

Министерство образования и науки Украины
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, А.О. Гарин, В.О. Гарин, О. В. Трифонов

Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии

The Modern Methods of Final Cleaning by Intense Energy Flux

Монография

Харьков – 2013

УДК 621.044/.048
С56

Подано матеріали, присвячені вирішенню проблем збільшення якості фінішного оброблення поверхонь і кромок деталей, які пов'язані з жорсткими вимогами щодо забезпечення надійності та ресурсу особливо відповідальних високоточних механізмів - агрегатів двигунів, виконавчих елементів паливних, гідравлічних і повітряних систем, агрегатів систем управління. Розглянуто перспективні методи фінішного оброблення інтенсивними потоками енергії. Викладено методики, використання яких дозволяє найбільш точно управляти процесами фінішного оброблення кромок і очищення поверхонь.

Для фахівців в області розробки і моделювання в пакетах САМ. Може бути корисною магістрам, аспірантам та науковим працівникам, які займаються проблемами надійності й ресурсу особливо відповідальних високоточних механізмів - агрегатів двигунів, виконавчих елементів паливних, гідравлічних і повітряних систем, агрегатів систем управління.

Рецензенти: д-р физ.-мат. наук, проф.
Филоненко Анатолий Дмитриевич,
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля (г. Луганск),
профессор кафедры физики;

канд. техн. наук, доц.
Сергиенко Сергей Николаевич,
Донбасский государственный технический университет (г. Алчевск),
доцент кафедры радиопизики.

Шипуль О.В.

С56 Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии: Монография / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, А.О. Гарин и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 189 с.

ISBN 978-966-662-308-2

Представлены материалы, посвящённые решению проблем увеличения качества финишной обработки поверхностей и кромок деталей, которые связаны с жесткими требованиями по обеспечению надежности и ресурса особо ответственных высокоточных механизмов – агрегатов двигателей, исполнительных элементов топливных, гидравлических и воздушных систем, агрегатов систем управления. Рассмотрены перспективные методы финишной обработки интенсивными потоками энергии. Изложены методики, использование которых позволяет наиболее точно управлять процессами финишной отделки кромок и очистки поверхностей.

Для специалистов в области разработки и моделирования в пакетах САМ. Может быть полезно магистрам, аспирантам и научным работникам, занимающимся проблемами надежности и ресурса особо ответственных высокоточных механизмов – агрегатов двигателей, исполнительных элементов топливных, гидравлических и воздушных систем, агрегатов систем управления.

Библиогр.: 151 назв. Ил. 91. Табл. 8.

Утверждено на заседании ученого совета Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" 23 января 2013 г. (протокол №5) в качестве монографии.

УДК 621.044/.048

ISBN 978-966-662-308-2

©Коллектив авторов, 2013

©Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ПРОБЛЕМЫ ФИНИШНОЙ ОЧИСТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ	8
1.1 Образование технологических ликвидов при механообработке	8
1.2 Промышленная чистота как фактор обеспечения надежности и ресурса.....	20
1.3 Современные методы финишной очистки.....	26
1.4 Перспективы применения методов очистки интенсивными потоками энергии.....	30
2 ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТОНИРУЮЩИМИ ГАЗОВЫМИ СМЕСЯМИ.....	40
2.1 Современное состояние развития технологии и оборудования	40
2.2 Моделирование процессов сгорания и теплообмена в камерах термоимпульсных установок.....	48
2.3 Методика назначения режимов термоимпульсной обработки	58
2.3.1 Источники информации для расчета режимов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями	58
2.3.2 Методика определения характеристик оборудования для термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями.....	65
2.3.3 Применение эквивалентной камеры сгорания для расчета времени затухания ударных волн при термоимпульсной обработке	80
2.3.4 Методика определения режимов термоимпульсной обработки, необходимых для удаления ликвидов с кромок и поверхностей.....	83
2.4 Проблемы дозирования и смесеобразования при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями	96
2.4.1 Существующие схемы систем смесеобразования термоимпульсного оборудования	100
2.4.2 Совершенствование систем дозирования энергии термоимпульсного оборудования	110

3 ИОННАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ	118
3.1 Современное состояние развития технологии и оборудования	118
3.2 Оборудование для чистки деталей ГТД в вакууме	122
3.3 Параметры технологических источников для ионной очистки.....	131
3.3.1 Определение участка действия теплового потока при планетарном движении деталей.....	131
3.3.2 Оптимизации параметров ионной очистки с учетом теплового состояния детали	135
3.4 Методика выбора режима ионной очистки	136
3.5 Экспериментальная проверка методики оценки параметров технологических ускорителей для очистки.....	147
3.5.1 Оборудование и описание методики эксперимента	147
3.5.2 Результаты эксперимента	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	173

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день основным методом формообразования деталей в машиностроении остается обработка резанием. Производительность, точность, высокая степень автоматизации являются характерными чертами современного металлорежущего оборудования.

Все более широкое применение находит высокоскоростное оборудование, которая сокращает трудоёмкость размерной обработки в несколько раз. Активно применяются методы моделирования процесса размерной обработки при помощи различных пакетов САМ. Совершенствуются алгоритмы многокоординатной обработки сложных поверхностей.

На сегодняшний день сформировалась четкая тенденция объединения в составе одного оборудования функций размерной обработки и контроля. Современные встроенные измерительные системы позволяют строить модель поверхности детали, после чего ее контроль ведется на основе сравнения с эталоном, полученным в модуле САД. Интенсивное развитие алгоритмов и техники встроенных измерений стали основой адаптивной размерной обработки. При таком методе встроенная в обрабатывающий центр измерительная система активно используется в ходе всего процесса обработки, начиная с базирования. Учет реальной геометрии заготовки и ее расположения в станке позволяет автоматически корректировать управляющие программы при помощи алгоритмов преобразования координат.

Современные системы САМ позволяют учитывать при составлении управляющих программ деформации в системе «Станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД), вызванные действием сил резания и неравномерностью поля температур. Новейшие пакеты САМ могут предсказывать даже форму микрорельефа поверхности детали.

Обрабатывающие центры оснащаются инструментом для удаления заусенцев на кромках, а составление управляющих программ ведется по специально разработанным алгоритмам, позволяющим оптимизировать траекторию обработки с целью

минимизации образования дефектов на кромках деталей.

Однако несмотря на такие достижения при производстве высокоточной техники задача обеспечения ее качества (прежде всего ресурса и безотказности) не может быть решена одной лишь размерной обработкой. Любые методы механообработки являются не только средством обеспечения точности размеров, но и основным источником искажений геометрии кромок и загрязнения поверхностей. Избежать этих явлений при обработке резанием невозможно, поскольку они являются проявлениями законов механики сплошных сред.

Поэтому задачи технологической очистки поверхностей и кромок деталей высокоточных механизмов от заусенцев и микрочастиц остаются актуальными, а интерес к финишным отделочно-очистным технологиям в высокоразвитых, в промышленном отношении, странах не ослабевает на протяжении последних 30 лет.

В аэрокосмической промышленности повышенные требования к качеству финишной обработки поверхностей и кромок деталей связаны с жесткими требованиями по обеспечению надежности и ресурса особо ответственных высокоточных механизмов – агрегатов двигателей, исполнительных элементов топливных, гидравлических и воздушных систем, агрегатов систем управления.

Постоянно повышающиеся требования к качеству финишной обработки требуют все большей гибкости и точности задания ее режимов. С этой точки зрения перспективным представляется развитие методов финишной обработки интенсивными потоками энергии, использование которых позволяет наиболее точно управлять процессами финишной отделки кромок и очистки поверхностей.

К таким методам могут быть отнесены термоимпульсная обработка детонирующими газовыми смесями, лазерные технологии финишной очистки, которые стали особенно интенсивно развиваться в последние годы. В качестве последнего этапа очистки поверхностей перед нанесением покрытий активно применяются методы ионной очистки.

Достоинством таких методов является возможность управления качеством обработки на основе физических законов, путем согласования величины потоков энер-

гии, длительности их действия и свойств материала обрабатываемых деталей. Безусловно, для достижения высших показателей качества необходимо использовать все методы инженерии поверхности. В том числе создание регулярного микрорельефа и нанесения покрытий со специальными свойствами. Однако их использование должно начинаться там, где заканчиваются возможности обычных технологий, и только тогда, когда поверхности и кромки деталей самым тщательным образом подготовлены.

Настоящая монография является первой частью из запланированных к опубликованию работ, посвященных некоторым актуальным проблемам развития методов финишной очистки интенсивными потоками энергии. В ней затронуты вопросы, связанные с совершенствованием технологий и оборудования для термоимпульсной очистки детонирующими газовыми смесями и ионной очистки. Вопросы лазерной очистки будут рассмотрены в следующей работе.

В первой главе монографии рассмотрены некоторые общие проблемы, связанные с образованием технологических ликвидов и влиянием промышленной чистоты на обеспечение показателей качества высокоточных механизмов. Эти вопросы важны для дальнейшего изложения, поскольку формируют понимание целей и исходной информации для технологий финишной очистки. Эти вопросы недостаточно освещаются в отечественной литературе, поэтому включение этого раздела в работу с точки зрения авторов было необходимым.

Первая глава монографии была подготовлена всеми авторами; вторая написана Шипуль О.В., Цегельником Е.В. и Трифоновым О.В.; третья – Гариным А.О. и Гариным В.О.

При написании монографии использовались материалы исследований, выполненных на кафедре "Технологии производства летательных аппаратов" Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт". В этих исследованиях принимали участие аспиранты и соискатели кафедры Борисова О.С., Козлов В.Г., Малашенко В.Л., Палазюк Е.С. Авторы выражают благодарность профессору Планковскому С.И. за общее руководство работой и участие в обсуждении вопросов, связанных с написанием книги.

1 ПРОБЛЕМЫ ФИНИШНОЙ ОЧИСТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

1.1 Образование технологических ликвидов при механообработке¹

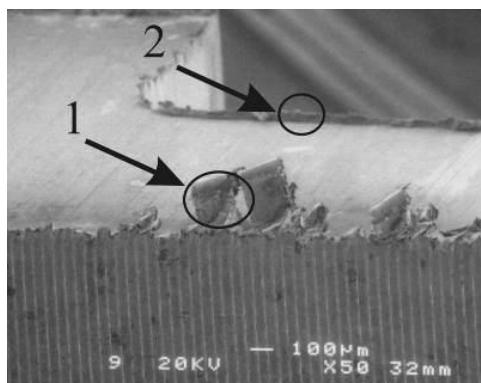
Все виды механической обработки, в основу которых положены процессы резания, сопровождаются образованием заусенцев на кромках, а также микрозаусенцев и микрочастиц на поверхностях деталей. Оптимизация режимов и применение инновационных способов обработки не может исключить образование технологических ликвидов на поверхностях и кромках обрабатываемых деталей (рис. 1.1). При производстве высокоточных механизмов наличие заусенцев даже микронного размера может создавать проблемы при сборке, а при эксплуатации приводить к повышенному износу или даже заклиниванию прецизионных пар и т.д.

Исследования в области выяснения механизмов образования заусенцев при механообработке и разработке оборудования для их удаления начали интенсивно проводиться с 1970-х годов. До этого времени было известно и применялось на практике только 17 из существующих на сегодня 120 методов удаления заусенцев. Еще ярче интенсивность исследований в этой области иллюстрируется тем, что более 90% из всех публикаций в области механизмов образования и удаления заусенцев были написаны после 1989 года [1].

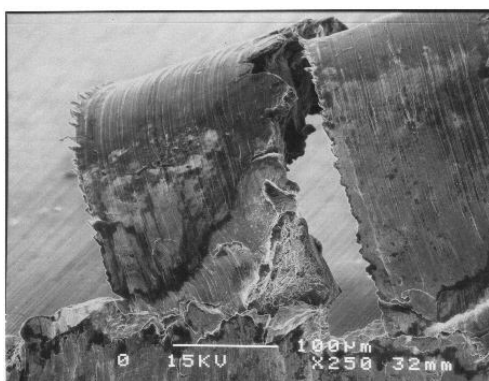
Первые исследования в данной области были сделаны в США (Gillespie [2]), Германии (Schäfer [3]) и Японии (Takazawa [4]). Наибольших результатов в области описания условия возникновения заусенцев на основе численного моделирования добился исследовательский коллектив Университета Беркли (Dornfeld и группа CODEF). На рис. 1.2 в качестве примера приведены результаты моделирования образования заусенца при сверлении, выполненного исследовательской группой CODEF [5]. По результатам проведения численного моделирования и факторных экспериментов были установлены зависимости для оценки величины заусенцев с учетом материала детали, режимов обработки, характеристик инструмента. На ос-

¹ В работах принимала участие Борисова О.С.

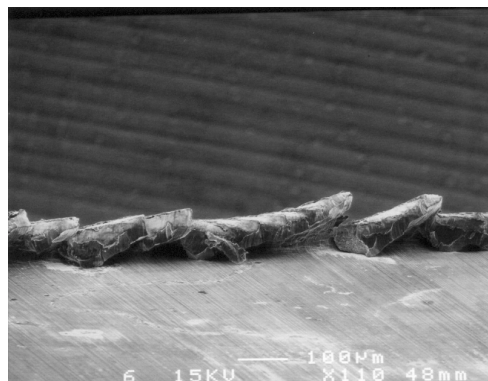
нове этих результатов CODEF заявила о разработке экспертной WEB-системы для прогнозирования места, типа и размеров заусенцев при различных видах обработки.



а)

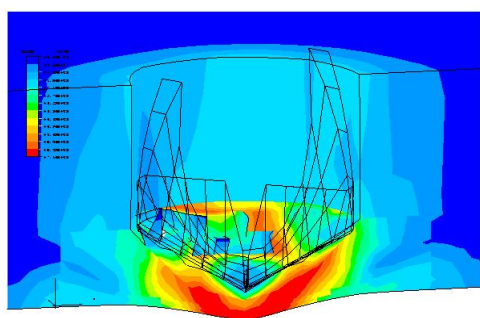


б)

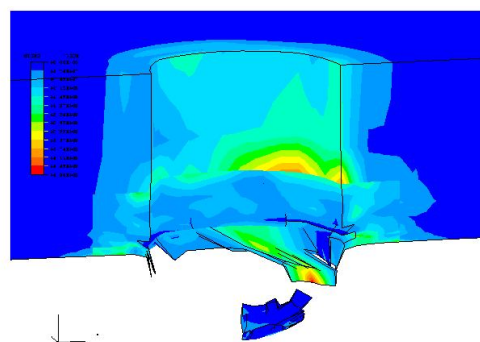


в)

Рисунок 1.1 – Заусенцы и микрозаусенцы на поверхности детали после высокоскоростного фрезерования: а) поверхность детали; б) заусенец (зона 1); в) микрозаусенцы (зона 2)



а)



б)

Рисунок 1.2 – Стадии формирования заусенца при сверлении: а) начало выхода сверла; б) окончательный вид заусенца

Понимание механизмов образования заусенцев дает возможность управлять процессом их образования. Для снижения трудоемкости и повышения качества отделки кромок были сформулированы следующие принципы: предотвращения образования заусенцев в труднодоступных местах, их перенос в процессе обработки на внешние кромки, с которых они могут быть легко удалены, минимизация величины заусенцев.

Примером эффективности такого подхода являются результаты оптимизации траектории инструмента с целью уменьшения величины заусенцев на кромках при торцевом высокоскоростном фрезеровании, на основании алгоритма, предложенного в [6] (рис. 1.3).

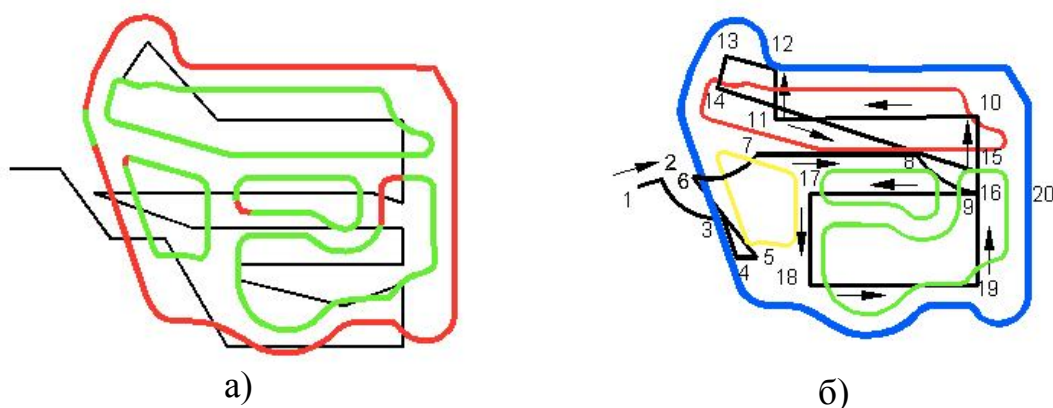


Рисунок 1.3 – Результаты оптимизации траектории инструмента по критерию размера заусенцев [6]:

а) исходная траектория фрезы; б) траектория после оптимизации

На рис. 1.4. приведены фотографии кромок обработанной детали для двух траекторий фрезы, представленных на рис. 1.3. Результаты были получены при одинаковых режимах резания одинаковыми фрезами. Из-за увеличения длины пути инструмента, время фрезерования в оптимизированном варианте увеличилось с 4,7 до 5,3 сек [7].

Параллельно интенсивно развивались исследования в области влияния качества финишной отделки кромок на эксплуатационные характеристики механизмов. Так, например, внедрение рекомендаций исследовательской группы Takazawa по

качеству кромок, позволили поднять объемный КПД кондиционеров на 5...15% [8]. Впоследствии была установлена связь качества финишной отделки кромок с ресурсными характеристиками и на сегодняшний день необходимость этих операций принята промышленностью и подтверждена соответствующими стандартами.

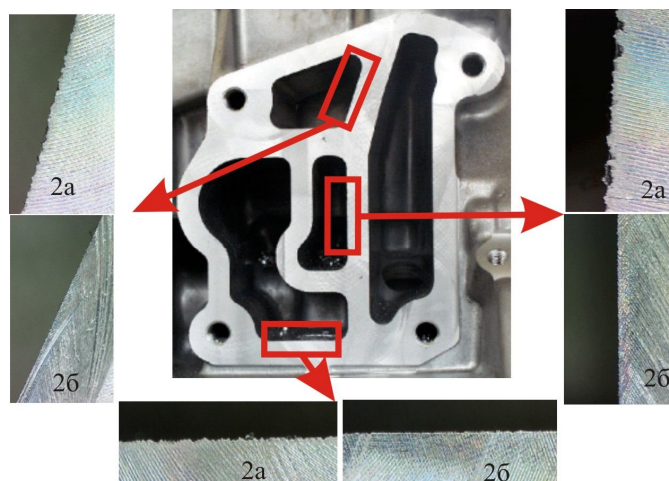


Рисунок 1.4 – Вид кромок детали после оптимизации траектории [7]

Создание стандартов, связанных с качеством кромок – еще одна задача, которая решалась совместными усилиями исследователей, промышленности и государственных организаций. В этом направлении достигнуты определенные успехи, хотя введенные до настоящего времени стандарты касаются терминов, связанных с отделкой кромок [9]. Ряд фирм выпустили корпоративные стандарты качества кромок. Япония, КНР, Южная Корея и Германия готовят международный стандарт, который должен быть введен в ближайшее время.

Проектом международного стандарта отделки кромок [10] предусмотрено семь уровней качества по финишной отделке кромок:

А. Снятие заусенцев не требуется. Все кромки можно оставить в виде, образовавшемся в результате производственных процессов. Заусенцы на кромках деталей могут привести к выходу за пределы допусков по некоторым размерам. Уровень качества края позволяет производителям удалить заусенцы и обработать кромку.

В. Притупить острые кромки. Кромки, определенные этим уровнем качества, должны быть сглажены до уровня, не допускающего порезов рук, повреждения жгу-

тов или электрических проводов. Заусенцы могут все еще остаться на деталях. Размер заусенцев на кромках не должен приводить к выходу размеров за пределы допусков.

С. Удалить все видимые заусенцы. Никакие заусенцы, видимые невооруженным глазом, не допускаются. Более мелкие заусенцы могут оставаться на кромках. Размер заусенцев на кромках не должен приводить к выходу размеров за пределы допусков. Требуется также, чтобы кромки не были острыми до степени, допускающей порезы рук, повреждение жгутов или электрических проводов.

Д. Удалить все заусенцы, видимые в $\times 00$ увеличении (уровень увеличения задается на чертеже). Никакие заусенцы, видимые в $\times 00$ увеличении не допускаются. Более мелкие заусенцы могут оставаться на кромках. Размер заусенцев на кромках не должен приводить к выходу размеров за пределы допусков. Требуется также, чтобы кромки не были острыми до степени, допускающей порезы рук, повреждение жгутов или электрических проводов. Этот уровень качества края позволяет контроль любым оптическим устройством при любом освещении.

Е. Снять фаску (размер и угол указываются на чертеже). Кромки обрабатываются так, что никакие заусенцы не должны находится выше заданных поверхностей. Мелкие заусенцы могут остаться на кромках и вблизи фасок. Размер заусенцев на кромках не должен приводить к выходу размеров за пределы допусков.

Ф. Скруглить кромку радиусом (радиус задается на чертеже). У кромок должно быть искривление, находящееся в обозначенных пределах. Заусенцы на кромках, независимо от их радиуса, не допустимы при визуальном осмотре.

Г. Кромки не обрабатывать. Кромки должна остаться в виде, образовавшемся в результате производственных процессов. Этот уровень, в отличие от уровня А, полностью запрещает обработку кромок.

Для прецизионных деталей высокоточных механизмов перечисленные базовые требования уровней качества могут быть ужесточены. Для деталей, контактирующих с рабочими жидкостями гидравлических и топливных систем отделка кромок с удалением заусенцев и очистка от микрочастиц должна быть проведена для

всех деталей жидкостного тракта. Более того, необходимой является также отделка резьб присоединительных штуцеров, накидных гаек и пр., так как наличие заусенцев на любой из них может привести при последующей эксплуатации к их обрыву и попаданию в гидравлический тракт.

К сожалению, в отечественной практике сохраняется невнимание к вопросам выбора метрик и обеспечения качества кромок. Так, например, считается необязательной обработка кромок после электроискровой и лазерной обработки на современных станках с ЧПУ. Для того чтобы показать ошибочность таких представлений, приведем данные одного из ведущих производителей оборудования для финишной обработки прецизионных деталей – фирмы Extrude None (США).

В рекламных материалах фирмы приводятся результаты измерения коэффициентов расхода в топливных форсунках с отверстиями, полученными электроискровым методом без финишной обработки и после профилирования кромок на экструзионно-абразивном оборудовании. Прецизионное профилирование отверстия после финишной обработки повышает точность обеспечения массового расхода с $\pm 6\%$ до $\pm 1\%$, а с этой характеристикой непосредственно связана топливная эффективность двигателя [11].

В качестве еще одного примера рассмотрим режущий инструмент. На его стойкость оказывает значительное влияние состояние кромок. Их продольная шероховатость является результатом наложения друг на друга шероховатостей поверхностей, образующих кромку. При заточке режущих инструментов шлифованием шероховатость кромок оказывается в 1,5...2,5 больше, чем на поверхностях (рис. 1.5) [12].

Повышенная шероховатость кромок существенно снижает их прочность. Выступы микронеровностей из-за малой прочности разрушаются в первые секунды резания, впадины являются местом зарождения трещин. Разрушение режущей кромки на начальном этапе резания приводит к неуправляемому износу инструмента. Нанесение покрытий на инструмент с такими режущими кромками задачу повышения его ресурса решить не сможет.

Дополнительная финишная обработка кромок (например, магнитоабразивная) выравнивает шероховатость поверхностей и кромок. Одно это позволяет повысить стойкость инструмента в 1,5 раза. Дополнительное округление кромок позволяет повысить ее еще в 3...4 раза [12].

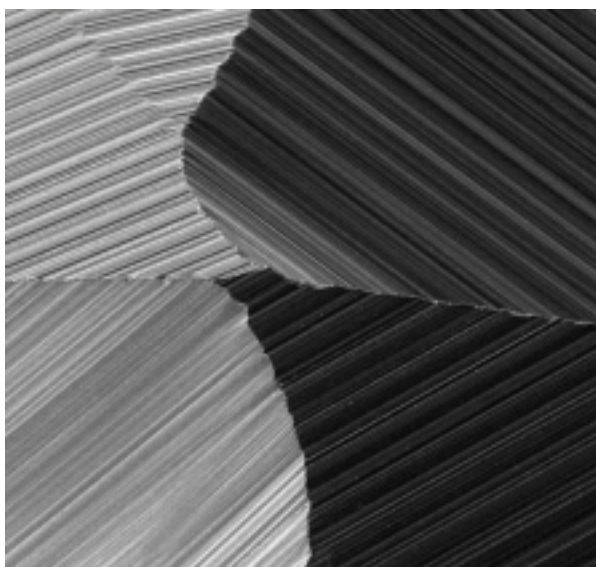


Рисунок 1.5 – Продольная шероховатость режущих кромок сверла

Таким образом, финишная отделка кромок входящих деталей является обязательным условием при производстве современных высокоточных механизмов, а в ряде случаев должны выдвигаться требования профилирования кромок с указанием радиусов, углов наклона и т.д. Разработка метрик и параметров качества кромок в настоящее время производится ведущими машиностроительными компаниями по внутренним стандартам. Информация, касающаяся принципов задания и соблюдения качества финишной отделки кромок, многими из них рассматривается как конфиденциальная, так как непосредственно связана с обеспечением характеристик, определяющих конкурентоспособность продукции.

Обработка резанием сопровождается не только искажением кромок, но и образованием ликвидов на поверхностях деталей в виде микрозаусенцев и микрочастиц. На рис. 1.6 и 1.7 продемонстрировано влияние притупления режущей кромки инструмента на образование микрозаусенцев на обрабатываемых поверхностях.

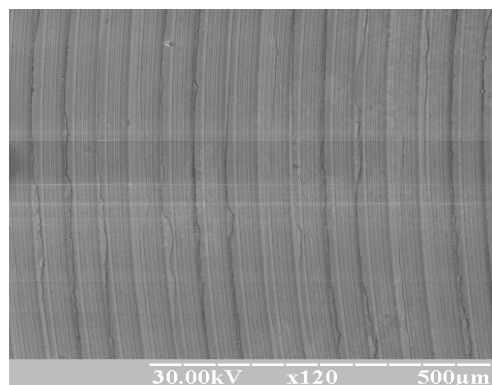
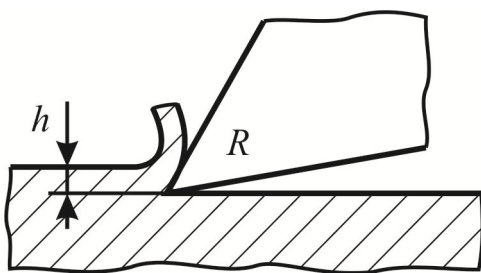


Рисунок 1.6 – Поверхность, обработанная инструментом с острой кромкой

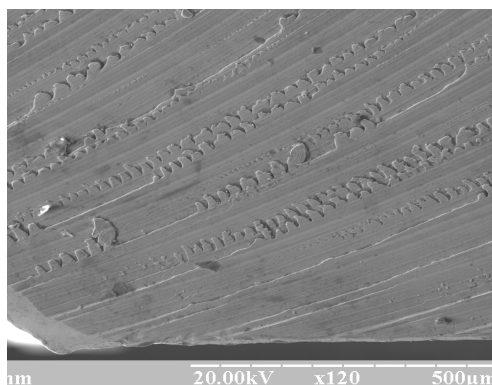
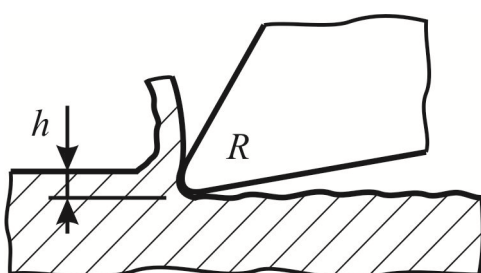


Рисунок 1.7 – Поверхность, обработанная резцом с притупленной кромкой

В отличие от процессов образования заусенцев, которые интенсивно развиваются уже более сорока лет, исследования в области изучения механизмов формирования микрочастиц при лезвийной обработке находятся на самых ранних стадиях.

С учетом опыта развития технологий финишной обработки кромок, в настоящее время формулируются следующие направления исследований в этой области [13]: источники и механизм образования корпускулярных загрязнений; производственные и организационные меры их минимизации и предотвращения; разработка стандартов чистоты и средств метрологического оснащения; создание оборудования для очистки до заданного стандартами качества.

Активность в области изучения механизмов образования микрочастиц при механообработке существенно возросла с результатами исследований доказавших, что воздействие высоких концентраций ингаляционных металлических частиц может привести к серьезным болезням легких у операторов станков [14, 15].

Это вызвало появление целого ряда исследований, в которых изучался вопрос

образования микрочастиц при резании. Первые из этих работ имели чисто экспериментальный характер [16, 17, 18, 19, 20]. Была разработана специальная установка, позволяющая локализовать различные зоны возможного образования микрочастиц. Измерение распределения частиц по размерам и интенсивности образования микрочастиц в различных зонах производилось при помощи лазерного фотометра.

Была установлена связь интенсивности образования микрочастиц от способа формирования стружки [18], материала, скорости резания, подачи и формы резца [20]. На рис. 1.8 приведен типичный график, иллюстрирующий влияние формы резца на интенсивность образования микрочастиц. Величина $D_u = m_{\text{частиц}} / m_{\text{стружки}}$, приведенная на графиках, представляет собой относительную массу микрочастиц.

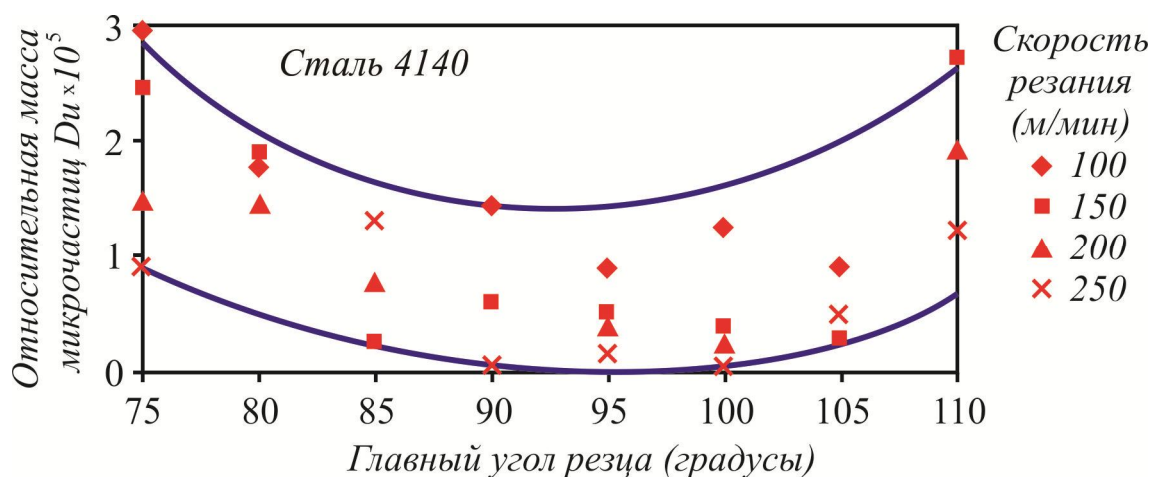


Рисунок 1.8 – Типичная зависимость относительной массы микрочастиц от главного угла резца

Интенсивность образования микрочастиц существенно зависит от скорости резания (рис. 1.9). Изменение интенсивности образования в этом случае микрочастиц вызвано изменением условий деформирования стружки. Рис. 1.10 показывает, что наиболее интенсивное образование микрочастиц связано с хрупким изломом образующейся стружки. На полученных фотографиях видны поперечные плоскости сдвига на поверхности стружки, количество которых зависит от скорости резания.

Khettabi [21] выделяет четыре зоны, в которых происходит образование микрочастиц различающиеся по характеру напряженного состояния (рис. 1.11).

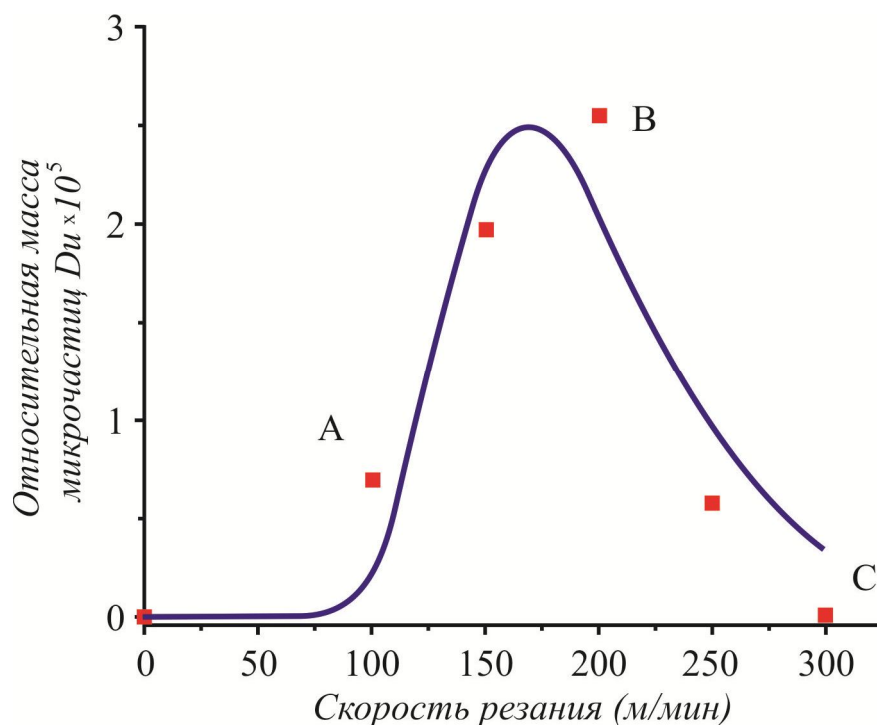
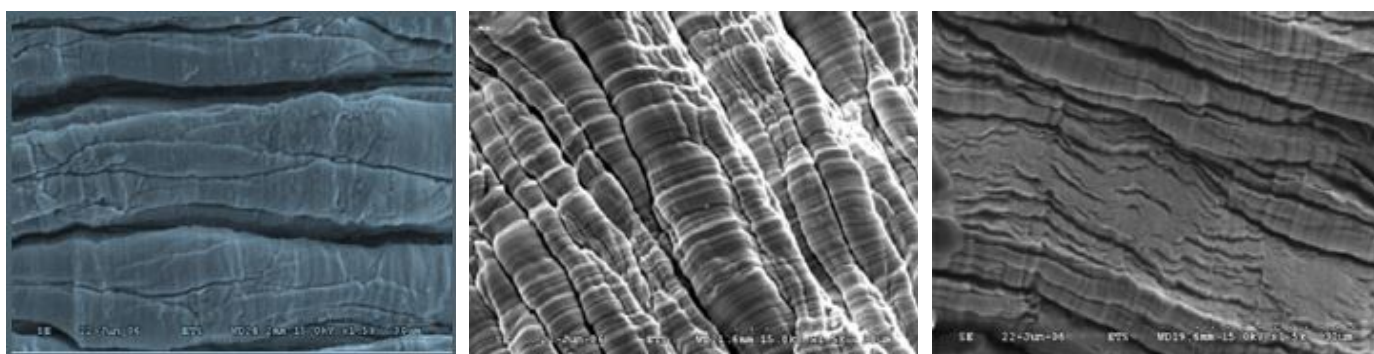


Рисунок 1.9 – Типичная зависимость относительной массы микрочастиц от скорости резания



зона А

зона В

зона С

Рисунок 1.10 – Поверхность стружки, полученной при различных скоростях резания

В месте образования стружки образуется зона первичного сдвига. Для этой зоны характерны очень большие сжимающие напряжения, которые вызывают расщепление металла. Наружная поверхность стружки сжимается в ограниченном пространстве. Дополнительно деталь и стружка подвергаются периодическим ударам. Это приводит к столкновениям выступающих частей микрорельефа и генерации микро и наночастиц.

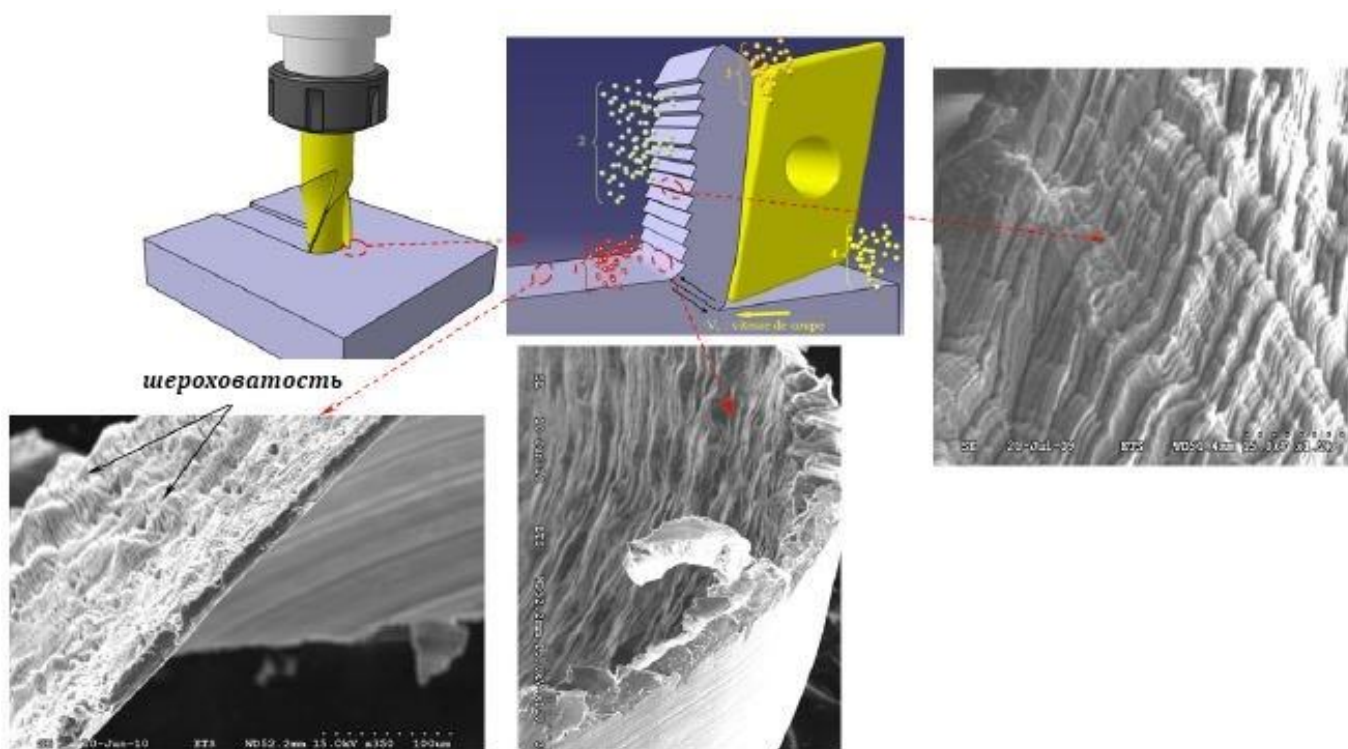


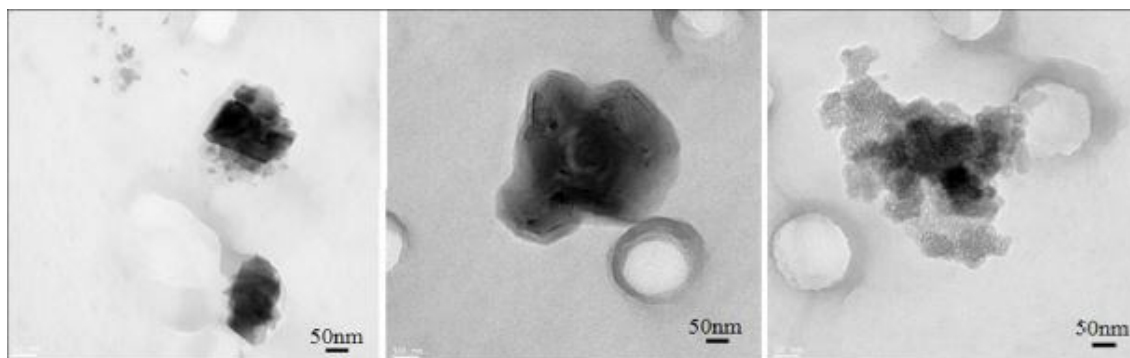
Рисунок 1.11 – Зоны образования микрочастиц при резании

На выходе из зоны первичного сдвига под действием трения между инструментом и стружкой, высоких давлений и высоких температур создается зона вторичного сдвига. Для этой области характерны небольшая толщина стружки и большие градиенты скорости деформации. В стружке образуются микросегменты которые интенсивно упрочняются и при хрупком изломе выбрасывают существенное количество микрочастиц по направлению подачи. Размер частиц зависит от шероховатости режущей поверхности инструмента, сил резания и материала детали.

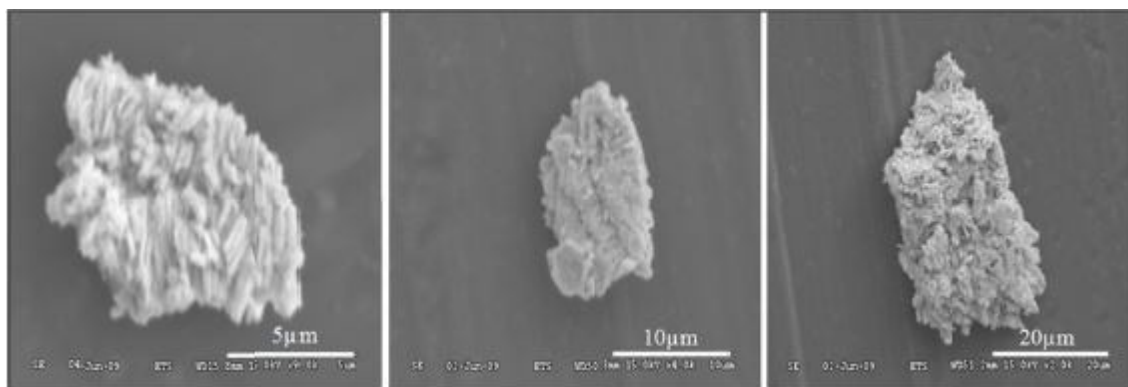
В области режущей кромки инструмента создается зона, в которой обрабатываемый материал застаивается. В зависимости от условий резания и материала, размер застойной зоны может изменяться. Интенсивные механические и термические упругопластические деформации являются причиной выброса микрочастиц из этой зоны. В этой зоне образуются как микрочастицы материала детали, так и микрочастицы материала инструмента, образующиеся в результате износа.

Форма и размеры частиц, образующихся при резании, различны. На рис. 1.12 приведены фотографии нано и микрочастиц полученных для одного режима ре-

зания. Наночастицы имеют форму, близкую к сферической, в то время как форма частиц микронного размера близка к пластинчатой. Распределение частиц по размерам существенно зависит от материала детали и условий резания, однако для формирования обобщений в этой области в настоящее время получен недостаточный объем экспериментальных результатов.



наноразмерные частицы



микрочастицы

Рисунок 1.12 – Характерная форма частиц, образующихся при резании

Таким образом, в настоящее время экспериментально подтвержден факт образования микрочастиц при резании и получены первые результаты, позволяющие установить интенсивности их образования, размеров и формы от режимов резания, формы инструмента и материала обрабатываемой детали. Рост числа публикаций, связанных с данной проблематикой, позволяет надеяться на появление в ближайшее время специализированных баз данных, позволяющих связать технологические параметры резания с характеристиками образующихся частиц.

1.2 Промышленная чистота как фактор обеспечения надежности и ресурса²

Опыт эксплуатации изделий машиностроения убедительно показывает, что их качество, в том числе безотказность работы и ресурс, во многом зависят от микро-рельефа контактирующих поверхностей и промышленной чистоты машины [22, 23].

В области машиностроительной гидравлики, трения и изнашивания деталей машин проведены фундаментальные исследования по изучению физической сущности причин отказов и неисправностей, роли и влияния конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на работоспособность, выбору критериев и методов оценки надежности прецизионных пар гидравлических агрегатов.

В результате проведения этих исследований были выявлены основные факторы, влияющие на износ прецизионных деталей: микрогеометрия и физико-механические свойства поверхности [27], структурные изменения в металлах под действием нагрузки и среды [28], схватывание металлов [29, 30], влияние на износ свойств рабочих жидкостей и топлив [31] и др. Однако, несмотря на значительное число факторов, влияющих на ресурс и надежность для высокоточных механизмов гидравлических и топливных систем в качестве основного большинство авторов указывает степень чистоты рабочих жидкостей [31, 32, 33].

С момента ввода системы в эксплуатацию, степень ее загрязнения увеличивается вследствие износа входящих деталей. Кроме того, загрязнения из окружающей атмосферы попадает в систему через вентиляционные отверстия, поверхности поршневых штоков, уплотнения и т.д.

В ходе эксплуатации чистота рабочей жидкости определяется главным образом тонкостью фильтрации. Однако производственные загрязнения оказывают наибольшее влияние на начальные повреждения поверхностей пар трения на этапе приработки. Частицы заусенцев и микрочастицы попадая в рабочую жидкость, переносятся рабочей средой по всей системе, повреждают или нарушают работу наиболее

² В подготовке раздела принимал участие Козлов В.Г.

чувствительных элементов: манжетных уплотнений, золотниковых, плунжерных пар, подшипников, клапанов и др. Заусенцы на кромках вызывают завихрения в потоке газа или жидкости, нарушая равномерность потока.

Исследования, проведенные Министерством обороны Великобритании, корпорацией «Westland Helicopter», Имперским колледжем и др., позволили разработать упрощенные рекомендации по выбору класса чистоты рабочих жидкостей, необходимого для различных систем (табл. 1.1).

Критериями для выбора класса чистоты рабочих жидкостей являются:

- ключевое оборудование, требующее высокой степени надежности;
- оборудование с высоким давлением, работающее на пределе прочности;
- оборудование, рассчитанное на длительный срок эксплуатации;
- оборудование с очень высокими затратами по поддержанию его в исправности при внезапном выходе из строя.

Требования к чистоте рабочей жидкости по ISO 4406 определяются как:

- очень высокие, если действуют все критерии;
- высокие, если действуют три из перечисленных критериев;
- нормальные, если действуют два или меньше критериев.

Указанные в таблице 1.1 требования по чистоте являются минимальными. При определении требований к чистоте конкретных гидравлических систем необходимо учитывать их конструктивные особенности. Так, например, в золотниковых распределителях гидравлических усилителей БУ-10 при наличии в рабочей жидкости частиц размером 2...5 мкм (в количестве 0,5 мг/дм³) усилие страгивания плунжера возрастает в 5 и более раз по сравнению с работой на незагрязненной жидкости. В присутствии такого же количества частиц размером 7...13 мкм – в два раза [34].

Исследования, проведенные с насосами, установленными в авиационных гидравлических системах, показали, что их объемный коэффициент полезного действия наиболее снижается при наличии в рабочей жидкости частиц размером 20...30 мкм. У аксиально-поршневых насосов относительный объемный КПД снижается более чем на 40% [34]. Поэтому для нормальной работы авиационных гидравлических

систем в рабочих жидкостях не должны содержаться загрязнения размером свыше 2...5 мкм.

Таблица 1.1

Минимальные требования к чистоте рабочих жидкостей гидросистем по ISO 4406

Виды систем	Требования		
	Очень высокие	Высокие	Нормальные
Сервотехника, шарикоподшипники	13/10/7	16/13/10	17/14/11
Пропорциональная техника, гидравлика высокого давления ($P > 16$ МПа)	15/12/9	18/15/12	19/16/13
Гидравлика среднего и низкого давления ($P < 16$ МПа)	16/13/10	19/16/13	20/17/14

Обеспечение промышленной чистоты агрегатов и узлов авиационных систем в производстве и эксплуатации в значительной степени зависит от определения источников загрязнения. Известно, что подавляющее количество загрязняющих частиц имеют размеры менее 5мкм [34, 35]. На рис. 1.13 показан график распределения частиц по размерам согласно ГОСТ 17216-2001 (6-й класс чистоты) [36]. В то же время установлен факт постепенного увеличения концентрации частиц в рабочих жидкостях в процессе эксплуатации, не удерживаемых бортовыми фильтрами, на порядок и более. При этом статистика отказов показывает, что основная доля приходится на превышение норм по массовой концентрации, а не по размерам не отфильтрованных частиц [34].

На рис. 1.14 показана зависимость наработки на отказ золотниковых агрегатов и гидронасосов в летных часах от класса чистоты рабочих жидкостей. Зависимости 1 и 2 соответствуют случаям превышения норм по массовой концентрации частиц меньших 5мкм; 3, 4 – с концентрацией согласно ГОСТ 17216-2001.

Не следует думать, что отмеченная тенденция многократного снижения ресурса при наличии на контактных поверхностях микрочастиц относится только к

авиационной технике. Например, в работе [37] были проведены исследования влияния коэффициента очистки на срок действия подшипников качения. Испытания проводились на установке, состоящей из емкости, маслонасоса, испытательного фильтра и стенда для испытаний на долговечность. Испытанию были подвергнуты несколько сот подшипников, причем менялся только один параметр – абсолютный коэффициент очистки испытательного фильтра. Каждый подшипник испытывался до появления питтинга. Моментом его появления ограничивалось время испытаний. При уменьшении максимального размера микрочастиц с 40 до 3 мкм ресурс подшипников увеличился более чем в 6 раз (рис.1.15).

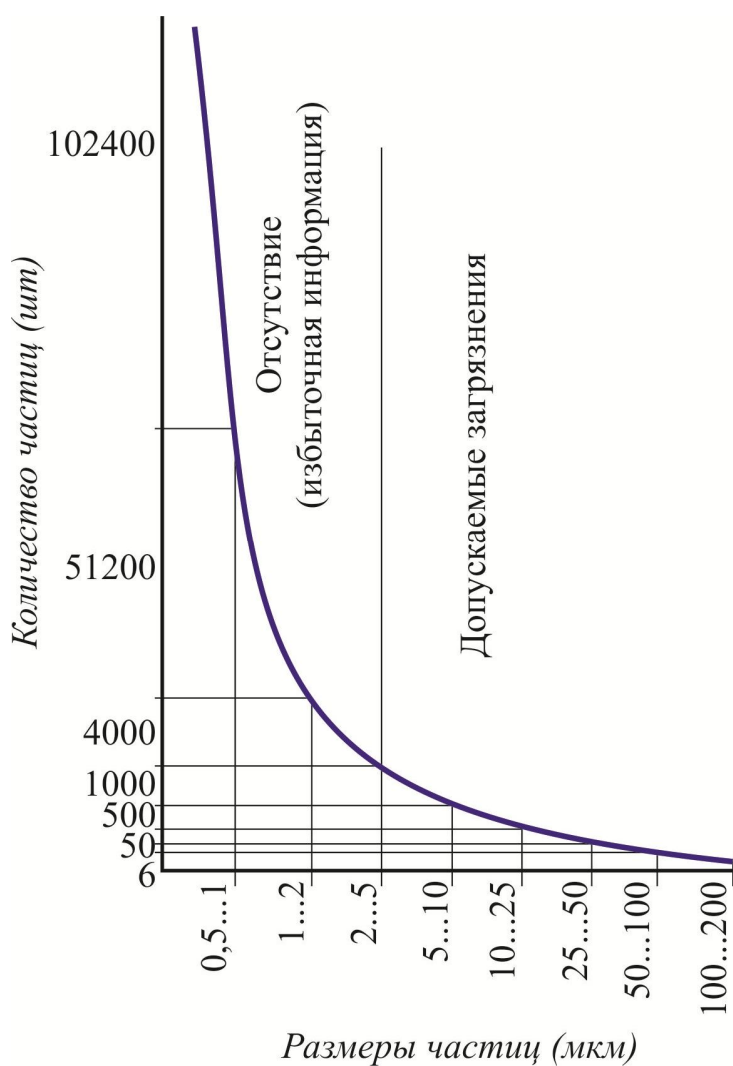


Рисунок 1.13 – Распределение количества частиц по размерам

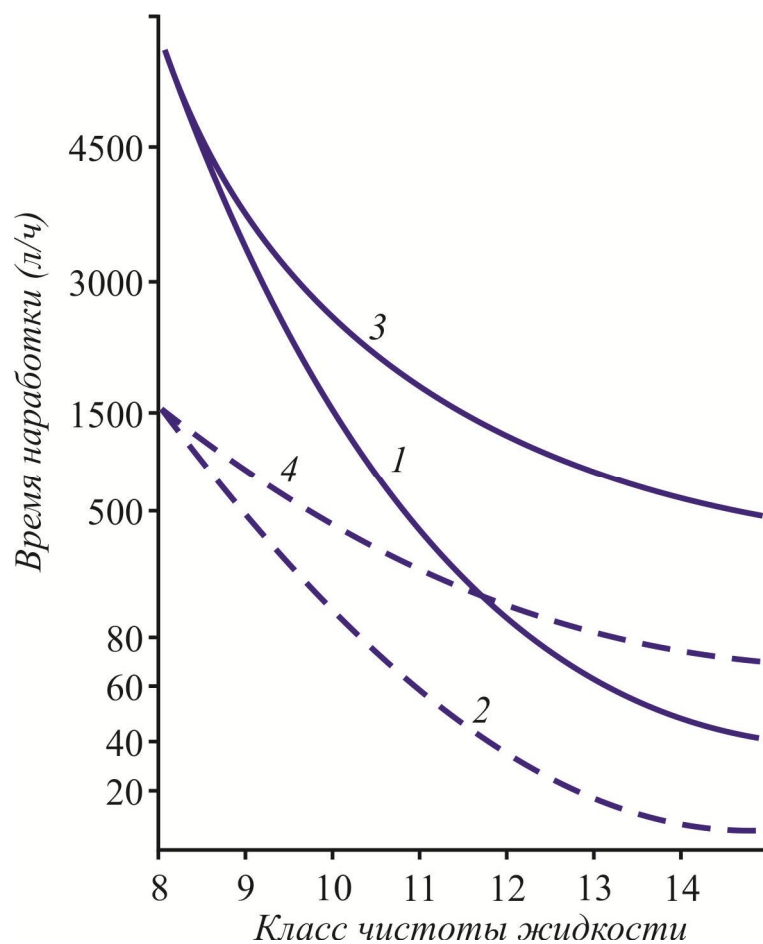


Рисунок 1.14 – Изменение времени наработки от класса чистоты жидкостей

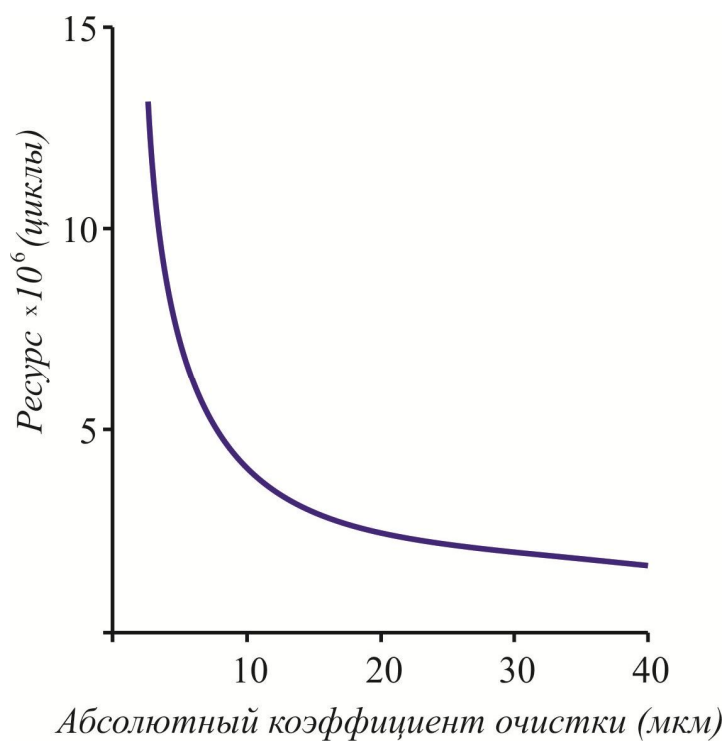


Рисунок 1.15 – Зависимость ресурса подшипников от чистоты смазки

Между деталями пар трения, например, между телом качения и дорожкой подшипника или поверхностями зубьев шестеренчатого гидронасоса, образуется эластогидродинамическая пленка, которая отделяет поверхности друг от друга. Если в жидкости находятся частицы, размеры которых больше толщины ЭГД, то при движении они будут выходить за пределы смазочной пленки. В этот момент вся нагрузка переносится через частицу, что приводит к поверхностному прессованию с большим усилием и повреждению поверхности. Следствием этого является зарождение и последующий рост микротрещин под поверхностью. В конце концов, из поверхности выбивается материал, что приводит к образованию новых частиц в системе, которые при перекачивании измельчаются с образованием мельчайших (< 5 мкм) частиц. Так начинается цепная реакция износа, которая ведет к увеличению зазоров допусков компонентов, и вместе с ними – к внутренним утечкам масла.

Увеличение загрязнения вследствие накопления множества мелких частиц ведет к зашламлению гидросистемы, что в свою очередь ухудшает свойства протекания, клапанов и гидрораспределителей. Под воздействием давления может образоваться конгломерат, который заклинивает компоненты. Следовательно, для увеличения ресурса прецизионных пар с поверхностями, образующих гидравлический тракт, всех входящих в гидросистему деталей необходимо удалять частицы таких размеров, которые превосходят толщину смазочной пленки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Типичная толщина смазочной пленки

Конструктивный элемент	Толщина пленки, мкм
Подшипник качения	0,1 – 1,0
Гидростатический подшипник скольжения	0,5 – 100,0
Гидродинамический подшипник скольжения	1,0 – 25,0
Зубчатая пара	0,1 – 1,0
Уплотнения	0,05 – 0,5

Детали агрегатов авиационных гидросистем, высокоточных приводов имеют

целый ряд конструктивных особенностей, усложняющих их финишную очистку. Для них характерны [24]: глубокие отверстия малых диаметров (0,8...1,5 мм); пересекающиеся каналы с расточками и карманами; допуски на биение резьбы относительно отверстий - не более 0,05 мм; отклонение от геометрической формы прецизионных пар – 1...3 мкм; допуск на зазор в пределах 2...4 мкм; шероховатость от 3,2...0,8 мкм для соединительных каналов до 0,04 мкм для плунжерных и золотниковых пар и т. п.; использование высоколегированных сплавов.

Традиционные технологии очистки, применяющиеся на отечественных заводах, позволяют достичь указанных классов чистоты при промывке в течение длительного времени (несколько суток). При этом не всегда удается извлекать из жидкостей даже относительно крупные частицы загрязнений (10...30 мкм), наиболее опасные для гидравлических каналов. Процесс приработки изделий сопровождается интенсивным износом трущихся пар, который может достигать 50% допустимого износа. Завышение же класса чистоты (понижение высоты микронеровностей в целях уменьшения величины загрязняющих частиц), с одной стороны, удорожает производство изделий, а с другой – ухудшает условия удержания смазки на поверхностях трущихся пар.

Поэтому для обеспечения конкурентоспособности необходимо идти по пути создания технологических систем нового поколения, интегрирующих современные методы прецизионной размерной обработки и эффективные технологии финишной очистки с исключением ручных доводочных работ.

1.3 Современные методы финишной очистки

Общей целью всех технологий очистки является достижение требуемых свойств поверхностей, необходимых для нормального функционирования. Выбор технологии очистки зависит от формы, размеров и точности деталей, степени загрязнения поверхностей, а также их назначения, материала и др.

Существующие методы финишной очистки деталей в зависимости от особенностей технологического воздействия могут быть разделены на группы. Некоторые

авторы [24, 25] выделяют пять таких групп: механические, химико-механические, химические, электрохимические, физические методы. В других работах [26] предложена классификация с выделением четырех групп: механические, химические, электрические и термические (рис. 1.16). При этом отнесение того или иного метода при классификации к конкретной группе производится произвольно. Так, например, один и тот же метод – лезвийное удаление с нагревом материала – в одних случаях относят к механическим методам [24], а в других – к термическим [26].

Поскольку удаление ликвидов происходит за счет комплексного физико-химического воздействия, задача их классификации требует применения четких критериев. Для этого можно использовать критерий определяющего воздействия, основанный на выделении первичного механизма удаления ликвида. С этой точки зрения методы, в которых нагрев используется как вспомогательное средство для ускорения химических реакций, следует отнести к химическим методам, а термоэнергетические методы обжига заусенцев, где термическое воздействие служит для инициации реакций и определяет возможность обработки – к термическим.

Основные методы финишной очистки, рекомендуемые к применению на современном производстве, приведены в ГОСТ ИСО/ТО 10949-2007 [38]. К их числу отнесены следующие методы. Дробеструйная очистка. При дробеструйной очистке удаляют загрязнитель с поверхности с помощью материала, предназначенного для удаления загрязнителя, оставляя саму поверхность неповрежденной. Дробеструйная очистка эффективна перед механической обработкой для удаления таких загрязнителей, как оставшийся после литья песок и нагар.

Ультразвуковая очистка, использующая излучение высокой частоты, пропускаемое через жидкую среду, для направления колебательной энергии излучения на поверхность и удаления с нее загрязнителя. Для обеспечения эффективности этой процедуры необходимо поддерживать соответствующую температуру детали и жидкой среды в ванне.

Химическая очистка. Использует химические реактивы, растворители и летучие жидкости, является опасной для здоровья. Необходимы персональные средства

защиты. Необходимо соблюдать требования по использованию и утилизации растворителей.



Рисунок 1.16 – Классификация методов финишной обработки

Очистка водой. При очистке водой используют воду с моющими средствами, кислотами, щелочами при нагревании и (или) взбалтывании. Системы на водной основе используют для очистки различных типов материалов. Для водной очистки часто используют струйную мойку и ванны для погружения.

Для улучшения растворимости моющих средств, в воде часто используют взбалтывание с помощью ультразвука. Соответствующий уровень чистоты жидкости для очистки должен поддерживаться с помощью непрерывного фильтрования [36].

Полуводная очистка. Для снижения затрат и улучшения очистки в воду добавляют растворители. В зависимости от выбранного растворителя для полуводной очистки используют те же методы, что и для очистки водой. При выборе метода полуводной очистки принимают во внимание точку воспламенения растворителя, вы-

бросы его в атмосферу, защищенность работника, а также методы обработки и удаления отходов. Уровень чистоты жидкости для очистки должен поддерживаться с помощью непрерывного фильтрования [36].

Очистка растворителем. Для удаления покрытия или обезжиривания поверхностей компонентов используют чистый растворитель или смеси растворителей. Растворители применяют при ручном смывании, струйной очистке, погружении в ванну и паровом обезжиривании. Очистка растворителем может быть усилена с помощью взбалтывания, ультразвука и нагревания. Уровень чистоты жидкости для очистки должен поддерживаться с помощью непрерывного фильтрования [36].

Промывание. Промывание используют для удаления загрязнителя, занесенного при производстве или сборке компонентов. Принцип промывания заключается в применении высокого давления для смещения загрязнителя и смывания его с компонента для последующего сбора на фильтре. В качестве жидкости для промывания используют рабочую жидкость или жидкость, специально предназначенную для промывания, совместимую с компонентами и герметиками.

Перечисленные методы составляют очень малую часть от существующих на сегодня и реализованных в промышленном оборудовании технологий финишной очистки. База данных CleanTool [39], созданная в рамках проекта ЕС содержит данные о 226 методах очистки деталей от загрязнений всех регламентируемых стандартами видов. База включает такие инновационные технологии как вибрационная, лазерная, плазменная очистка, очистка сухим льдом, деполяризованной водой и др. Экспертная система базы позволяет выбрать список рекомендуемых технологий очистки в зависимости от требований пользователя.

Применение абразивной очистки для деталей гидравлических систем может привести к возникновению серьезных проблем при эксплуатации. Главным образом это связано с шаржированием поверхности абразивными частицами при обработке мягких материалов (алюминиевых сплавов, латуней), применяющихся для изготовления корпусов гидроагрегатов.

С этой точки зрения только две группы методов не приводят к дополнитель-

ным технологическим загрязнениям при обработке – электрохимические и обработка интенсивными тепловыми потоками. Однако электрохимическая обработка позволяет удалить металлические микрочастицы и неприменима для очистки внутренних поверхностей. Поэтому методы очистки интенсивными потоками энергии в наибольшей степени соответствует современным и вновь формирующимся требованиям по финишной очистке прецизионных деталей.

1.4 Перспективы применения методов очистки интенсивными потоками энергии

На основе приведенных данных, можно выделить следующие основные тенденции развития технологий финишной очистки:

- для разработки технологий финишной отделки характерен системный подход, учитывающий основные факторы, определяющие качество обработки - изучение механизмов формирования технологических загрязнений, разработку методов проектирования и производства с учетом требований их минимизации, создание стандартов качества, средств метрологического контроля, совершенствование технологии и оборудования для финишной отделки;
- развитие оборудования для финишной очистки идет в направлении создания автоматизированных комплексов, для которых режимы обработки задаются на основе математического моделирования процессов изготовления деталей и данных специализированных экспертных систем, среди которых в ближайшее время следует ожидать появления модулей, совместимых с наиболее распространенными CAD/CAM-системами;
- к операциям финишной отделки будут выдвигаться все большие требования по управляемости процессов, установлению режимов обработки исходя из параметров качества кромок; следует ожидать появления требований, связанных с обеспечением разных параметров качества для различных кромок одной детали, что потребует создания более гибких процессов финишной отделки.

Дополнительные задачи, которые будут возникать в ближайшее время, могут

быть связаны с разработкой технологий финишной обработки неметаллических деталей (из керамики, пластмасс, композиционных материалов).

Для дальнейшего анализа методов очистки интенсивными потоками энергии воспользуемся методом морфологических таблиц. Выделим четыре функциональных признака, характерных для любых термических методов финишной отделки и очистки: вид теплового источника, характер изменения источника по времени, рабочая среда при проведении обработки и способ уноса удаленного с кромок и поверхностей детали материала. В столбцах морфологической таблицы (табл. 1.3) приведены альтернативные варианты реализации функциональных признаков. Путем произвольного сочетания функциональных признаков может быть получен тот или иной термический метод финишной обработки.

Несмотря на то, что список вариантов реализации признаков является далеко не полным, по данным табл. 1.3 может быть образовано около 900 способов термической финишной очистки. Такое разнообразие возможных способов затрудняет анализ перспектив их применения на практике и требует выделения тех из них, в которых наиболее полно реализуются преимущества данной группы методов финишной отделки и очистки деталей.

Таблица 1.3

Морфологическая таблица
методов финишной очистки интенсивными потоками энергии

Вид источника	Характер источника	Рабочая среда	Унос материала
лазерный электронно-лучевой плазменный плазменно-дуговой электродуговой пламенный электроискровой электроконтактный ионный комбинированный	постоянный импульсный комбинированный	вакуум активный газ инертный газ активная жидкость инертная жидкость двухфазная	без уноса механический газодинамический электромагнитный комбинированный

Для этого рассмотрим основные механизмы удаления ликвидов и загрязнений, реализующиеся при термических методах финишной обработки. Будем рассматривать процессы отделки кромок (удаление заусенцев и округление) и очистки поверхности деталей от микрочастиц. Процессы очистки от других загрязнений на поверхности из дальнейшего рассмотрения исключены. Исходя из свойств материалов загрязнений и обрабатываемых деталей, механизмы очистки от микрочастиц и удаления заусенцев при воздействии интенсивных тепловых потоков классифицируем следующим образом (табл. 1.4).

Несмотря на быстро растущие объемы применения пластмасс и композиционных материалов, в настоящее время по-прежнему с точки зрения практического применения наибольший интерес представляет обработка деталей из металлов. Как показано в [24, 25, 40] удаление заусенцев и микрочастиц испарением в этих случаях энергетически не выгодно. Поэтому для металлических деталей может использоваться два механизма очистки - обжиг в окислительной среде и оплавление с последующим уносом материала.

Наиболее сложной и актуальной является проблема технологической очистки высокоточных деталей и механизмов, имеющих пары трения. В этом случае для минимизации влияния термического воздействия естественным выглядит уменьшение времени действия теплового источника.

Из уравнения теплопроводности можно приблизительно оценить время проникновения равномерно распределенного по поверхности теплового потока на глубину δ : $t_{np} = \delta^2 / 4a$, где a – температуропроводность материала. Для металлов температуропроводность находится в пределах от 6×10^{-6} м²/с (титан) до $1,1 \times 10^{-4}$ м²/с (медь). Тогда для того, чтобы при обработке высокоточных деталей ограничить зону интенсивного воздействия теплового потока глубиной 0,1 мм время действия теплового источника должно составлять порядка 4×10^{-4} с для титана и $2,3 \times 10^{-5}$ с для меди. Таким образом, при введенном ограничении на зону термического влияния термическая финишная обработка может вестись только в импульсном режиме.

Классификация механизмов очистки и отделки
деталей при воздействии на них интенсивных тепловых источников

Группа	Механизм удаления	Обрабатываемые материалы		
		Пластмассы, композиты	Металлы	Керамика
Термохимические механизмы	сублимация			
	термическое разложение			
	химическое взаимодействие компонент материала и с набегающим потоком			
	химическое взаимодействие с набегающим потоком			
Физико-механические механизмы	оплавление, отрыв оплавленного материала		Металлы	Керамика
	высокоскоростное термическое расширение материала			
	растрескивание и откол материала под действием термических напряжений			

Для того, чтобы за столь малое время оплавить заусенец объемом порядка 1 мм^3 , величина действующего теплового потока должна составлять порядка 10^9 Вт/м^2 для титана и 10^{10} Вт/м^2 для меди. Исходя из таких значений, можно сделать вывод, что по достигаемым величинам теплового потока для отделки кромок с оплавлением могут применяться следующие типы тепловых источников: лазерные, электронно-лучевые, плазменно-дуговые, электродуговые и комбинированные (лазерно-дуговые, лазерно-плазменные и др.). Из данного перечня исключим методы, основанные на применении электронно-лучевых источников, так как их применение требует использования вакуумных установок и может быть оправдано только для очень специфических случаев обработки.

При отделке кромок при помощи пламени величина передаваемого в деталь теплового потока определяется скоростью течения горючих газов. Исходя из приведенных выше оценочных данных, в качестве возможного метода финишной обра-

ботки можно рассматривать также применение импульсных пламенных источников, реализующихся при детонационном сгорании газовых смесей.

Проанализируем возможности создания технологий финишной отделки и очистки высокоточных деталей машиностроения на основе применения выделенных типов тепловых источников.

Для создания эффективных термоимпульсных технологий их развитие должно иметь системный характер и учитывать сформулированные выше тенденции развития методов финишной отделки и очистки. Задачи, которые необходимо для этого решить, можно сформулировать исходя из описанной общей схемы направлений исследований в данной области.

Контроль качества обработки. Интенсивное термическое воздействие может быть связано с изменениями структуры материала обрабатываемых деталей, искажением их геометрии из-за температурных деформаций, появлением дефектов, вызванных действием температурных напряжений (трещин, сколов, пригаров). Поэтому применение термических видов финишной обработки требует проведения исследований для разработки обоснованных метрик качества кромок и поверхностей, связанных с воздействием интенсивных тепловых потоков. На этой основе должны быть доработаны нормативные документы и стандарты. Требуется также разработка средств метрологического обеспечения для проведения контроля качества финишной обработки с учетом введенных метрик.

Характеристики обрабатываемой детали. Для термоимпульсных методов задачи этого типа главным образом должны быть связаны с изучением влияния свойств материала детали на режимы обработки. В частности, для широкого применения данных методов необходимо включение в сертификаты материалов данных об их теплофизических свойствах (теплоемкости, теплопроводности и др.). В настоящее время даже для наиболее распространенных материалов получение таких данных затруднено. Кроме того, требует изучения влияние предварительной обработки (например, режимов резания, характеристик инструмента) на свойства поверхностей деталей, определяющие эффективность передачи теплового потока (ко-

эфицненты отражения, излучения, теплоотдачи и т.п.).

Разработка гибких автоматизированных комплексов термоимпульсной финишной обработки. Одной из основных задач в данном направлении исследований является разработка моделей, достоверно описывающих механизмы отделки кромок и очистки поверхностей. Данные модели необходимы для создания методов научно обоснованного задания режимов обработки с учетом информации о состоянии детали перед обработкой, требований качества и характеристик материала.

Для всех способов, использующих импульсные тепловые источники, факторами, определяющими качество финишной обработки, будут являться точность задания интенсивности источника тепла, его позиционирования и времени действия. С этой точки зрения наихудшие возможности имеют электродуговые и плазменно-дуговые источники. Это связано с невозможностью обеспечения стабильности привязки дуги на поверхности обрабатываемой детали. Хаотичные смещения пятна привязки снижают точность обработки, поэтому данные методы не применимы для финишной обработки высокоточных деталей.

Наибольшими возможностями с точки зрения точности обработки имеют методы с использованием лазерных источников. Из рассматриваемых типов источников лазерные обеспечивают наибольшую интенсивность теплового потока, причем их величина в целом ряде случаев оказывается избыточной. Это приводит к необходимости расфокусировки пучка в процессах лазерной очистки поверхностей от микрочастиц [41], которая может производиться на воздухе, под слоем жидкости или в воздушно-капельной среде. Удаление микрочастиц происходит за счет ударного термического расширения приповерхностного слоя детали и импульсного воздействия паров жидкости.

В процессах лазерного удаления микрозаусенцев используется обработка лазерным лучом, движущимся вдоль кромки с прецессией (рис. 1.17) [42]. Обработка производится в среде защитного газа. С точки зрения точности обработки данный метод в наибольшей степени подходит для обработки прецизионных миниатюрных деталей электронных и электронно-механических устройств.

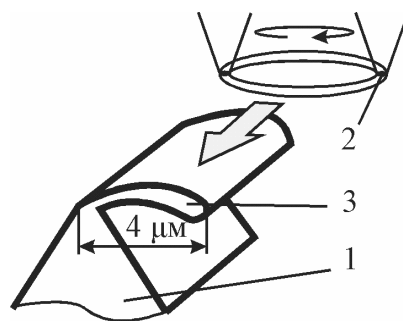


Рисунок 1.17 – Схема процесса лазерного удаления микрозаусенцев [42]:

1 – обрабатываемая кромка; 2 – сфокусированный луч лазера; 3 - микрозаусенец

Одной из основных проблем при лазерной отделке кромок является точное позиционирование лазерного луча. При обработке деталей сложной формы это является сложной задачей даже при применении современных систем ЧПУ. Для решения этой задачи в [43] предложено использовать обработку с подачей кислорода в область обрабатываемой кромки. При обработке используется расфокусированный лазерный луч. Величина теплового потока выбирается из условия недопущения оплавления материала вне обрабатываемой кромки. Удаление заусенца происходит за счет его сгорания в среде кислорода. Дополнительно используется газодинамический унос удаленного материала из зоны обработки.

Существенным недостатком лазерных методов финишной обработки является высокая стоимость оборудования, особенно для случаев обработки крупногабаритных деталей или кромок с заусенцами размерами порядка 1...5 мм. Для таких деталей с точки зрения стоимости обработки целесообразно использовать традиционные методы обработки кромок (лезвийные, абразивные и т.п.).

Альтернативным решением может быть использование комбинированных лазерно-дуговых или лазерно-плазменных методов. Преимуществом этих методов является то, что при их использовании тепловложение в металл оказывается выше суммы тепловых вкладов при лазерном и дуговом (плазменном) нагреве в отдельности [44]. Это позволяет существенно повысить КПД обработки при качестве среза, соответствующем лазерным процессам.

Еще одним преимуществом использования лазерного источника тепла в комбинированных методах является возможность решения проблемы неустойчивости дуги, свойственной электродуговому и плазменно-дуговому методу. Экспериментальные исследования показывают, что действие лазерного источника стабилизирует точку привязки пятна на обрабатываемой поверхности (рис. 1.18). Этот эффект особенно проявляется в случае, когда обрабатываемая деталь является анодом [44].

Описанные выше методы применимы для обработки внешних поверхностей деталей. Обработка деталей сложной формы с внутренними полостями возможна с помощью методов, использующих энергию сгорания газовых смесей. Один из таких методов – термохимический – в настоящее время используется довольно широко. При его применении удаление заусенцев происходит за счет обгорания, а тепло, выделяемое при горении топливной смеси служит для инициации горения удаляемого материала детали [26].

Как известно, коэффициент теплоотдачи при теплообмене между газом и твердым телом зависит от величины пограничного слоя, на которую существенно влияет скорость потока. При сгорании топливных смесей в замкнутых камерах скорости потока невелики. Поэтому при термохимической обработке тяжело обеспечить эффективность теплопередачи, а необходимый для обгорания заусенцев уровень температур приходится обеспечивать за счет увеличения времени контакта деталей с продуктами сгорания. Это может приводить к перегреву тонкостенных конструктивных элементов обрабатываемых деталей и их разрушению из-за температурных напряжений [45]. Кроме того, данный метод не позволяет обрабатывать кромки глубоких отверстий и производить очистку от микрочастиц.

Термоимпульсный режим очистки может быть обеспечен при сгорании части топливной смеси в детонационном режиме [13, 46]. Скорости распространения ударных волн в камере могут составлять до 2000 м/с. При этом происходит срыв пограничного слоя у поверхности обрабатываемых деталей и коэффициент теплоотдачи увеличивается на порядки. Удаление заусенцев и микрочастиц происходит за счет их оплавления и уноса с поверхности ударными волнами.

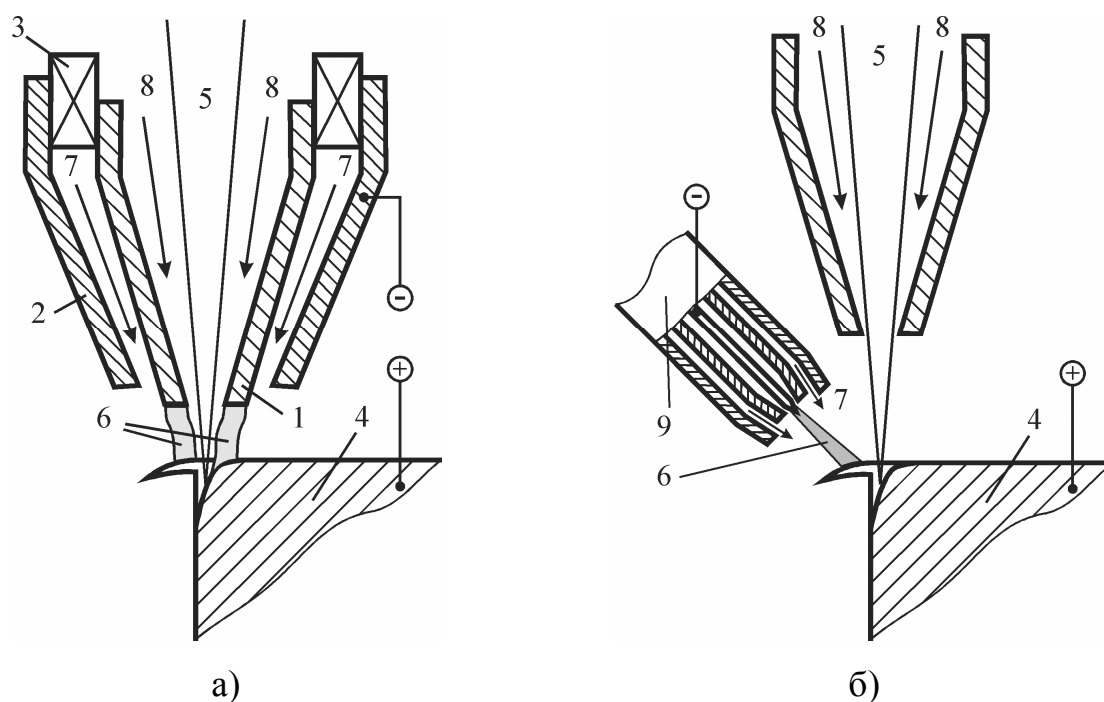


Рисунок 1.18 – Схемы комбинированной лазерно-дуговой (а) и лазерно-плазменной (б) обработки: 1 – кольцевой катод; 2 – сопло; 3 – изолятор; 4 – обрабатываемая кромка; 5 – лазерный луч; 6 – дуга; 7, 8 – подача защитного газа; 9 – плазмотрон

Принципиальную разницу в требованиях к системам дозирования этих способов очистки иллюстрируют графики, приведенные на рис. 1.19. При термохимической очистке на графике давления в камере сгорания можно выделить три характерных участка (рис. 1.19 а). Участок 1-2 соответствует этапу сгорания смеси, участок 2-3 – выдержке, длительность которой определяется временем протекания реакций сгорания материала заусенцев, участок 3-4 – выпуску продуктов сгорания.

При термоимпульсном детонационном методе на графике изменения давления появляется характерный участок (2-3) на графике (рис. 1.19 б). Обработка происходит в промежутке между началом детонационного горения и затуханием ударных волн. Несмотря на небольшую длительность этого этапа (порядка от нескольких тысячных до сотых долей секунды), из-за высокой эффективности теплообмена кромки обрабатываемых деталей успевают нагреться до требуемых для обработки температур, как на внешних, так и на внутренних поверхностях.

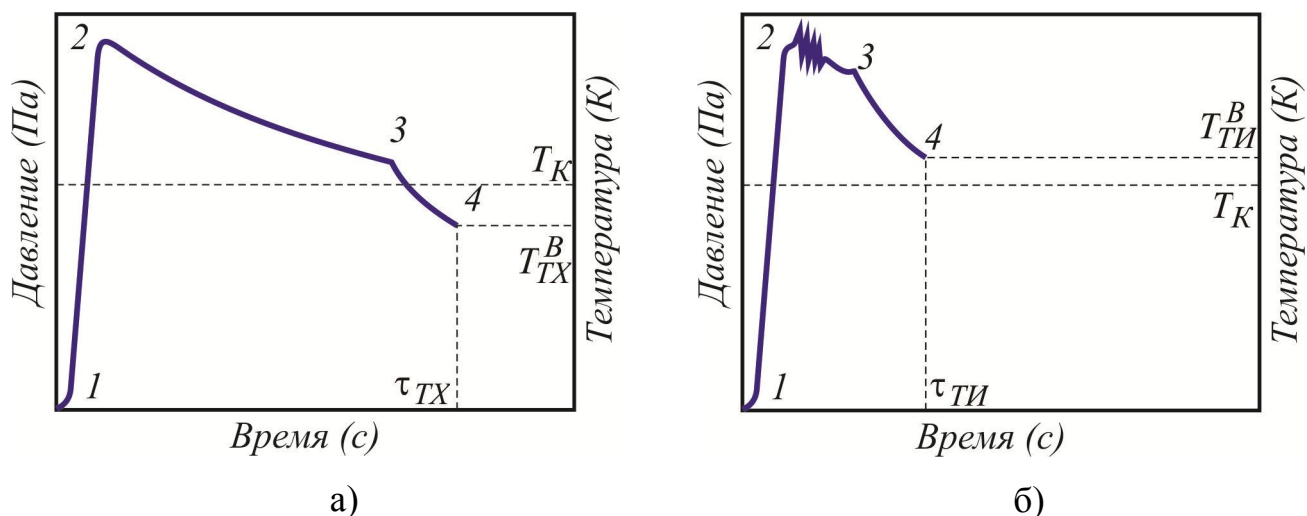


Рисунок. 1.19 – Типичные диаграммы изменения давления в камере сгорания при термохимической (а) и термоимпульсной детонационной (б) очистке

Основными параметрами, определяющими величину тепловой энергии, переданной обрабатываемым деталям, в этом случае является интенсивность детонации и время затухания ударных волн в камере. Таким образом, для создания автоматизированных комплексов с использованием энергии детонирующих газовых смесей необходимо разработать способы управления процессами детонационного сгорания в рабочих камерах и научно обоснованные методы назначения режимов обработки, учитывающие информацию об обрабатываемых деталях, полученную из CAD/CAM-систем.

2 ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТОНИРУЮЩИМИ ГАЗОВЫМИ СМЕСЯМИ

2.1 Современное состояние развития технологии и оборудования

Примерно в 1970 году, был разработан новый метод, предложивший промышленности альтернативу малоэффективному ручному способу удаления заусенцев – процесс стал известен как термохимический метод снятия заусенцев (в зарубежной литературе ТЕМ – thermal energy method). До настоящего времени ТЕМ остается самым быстрым после термоимпульсного детонационного среди современных методов очистки от заусенцев, позволяющим обрабатывать как отдельные детали, так и партии до 50 деталей одновременно. Время обработки не превышает 30 мс, а длительность полного цикла не более 25 с [47].

Этот метод, позволяет обрабатывать глухие и пересекающиеся отверстия одновременно с внешней поверхностью детали. Так как при очистке не используются никакие абразивные элементы, размеры детали не изменяются. Применение охлаждаемых камер сгорания и малое время обработки предотвращают нагревание детали более чем на 150 °С (за исключением слишком тонких элементов), что не изменяет внутреннюю структуру материала детали. Удаляемые элементы могут быть ориентированы в любом направлении, поскольку газовая смесь окутывает их со всех сторон [48].

Исторически ТЕМ был впервые использован в литейном производстве и при обработке деталей и агрегатов гидравлических систем. В вопросах связанных с гидравликой, делался акцент на гарантии удаления самых маленьких, самых неудобных заусенцев, которые, скорее всего, отделятся во время эксплуатации. Т.е. идея заключалась в следующем: «если заусенец не оторвался при взрыве, он не оторвется и при эксплуатации». Количество удаленных заусенцев зависит от количества подведенной теплоты, их материала и формы.

Список отраслей, где применяют ТЕМ, ежегодно растет. Метод используют для очистки от заусенцев и микрочастиц широкой номенклатуры деталей, особенно

при наличии в них ликвидов на внутренних поверхностях пересекающихся каналов, резьбах и прочих зонах, где провести качественную очистку при помощи традиционных методов невозможно или невыгодно. Стоимость, скорость обработки и степень пригодности данного метода может варьироваться для каждого отдельного типа деталей. Тем не менее практически все материалы могут быть обработаны этим методом, но наибольший эффект виден на материалах с низкой теплопроводностью, таких как стали и сплавы из цинка. ТЕМ может эффективно использоваться при обработке деталей двигателей внутреннего сгорания, авиационных двигателей, например, для очистки охлаждаемы лопаток турбин [49], в приборостроении, при обработке элементов подшипников, гидро- и пневмоклапанов, топливных насосов [50, 51, 52]. В настоящее время обработка пластмасс термоэнергетическим методом осуществляется так же хорошо, как и обработка металлов.

Детали с заусенцами помещают в толстостенную камеру, которую герметизируют и заполняют газовой топливной смесью. Смесью полностью заполняется все пространство камеры и пустоты обрабатываемых деталей (включая глухие отверстия, пересечения длинных тонких каналов и т.п.). Далее горючую смесь воспламеняют искрой. Сгорая, смесь создает тепловые волны с температурой до 3500 К, в зависимости от используемого горючего. В течение нескольких миллисекунд, топливо выгорает. Так как большинство заусенцев обладают высоким соотношением площади поверхности к массе, они не могут быстро передать теплоту в массив детали. Поэтому она расходуется на их оплавление, выгорание или испарение (в зависимости от режима обработки) и процесс будет продолжаться, пока теплота не начнет передаваться непосредственно в деталь. К этому времени все заусенцы, сколы, и загрязняющие вещества будут удалены.

При обработке некоторых деталей, требуется наличие приспособлений, чтобы обеспечить их правильное расположение в камере сгорания для противостояния ударным волнам или обеспечения достаточного теплоотвода от очень тонких элементов обрабатываемой детали во избежание их перегрева или разрушения [53, 54]. Мелкие детали иногда обрабатывают партиями, особенно если они имеют заусенцы

только на внутренних поверхностях. В реальном производстве обработку чаще всего производят без применения приспособлений и деталь обычно располагают на рабочем столе оборудования или в специальной корзине.

При правильно назначенных режимах обработки ТЕМ не изменяет размеры поверхностей или физико-химические свойства детали. Это связано с тем, что деталь подвергается интенсивному тепловому воздействию только на несколько десятков миллисекунд и наблюдаемый рост температуры не превышает нескольких кельвинов [55].

При термохимической обработке удаление заусенцев на кромках происходит за счет инициации их сгорания в обедненной топливной смеси, т.е. с повышенным содержанием окислителя. Для обеспечения процесса термохимической очистки необходимо обеспечить в камере избыток кислорода, достаточный для обгорания наибольших по размеру заусенцев на детали. В настоящее время термохимический метод более распространен и реализован в установках таких фирм как BOSCH, Extrude Hone, ATL (рис. 2.1)



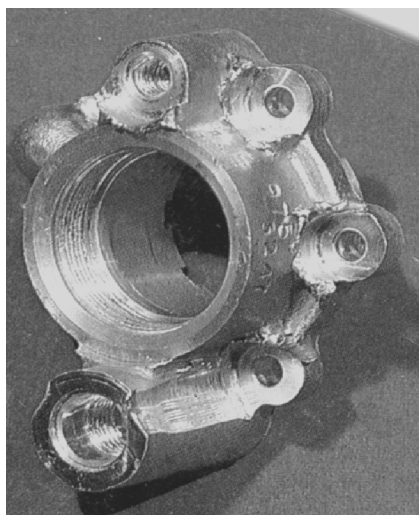
Рисунок 2.1 – Образцы оборудования для термохимической обработки:

а) Extrude Hone; б) BOSCH; в) ATL

Термоимпульсный метод получил развитие в работах ученых Национального аэрокосмического университета «ХАИ». При термоимпульсном методе, обработка происходит за счет быстрого воздействия на удаляемый элемент интенсивного теплового потока, вызывающего их оплавление, испарение или срыв с поверхности ударными волнами. Особенностью метода является то, что при термоимпульсной

очистке, в отличие от термохимической, часть топливной смеси сгорает в режиме теплового взрыва или детонации, с резким увеличением скорости горения и давления. Это приводит к образованию ударных волн в камере сгорания с определенным временем их затухания, за которое все заусенцы и микрочастицы успевают нагреться до требуемых для обработки температур, как на внешних, так и на внутренних поверхностях. Скорость распространения ударных волн в камере составляет примерно 1200 м/с, что соответствует скорости звука в среде продуктов сгорания при температуре порядка 2500 К. При этом происходит срыв пограничного слоя у поверхности обрабатываемых деталей и коэффициент теплоотдачи увеличивается на порядки. Фактически, весь процесс термоимпульсной очистки определяется временем затухания ударных волн. Теплообмен на этапах сгорания топливной смеси и выпуска продуктов сгорания ввиду малых скоростей практически не оказывает влияния на эффективность обработки. Выпуск продуктов сгорания происходит при температурах, больших чем температура конденсации окислов, что исключает необходимость их последующей очистки. Поэтому термоимпульсный способ можно применять для обработки высокоточных деталей (рис. 2.2) [25].

До обработки



После обработки

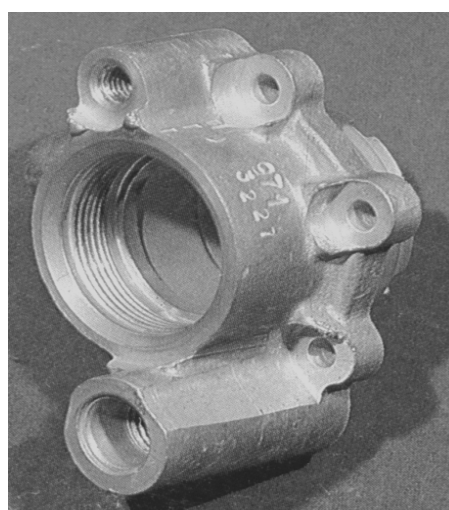


Рисунок 2.2 – Деталь, обработанная термоимпульсным методом

Термоимпульсный метод обработки реализован в установке Т-15 (рис. 2.3). Несмотря на все преимущества у термоимпульсного метода есть некоторые недос-

татки. Если в камеру сгорания помещены детали, загрязненные маслом или прочими смазочными веществами, то эти вещества будут сгорать с образованием сажи и копоти, которые будет трудно удалить. Избыток масла также может вызвать преждевременное зажигание, потреблять часть теплоты, которая необходима для удаления заусенца. Кроме того, наличие масляных пленок существенно увеличивает адгезию микрочастиц к поверхности детали, что может снизить эффективность обработки.

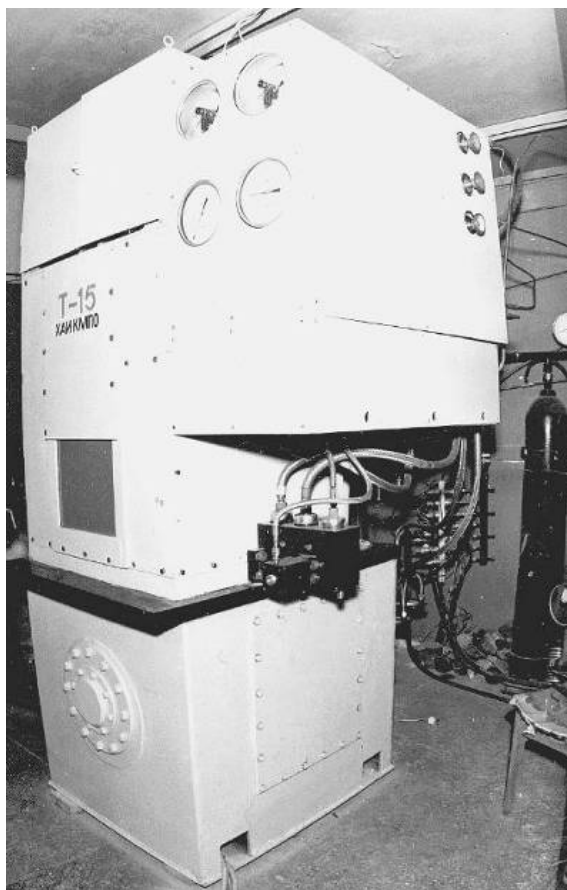


Рисунок 2.3 – Установка для термоимпульсной обработки модели Т-15

Таким образом, перед обработкой все детали должны быть обезжирены, а глухие и резьбовые отверстия очищены от уплотненной стружки. Если газ не может окружать заусенцы со всех сторон, то маловероятно, что они будут удалены полностью. Как упоминалось ранее, заусенцы должны поглощать теплоту, и, достигнув достаточно высокой температуры, они оплавляются или выгорают. Эти два важных шага трудно достичь, если материал имеет высокий коэффициент теплопроводности, поэтому обработка таких материалов как медь и алюминий требует тщательно

подобранных режимов обработки. При термохимической обработке материалов с содержанием Ti, начиная от 0,1%, может наблюдаться их охрупчивание [47]. Мартенситные нержавеющие стали подвергаются насыщению углеродом, что при высокотемпературной обработке может привести к образованию карбидов на границах зерен. Это будет негативно сказываться на коррозионной стойкости материала [56].

Примером другого существенного ограничения является размер обрабатываемой детали. Современное оборудование способно обрабатывать детали, габаритные размеры которых не превышают 500 мм.

Еще одной сложностью, которая больше касается термохимической обработки, является обеспечение требуемого уровня температур на различных участках поверхности деталей. При сгорании топливных смесей в замкнутых камерах скорости потоков невелики, особенно во внутренних полостях деталей сложной геометрической формы, имеющих проточки, отверстия малых диаметров и пр. При термохимической обработке до начала выпуска продукты сгорания существенно остывают (до уровня ниже температуры конденсации окислов T_K). В процессе испарения, заусенцы преобразовываются в оксиды обрабатываемого металла, которые оседают на элементы детали в виде отдельных порошкообразных остатков (рис. 2.4). Поэтому, каждый раз, когда необходимо снятие заусенцев при помощи термохимического метода, следует рассматривать необходимость очистки от окислов и возможные методы ее реализации. Это должно быть частью производственной стратегии, особенно когда стоимость очистки от окислов соизмерима со стоимостью удаления заусенцев.

Как и при любой обработке, качество полученного результата зависит от правильности назначения технологических режимов. Рассмотрим некоторые факторы, влияющие на выбор режимов обработки: теплофизические свойства материалов и геометрические размеры заусенцев.

К теплофизическим свойствам материалов относятся теплоемкость, теплопроводность, температура плавления. Следует отметить, что эти свойства существенно зависят от примесей и соотношения легирующих элементов. Так, повышение содержания марганца в стали с 0,117% до 0,6% влечет за собой понижение теплопро-

водности на 14% [25].

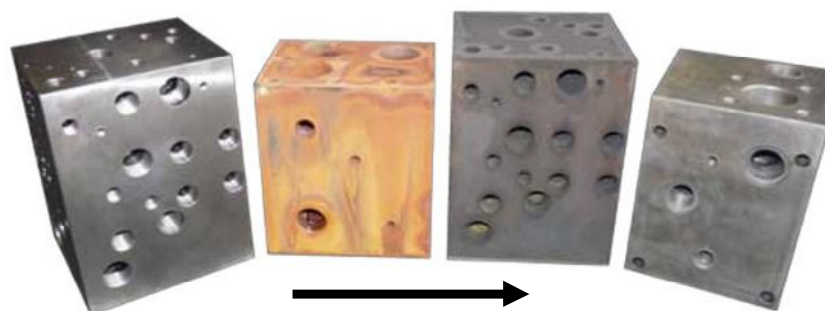


Рисунок 2.4 – Состояние детали в ходе термохимической обработки

Анализ теплофизических свойств позволяет определить пути совершенствования технологии путем дозирования подводимой энергии, но с другой стороны обуславливает сложность поставленной задачи, так как теплопроводность обрабатываемых материалов может изменяться в пределах от 0,14 до 180 Вт/м·К, т.е. более чем в 1000 раз [25].

Сложность назначения технологических режимов определяется еще и тем, что величина требуемой энергии определяется размерами заусенцев. Размеры заусенцев зависят от режима обработки металла [57], которые условно можно разделить на три группы: для черновой, чистовой и отделочной обработки.

Для обработки деталей применяют различные виды инструмента, которые оставляют после себя заусенцы толщиной не более чем 0,35 мм [25]. Следует учитывать, что при фрезеровании острым инструментом, как правило, образуется равномерный по толщине тонкий заусенец [26]. При его удалении оплавление будет происходить равномерно с образованием ровной кромки (рис. 2.5, а). При обработке притупленным инструментом, наблюдается перемещение небольшого количества материала, непосредственно перед образованием заусенцев. Такая форма заусенцев может привести к образованию бортика, где теплота переходит вглубь детали (рис. 2.5, б).

Предварительные испытания – это лучший способ для определения оптималь-

ных режимов процесса для данной детали с известным диапазоном размеров заусенцев. Целью этих испытаний является выявление таких режимов, при которых обеспечивалось бы удаление максимального количества заусенцев без повреждения детали. Но как показывает опыт внедрения подобного оборудования на предприятиях [58, 55, 59], ввиду вышеуказанных особенностей, экспериментальное определение технологических режимов малоэффективно и требует больших материальных затрат.

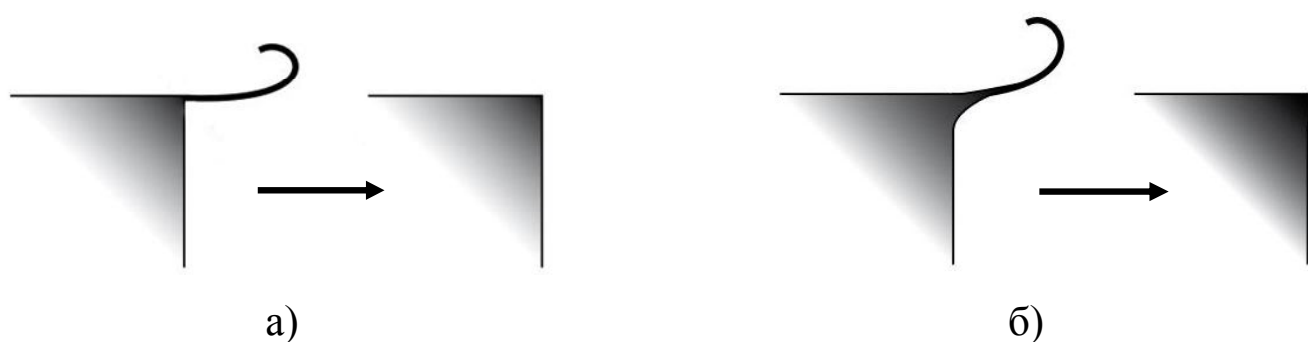


Рисунок 2.5 – Зависимость формы заусенца от состояния инструмента:

а) острый инструмент; б) притупленный инструмент

При наличии разработанных математических моделей, можно существенно повысить точность и эффективность назначения режимов обработки детонирующими газовыми смесями по сравнению с экспериментальным методом. Это ни в коем случае не предполагает полное исключение экспериментов, но поможет сократить их количество до минимума, чем существенно повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Безусловно, дальнейшее развитие термохимического и термоимпульсного методов должно соответствовать современным тенденциям и требованиям технологий финишной обработки. Поэтому для развития термоимпульсных технологий финишной очистки прецизионных деталей необходимо решение следующих задач [60]:

- уменьшить количество предварительных испытаний путем активного использования интегрированных CAD/CAE-систем и разработки с их помощью новых математических моделей, достоверно описывающих рабочий цикл термоимпульсной обработки. На основе разработанных математических моделей создать метод

задания научно обоснованных режимов обработки;

- создать единую базу данных, содержащую информацию о размере заусенцев и микрочастиц в зависимости от типа предшествующей механической обработки, ее режимов и состояния инструмента. На основе разработанной базы данных создать программное обеспечение для расчета требуемой величины подведенной энергии в зависимости от геометрических размеров удаляемых элементов, интегрированное в программно-цифровой комплекс оборудования для термоимпульсной обработки;

- повысить точность и стабильность дозирования энергии при термоимпульсной обработке прецизионных деталей ЛА путем разработки комплекса мероприятий, позволяющих в широком диапазоне управлять процессом перехода сгорания в режимы детонации или теплового взрыва (в зависимости от способа самовоспламенения смеси) и временем затухания ударных волн. Это позволит существенно расширить номенклатуру обрабатываемых деталей и материалов и проводить очистку со стабильно высоким качеством.

2.2 Моделирование процессов сгорания и теплообмена в камерах термоимпульсных установок³

Для описания процессов, происходящих в камере термоимпульсной машины, исследовательской группой Национального аэрокосмического университета "ХАИ" используется модель однофазного многокомпонентного течения реагирующих газов [61]. Модель использует законы сохранения массы, импульса и тепловой энергии нестационарного пространственного течения в дифференциальной форме. Для определения компонентного состава газа используется уравнение концентрации. Пренебрегая массовыми силами и учитывая приток энергии только через теплопроводность эти уравнения можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (2.1)$$

³ В подготовке раздела принимал участие Малашенко В.Л.

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} = \text{div } \mathbf{P}, \quad (2.2)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \text{div}(\lambda \text{grad } T) + \sum_{i=1}^N Q^i - Q_{\text{изл}} + \mathbf{P} * \text{grad } \bar{u}, \quad (2.3)$$

$$\rho \frac{\partial c^i}{\partial t} = -\text{div } \bar{\mathbf{I}}^i + \dot{S}^i, \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (2.4)$$

где ρ (ρ^i), p (p^i) – плотность и давление смеси и ее i -той компоненты; \mathbf{P} – тензор напряжений; Q^i – выделение (поглощение) тепла по всем реакциям с образованием i -той компоненты; $Q_{\text{изл}}$ – объемное излучение газа; $\bar{\mathbf{I}}^i = \rho^i \bar{\mathbf{w}}^i$ – вектор потока диффузии; \dot{S}^i – массовая скорость образования i -той компоненты смеси; e – внутренняя энергия газа.

В выражении (2.3) последнее слагаемое представляет собой свертку двух тензоров второго ранга по двум индексам: $\mathbf{P} * \text{grad } \bar{u} = -p \text{div } \bar{u} + \mathbf{T} * \text{grad } \bar{u}$, где \mathbf{T} – тензор вязких напряжений, а последнее слагаемое представляет собой диссипативную функцию [61].

Массовая скорость образования i -той компоненты может быть определена суммированием по всем K реакциям, в которых она участвует:

$$\dot{S}^i = \sum_{m=1}^K m^i (v_{im}'' - v_{im}') \omega_m,$$

где ω_m – скорость m -той химической реакции, а v_{im}'', v_{im}' – стехиометрические коэффициенты i -той компоненты до и после m -той реакции.

При исследовании горения, в настоящей работе используется модель конечной скорости химических реакций [62]. Она предполагает, что скорость элементарной реакции может быть отрицательной, если определена обратная реакция. Поэтому, величина ω_m вычисляется как:

$$\omega_m = \left(F_m \prod_{I=A,B,C,\dots}^{Nc} [I]^{r_{mi}'} - B_m \prod_{I=A,B,C,\dots}^{Nc} [I]^{r_{mi}''} \right), \quad (2.5)$$

где $[I]$ – молярная концентрация компоненты I ; F_m, B_m – константы прямой и об-

ратных реакций соответственно; r_{mi} – доля компоненты i , принимающая участие в реакции m .

Для определения констант прямых и обратных реакций температурные зависимости Аррениуса [62]:

$$F_m = A_{m1} T^{\beta_{m1}} \exp\left(-\frac{E_m}{RT}\right), \quad (2.6)$$

$$B_m = A_{m2} T^{\beta_{m2}} \exp\left(-\frac{E_m}{RT}\right), \quad (2.7)$$

где A_m, β_m – эмпирические коэффициенты; E_m – энергия активации.

Величина выделения/поглощения тепла Q^i для компоненты i вычисляется как сумма производства для всех элементарных реакций с ее участием:

$$Q^i = W^i \sum_{m=1}^K (v_{imi}'' - v_{im}') \omega_m. \quad (2.8)$$

Для случая многокомпонентной реагирующей смеси компоненты тензора напряжений в (2.2) могут быть записаны в виде [61]:

$$P_{jk} = 2\mu \dot{S}_{jk} - \left(p + \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \bar{u}\right) \delta_{jk} - \sum_{i=1}^N \frac{I_j^i I_k^i}{\rho^i},$$

где \dot{S}_{jk} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{jk} – символ Кронекера.

Скорость диффузии i -того компонента для случая бинарных систем задается

формулой $\bar{w}^i = -D^{il} \left[\operatorname{grad} \ln c^i + \frac{m^l - m^i}{m} c^l \operatorname{grad} \ln p + \frac{m^l m^i}{m^2 c^i} k_T \operatorname{grad} \ln T \right]$, где D^{il} –

коэффициент бинарной диффузии i -того компонента в l -тый; $m = \left(\sum_{i=1}^N \frac{c^i}{m^i} \right)$ – молекулярная масса смеси; k_T – коэффициент, характеризующий термодиффузию.

Для большинства газовых смесей справедливо соотношение:

Для большинства газовых смесей справедливо соотношение:

$$\left| \frac{dc^i}{c^i} \right| \gg \left| \frac{dp}{p} \right| \cdot \left| k_T \frac{dT}{T} \right|,$$

что позволяет пренебречь эффектами термо- и бародиффузии и определить скорость

диффузии в (2.4) с помощью закона Фика:

$$\vec{w}^i = -D^i \text{grad} \ln c^i,$$

где D^i - коэффициент диффузии i -того компонента в смеси из N компонент, который приближенно может быть определен по формуле:

$$D^i = \frac{1 - \chi^i}{\sum_{l=1, l \neq i}^N \chi^l / D^{il}}.$$

Коэффициенты бинарной диффузии могут быть рассчитаны по известным методикам или заданы на основании экспериментальных данных [63].

При вычислении плотности, давления, энтальпии и газовой постоянной смеси с N компонентами используются стандартные правила смешения:

$$1/\rho = \sum_{i=1}^N c_i / \rho_i, \quad p = \sum_{i=1}^N p_i, \quad \mathfrak{R} = \sum_{i=1}^N c_i \mathfrak{R}_i, \quad H = \sum_{i=1}^N c_i H_i. \quad (2.9)$$

Для определения теплофизических свойств текучей среды, т. е. зависимостей плотности, вязкости, теплопроводности, удельных теплоемкостей, коэффициентов диффузии компонентов текучей среды от давления и температуры используются уравнения состояния и экспериментальные данные.

Для случая турбулентного течения зависимости (2.1)...(2.9) описывают поведение осредненных характеристик турбулентного течения, если в качестве коэффициентов вязкости и теплопроводности в них использовать значения, равные сумме молекулярной и турбулентной вязкости и теплопроводности соответственно, т.е.

$$\mu = \mu_l + \mu_T, \quad \lambda = \lambda_l + \lambda_T. \quad (2.10)$$

Для определения μ_T и λ_T при исследовании процессов термоимпульсной очистки и отделки обычно используется SST модель турбулентности [64, 65]. Такой выбор обоснован необходимостью расчета теплообмена в пристеночных областях, для которых применение такой модели является рекомендуемым.

В этой модели для задания значения турбулентной вязкости используется выражение:

$$\mu_T = \frac{0,31\rho k}{\max(0,31\omega; \Omega F_2)}, \quad (2.11)$$

где $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$; $\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right)$ – функция, которая равна единице для пограничного слоя и нулю для свободных слоев; $\Omega = (\partial u / \partial n)$ – производная скорости течения по направлению нормали к стенке.

Для определения кинетической энергии турбулентности k и ее удельной диссипации ω используются уравнения:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right), \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = & \frac{\gamma \rho}{\mu_m} \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \\ & + 2\rho(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $\beta, \beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ – константы, вычисляемые по формуле $\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2$, а φ_1 и φ_2 соответствующие эмпирические коэффициенты $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ моделей турбулентности [65], F_1 – функция, играющая роль переключателя между моделями и построена таким образом, чтобы быть равной единице вблизи стенки и 0 – вдали от поверхности.

Menter из условия устойчивости вычислений предложил выбирать функцию F_1 в виде:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), \quad (2.14)$$

где $\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y_1}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right), \frac{4\rho\sigma_\omega k}{CD_{k\omega} y_1^2} \right]$; y_1 – расстояние от первого узла

сетки до стенки; $CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right)$.

Система уравнений (2.1)...(2.14) позволяет рассчитать все характеристики течения реагирующего газа. Для решения конкретных задач она должна быть дополнена граничными и начальными условиями.

При моделировании горения, стенки камеры термоимпульсной машины как правило считаются адиабатическими, скорость газа в поверхностных узлах сетки на стенках принимается равной нулю. Состав смеси в зависимости от решаемой задачи может приниматься равномерным или рассчитываться (в случае решения задач смеобразование). Для инициации горения использовалась модель искрового поджога с заданной энергией разряда.

Для оценки качества формирования обрабатывающей среды (для случая термоимпульсной обработки – распределения температуры продуктов сгорания) вводятся в рассмотрение дополнительные количественные критерии. Такие критерии строятся на основе функций распределения.

При термоимпульсной обработке наибольшее распространение получили смеси в которых горючим является метан (пропан), а окислителем кислород (воздух). Поэтому для решения практических задач в соответствии с рекомендациями работы [66] при моделировании используется сокращенный механизм горения. Для случая метана он содержит 52 элементарных реакций, включающих 19 реагентов. Список элементарных реакций для механизма горения метана приведен в таблице 2.1.

Расчет тепловых потоков при термоимпульсной обработке проводится с использованием интегрированной CAD/CAE-системы ANSYS CFX. В данной системе при моделировании процессов переноса в пристеночной области используется метод масштабируемых пристеночных функций Лаундера [67]. Основной идеей такого подхода является уход от ограничений по размерам расчетной сетки в пристеночной области.

Таблица 2.1

Механизм реакции горения метан-кислород

1	$CH_3+H+M \rightleftharpoons CH_4+M$	27	$HCO+O \rightleftharpoons CO_2+H$
2	$CH_3+OH \rightleftharpoons CH_2+H_2O$	28	$HCO+O_2 \rightleftharpoons HO_2+CO$
3	$CH_3+H \rightleftharpoons CH_2+H_2$	29	$CO+O+M \rightleftharpoons CO_2+M$
4	$CH_2+H \rightleftharpoons CH+H_2$	30	$CO+OH \rightleftharpoons CO_2+H$
5	$CH_2+OH \rightleftharpoons CH_2O+H$	31	$CO+O_2 \rightleftharpoons CO_2+O$
6	$CH_2+OH \rightleftharpoons CH+H_2O$	32	$HO_2+CO \rightleftharpoons CO_2+OH$
7	$CH+O_2 \rightleftharpoons HCO+O$	33	$H_2+O_2 \rightleftharpoons 2OH$
8	$CH+O \rightleftharpoons CO+H$	34	$OH+H_2 \rightleftharpoons H_2O+H$
9	$CH+OH \rightleftharpoons HCO+H$	35	$H+O_2 \rightleftharpoons OH+O$
10	$CH+CO_2 \rightleftharpoons HCO+CO$	36	$O+H_2 \rightleftharpoons OH+H$
11	$CH_2+CO_2 \rightleftharpoons CH_2O+CO$	37	$H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$
12	$CH_2+O \rightleftharpoons CO+H+H$	38	$OH+HO_2 \rightleftharpoons H_2O+O_2$
13	$CH_2+O \rightleftharpoons CO+H_2$	39	$H+HO_2 \rightleftharpoons 2OH$
14	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO_2+H+H$	40	$O+HO_2 \rightleftharpoons O_2+OH$
15	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CH_2O+O$	41	$2OH \rightleftharpoons O+H_2O$
16	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO_2+H_2$	42	$H+H+M \rightleftharpoons H_2+M$
17	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO+H_2O$	43	$H+H+H_2 \rightleftharpoons H_2+H_2$
18	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO+OH+H$	44	$H+H+H_2O \rightleftharpoons H_2+H_2O$
19	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons HCO+OH$	45	$H+H+CO_2 \rightleftharpoons H_2+CO_2$
20	$CH_2O+OH \rightleftharpoons HCO+H_2O$	46	$H+OH+M \rightleftharpoons H_2O+M$
21	$CH_2O+H \rightleftharpoons HCO+H_2$	47	$H+O+M \rightleftharpoons OH+M$
22	$CH_2O+M \rightleftharpoons HCO+H+M$	48	$H+HO_2 \rightleftharpoons H_2+O_2$
23	$CH_2O+O \rightleftharpoons HCO+OH$	49	$HO_2+HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2+O_2$
24	$HCO+OH \rightleftharpoons CO+H_2O$	50	$H_2O_2+M \rightleftharpoons OH+OH+M$
25	$HCO+M \rightleftharpoons H+CO+M$	51	$H_2O_2+H \rightleftharpoons HO_2+H_2$
26	$HCO+H \rightleftharpoons CO+H_2$	52	$H_2O_2+OH \rightleftharpoons H_2O+HO_2$

Обычным требованием при использовании различных моделей турбулентности является соблюдение в пристеночной области условия вида:

$y^+ \geq Y_{\text{ниж}}^+$, где $y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu}$ – безразмерное расстояние от стенки первого узла сетки;

$Y_{\text{ниж}}^+$ – предельное нижнее значение, величина которого определяется используемой моделью турбулентности (обычно ≈ 20).

При использовании стандартного метода пристеночных функций профиль скорости в пристеночном слое задается логарифмическим соотношением вида:

$$u_\tau = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C, \quad (2.15)$$

где k – константа Кармана; C – константа, зависящая от шероховатости стенки.

Один из недостатков описанного подхода - зависимость результатов от расположения ближайшего к стенке узла. При этом уменьшение размера ячейки сетки не приводит к улучшению сходимости решения и увеличению его точности [67]. Этот недостаток преодолевается при помощи масштабируемых пристеночных функций. Основная идея этого подхода состоит в ограничении значения y^+ путем использования величины $\tilde{y}^+ = \max(y^+, 11.067)$. Значение $y^+ = 11.067$ соответствует пересечению логарифмического и линейного подслоя [68, 69].

Для определения профиля температуры в пристеночном слое в методе масштабируемых пристеночных функций используется аналитическое решение, полученное Кадером [70]:

$$T^+ = Pr \cdot \tilde{y}^+ \exp(-\Gamma) + [2.12 \ln(1 + \tilde{y}^+) + \beta] \exp(-1/\Gamma), \quad (2.16)$$

где $\beta = \left(3.85 Pr^{1/3} - 1.3\right)^2 + 2.12 \ln(Pr)$; $\Gamma = \frac{0.01(Pr \cdot \tilde{y}^+)^4}{1 + 5 Pr \cdot \tilde{y}^+}$.

В выражении используется безразмерная температура определяемая как:

$$T^+ = \frac{\rho c_p \tilde{u}_\tau (T_w - T_f)}{q_w}, \quad (2.17)$$

где T_w – температура стенки; T_f – температура продуктов сгорания в ядре потока;

q_w – конвективный тепловой поток в стенку.

Величина конвективного теплового потока определяется по зависимости:

$$q_w = \frac{\rho c_p \tilde{u}_\tau}{T^+} (T_w - T_f). \quad (2.18)$$

Недостатком метода масштабируемых пристеночных функций является пренебрежение влиянием вязкого подслоя. Это особенно проявляется для течений с малыми числами Рейнольдса, для которых игнорирование влияния вязкого подслоя может приводить к погрешностям в определении коэффициента теплоотдачи на 10% и более [71]. Этот эффект может проявляться и при термоимпульсной обработке с подавлением образования ударных волн в связи с тем, что остаточные скорости движения продуктов сгорания не превышают 10 м/с.

Для устранения отмеченного недостатка при использовании SST модели турбулентности для определения профиля скорости в пристеночном слое применяются автоматически перестраиваемые пристеночные функции [72]. Основной идеей этого подхода является смешение решений, полученного в формулировке вязкого подслоя и пристеночных функций с использованием значений плотности расчетной сетки. Для этой задачи хорошо подходит уравнение для удельной диссипации ω , так как оно имеет аналитическое решение, и для вязкого подслоя и логарифмического слоя. Поэтому с его использованием может быть определена функция смешения с учетом величины y^+ .

Решения для ω в вязком и логарифмическом пристеночном слое могут быть записаны в виде [71]:

$$\omega_{вяз} = \frac{6\nu}{0.075 y_1^2}; \quad \omega_{log} = \frac{1}{3k} \frac{u_\tau}{y_1}.$$

Они могут быть переформулированы в терминах y^+ при помощи гладкой функции смешения:

$$\omega(y^+) = \sqrt{\omega_{вяз}^2(y^+) + \omega_{log}^2(y^+)}.$$

Аналогичная формулировка используется для задания пристеночного профиля

скорости:

$$u_{\tau}^{вяз} = \frac{U_1}{y^+}; \quad u_{\tau}^{log} = \frac{U_1}{\frac{1}{k} \ln(y^+) + C}; \quad u_{\tau} = \left[(u_{\tau}^{вяз})^4 + (u_{\tau}^{log})^4 \right]^{0.25}, \quad (2.19)$$

где U_1 – значение скорости в ближайшем к стенке узле сетки.

Такая формулировка дает соотношение между скоростью при ($y = y_1$) и сдвиговым напряжением. Подтверждением эффективности такого подхода являются результаты моделирования теплообмена для пластины для стандартного подхода и метода, использующего автоматическое пристеночное смещение (рис. 2.6, 2.7) [72].

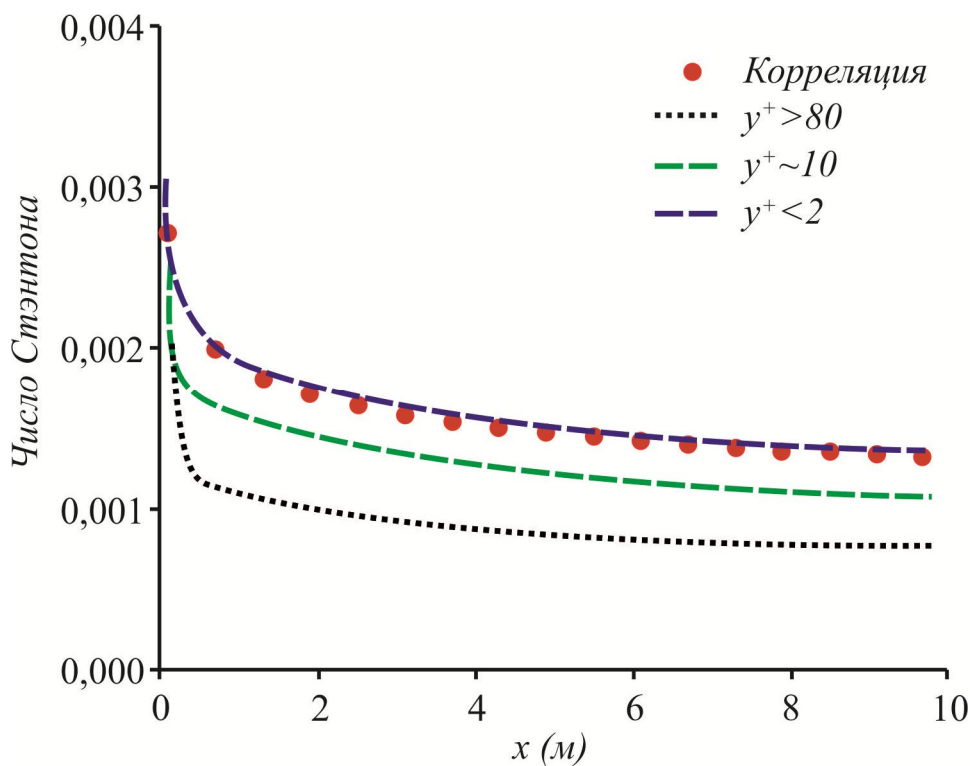


Рисунок 2.6 – Чувствительность к размеру сетки для низкорейнольдсового решения

При использовании стандартного низкорейнольдсового приближения результаты ухудшаются при огрублении сетки, в то время как метод автоматически перестраиваемых пристеночных функций дает достаточно точные результаты независимо от качества сетки. Поэтому для расчета тепловых потоков при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями совместно с уравнениями (2.1)...(2.14) применяется метод автоматически перестраиваемых пристеночных функций, основанный на совместном использовании выражений (2.16), (2.18) и (2.19).

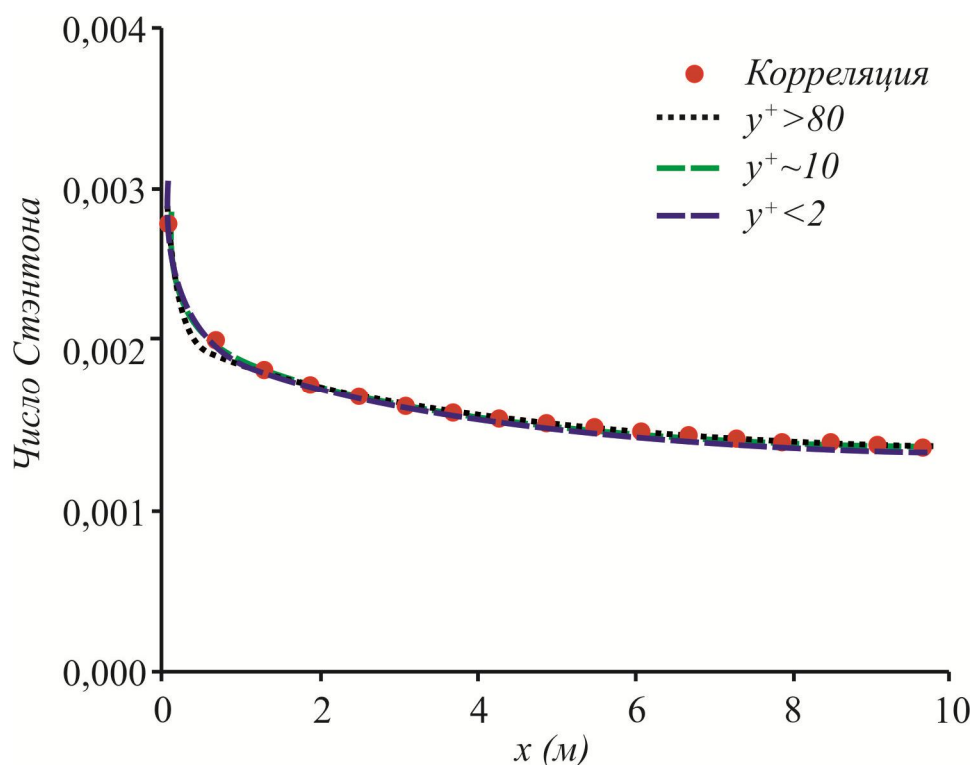


Рисунок 2.7 – Чувствительность к размеру сетки для метода автоматически перестраиваемых пристеночных функций

2.3 Методика назначения режимов термоимпульсной обработки

2.3.1 Источники информации для расчета режимов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями

Понимание процесса формирования заусенцев и корпускулярных загрязнений является критическим для качественной финишной очистки прецизионных деталей. Для эффективного решения проблемы очистки рабочих поверхностей и кромок нужно обеспечить свободный обмен информацией на различных этапах изготовления детали от этапа проектирования до этапа финишной очистки (рис. 2.8). Здесь важна интеграция всех элементов, влияющих на образование заусенцев и их последующее удаление, начиная с характеристик детали, проходя процесс размерной обработки и заканчивая, собственно, финишной очисткой (на примере термоимпульсного метода).

Конструкторскую документацию на деталь следует интерпретировать с точки зрения производственных процессов, которые будут использовать для ее изготовле-

ния. Этот шаг называют процессом планирования, который выражается в подготовке маршрутного листа обработки, т.е. последовательности операций, которые должны быть выполнены при изготовлении детали. Важно соблюдать точную и своевременную передачу информации между отдельными операциями. Этот процесс требует наличия обратной связи между различными элементами общей схемы обмена информацией.

Согласно схеме (рис. 2.8) все информационное пространство при изготовлении детали можно разделить на две подгруппы. Первая связана с процессом размерной обработки, вторая – с финишной термоимпульсной очисткой. Отдельным, базовым элементом можно выделить конструкторскую документацию, которая является первоисточником всей информации и определяет состояние детали после полного цикла ее изготовления. Также отдельно стоит и этап выбора критерия, т.е. сопутствующей цели, обычно связанной с повышением эффективности того или иного этапа изготовления детали.

Таким критерием может быть повышение эффективности финишной очистки за счет минимизации количества и размеров ликвидов, или выбор оптимальной траектории для минимизации штучного времени изготовления. Этот параметр напрямую влияет на расчет режимов механообработки, последовательность операций, траекторию инструмента. Выбор критерия позволяет гибко управлять процессом изготовления детали в целом. Механообработку можно рассматривать как отдельную подгруппу источников информации, состоящую из независимых (входных) переменных, зависимых переменных и их независимых взаимосвязей. Инженер или оператор обрабатывающего центра осуществляет прямой контроль входных переменных и может управлять ими при настройке оборудования для обработки.

Материал заготовки выбирают с точки зрения функционального назначения будущей детали. Заготовка несет в себе информацию о структуре материала, его механических свойствах. Обычно размер и форма заготовки продиктованы методом ее изготовления (литье, ковка, штамповка и др.) или же это может быть стандартная заготовка (прутки, заготовки из металлопроката и др.).

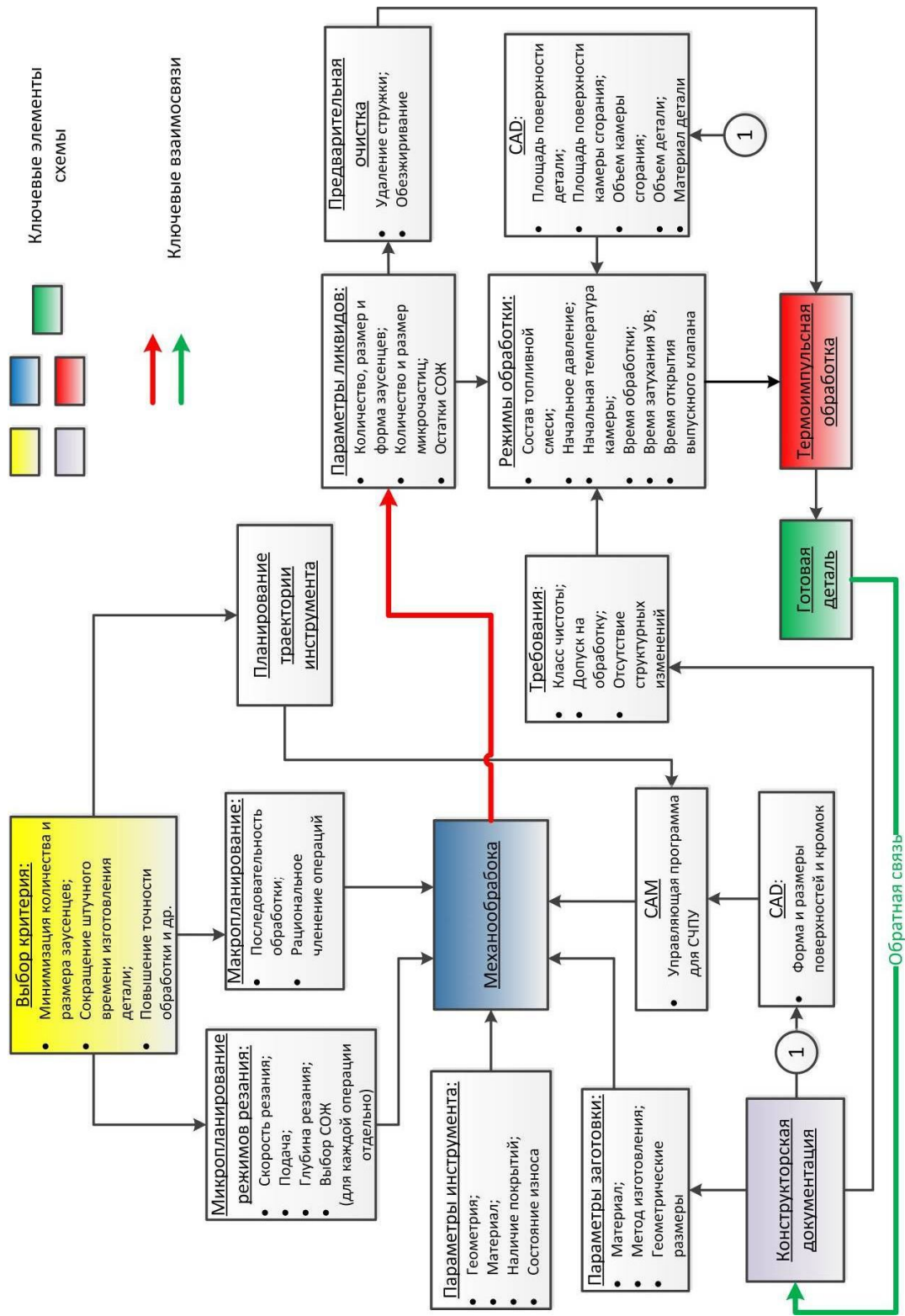


Рисунок 2.8 – Схема информационных потоков при термоимпульсной обработке

Главным источником информации для назначения режимов финишной термоимпульсной обработки является величина и количество заусенцев и прочих ликвидов, которые образуются при механообработке. Это основное звено, которое связывает два глобальных этапа полного цикла изготовления прецизионных деталей ЛА в структурно-логической схеме информационных потоков. Поэтому, анализу основных параметров, влияющих на формирование заусенцев, их форму и размер необходимо уделять достаточное внимания.

В настоящее время существует большое количество методов выявления и измерения заусенцев. Выбор подходящего способа зависит от условий проведения измерений, требуемой точности и от того, какие параметры следует измерять: высоту, толщину заусенца, их количество или твердость. Для расчета режимов термоимпульсной обработки наибольшее значение имеет информация о количестве и геометрических параметрах заусенцев. Все методы измерения могут быть классифицированы в соответствии с различными критериями, основными из которых являются [57]: одно-, двух- и трехмерные; контактные и бесконтактные; разрушающие и неразрушающие.

Из-за сложных связей и отношений между многочисленными влияющими параметрами, невозможно их разделить на прямые и косвенные (рис. 2.9).

Как показывают исследования [73], при фрезеровании высота заусенцев в направлении резания снижается с увеличением глубины резания, подачи, угла режущей кромки в плане. Увеличение радиуса закругления приводит к увеличению высоты заусенца. Обработка с малой подачей вызывает образование более мелких заусенцев с небольшой толщиной у корня. Кроме того, большая подача, низкая скорость, малый износ инструмента и твердость материала оказывают положительное влияние на минимизацию размера и количества заусенцев [74, 75]. Наряду со сказанным выше, большее влияние на образование заусенцев оказывают условия входа и выхода инструмента при обработке.

Важным критерием является шероховатость поверхности после обработки. Ус-

тановлено, что при $\lambda = \frac{Ra}{d} > 0,25$, где Ra – шероховатость поверхности; d – диаметр частицы, удаление микроликвидов с поверхности может быть затруднено [76, 77].

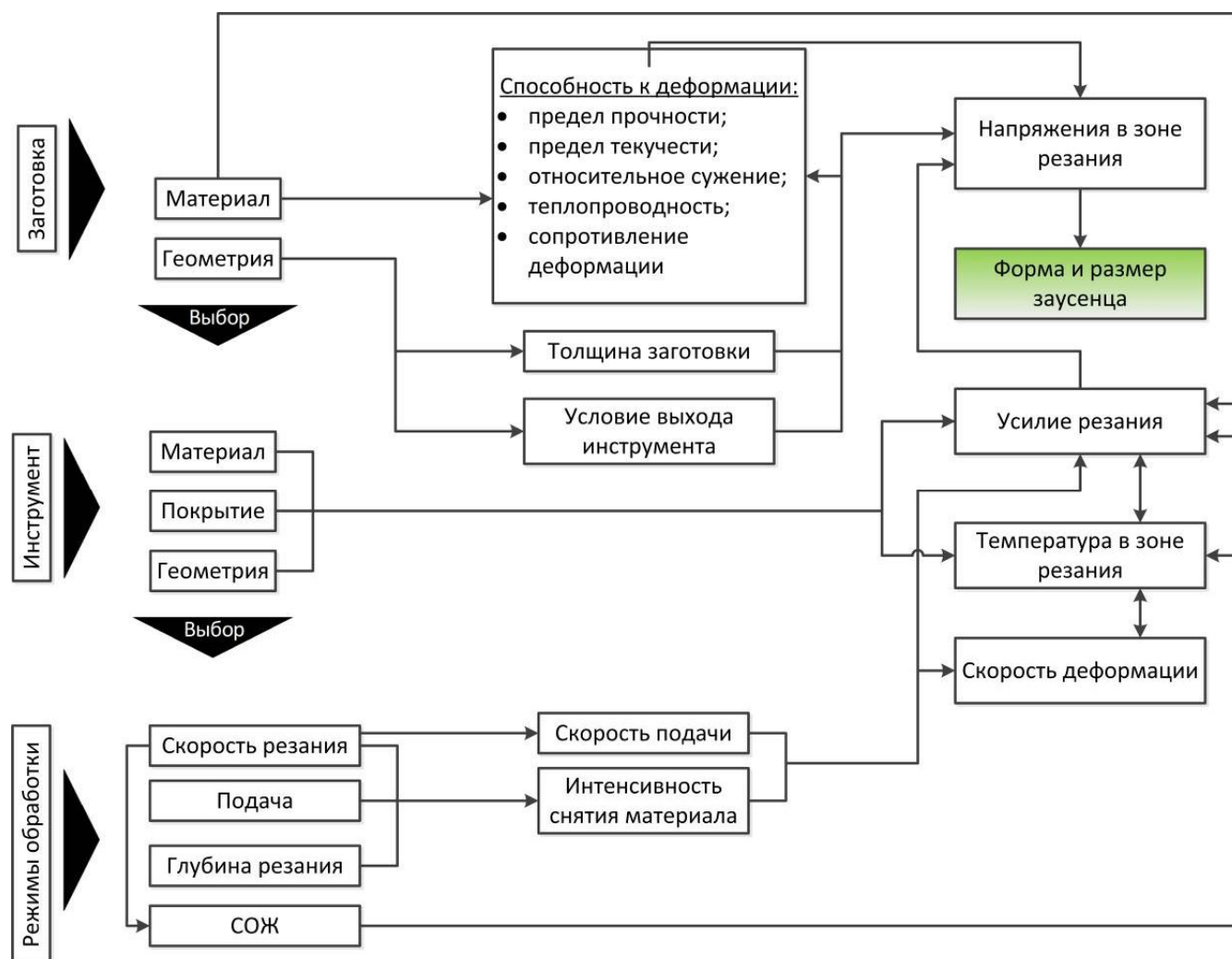


Рисунок 2.9 – Взаимосвязи параметров образования заусенцев

Понимание связи между входными параметрами для процесса финишной термоимпульсной очистки – это очень важные знания для инженера. Обработка детонирующими газовыми смесями является уникальным процессом. Большое разнообразие входных данных приводит к огромному числу различных комбинаций обработки. В данном случае можно выделить три основных способа накопления и обмена информацией.

Опыт требует длительного периода накопления информации, потому что зна-

ния, в основном, приобретают методом «проб и ошибок», и в случае успешного результата применяют для разрешения других, «похожих» ситуаций. Этот процесс продолжается каждый раз, когда в производство вводят новый материал. К сожалению, знания, накопленные за один процесс, не могут без корректировки быть переданы на другой, даже если исходные параметры обработки очень похожи.

Эксперимент. Проведение экспериментов стоит дорого, отнимает много времени и трудноосуществимо в условиях серийного производства. Опять-таки, вследствие большого количества параметров, влияющих на режимы обработки, невозможно охватить весь спектр ее возможных вариантов и при этом сохранить конкурентоспособность выпускаемой продукции. Проведение экспериментов в наибольшей мере характерно опытному производству с малой номенклатурой обрабатываемых деталей и материалов. Более того, от момента получения результатов экспериментальных исследований до внедрения этого опыта в производство также проходит достаточно длительный период.

Теория. Теоретические исследования, пожалуй, это наиболее перспективное и динамично развивающееся направление. Касательно технологии термоимпульсной обработки, на сегодняшний момент разработаны математические модели, которые с высокой точностью описывают процессы смесеобразования в камерах термоимпульсных машин и горения детонирующих газовых смесей, с учетом перехода между различными режимами сгорания. Тем не менее, нет математических моделей, которые достоверно описывают взаимодействие обрабатываемой детали с продуктами горения газовой смеси.

Хотя традиционно считается, что САД-системы находят свое применение только на начальных этапах производственного цикла, анализ возможностей современных систем твердотельного моделирования подтверждает возможность более широкого использования их на протяжении всего цикла изготовления детали, включая финишную очистку.

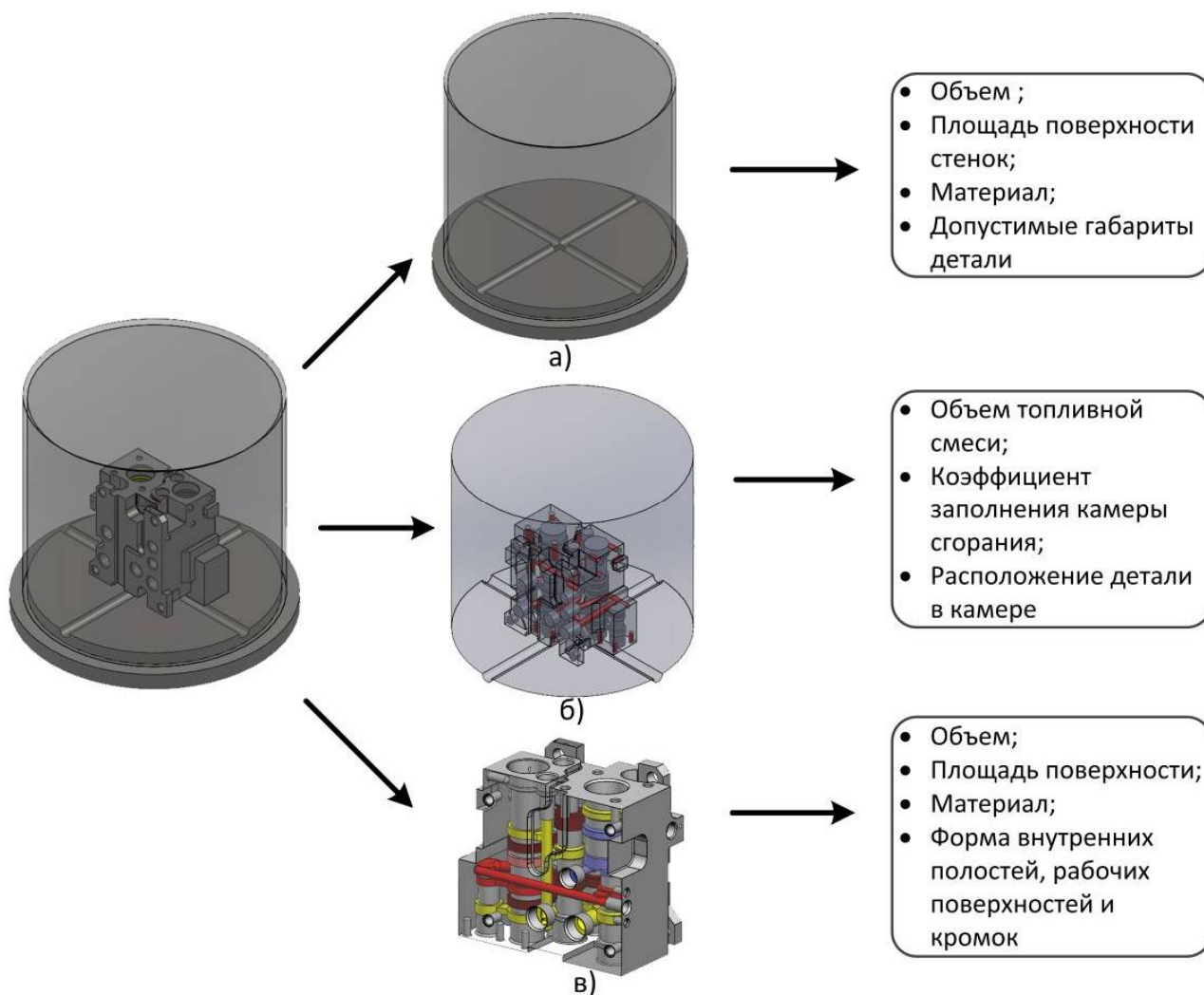


Рисунок 2.10 – Схема членения САD-модели:

а) камера сгорания термоимпульсной установки; б) пространство внутри камеры сгорания; в) обрабатываемая деталь

Для термоимпульсной обработки применение САD/САЕ технологий так же весьма актуально. Ведь форма, геометрические размеры, объем, площади поверхностей и прочее параметры, которые автоматически вычисляются из трехмерной модели (рис. 2.10), напрямую влияют на выбор режимов финишной термоимпульсной очистки и определяют такие параметры как площадь теплоотводящих поверхностей, коэффициент загрузки камеры сгорания, объем горючей смеси. Кроме этой информации для расчета режимов термоимпульсной очистки и отделки из САD системы должна поступить информация о теплофизических характеристиках материала об-

рабатываемых деталей (коэффициентах теплопроводности и теплоемкости), а из специализированных баз данных, совмещенных смодулями САМ – данные о величине заусенцев и микрочастиц, образовавшихся в результате механообработки. Благодаря применению CAD/CAE-систем, инженер имеет возможность управлять процессом обработки на различных этапах изготовления детали. На современном этапе развития автоматизированных систем эту информацию можно вводить в формате, который не требует вмешательства человека. Это направление перспективно в применении к термоимпульсной очистке: расчет режимов обработки будет происходить более точно, заменит интуицию, метод проб и ошибок и позволит выполнять обработку со стабильно высоким качеством.

2.3.2 Методика определения характеристик оборудования для термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями

Алгоритм выбора режимов термоимпульсной обработки был впервые разработан авторами работ [24, 25] (рис. 2.11). Согласно алгоритму, в первую очередь проводится сбор исходных данных, в ходе которого в соответствии с конструкторской и технологической документацией обрабатываемая деталь характеризуется с точки зрения наличия тонкостенных элементов, каналов и т.д.

Далее согласно теплофизическим свойствам материала изделия, рассчитывается время прогрева элементов изделия в зависимости от их толщины и площади поверхности, а также время прогрева удаляемых элементов. Период прогрева и удаления ликвидов определяет время обработки τ_o .

Далее проводится контроль прогрева отдельных элементов изделия за время обработки t_o , для оценки вероятности их повреждения или перегрева, после чего технические характеристики оборудования согласовываются с требованиями к качеству обработки детали и определяются исходные данные для наладки оборудования.

В зависимости от типа обработки (групповая, индивидуальная) выбирается существующее приспособление или проектируется новое. Далее определяется загрузка рабочей камеры, время выпуска продуктов сгорания после обработки.



Рисунок 2.11 – Алгоритм выбора режимов термоимпульсной обработки

Одним из ключевых параметров является время затухания ударных волн $\tau_{ув}$, с которым необходимо увязывать другие параметры при расчете режимов термоимпульсной обработки. Так, время обработки τ_o не должно превышать время затухания ударных волн $\tau_{ув}$ в рабочей камере при детонации горючей смеси, иначе очистка

произойдет не полностью, и придется повторять цикл обработки заново. Таким образом, τ_o и $\tau_{yв}$ согласовываются между собой по следующему критерию: $\tau_o \leq \tau_{yв}$.

Для предотвращения перегрева или разрушения время прогрева тонкостенных элементов детали τ_{∂} должно превышать время выпуска продуктов сгорания τ_{ϵ} и существенно превышать время затухания ударных волн $\tau_{yв}$, т.е. должны соблюдаться следующие условия: $\tau_{\partial} > \tau_{\epsilon}$ и $\tau_{\partial} \gg \tau_{yв}$. Как видно, роль времени затухания ударных волн $\tau_{yв}$ крайне важна.

Не менее важным параметром термоимпульсного оборудования, определяющим возможность качественной обработки, является величина тепловых потоков, достигаемых в процессе теплообмена деталей с продуктами сгорания. Согласно [24, 25], при термоимпульсной обработке количество энергии сгорания горючих газовых смесей лежит в основе расчета величины теплового потока через поверхности детали.

Распределение теплового потока по поверхности детали в указанных работах принималось равномерным и рассчитывалось по зависимости:

$$q = \frac{Q_{y\partial} \cdot V_{см}}{F_{\Sigma} \tau}, \quad (2.20)$$

где $Q_{y\partial}$ – удельная теплота сгорания газовой смеси; $V_{см}$ – объем смеси; F_{Σ} – суммарная площадь теплоотводящих поверхностей; τ – время действия источника теплоты.

Объем горючей смеси определяется следующей зависимостью:

$$V_{см} = \frac{V_{рк} k_3 P_{см} T_0}{T_{см} P_0}, \quad (2.21)$$

где T_0 , P_0 – начальные значения температуры и давления в камере; $V_{рк}$ – объем рабочей камеры; k_3 – коэффициент загрузки деталями; $P_{см}$ – давление газовой смеси; $T_{см}$ – температура газовой смеси.

Величина удельной теплоты сгорания, согласно [78], зависит от компонентного состава топлива и определяется при помощи следующей зависимости:

$$Q_{y\partial} = \sum_{i=1}^N Q_i C_i, \quad (2.22)$$

где Q_i – теплота сгорания газа i -го компонента газа; C_i – доля i -го компонента в газе.

Таким образом, выражение (2.20) можно записать в виде:

$$q = \frac{V_{pk} k_z P_{cm} T_0}{T_{cm} P_0 F_{\Sigma} \tau} \sum_{i=1}^N Q_i C_i. \quad (2.23)$$

Таким образом, мощность источника тепла при термоимпульсной обработке принималась зависящей от объема камеры сгорания, коэффициента загрузки, состава горючего, суммарной площади теплоотводящих поверхностей и ее можно регулировать давлением и температурой горючей смеси. В дальнейшем в работах [24, 25] считалось, что большая часть тепла, задаваемого выражением (2.23) выделяется в импульсном режиме, а оставшаяся – в квазипостоянном, на этапе выдержки смеси до выпуска продуктов сгорания. Значение коэффициента, определявшее долю импульсного тепла, задавалось с учетом экспериментальных данных и составляло для низких давлений смеси (менее 0,65 МПа) 0,7...0,8, для средних (0,65...1,0 МПа) – 0,8...0,9, высоких – 0,85, 0,9 [25].

Зависимость (2.23) по способу получения и виду имеет недостатки. Она не учитывает физику процесса теплообмена при взаимодействии продуктов сгорания и материала обрабатываемой детали. Для случая термоимпульсной обработки тепловой поток, действующий на обрабатываемую поверхность, можно представить в виде суммы двух составляющих – радиационной и конвективной.

Радиационный тепловой поток может быть определен по закону Стефана-Больцмана и зависит от температур поверхности детали и продуктов сгорания. Температура продуктов сгорания определяется термодинамическими параметрами топливной смеси и практически не зависит от начального давления смеси.

Конвективная составляющая теплового потока также зависит от разности температуры поверхности детали и температуры продуктов сгорания, а при действии ударных волн, вызванных детонацией или тепловым взрывом части топливной смеси, – температуры поверхности детали и температуры торможения. Температура тормо-

жения зависит от скорости распространения ударных волн, которая однозначно определяется температурой и компонентным составом продуктов сгорания.

Переменность конвективного теплового потока связана с изменением коэффициента теплоотдачи, который, существенно зависит от скорости течения газа вблизи стенок. Выполнение численного моделирования для случая термоимпульсной обработки каждой детали является бесперспективным. Это слишком долго и слишком дорого для производственных задач особенно с учетом многономенклатурности деталей по формам и материалам.

Поэтому для практических расчетов можно принять подход, использующий осреднение теплового потока по поверхности. Для уточнения зависимости (2.23) с использованием описанной выше математической модели были проведены численные эксперименты по расчету тепловых потоков в камере термоимпульсной машины.⁴

Варьируемым параметром было начальное давление топливной смеси. Задача рассматривалась как цепочка краевых задач горения и теплообмена. Значения всех расчетных параметров предыдущей задачи использовались в качестве начальных условий для следующего этапа расчета. Дополнительно вводились критерии перехода между этапами моделирования. При генерации перечня реакций учитывалось влияние величины давления смеси (в перечне реакций присутствуют реакции, скорость которых зависит от давления).

На рис. 2.12 приведены зависимости изменения средней по поверхности камеры величины теплового потока для различной величины начального давления топливной смеси. Результаты моделирования показывают, что величина максимального теплового потока существенно зависит от начального давления смеси. Этот результат в некоторой степени совпадает с принимавшимися в ранее выполненных работах допущениями [24, 25]. Однако, как показали результаты анализа, зависимость величины теплового потока от давления смеси оказалась отличной от линейной, как это было принято авторами упомянутых работ.

Качественная оценка характера зависимости величины максимального теплово-

⁴ Численное моделирование проводилось Малашенко В.Л.

го потока от давления смеси может быть сделана из следующих соображений. При рассмотрении теплового пограничного слоя для определения коэффициента теплоотдачи может быть записано следующее выражение [79]:

$$\alpha(T_z - T_{cm}) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \approx \lambda \frac{(T_z - T_{cm})}{\delta}, \quad (2.24)$$

где δ – толщина теплового пограничного слоя.

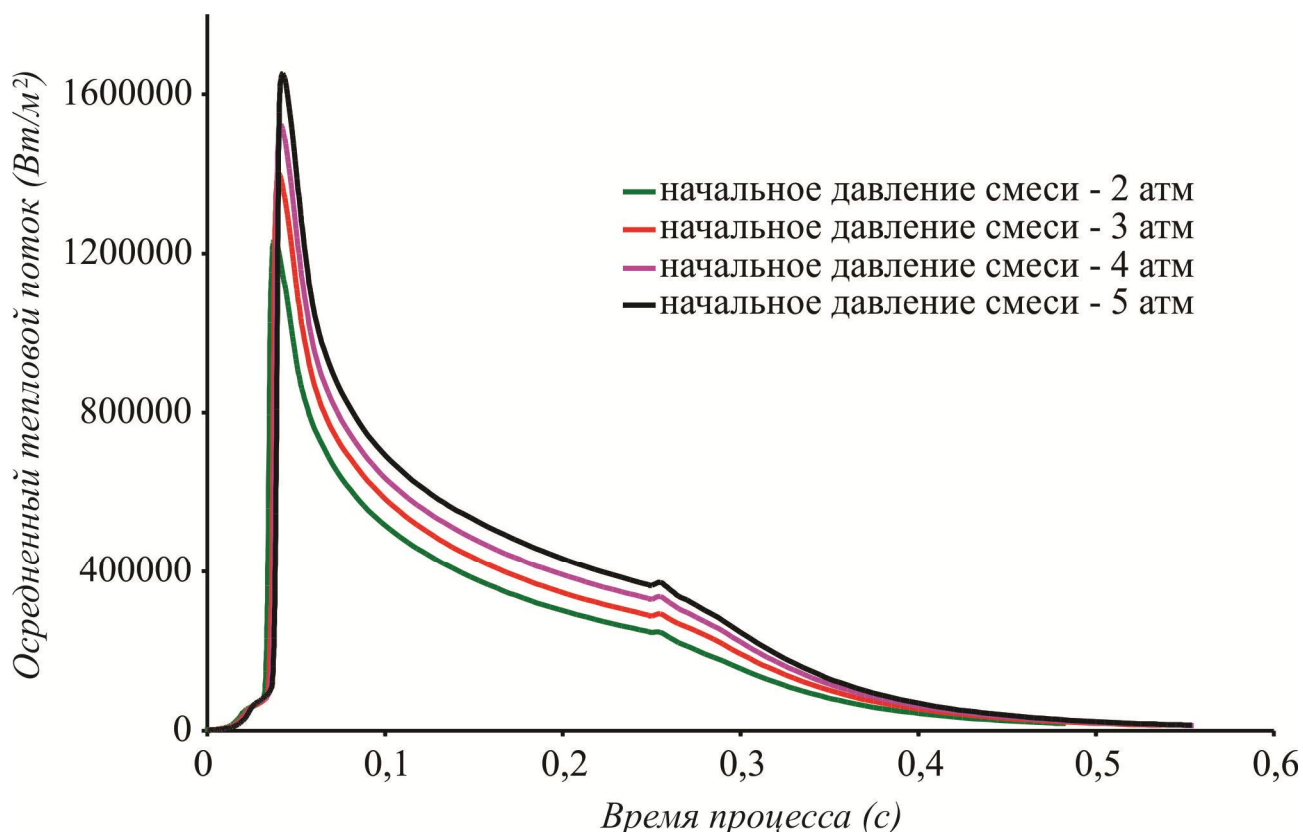


Рисунок 2.12 – Графики изменения осредненного по поверхности камеры теплового потока для различных начальных давлений смеси

Для случая теплообмена с ламинарным потоком газа характерного для случая подавления детонации, толщина теплового пограничного слоя обратно пропорциональна числу квадратному корню из числа Рейнольдса [79]:

$$\delta \sim \frac{1}{\sqrt{Re}} = \frac{1}{\sqrt{v_z l \rho_z / \eta_z}}.$$

Для постоянной геометрии камеры масштаб длины является постоянной величиной, а скорость газов практически не зависит от давления в камере.

Поэтому приближенно можно считать, что для рассматриваемого случая термоимпульсной обработки с форкамерно-факельным поджогом

$$\delta \sim \frac{1}{\sqrt{\rho_2}}.$$

Тогда с учетом зависимости $\rho_2 = p/R_2 T_2$, а также уже отмеченной выше слабой зависимостью температуры продуктов сгорания от начального давления из выражения (2.31) можно получить следующую оценку

$$\alpha \sim \sqrt{p}.$$

С учетом того, что коэффициент повышения давления при сгорании газообразных топлив является практически постоянной величиной, это приводит к выводу о зависимости значения осредненного по поверхности теплового потока от квадратного корня от начального давления:

$$q_p = q_{p_0} \sqrt{p/p_0}. \quad (2.25)$$

Согласно полученным данным зависимость максимальной величины осредненного по поверхности камеры теплового потока описывается выражением (2.18) с погрешностью не более 1,4%. Аналогичный результат может быть получен для величины осредненного теплового потока (рис. 2.13). Полученный результат отличается от зависимости (2.23), в которой принята его линейная зависимость от начального давления смеси. Зависимость (2.25) совпадает с данными экспериментальных исследований, представленных в работе [80], что является дополнительным подтверждением правильности проделанных выкладок.

Таким образом для расчета величины осредненных тепловых потоков предложено использовать подход, основанный на моделировании теплообмена в эквивалентной камере сгорания. В ходе численного моделирования для базовой величины давления может быть определена величина тепловых потоков на каждом этапе рабочего цикла - сгорании топлива, затухания ударных волн, выдержки и выпуске продуктов сгорания. Зависимости осредненных тепловых потоков от времени при других значениях давления смеси с погрешностью не более 2% могут быть получены по дан-

ным моделирования для базового давления по зависимости (2.25).

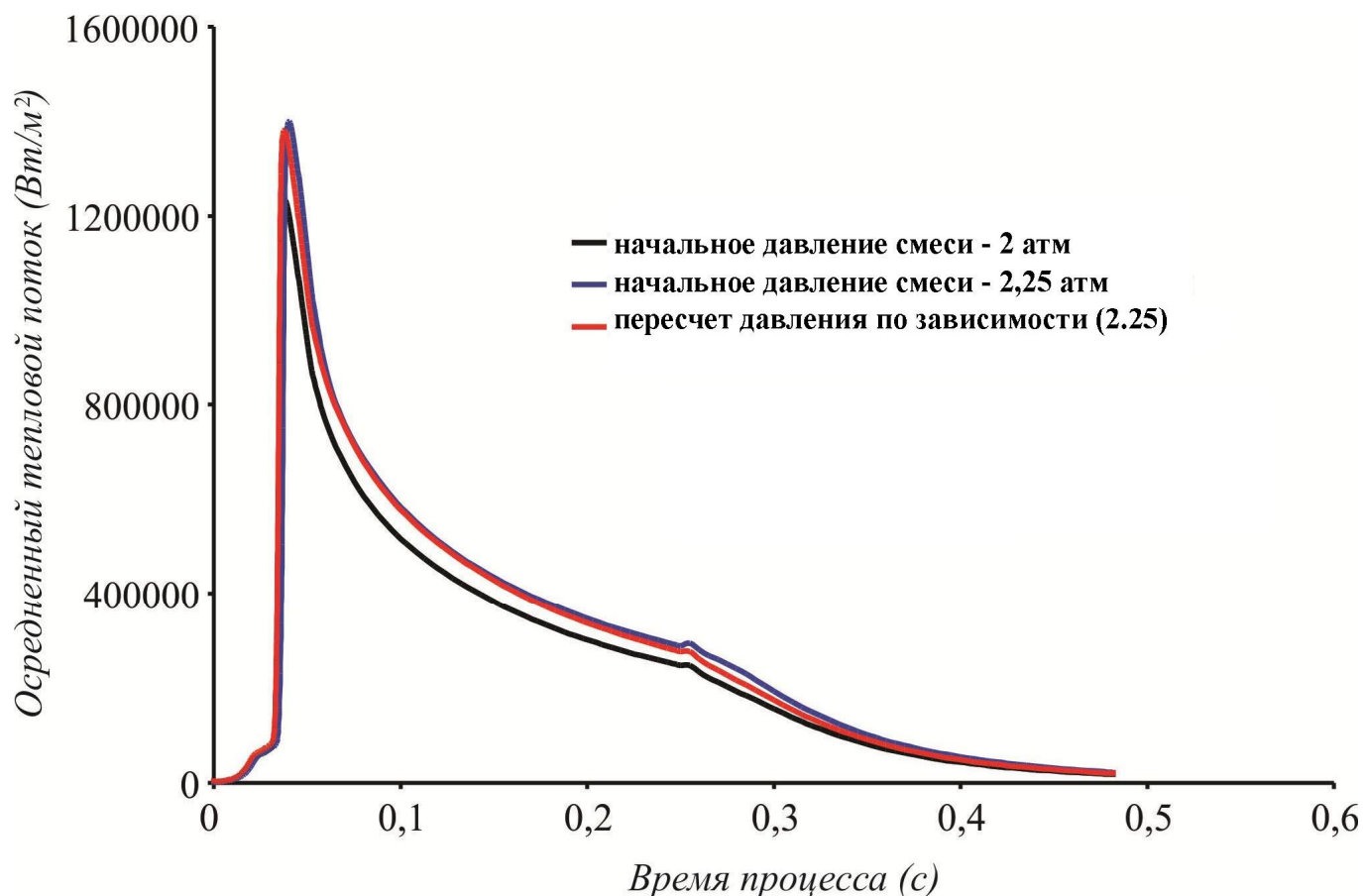


Рисунок 2.13 – Данные численного расчета осредненного по поверхности камеры теплового потока и рассчитанного по зависимости (2.25)

С учетом условий практического применения термоимпульсных установок с использованием описанной выше математической модели было изучено влияние значения начального давления смеси и ее состава на переход между различными режимами сгорания топливной смеси, в частности на переход во взрывное сгорание.

На первом этапе работ была проведена отработка расчетной модели путем сравнения с результатами экспериментальных исследований. Для этого результаты численного моделирования и экспериментальные данные сравнивались для двух случаев – распространении пламени с переходом в детонацию в ударных трубах (эксперименты проводились на базе Варшавского политехнического университета) и для задачи о затухании ударных волн в замкнутой камере (использовались данные экспе-

риментов, проведенных в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентева СО РАН).

Для задачи о распространении детонации в ударной трубе все эксперименты проводились для водородно-воздушной смеси стехиометрического состава. На рис. 2.14 показаны характерные данные сравнения профилей давления, полученных в результате численного моделирования, с экспериментальными результатами для случая ударной трубы. Для приведенного случая результаты численного моделирования в месте установки первого датчика регистрирует прохождение детонационной волны в момент времени 1,29 мс, что на 3,2% позже, по сравнению с экспериментом. Отличие максимальных значений давления во фронте детонации составило 2,89%.

В целом характер распределения давлений при моделировании распространения детонации в ударной трубе качественно и количественно находилась в хорошем соответствии с экспериментом. Пульсации давления, фиксировавшиеся датчиками в эксперименте после прохождения ударной волны и отсутствовавшие в данных численного эксперимента, были идентифицированы как дефекты эксперимента, связанные с вибрациями ударной при взаимодействии с ударными волнами.

При сравнении скоростей детонации, проводили сопоставление результатов моделирования со средним значением скорости по результатам серии из трех экспериментов. Максимальное отличие составило 4,02%.

В результате был сделан вывод о том, что разработанная расчетная модель адекватно описывает распространение детонации в газовых смесях. Модель реалистично описывает процессы, предшествующие переходу дефлаграционного горения в детонацию, что подтверждалось сравнением результатов моделирования с данными работ [81, 82, 83].

Результаты численного моделирования сравнивались также с экспериментальными данными, полученными при исследовании затухания ударных волн после детонации в замкнутой камере в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения АН РФ [84, 85].

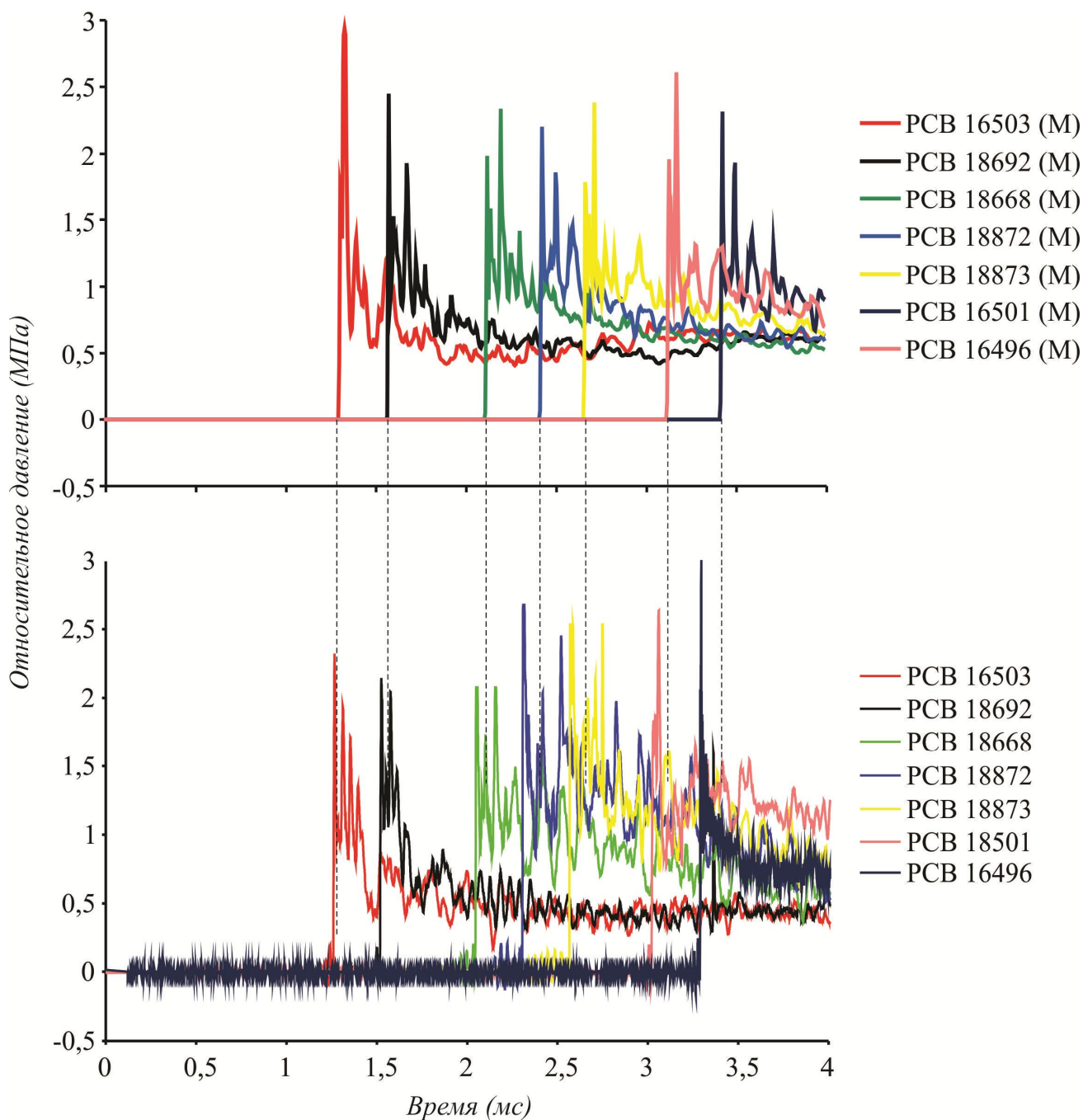


Рисунок 2.14 – Сравнение результатов моделирования (сверху) с экспериментальными данными (снизу)

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными (рис. 2.15), показывает хорошее совпадение полученных результатов. В обоих случаях период распространения ударных волн полностью соответствует полученному экспериментальному значению 5 мс. Количество пробегов волны по камере с учетом стоячих колебаний также полностью соответствует эксперименту. Так, для камеры с

$L = 0,2$ м, $P_0 = 0,1$ МПа количество пробегов составило 18 раз за 6 мс. Для камеры с $L = 0,4$ м, $P_0 = 0,04$ МПа – 11 раз за 7 мс. Вследствие того, что при пробеге скорость волны меняется незначительно [84], средняя скорость распространения ударной волны составляет 1200 м/с, что в среде высокотемпературных продуктов горения составляет $\sim 1,3$ числа Маха. Это значение так же соответствует полученному экспериментально значению средней скорости 1,3 числа Маха [84].

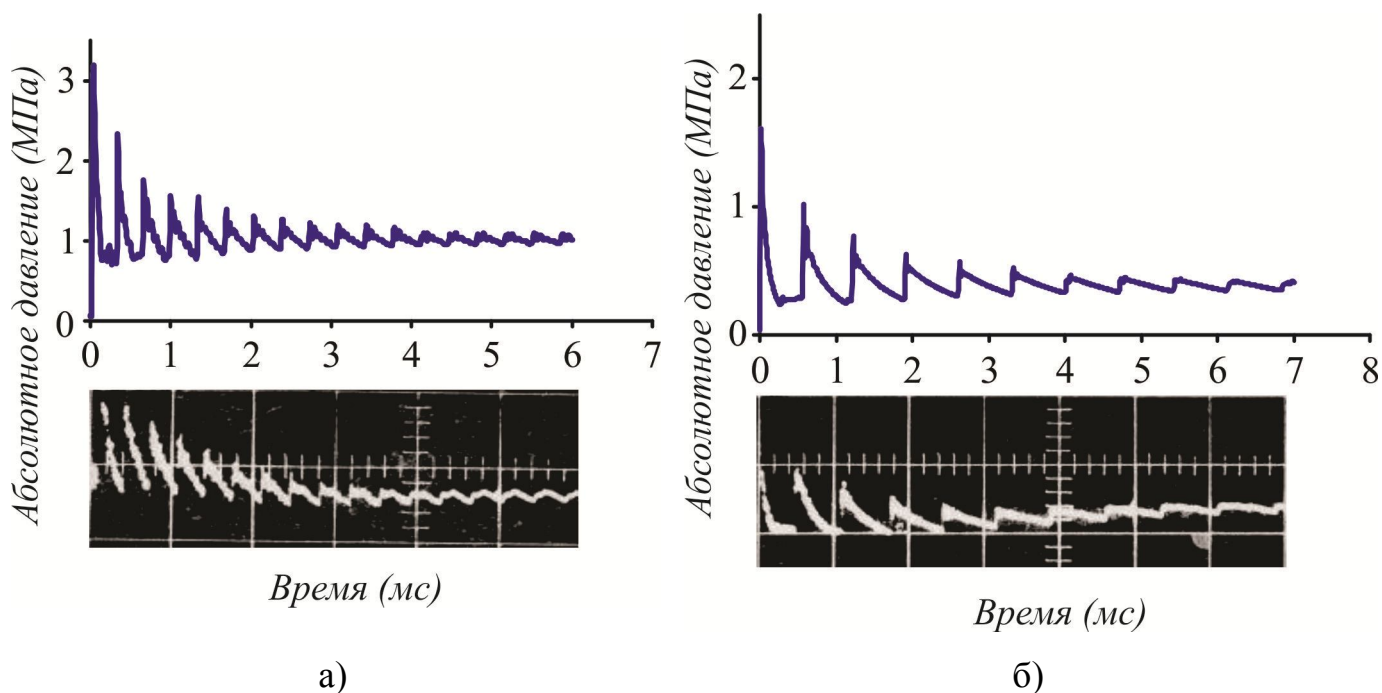


Рисунок 2.15 – Сравнение результатов моделирования для задачи о затухании ударных волн в камере с экспериментальными данными:

а) камера $L = 0,2$ м, $P_0 = 0,1$ МПа; б) камера $L = 0,2$ м, $P_0 = 0,04$ МПа

Следует отметить, что в эксперименте, ввиду медленной развертки, отражения ударной волны от стенок камеры практически незаметны на осциллограмме. Наличие отраженных ударных волн немного просматривается на осциллограмме в опыте с камерой длиной $L = 0,2$ м и начальным давлением $P_0 = 0,1$ МПа. Переходя к разработанной модели, можно считать, что она способна описывать релаксацию за фронтом ударной волны, что видно на полученных при моделировании осциллограммах давления.

Результатам моделирования совпали с данными экспериментов в плане качест-

венного – время затухания ударных волн после детонации в замкнутой камере определяется лишь количеством пробегов волны и не зависит от начального давления. Однако такой вывод был получен для случая, когда в детонационном режиме сгорало 100% смеси, поскольку детонация инициировалась в трубке за пределами камеры.

Таким образом, по результатам сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, можно утверждать, что разработанная математическая модель адекватно описывает процессы затухания ударных волн после детонации в камере и может быть использована для расчетов режимов при термоимпульсной обработке.

На последующем этапе исследований было проведено численное моделирование процесса перехода горения от дефлаграционного распространения к тепловому взрыву. Именно этот случай реализуется в промышленных установках для термоимпульсной обработки.

Считалось, что перед зажиганием в камере находится неподвижная гомогенная смесь, с массовой концентрацией топлива в соответствии со стехиометрическим соотношением. Для численного исследования поставленной задачи использована описанная выше модель, основанная на применении системы уравнений Навье-Стокса. Для адекватного моделирования перехода между различными режимами горения, сетку конечных элементов измельчали в наиболее вероятных местах возникновения взрывного сгорания, а также в зоне поджога смеси.

Моделирование было выполнено для случаев горения метано-воздушных и метано-кислородных стехиометрических смесей с различным начальным давлением. В ходе моделирования определяли значение давления в камере сгорания в ходе сгорания топливной смеси и при затухании ударных волн в случае возникновения теплового взрыва. Диаграммы, полученные при различных начальных давлениях, показаны на рис. 2.16.

Зависимость времени затухания ударных волн от начального давления в камере приведена на рис. 2.17, а. На графике видно, что при увеличении начального давления в камере сгорания время затухания ударных волн монотонно увеличивается.

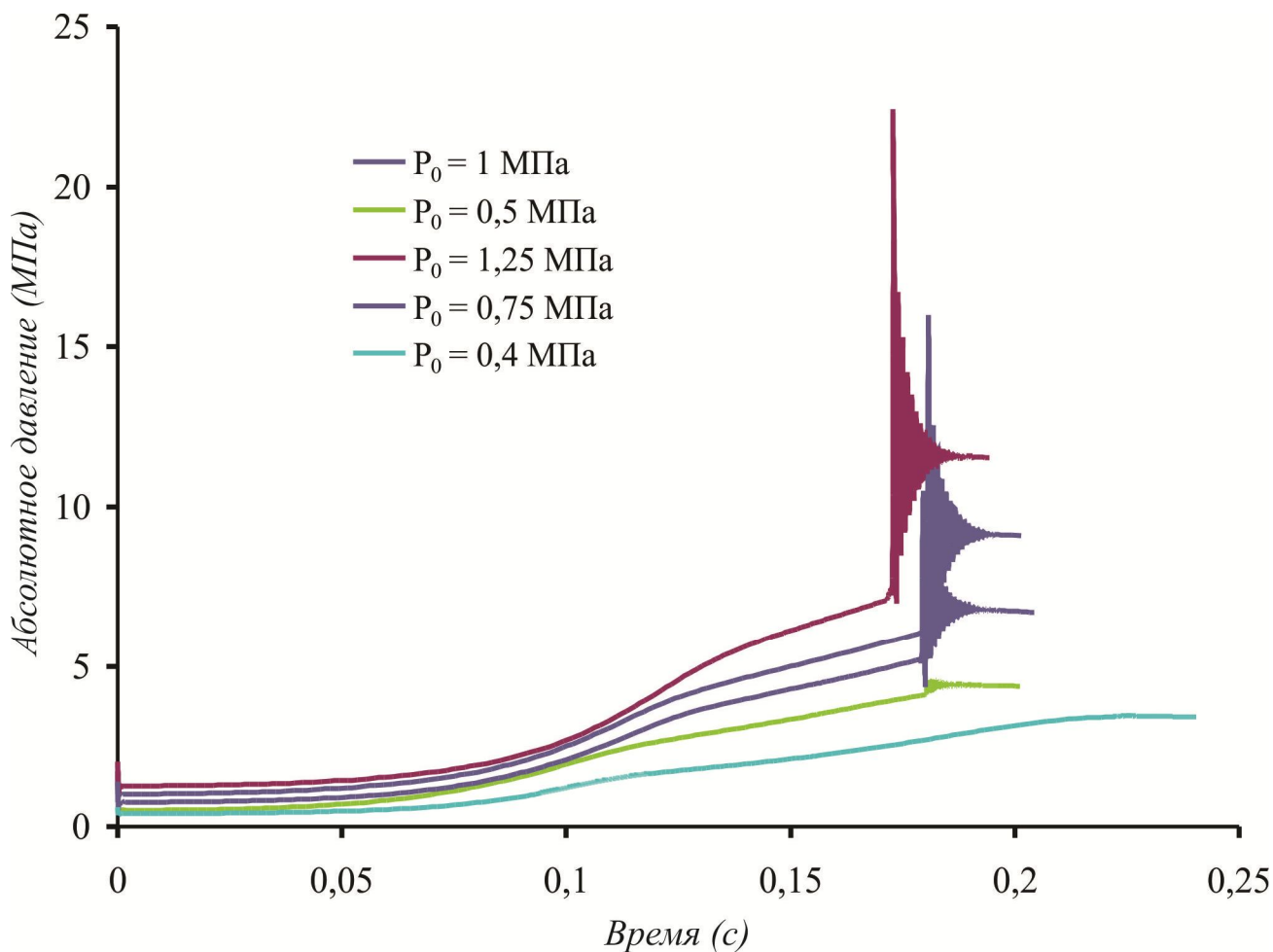


Рисунок 2.16 – Диаграммы давления при горении метан-воздушной смеси в камере сгорания термоимпульсного оборудования

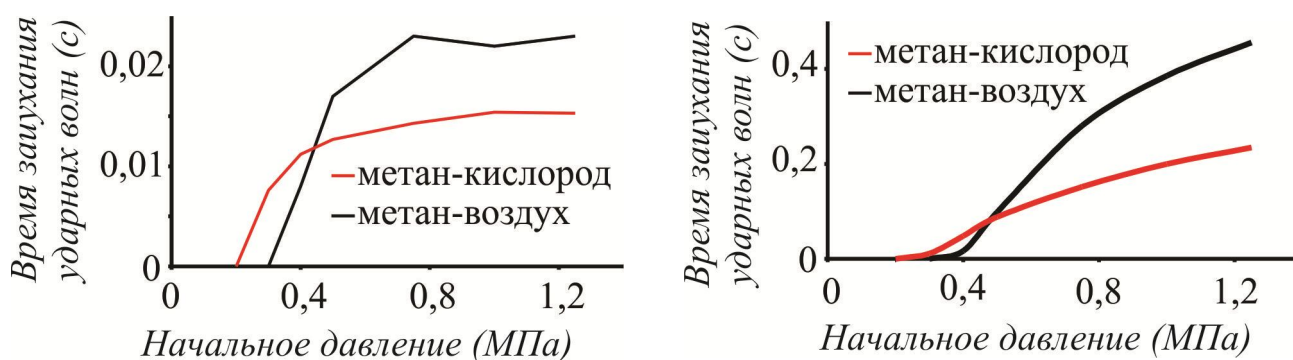


Рисунок 2.17 – Влияние начального давления смеси и ее состава на параметры сгорания: а) время затухания ударных волн; б) относительная массу заряда, сгорающая в режиме теплового взрыв

При $P_0 = 0.8$ МПа (для метан-воздушной смеси) и $P_0 = 1$ МПа (для метан-кислородной смеси) и более, выходит на практически постоянный уровень, своеобразную «полку», где время затухания УВ составляет 0,023 с и 0,015 с для смесей метан-воздух и метан-кислород соответственно. Дальнейшее повышение начального давления на величину времени затухания ударных волн не влияет.

Этот результат расходится с описанными выше экспериментальными данными, полученными в Институте гидродинамики СО РАН. Его можно объяснить следующим образом. В случае перехода дефлаграционного горения в тепловой взрыв во взрывном режиме сгорает только часть смеси. о некоторого начального давления смеси тепловой взрыв не происходит и вся смесь сгорает в режиме дефлаграционного горения (для рассмотренного случая это происходило до начального давления 0,3 МПа).

При увеличении давления происходит тепловой взрыв части смеси, наиболее удаленной от точки поджига. Для рассмотренного случая точка поджига располагалась на оси камеры, поэтому тепловой взрыв происходил в углах камеры вблизи противоположной торцевой стенки. Возникающие при этом ударные волны частично гасились при интерференции.

При дальнейшем увеличении начального давления тепловой взрыв происходил в некоторой части объема камеры, расположенного вблизи всей торцевой стенки, противоположной месту инициации горения. Ударная волна, которая образовывалась при этом имела практически плоский фронт, что соответствовало случаю, который исследовался в экспериментальных работах, проведенных в Институте гидродинамики СО РАН [84, 85]. В этом случае основным механизмом затухания ударной волны является энтропийное затухание, связанное с дисперсией ударной волны при ее прохождении в камере. Этот процесс связан с физическими свойствами продуктов сгорания и практически не зависит от начального давления смеси.

Массой заряда, сгоравшей в режиме теплового взрыва при моделировании считалась масса несгоревшей топливной смеси непосредственно перед переходом во взрыв. Более наглядной с точки зрения оценки является относительная масса топливной смеси показывающая, какая часть от начального количества смеси сгорела во

взрывном режиме (рис. 2.17 б), которую определяли по формуле:

$$\bar{m}_3 = \frac{m_3}{m_0},$$

где \bar{m}_3 – относительная масса заряда; m_3 – масса заряда, сгорающая в режиме теплового взрыва кг; m_0 – начальная масса топливной смеси, кг.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.2. Согласно результатам моделирования, при начальном давлении менее 0,3 МПа, перехода к взрывному сгоранию не происходит, и вся смесь сгорает в обычном режиме. При этих условиях теплоотвод через стенки камеры препятствует накоплению достаточного количества избыточной теплоты, достаточной для перехода во взрывного сгорания топливной смеси.

Таблица 2.2

Относительная масса заряда, сгорающая в режиме теплового взрыва

P_0 , МПа	m_3 , кг		m_0 , кг		\bar{m}_3	
	CH_4 +возд.	CH_4+O_2	CH_4 +возд.	$CH_4+ O_2$	CH_4 +возд.	$CH_4+ O_2$
0,2	0	0	0	0	0	0
0,3	0	0,0000155	0	0,00141	0	0,011
0,4	0,001	0,00009	0,061	0,00188	0,016393	0,047872
0,5	0,00748	0,000207	0,0762	0,00235	0,098163	0,088
0,75	0,032	0,000534	0,114	0,00352	0,280702	0,151705
0,1	0,0586	0,00094	0,152	0,0047	0,385526	0,2
1,25	0,0866	0,00138	0,19	0,00588	0,455789	0,234694

Таким образом, при численном моделировании с использованием описанной выше математической модели возможно определение главных характеристик оборудования для термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями – величины тепловых потоков и времени затухания ударных волн. Однако, как уже было сказано, проведение таких сложных расчетов для каждого производственного случая нецелесообразно. Поэтому для практических целей было предложено использовать

подход, связанный с моделированием сгорания в эквивалентной камере.

2.3.3 Применение эквивалентной камеры сгорания для расчета времени затухания ударных волн при термоимпульсной обработке

Основное преимущество применения интегрированных CAD/CAE систем состоит в их универсальности, то есть возможности решать практически любые задачи. Используя сетку конечных элементов, можно описать область любой формы, при этом в необходимых зонах можно увеличить плотность расчетной сетки, чтобы повысить точность решения задачи. Тем не менее, у метода конечных элементов есть и недостатки, главный из которых – это длительное время решения задач, которое может существенно увеличиваться при измельчении сетки, усложнении постановки задачи и т.д. Это, в свою очередь, требует больших вычислительных ресурсов, которые есть далеко не в каждой отечественной научно-исследовательской лаборатории, не говоря уже о серийных заводах.

Для повышения эффективности численного моделирования затухания ударных волн в камере сгорания термоимпульсного оборудования предложен переход к эквивалентной камере сгорания. Суть подхода заключается в том, что камера сгорания, с расположенной в ней деталью, заменена пустой, эквивалентной камерой (рис. 2.18).

Критерием эквивалентности перехода являются следующие выражения:

$$\begin{aligned} H_{\text{экв}} &= H_{\text{кам}}, \\ V_{\text{экв}} &= V_{\text{кам}} - V_{\text{дет}}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

где $H_{\text{экв}}$ и $V_{\text{экв}}$ – высота и объем эквивалентной камеры сгорания; $H_{\text{кам}}$ и $V_{\text{кам}}$ – высота и объем оригинальной камеры сгорания; $V_{\text{дет}}$ – объем детали.

Целью такого перехода является соблюдение геометрической эквивалентности, при которой объем топливной смеси в камере сгорания с учетом коэффициента заполнения деталями равен объему эквивалентной камеры сгорания. Так же неизменной оставалась высота камеры, для соблюдения идентичности максимальной длины пробега ударных волн при их затухании.

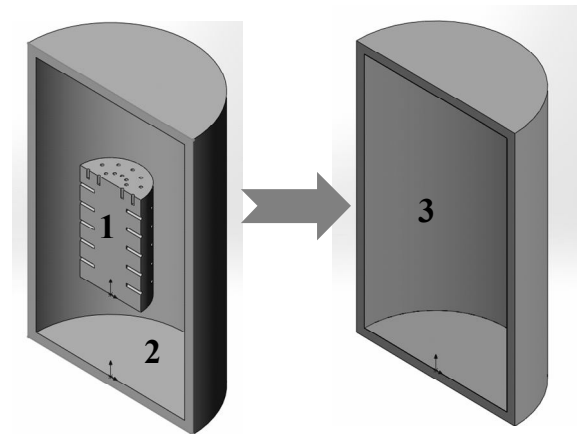


Рисунок 2.18 – Переход к эквивалентной камере сгорания:
 1 – обрабатываемая деталь; 2 – оригинальная камера сгорания;
 3 – эквивалентная камера сгорания

В тестовой задаче рассматривались случаи горения метан-воздушной и метан-кислородной смеси в камере высотой $H_{кам} = 0,44$ м и диаметром $D = 0,28$ м. Внутри камеры сгорания размещены детали разного объема, которые соответствовали коэффициенту загрузки камеры в диапазоне 0,03...0,2.

Целью численного исследования было сравнение времени затухания ударных волн при горении в обеих камерах и оценка влияния на этот параметр наличия деталей. Рассмотрен случай с центрально расположенной деталью для учета различных условий отражения ударной волны вследствие разного расстояния между деталью и стенкой камеры. Сравнение диаграмм давления при горении в исследуемых камерах сгорания изображено на рис. 2.19.

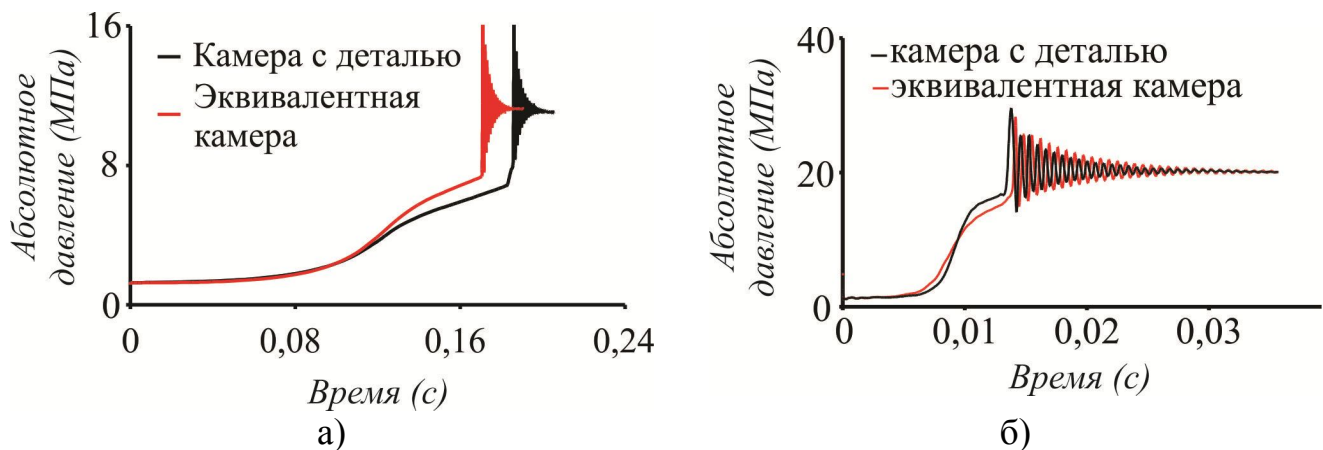


Рисунок 2.19 – Диаграммы давления для случая оригинальной и эквивалентной камеры: а) смесь метан-воздух; б) смесь метан-кислород

Зависимость времени затухания ударных волн от коэффициента загрузки камеры показана на рисунке 2.20. Результаты моделирования показали, что с ростом коэффициента загрузки камеры (k_3), время затухания ударных волн τ сокращается, а отличие времени затухания УВ в камере с деталью ($\tau_3^{кам}$) и эквивалентной камере ($\tau_3^{экв}$) при горении смеси метан-воздух увеличивается с 2,2% до 6,2%, а метан-кислород – от 1,98% до 4,8%. В то же время, суммарное время подготовки к моделированию и проведения расчетов сократилось в 3 раза.

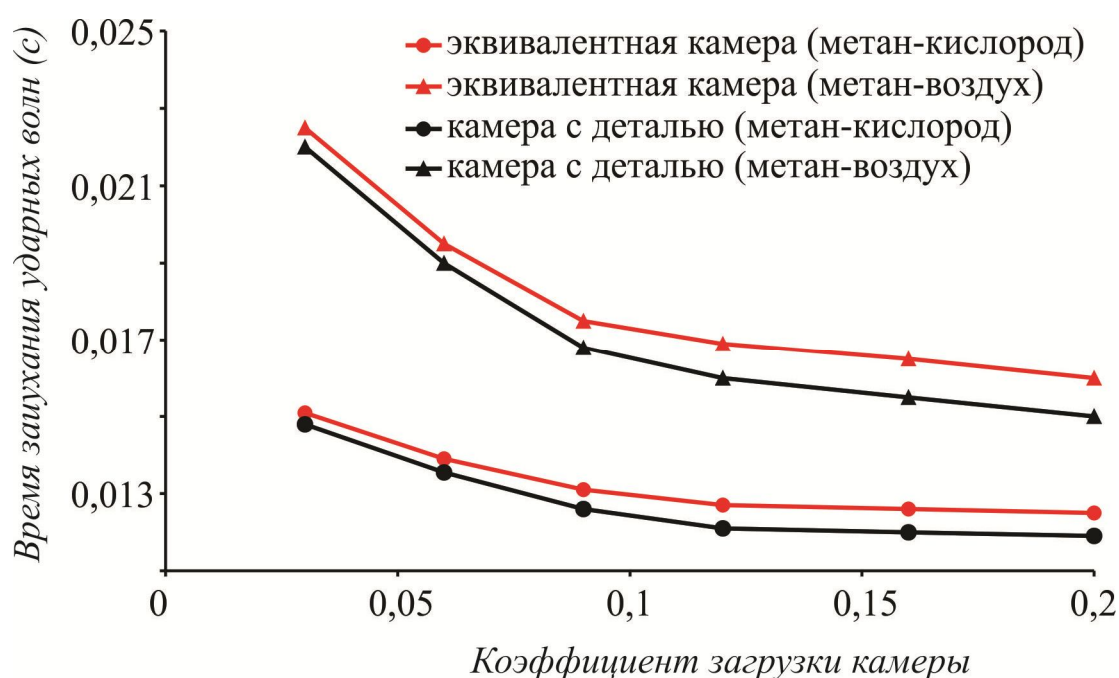


Рисунок 2.20 – Зависимость времени затухания ударных волн от коэффициента загрузки камеры

Таким образом, метод расчета времени затухания ударных волн с применением эквивалентной камеры сгорания может быть использован для расчета режимов термоимпульсной обработки, при этом существенно повышается эффективность численных расчетов вследствие использования упрощенной постановки задачи без учета обрабатываемой детали.

Описанный подход может быть модифицирован для случая расчета осредненных тепловых потоков. Методика расчета энергетических характеристик оборудования для термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями будет

иметь следующую последовательность шагов.

1. Для имеющейся геометрии камеры термоимпульсной машины проводится расчет цикла термоимпульсной обработки для базовой величины рабочего давления. Для учета объема, занимаемого обрабатываемыми деталями, расчет проводится для геометрически подобной пустой камеры при различных значениях коэффициента заполнения $k_3 = 1 - V_{деталей} / V_{камеры}$.

2. При определении средних тепловых потоков и учета потерь энергии при теплообмене продуктов сгорания со стенками для материала стенок задается эквивалентная теплопроводность:

$$\lambda_{камеры}^{экв} = (\lambda_{камеры} S_{камеры} + \lambda_{деталей} S_{деталей}) / S_{камеры}^{экв}.$$

3. По результатам численного эксперимента строятся зависимости величины теплового потока от времени на каждом из этапов рабочего цикла. Зависимости содержат в качестве параметра значения $\lambda_{деталей}$, $S_{деталей}$, $V_{деталей}$. Зависимости осредненных тепловых потоков от времени при других значениях давления смеси пересчитываются по данным моделирования для базового давления по зависимости (2.25).

4. При необходимости обработки деталей, данные, необходимые для расчета тепловых потоков ($\lambda_{деталей}$, $S_{деталей}$, $V_{деталей}$) получают непосредственно из САД системы. Полученные зависимости передают в специализированный модуль САЕ для получения регулировочных характеристик термоимпульсного оборудования.

Для выбора конкретных технологических параметров термоимпульсного оборудования (состава, начального давления смеси и времени обработки) необходимо согласовать их с потребными для удаления ликвидов с поверхностей и кромок обрабатываемых деталей характеристиками.

2.3.4 Методика определения режимов термоимпульсной обработки, необходимых для удаления ликвидов с кромок и поверхностей

При расчете режимов термоимпульсной обработки температурное состояние

детали и удаляемых элементов – это также ключевые параметры. В первых работах , в которых были решены задачи разработки основных принципов задания технологических режимов термоимпульсной обработки [24, 25] разработаны аналитические зависимости для определения полей температур в массиве детали:

$$T(x, y, \tau) = \frac{qm}{2\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi\tau}} \exp\left(-\frac{y^2}{4a\tau}\right) \cdot \left(\operatorname{erf} \frac{\ell-x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell+x}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \frac{qp}{2\ell\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau}} e^{-\frac{y^2}{4a\tau}} \left(\operatorname{erf} \frac{\ell-x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell+x}{2\sqrt{a\tau}}\right) d\tau, \quad (2.27)$$

и в заусенце:

$$T(x, y, \tau) = \frac{aqm}{2lh\lambda} \left(\operatorname{erf} \frac{\ell-x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell+x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \cdot \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-\frac{an^2\pi^2\tau^2}{h^2}} \cos \frac{n\pi y}{h}\right) + \frac{aqp}{lh\lambda} \left[\frac{1}{2} \int_0^{\tau} \left(\operatorname{erf} \frac{\ell-x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell+x}{2\sqrt{a\tau}}\right) d\tau + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \frac{n\pi y}{h} \int_0^{\tau} e^{-\frac{an^2\pi^2\tau^2}{h^2}} \left(\operatorname{erf} \frac{\ell-x}{2\sqrt{a\tau}} + \operatorname{erf} \frac{\ell+x}{2\sqrt{a\tau}}\right) d\tau \right], \quad (2.28)$$

где m – доля теплоты, подведенного импульсным источником; p – доля теплоты, подведенная ее источником квазипостоянной мощности; l – длина участка воздействия теплового потока; h – толщина заусенца.

В работе [24] по зависимостям (2.27), (2.28) рассчитывались температурные поля в микрочастице. При этом она считалась связанной с поверхностью, а время удаления ее поверхности определялось по времени полного оплавления. В работе [25] по данным зависимостям определялось распределение температуры в заусенце.

Решение в виде зависимостей (2.27), (2.28) было получено при следующих допущениях. Заусенец представлялся в виде пластины постоянной толщины, выступающей из детали (рис. 2.21). Механизмом удаления заусенца считалось оплавление.

При продолжении пластины вглубь детали и пренебрежении теплоотводом по

поверхностям, выделенным на рис. 2.21 пунктиром, задача сводилась к расчету поля температур для плоской задачи нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right).$$

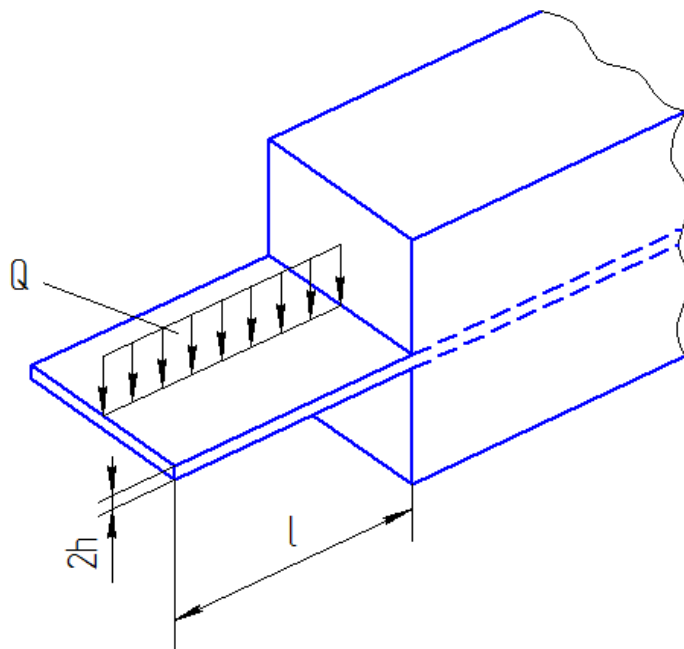


Рисунок 2.21 – Физическая модель детали с заусенцем [25]

Задача расчета температур в заусенце представлялась в виде суперпозиции двух задач: задачи о действии на поверхности заусенца мгновенного теплового потока и задачи о действии стационарного теплового потока. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что для низких давлений смеси (до 0,65 МПа) заусенец в импульсном режиме воспринимает 70...80% тепла, при средних (до 1 МПа) 80...90%, а при высоких 85...90% [25].

Задача решалась для полубесконечной пластины, изображенной на рис. 2.22 со следующими условиями:

– для нагрева мгновенным потоком

$$T(x,y,0) = 0, \quad \frac{\partial T(0,y,\tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(x,0,\tau)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T(x,h,\tau)}{\partial x} = -\frac{mQ\delta TP(x)}{\lambda},$$

– для нагрева постоянным потоком

$$T(x,y,0) = 0, \quad \frac{\partial T(0,y,\tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(x,0,\tau)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T(x,h,\tau)}{\partial x} = -\frac{(1-m)QP(x)}{\lambda},$$

где Q – тепловой поток; α, λ – температуропроводность и теплопроводность материала детали; δ – дельта функция Дирака; m – доля тепла, выделившаяся в импульсном режиме; $P(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [0, l]; \\ 0, & \text{при } x \in (l, \infty). \end{cases}$

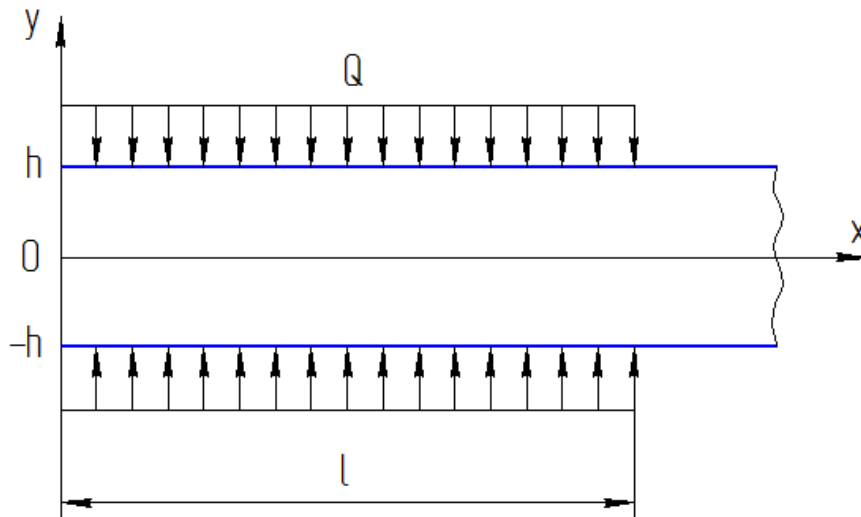


Рисунок 2.22 – Расчетная схема для определения полей температур в заусенце [25]

Решение, полученное таким образом, обладает недостатками, присущими решениям, получаемым методами мгновенных источников – в начальный момент времени температура поверхности не определена. Погрешность определения температуры сохраняется и в моменты времени, близкие к нулю.

Данное решение получено в предположении независимости теплофизических характеристик материала от температуры. Кроме того, изменение энтальпии при фазовом переходе также не учитываются.

Дополнительными недостатками модели являются: постоянная геометрия расчетной области, не учитывающая оплавления заусенца, и невозможность моделирования скругления кромки из-за отсутствия подвода тепла на части границы, превышающей высоту заусенца.

Тем не менее, аналитические решения, полученные в работе [25], позволили

впервые разработать методику назначения режимов термоимпульсной обработки.

Для устранения перечисленных выше недостатков модель оплавления заусенца была усовершенствована следующим образом.⁵ Для изучения влияния конструктивных особенностей детали на характеристики кромки после термоимпульсной обработки предусмотрена возможность изменения угла кромки α (рис. 2.23). В модернизированной схеме был учтен подвод тепла по торцу заусенца.

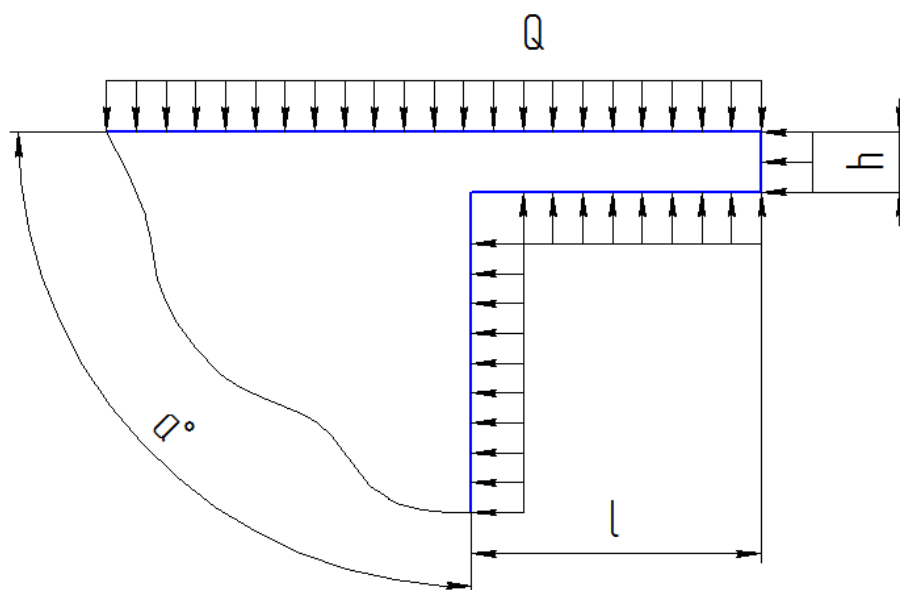


Рисунок 2.23 – Модернизированная расчетная схема определения температур в заусенце

При расчете учитывались реальные зависимости теплопроводности и теплоемкости материалов от температуры и скрытая теплота плавления при фазовом переходе. Решение такой задачи возможно только численным методом. В настоящей работе для получения результатов применялся вычислительный пакет ANSYS CFX.

Зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости при нагреве стали 30X13 приведены на рис. 2.24. Для этой стали коэффициент теплопроводности при достижении температуры 700°C изменяется только на 5%, но коэффициент теплоемкости увеличивается почти в 2 раза по сравнению со свойствами при нормальных условиях. Учёт изменения теплофизических свойств с увеличением темпе-

⁵ Численное моделирование задачи проводилось Палазюком Е.С.

ратуры позволит получить более адекватный результат при численном решении данной задачи.

В случае задания теплопроводности и теплоемкости как функций от температуры наблюдаются существенные отличия в значениях температуры заусенца по сравнению с данными, полученными по зависимости (2.27).

Если при действии теплового источника в течение 0,001 с разность температур составляет 3 %, то через 0,005 с она уже достигает 34 %. С дальнейшим увеличением времени действия источника тепла эта разность постепенно увеличивается. Поэтому использование постоянных значений теплофизических свойств материалов может приводить к существенной погрешности полученных результатов и, как следствие, заданию неправильных режимов обработки (рис. 2.25).

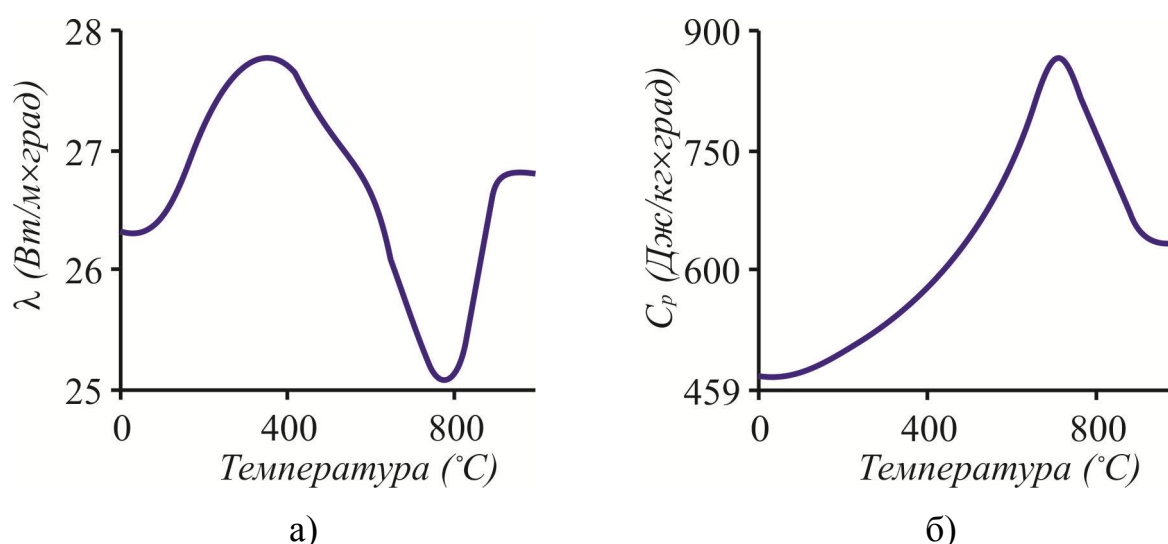


Рисунок 2.24 – Теплофизические свойства стали 30X13:

а) коэффициент теплопроводности λ ; б) коэффициент теплоемкости C_p

Обработка кромок деталей представляет собой важный процесс производственного цикла и включает в себя не только операцию очистки от заусенцев, но также притупление кромок произвольным радиусом и размерное округление.

Картина оплавления рассматриваемого заусенца, полученная при использовании модернизированной расчетной схемы определения температур, показана на рис. 2.26. При полном оплавлении заусенца кромка неизбежно притупляется с определенным радиусом.

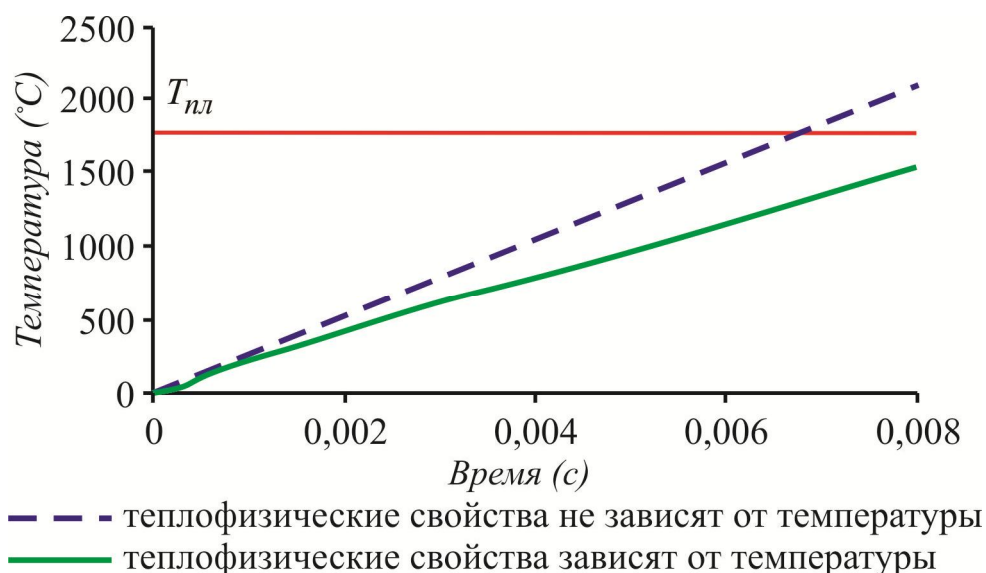


Рисунок 2.25 – Температура среднего ($h = 0$) слоя заусенца по времени

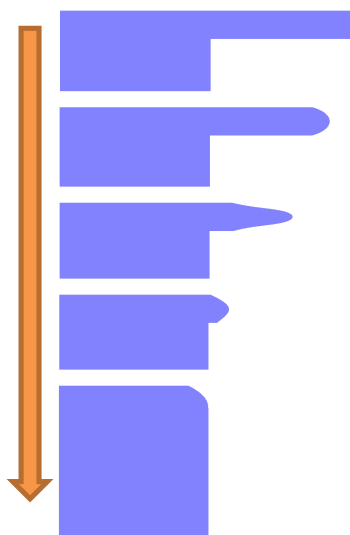


Рисунок 2.26 – Картина оплавления заусенца и скругления кромки детали

Дальнейшее усовершенствование расчетной модели удаления заусенцев при термоимпульсной зачистке должно происходить по следующим направлениям. Данные работы [80] показывают необходимость учета тепла химических реакций при взаимодействии продуктов сгорания с материалом заусенца. Такой учет необходим при применении топливных смесей с избытком кислорода, особенно для материалов, у которых температура воспламенения ниже температуры плавления (например, магниевых и титановых сплавов).

Кроме интенсивного нагрева во время распространения ударных волн заусенцы

подвергаются существенному динамическому воздействию. Так, по данным работы [86], при детонации метано-кислородной смеси максимальная интенсивность детонационной волны растет с повышением давления смеси. При начальном давлении смеси 1 МПа, являющимся обычным для термоимпульсной обработки, она составляет 22 МПа. Интенсивное термомеханическое воздействие может приводить к отрыву заусенцев.

Таким образом, при создании математической модели удаления заусенцев при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями необходимо учитывать такие возможные механизмы: оплавление заусенца и отрыв жидкого металла ударными волнами; сгорание заусенца при обработке смесями с избытком кислорода; хрупкое скалывание заусенца, вызванное термическим разупрочнением и динамическим воздействием ударных волн.

Методика назначения режимов термоимпульсной очистки от микрочастиц может также проводиться по результатам численного моделирования. Рассмотрим поведение микрочастицы на гладкой и шероховатой поверхностях. При анализе будем считать микрочастицу сферической (рис. 2.27) с диаметром менее 100 мкм. Частицы большего диаметра будем относить к макрочастицам, имея в виду, что их вес намного больше силы адгезии. При термоимпульсной очистке в качестве предварительных операций применяются обезжиривание, промывка и сушка деталей. Поэтому, пренебрегая электростатическими силами, будем считать, что в исходном состоянии перед очисткой на частицы действуют силы адгезии, тяжести, трения и силы термоупругого расширения при прохождении ударной волны⁶

Для случая частицы на горизонтальной поверхности в горизонтальной плоскости на частицу действует сила давления и сила трения, а в вертикальной – сила веса, подъемная сила (сумма аэродинамических сил) и сила адгезии.

$$F_x = F_{\text{лоб}} - F_{\text{тр}} = F_{\text{лоб}} - \mu(F_{\text{ад}} + G), \quad (2.29)$$

$$F_y = F_{\text{под}} - F_{\text{ад}} - G + F_{\text{упр}}. \quad (2.30)$$

⁶ Численное моделирование задачи проводилось Козловым В.Г.

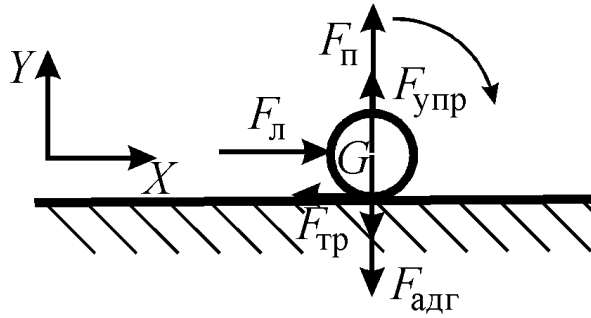


Рисунок 2.27 – Силы, действующие на микрочастицу на поверхности

Условия, при котором возможен перенос частицы в горизонтальной плоскости скольжением, волочением или перекачиванием выразится следующим неравенством:

$$F_{\text{лоб}} - \mu(F_{\text{ад}} + G) > 0, \quad (2.31)$$

где μ – коэффициент трения; $F_{\text{ад}}$ – силы адгезии частиц к поверхности; $F_{\text{лоб}}$ – аэродинамическая сила давления (лобовая сила); $F_{\text{тр}}$ – сила трения; G – вес частицы.

Условия, при котором возможен унос частиц с поверхности, выразятся неравенствами:

$$F_{\text{под}} - G - F_{\text{ад}} + F_{\text{упр}} > 0. \quad (2.32)$$

Сила адгезии считалась кратной массе микрочастицы и задавалась кратной силе тяжести $F_{\text{ад}} = kG$, где коэффициент k зависит от материала частицы и подложки, размера частицы и состояния поверхности. С уменьшением размера частиц величина данного коэффициента возрастает так, что силы адгезии могут на порядок превышать силу тяжести. Конкретные значения данного коэффициента при расчетах выбирались исходя из рекомендаций работ [87, 88].

При моделировании отрыва частицы от поверхности следует учитывать сильную зависимость сил адгезии от расстояния между частицей и поверхностью. Поэтому при моделировании движения частицы после начала отрыва, который фиксировался возникновением положительной компоненты скорости частицы по оси OY , сила адгезии считалась равной нулю.

Решаемая задача была разделена на две части:

1. Моделирование поведения частицы на участке разгона и ее отрыва с поверхности детали. Здесь применялся Эйлер-Эйлеров подход с постоянными сетками.

2. Моделирование поведения частицы в движущемся потоке с использованием 6DOF решателя и применением Лагранжевых перестраивающихся сеток.

Переключение между типами сеток при решении задачи производилось автоматически при отрыве микрочастицы от поверхности. Момент отрыва фиксировался исходя из условия $v_y > 0$.

Пример реализации применения цикла перестройки сетки КЭ для рассматриваемой задачи показан на рис. 2.28. При решении поставленной задачи в качестве контрольного параметра выступал минимальный угол элемента сетки КЭ по всей расчетной области.

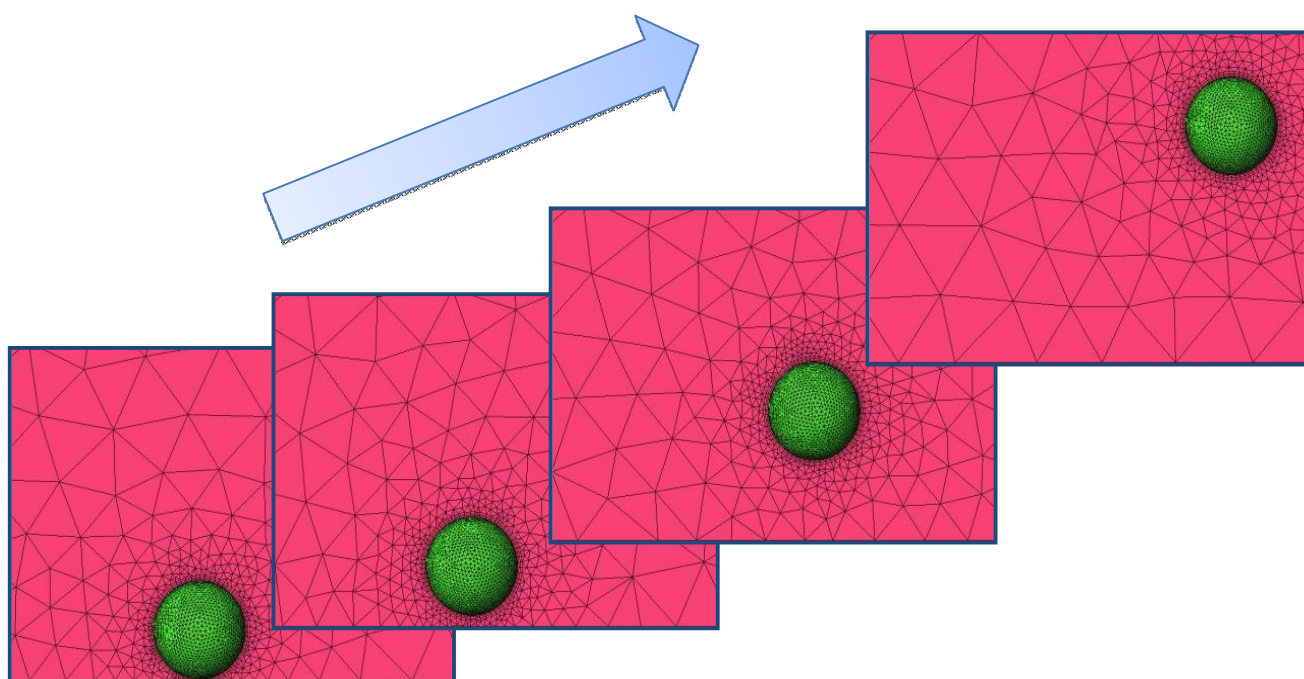


Рисунок 2.28 – Реализация цикла с перестроением сетки конечных элементов

Подключение цикла перестройки сетки производилось при появлении в расчетной области элемента с углом при вершине менее 30° . После чего производилось перестройка сетки и расчет продолжался на новой сетке, куда после интерполяции результатов с предыдущей сетки подгружались начальные условия для дальнейших вычислений.

Численное моделирование отрыва частицы проводилось для случаев с диаметром частиц 10, 20, 30, 40 и 50 мкм. Для каждого случая определялось время отрыва (рис. 2.29) и длина участка разгона (рис. 2.30).

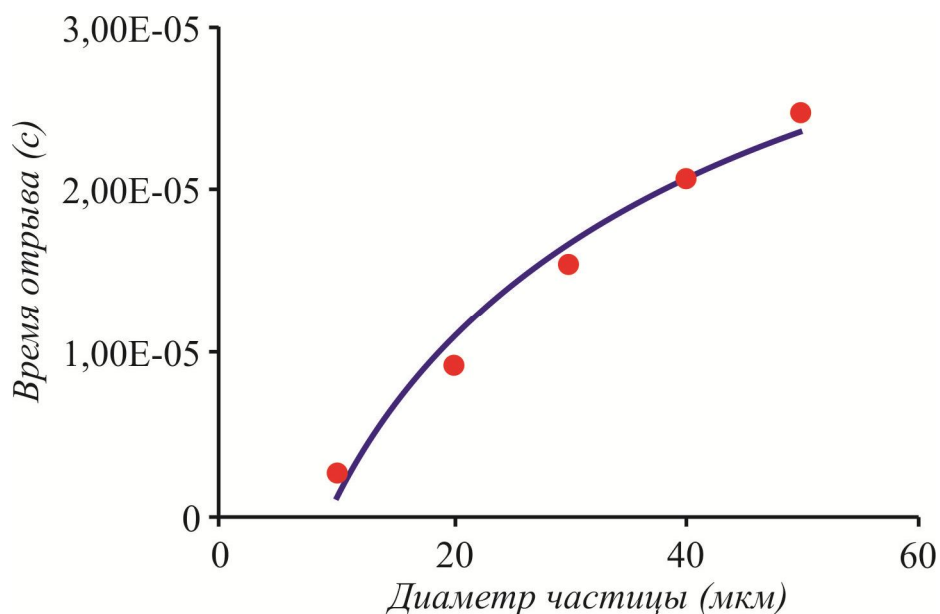


Рисунок 2.29 – Зависимость времени отрыва от размера частицы

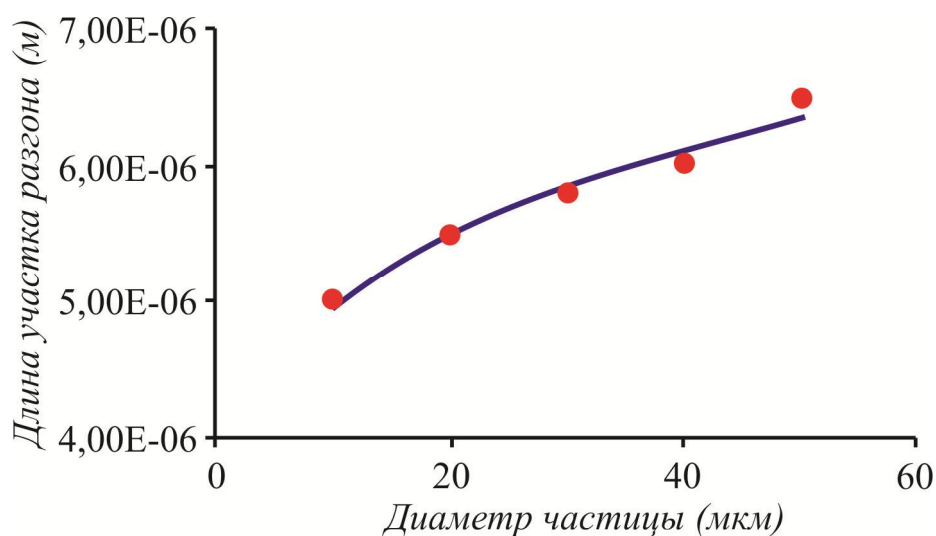


Рисунок 2.30 – Зависимость длины участка разгона от диаметра частицы

Окончательное удаление микрочастиц из камеры сгорания происходит в газовой фазе. Это означает, что металлические частицы должны быть доведены до температуры сгорания в кислороде, а неметаллические - доведены до испарения. Поэтому анализ температурного состояния частицы на момент ее отрыва от по-

верхности является одним из ключевых параметров для назначения правильных режимов термоимпульсной обработки.

Интенсивность нагрева частиц существенно зависит от характера течения у ее поверхности. Поэтому задача решалась в постановке связанной с обтеканием частиц, для адекватного описания тепловых потоков через поверхность удаляемого элемента. Интенсивность нагрева частиц в зависимости от времени, показана на рис. 2.31.

При моделировании не использовалась модель мультифазных превращений при плавлении частицы. Зависимость изменения температуры частиц от времени показана на рис. 2.32. Анализ результатов показывает, что на момент отрыва ни одна частиц не достигла температуры плавления и была унесена с поверхности в твердом состоянии. Это меняет представления о механизме удаления микрочастиц при термоимпульсной очистке.

Время термоимпульсной очистки должно назначаться как сумма времени, необходимого для отрыва микрочастиц заданного размера от поверхности и их перехода в газовую фазу в ходе теплообмена с продуктами сгорания в ядре потока. Суммарное время обработки должно быть меньше времени затухания ударных волн.

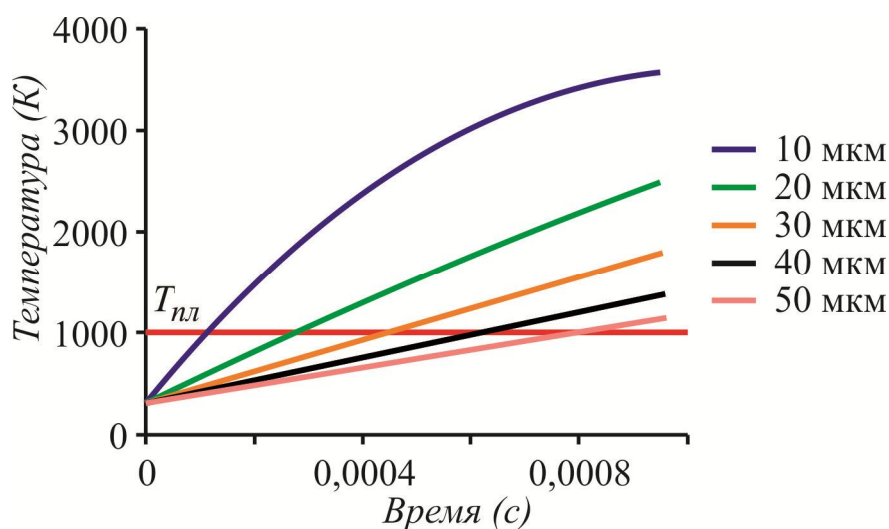


Рисунок 2.31 – Интенсивность нагрева частиц различного диаметра

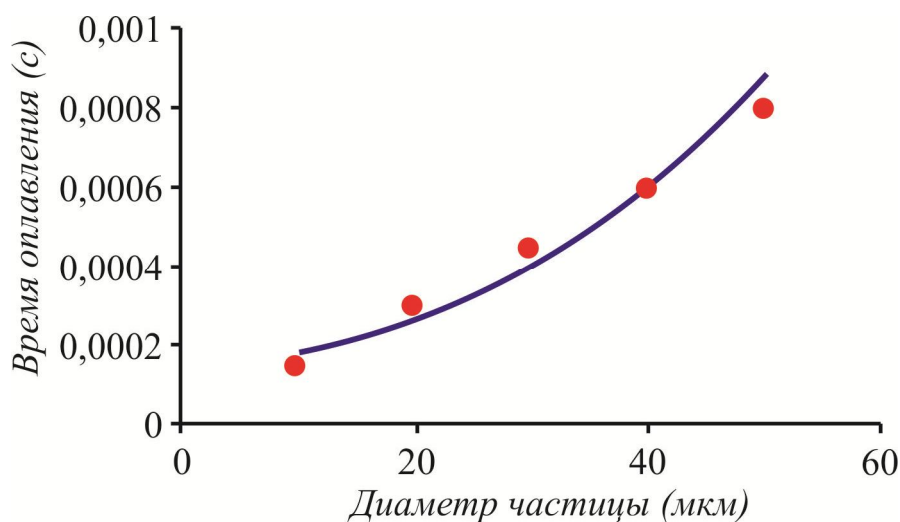


Рисунок 2.32 – Зависимость времени оплавления от диаметра частицы

Таким образом, назначение технологических режимов термоимпульсной отделки и очистки должно вестись на основе согласования энергетических характеристик оборудования (величины тепловых потоков и времени их действия) и аналогичных величин, необходимых для удаления ликвидов заданного размера с поверхностей и кромок деталей. На основе численного эксперимента с помощью САЕ-систем могут быть получены регулировочные кривые, при помощи которых можно определить основные параметры термоимпульсной обработки – величину тепловых потоков и время затухания ударных волн – в зависимости от состава и начального давления смеси.

Далее на основе математических моделей финишной термоимпульсной обработки с учетом данных о величине ликвидов, подлежащих удалению, рассчитывается время их удаления. Расчетное время удаления сопоставляется со временем затухания ударных волн, после чего производится выбор характеристик топливной смеси в случае, если удаление ликвидов возможно за один рабочий цикл, или определяется количество циклов термоимпульсной обработки и характеристики топливной смеси для каждого из них. Блок-схема алгоритма автоматизированного расчета режимов термоимпульсной обработки приведена на рис. 2.33.

Неотъемлемой частью выбора режимов обработки является определение требований к приспособлению, поскольку оно влияет на загрузку камеры и имеет поверхность теплоотвода.

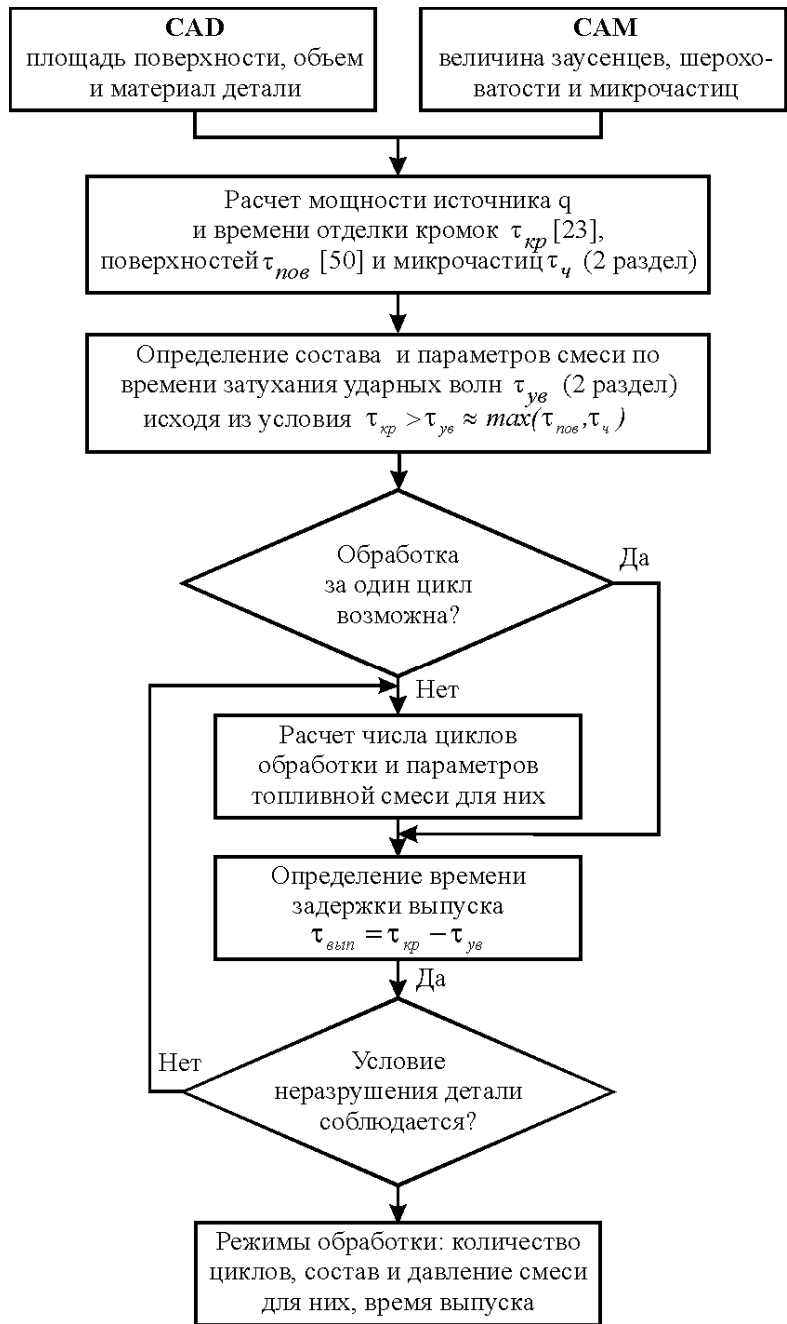


Рисунок 2.33 – Алгоритм расчета режимов термоимпульсной обработки

2.4 Проблемы дозирования и смесеобразования при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями⁷

Известны исследования в области смесеобразования в камерах сгорания применительно к ДВС [89, 90, 91, 92]. В том числе известны работы по математическому моделированию этих процессов [93, 94, 95, 96, 97].

⁷ При подготовке материалов раздела использовались результаты работ Борисовой О.С.

Однако процессы смесеобразования в камерах термоимпульсных машин существенно отличаются от аналогичных процессов в ДВС. Это, в частности, вызвано следующими причинами:

- большой объем камеры сгорания в термоимпульсных машинах (до 100 л);
- наличие в камере сгорания деталей сложной формы, влияющих на картину течения газов;
- отсутствие цикла сжатия в камере сгорания термоимпульсной машины.

Поэтому процессы наполнения и смесеобразования в термоимпульсных машинах требуют специального изучения.

Исторически создание термоимпульсного оборудования было связано с развитием тематики научно-исследовательских работ в области создания импульсных машин с газоздушным приводом, проводившихся в Харьковском авиационном институте под руководством В.Г. Кононенко. В ходе этих работ были созданы машины для импульсной резки горячего и холодного металла, брикетирования стружки, объемной штамповки [98, 99, 100]. При создании этих машин на самом начальном этапе встал вопрос о выборе способа смесеобразования в камере.

Рассматривалась возможность создания привода с внешним или с внутренним смесеобразованием. В первом случае было необходимо создание смесеобразующей аппаратуры, способной работать при давлениях до 5 МПа, что на время начала указанных работ (1960-е годы) являлось сложной технической задачей.

Вариант с подачей в камеру сгорания готовой смеси из промежуточного ресивера, наполняемого последовательно газом и воздухом до нужного состава, был отброшен по соображениям техники безопасности.

Поэтому в дальнейшем рассматривались три возможных варианта наполнения камеры сгорания импульсных машин:

- одновременная подача газа и воздуха. Для этого было необходимо обеспечить равенство давлений компонентов смеси и создать специальные дозирующие устройства для выдержки их соотношения;
- подача воздуха с последующим впрыском сжатого газа. Этот способ требо-

вал применения насос-форсунок для сжатого газа и не гарантировал качественного смесеобразования;

- подача газа низкого давления с последующим впрыском сжатого воздуха.

В этом случае для впуска газа не требуется никакой специальной аппаратуры, кроме обычных впускных клапанов, а последующий выпуск сжатого воздуха обеспечивает перемешивание компонентов.

Поскольку создание дозирующих устройств, необходимых для первого способа на время начала работ по созданию импульсных машин было связано с серьезными трудностями, при разработке и проектировании энергоузлов импульсных машин за основу был принят последний способ, с последовательным наполнением газом и окислителем [101]. Позже этот же способ смесеобразования был использован при создании термоимпульсного оборудования для удаления заусенцев, отделки кромок и очистки поверхностей деталей [24, 25, 102].

Что касается непосредственно смесеобразования, то в большинстве работ, посвященных проектированию привода импульсных машин, исследуемыми показателями являлись:

- эффективная энергия привода внутреннего сгорания;
- удельная эффективная работа, снимаемая с единиц объема энергоузла;
- полный КПД привода.

В работе [98] рассматривались факторы и параметры, которые оказывают влияние на рабочий процесс привода. Такие как характер протекания рабочего процесса, геометрические и энергетические параметры, конструктивные особенности камеры сгорания и режимы работы. Чтобы выявить их влияние на основные показатели привода производился последовательный анализ идеального и расчетного цикла. Для упрощения задачи анализировался идеальный термодинамический цикл.

Для математического описания процесса наполнения камеры сгорания в работе приняты следующие допущения:

- газ идеальный;
- теплоемкость газа постоянная;

- температура стенок ресивера и камеры в процессе наполнения постоянна;
- течение газа в трубопроводе, соединяющей ресивер с камерой, энергоизолировано.

В работе [101] в качестве одной из характеристик смесеобразования рассматривалось распределение скоростей потока воздуха в камере сгорания при наполнении. Для упрощения задачи камера сгорания считалась торообразной, а подача газа считалась тангенциальной к стенке камеры.

Примененный метод аналитического решения не позволял решить систему уравнений Навье-Стокса в общем виде. Поэтому задача расчета полей скоростей решалась при следующих упрощениях:

- задача рассматривалась в двухмерной постановке.
- применялась модель совершенного газа.
- считалось, что газ движется только в окружном направлении.
- процессы теплообмена между газом и стенками камеры сгорания не рассматривались.

Таким образом, также, как и в ранее рассмотренных работах, в работе [101] не учитывалась переменность состава газовой смеси во времени и степень однородности топливной смеси не рассматривалась в качестве характеристики смесеобразования. В работе получены интегральные зависимости давления, температуры и показателя политропы по времени наполнения. Полученные результаты с точностью до 8 – 12% совпадали с экспериментальными зависимостями. Кроме того, было установлено, что при тангенциальной подаче компонент в камере сгорания образуется крупномасштабная турбулентность, обеспечивающая удовлетворительное смешение газа с воздухом.

В работе [103] были получены аналитические зависимости для определения перемещений конструктивных элементов энергопривода импульсной машины для разных конструкций запирающего устройства. Синтезированная математическая модель описывала процесс перемещения рабочего штока, корпуса машины и клапана, а также параметры рабочего тела в камере сгорания и цилиндре расширения.

Для обобщения результатов исследований в [103] были предложены критерии подобия, определяющие идентичность процессов, происходящих в модели или прототипе и разрабатываемой конструкции. Эти критерии связывают энергосиловые характеристики привода с объемами, площадями и массами различных элементов энергопривода. Каких-либо исследований качества смесеобразования автором работы [103] не проводилось.

Таким образом, во всех ранее выполненных исследованиях, посвященных смесеобразованию в камерах сгорания импульсных машин, не исследовалась степень однородности топливной смеси и влияние на нее параметров процесса наполнения. При теоретических выкладках авторами рассмотренных выше работ использованы уравнения Навье-Стокса в двумерной постановке. Такой подход, оправданный для изучения течений в осесимметричной камере, неприменим для анализа смесеобразования в случае расположения в ней деталей сложной формы.

2.4.1 Существующие схемы систем смесеобразования термоимпульсного оборудования

Одним из основных требований к машинам термоимпульсной обработки является необходимость обеспечения стабильности работы и регулирования энергетических параметров машины. Так как давление наполнения камеры сгорания горючей смеси является суммой парциальных давлений компонентов, соотношение которых должно выдерживаться в весьма жестких пределах, приходим к выводу о необходимости специального устройства, обеспечивающего оптимальное соотношение компонентов при надежном смесеобразовании и возможности регулирования [103].

Рассмотрим основные варианты возможных схем газораспределения и топливоподачи. Традиционно, системы дозирования энергии для приводов аperiodического действия, использовавшего энергию сгорания газовых топливных смесей, создавались для машин импульсной резки металла и брикетирования стружки, разработка которых велась в Харьковском авиационном институте, начиная с 60-х годов. При создании таких систем рассматривались варианты реализации как последова-

тельного, так и совместного наполнения компонентами топливной смеси.

Схема системы наполнения при отдельной подаче компонентов в классическом виде показана на рис. 2.34. Газ и воздух посредством клапанов 3 и 4 последовательно подавались в камеру сгорания 7 через установленные в камере обратные клапаны 1 и 2. Энергия машины регулировалась по парциальным давлениям компонентов горючей смеси, измеряемым при помощи манометров 5 и 6 [101].

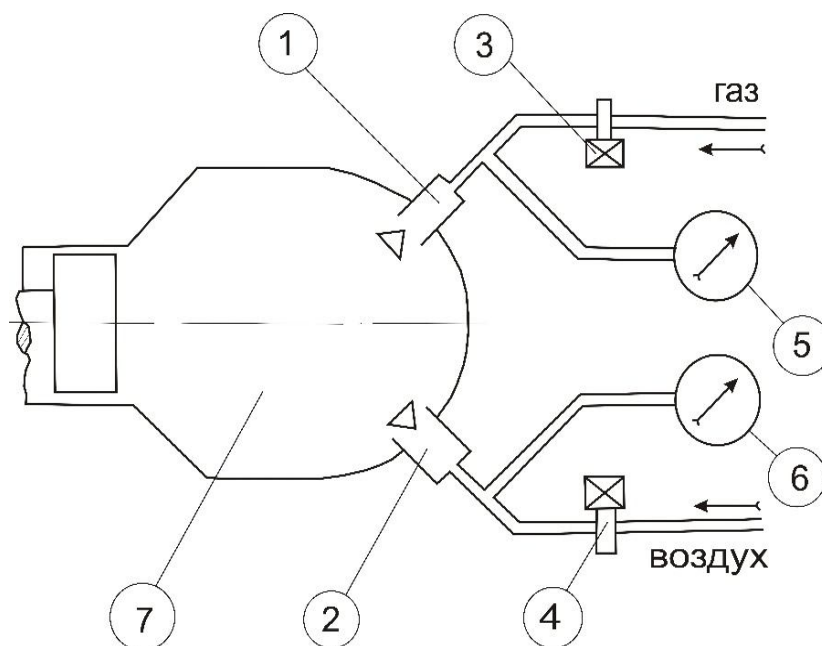


Рисунок 2.34 – Схема последовательного наполнения камеры сгорания

Отбор давления заполняемого компонента перед впускным клапаном привел к большим погрешностям измерения за счет перепада давлений на впускном клапане. Кроме того, такая схема не обеспечивала цикловой стабильности состава смеси. Это потребовало некоторого усложнения представленной схемы.

Модернизированная схема также использовала полностью разделенные магистрали подачи газа и воздуха и имела два впускных клапана 15 и 16 (рис. 2.35). Замер давления подаваемых компонентов производился из камеры сгорания посредством включаемых одновременно с впускными клапанами, дополнительных пневмоклапанов 6 и 9, имеющих отдельный привод 7 и 8, с целью необходимых, в процессе работы машины, контрольных проверок герметичности отдельных магистралей.

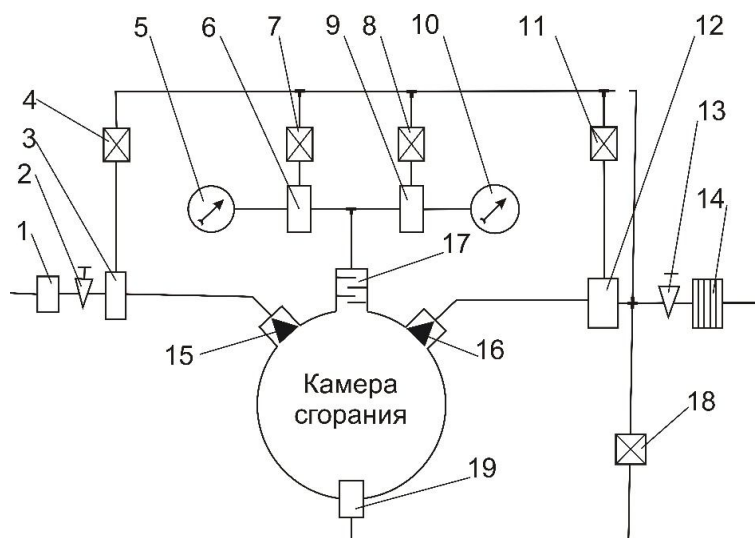


Рисунок 2.35 – Схема с двумя впускными клапанами (внутреннее смесеобразование): 1,14 – фильтры; 2,13 – сетевые вентили; 3,12 – впускные пневмоуправляемые клапаны; 4,11 – электропневмоклапаны управления; 5,10 – манометры; 6,9 – пневмоуправляемые запорные клапаны манометров; 7,8 – электропневмоклапаны управления манометрами; 15,16 – обратные впускные клапаны; 17 – фильтр-пламегаситель; 18 – электропневмоклапан управления продувкой; 19 – продувочный клапан

Отбор давления к манометрам 5 и 10 производился через специальное устройство 17, устраняющее прохождение пламени в трубопроводы и предотвращая тем самым выход из строя арматуры и шлангов за счет выгорания. В схему был также введен декомпрессионный клапан 19, служащий для удаления из камеры остатков продуктов сгорания и продувки камеры холодным воздухом, что в процессе работы от цикла к циклу позволяет поддерживать стабильный состав новой порции горючей смеси. Учитывая все положительные качества этой схемы, следует отметить также, что работа двух впускных клапанов на камере сгорания, подвергающихся значительным инерционным перегрузкам приводила к снижению надежности, что ограничило использование схемы машинами с неподвижным корпусом.

Дальнейшим развитием систем наполнения импульсных машин стала схема с одним впускным клапаном (рис. 2.36). На практике использовалось две основные разновидности схемы, характеризующиеся постановкой впускных клапанов различ-

ной конструкции (с дренажем и без дренажа) и, как следствие, разным количеством разделительных обратных клапанов. Различие модификаций было вызвано разнообразнейшей номенклатурой клапанов, хотя схемы по принципу работы и качеству обеспечения состава смеси идентичны.

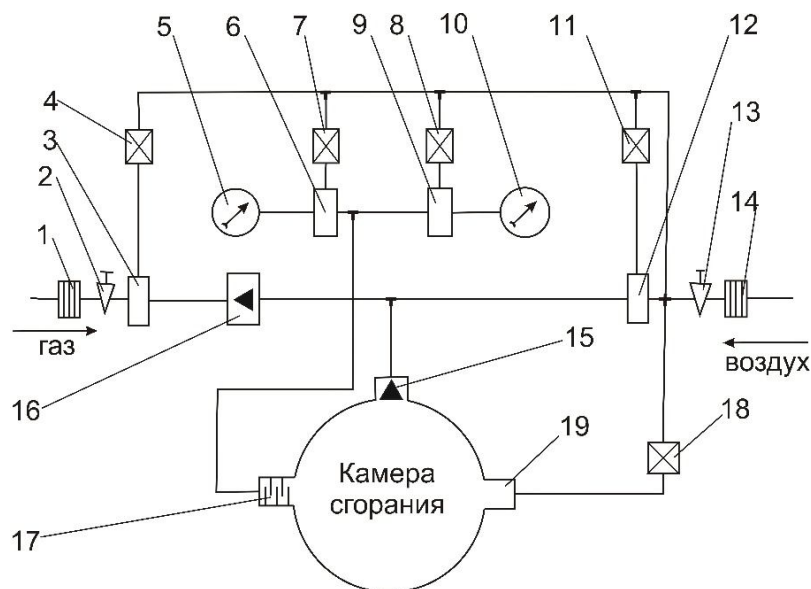


Рисунок 2.36 – Схема с одним впускным бездренажным клапаном:

1,14 – фильтры; 2,13 – сетевые вентили; 3,12 – впускные пневмоуправляемые клапаны; 4,11 – электропневмоклапаны управления; 5,10 – манометры; 6,9 – пневмоуправляемые запорные клапаны манометров; 7,8 – электропневмоклапаны управления манометрами; 15 – впускной обратный клапан; 16 – разделительный обратный клапан; 17 – фильтр-пламегаситель; 18 – электропневмоклапан управления продувкой; 19 – продувочный клапан

Применение бездренажных клапанов приводит к тому, что подводящие трубопроводы и шланги перед обратным клапаном 15 во время рабочего цикла находятся под давлением. Это давало как положительные, так и отрицательные последствия. С одной стороны, наличие противодействия в шланге в значительной мере исключало возможность прогара клапана 15 в процессе работы.

На начальном этапе создания импульсных машин с газоздушным приводом производились попытки создания систем с совместной подачей в камеру компонент топливной смеси. Как было показано выше, это является наиболее подходящим вариантом обеспечения качества смесеобразования, которое в значительной степени

влияет на процессы горения, на надежность и стабильность работы камеры сгорания. Одна из схем такого рода с внешним смесеобразованием приведена на рис. 2.37.

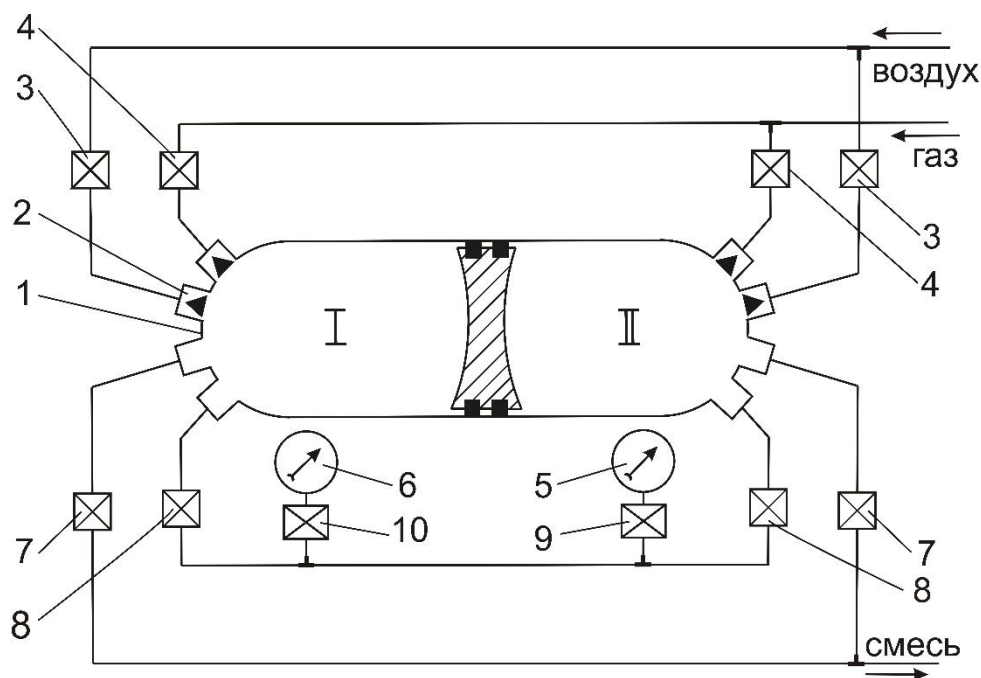


Рисунок 2.37 – Схема подачи готовой смеси (внешнее смесеобразование):

- 1 – двуполостной ресивер с разделительным поршнем; 2 – обратные клапаны;
- 3 – электропневмоклапаны впуска воздуха; 4 – электропневмоклапаны впуска газа;
- 5 – манометр газа; 6 – манометр воздуха; 7 – электропневмокран выпуска смеси;
- 8,9,10 – электропневмокамеры манометров

Ключевым элементом системы являлось устройство, представляющее собой двуполостную камеру с подвижным разделительным поршнем [98]. При последовательном заполнении одной из полостей газом и воздухом разделительный поршень смещался в крайнее положение. После достижения в камере смесителя заданного давления, фиксируемого манометрами, прекращалась подача воздуха в смеситель. Камера сгорания импульсной машины наполнялась с помощью открытия клапана 7. Одновременно газ поступал во вторую полость смесителя, чем ускоряется процесс перетекания смеси в камеру сгорания и смесь во второй камере готовилась к следующему рабочему циклу. В первом приближении смеситель рассчитывался по ме-

тодике Гуревича [104] без учета потерь на мембране и в связи со значительным изменением перепада в начале и в конце впуска, расчет осуществлялся методом последовательных приближений.

Для обеспечения наполнения, при использовании систем с внешним смесеобразованием, давление в камерах-смесителях должно быть больше давления в рабочей камере. Это неизбежно приводит к тому, что в ходе работы в камерах-смесителях постоянно находится топливная смесь под высоким давлением. С точки зрения техники безопасности такое решение выглядит проблемным. Поэтому на практике схемы наполнения с внешним смесеобразованием так и не были реализованы.

Еще одним вариантом, обеспечивающим подачу готовой смеси в камеру, являются схемы со смешением компонент непосредственно в ходе наполнения.

Смеситель, изображенный на рис. 2.38 называется оптимизатором соотношения, отличается от предыдущего принципиально новой схемой работы. Если двуполостная камера представляет собой устройство дискретного действия, то оптимизатор является устройством непрерывного действия, т.е. газ и воздух подаются одновременно и, проходя по тракту, сразу поступают в камеру сгорания. Благодаря наличию дифференциального регулятора давлений выдерживается оптимальный состав выходящей смеси. Работу смесителя схематически можно представить следующим образом. При снижении давления в полости 1 мембрана 2 сдвигает регулирующие клапаны 5, что измеряет расход компонент. При этом давления в полостях 1 и 2 выравниваются, и регулирующие клапаны устанавливаются в прежние положения.

В первом приближении смеситель рассчитывался без учета потерь на мембране, а соотношение проходных сечений для газа и воздуха 10,74. Описанная схема оптимизатора с указанным соотношением проходных сечений применима для термоимпульсных машин с объемом камеры сгорания до 20 л.

В силу своей конструкции такой смеситель имел ограниченные возможности регулировки. Для изменения соотношения компонент в топливной смеси, вызванно-

го, например, требованиями технологического процесса или переходом на другой вид топлива, при его применении необходимо сменить жиклеры и регулирующие клапана или полностью поменять смеситель. Кроме того, такое исполнение смесителя может обеспечить только дозирование компонентов, но никак не гарантирует равномерности состава топливной смеси.

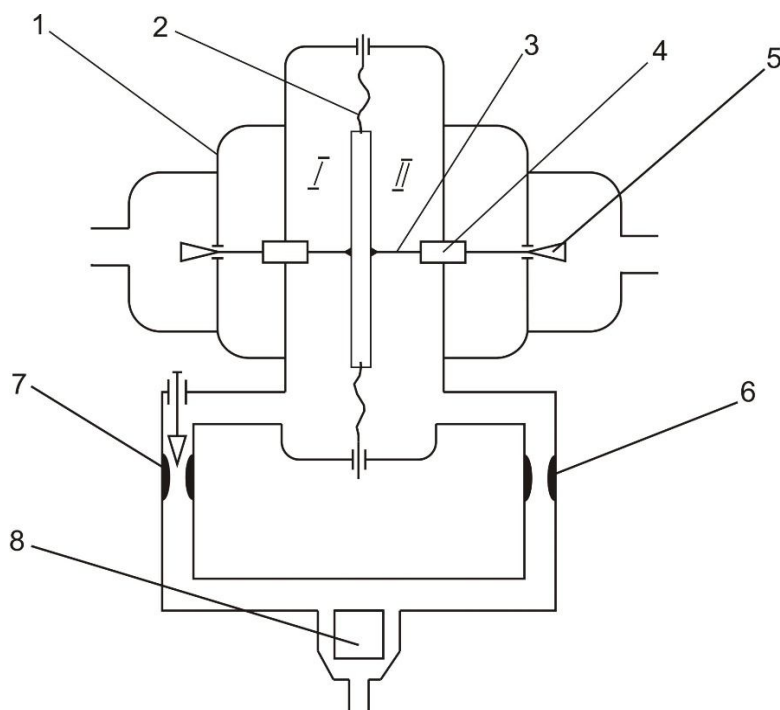


Рисунок 2.38 – Схема смесителя-оптимизатора соотношения:

1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – игла; 4 – подвижный жиклер постоянного сечения; 5 – регулирующий клапан; 6 – смежный жиклер газа; 7 – регулируемый жиклер воздуха; 8 – центробежная двухкомпонентная форсунка.

Основной причиной, по которой схемы со смешением топливных компонент в ходе наполнения не были реализованы на практике, являлось отсутствие методов проектирования смесителей. Методы расчета, использовавшиеся при создании систем наполнения импульсных машин в 60-е - 70-е годы, строились на аналитических зависимостях. Эти зависимости изначально имели большие погрешности, вызванные введением серьезных упрощающих допущений.

Задачи смесеобразования, которые при строгой постановке требовали рассмотрения течения многокомпонентной среды, такими методами не могли быть ре-

шены. Использование же метода проб и ошибок на основе проведения натуральных экспериментов оказалось непродуктивным. Кроме того, системы наполнения с последовательной подачей компонентов оказались достаточно простыми в реализации и быстро привели к решению текущей задачи, обеспечения надежной работы привода импульсных машин.

Это привело к тому, что дальнейшие работы в области создания систем наполнения импульсных машин со смещением в ходе наполнения были прекращены. Это, в частности, стало причиной того, что при создании в СССР термоимпульсного оборудования в начале 80-х годов были использованы хорошо отработанные к тому времени системы наполнения с использованием последовательной подачи компонент топливной смеси.

Другим центром развития технологий и оборудования для термоимпульсной очистки была ФРГ, где на фирме BOSCH в начале 70-х годов было создано оборудование, реализовавшее термохимический способ очистки. Удаление заусенцев на кромках деталей происходило за счет сгорания под воздействием температуры топливной смеси с избытком кислорода. Установки BOSCH изначально изготавливались со смесительным блоком, который должен был формировать топливную смесь заданного состава (рис. 2.39).

Дозирование компонент топливной смеси в установках BOSCH происходило за счет гидроцилиндров 12. Топливо и кислород подавались в полости цилиндров. Диаметр цилиндра дозирования кислорода был больше, чем диаметр цилиндра дозирования топлива. Поршни цилиндров перемещались с равной скоростью. При этом считалось, что в результате полного хода цилиндров и продавливания компонент через смеситель в камере образуется топливная смесь, состав которой определится соотношением диаметров цилиндров-дозаторов.

Более подробная схема блока смешения топливной смеси согласно первоначальному техническому решению [105] приведена на рис. 2.40. Принятые в нем принципы смешения топлива практически полностью сохранились в последующих модификациях термоимпульсного оборудования фирмы BOSCH и фирм, которые

продолжили развитие этой техники после приобретения у BOSCH лицензий (Extrude Hone, AnlagenTechnik Luhden GmbH и др.). Очевидно, что такое устройство системы смесеобразования трудно признать универсальным с точки зрения применяемого топлива – при смене типа топлива для обеспечения стехиометрии состава смеси необходимо менять цилиндры-дозаторы.

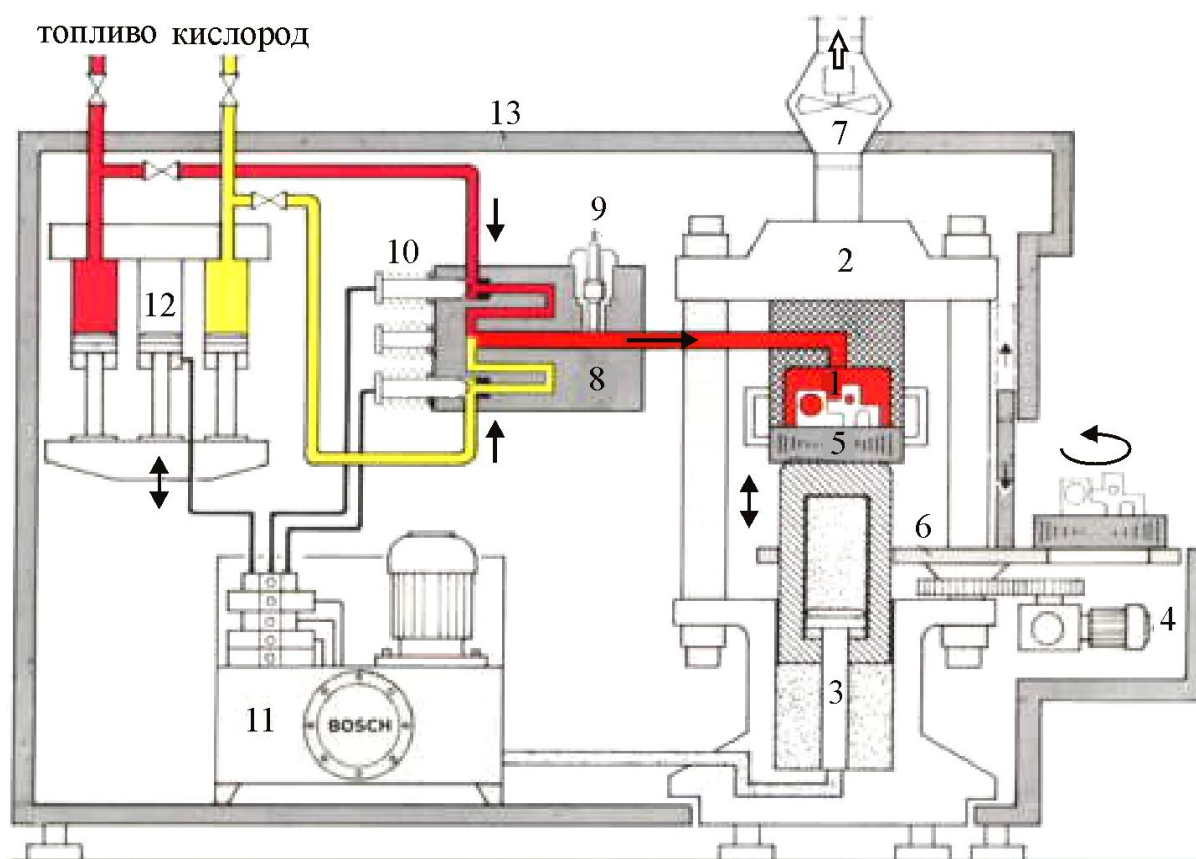


Рисунок 2.39 – Схема термоимпульсной установки фирмы BOSCH:
 1 – рабочая камера; 2 – корпус установки; 3 – гидрочилндр запираания;
 4 – привод поворотного стола; 5 – рабочий стол; 6 – поворотный стол;
 7 – выпуск продуктов сгорания; 8 – смеситель; 9 – свеча зажигания;
 10 – клапаны смесителя; 11 – гидропривод; 12 – цилиндры подачи компонент топливной смеси; 13 – звукопоглощающий кожух

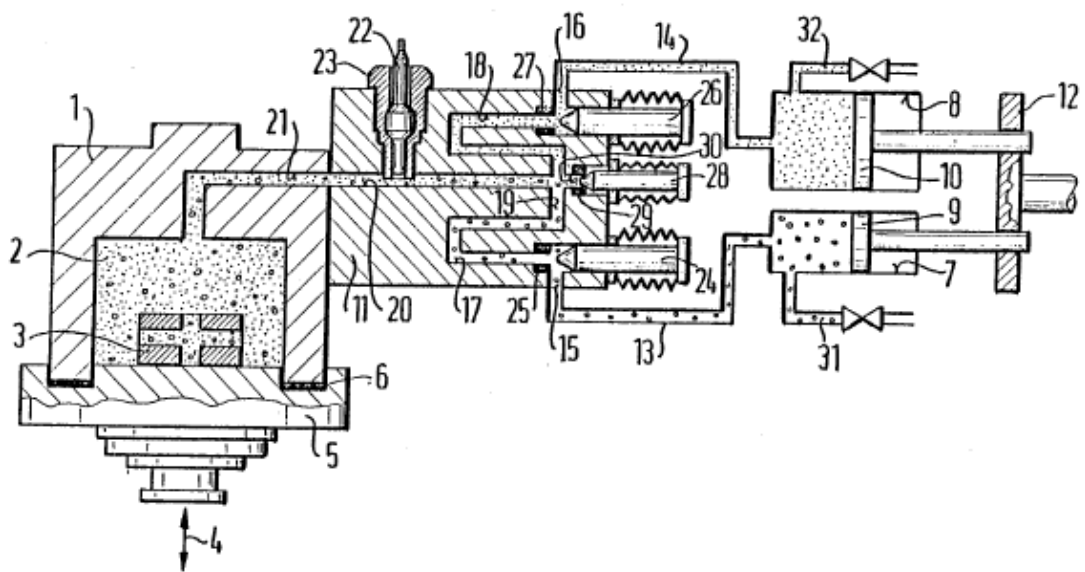


Рисунок 2.40 – Схема блока-смесителя термоимпульсной установки фирмы BOSCH:
 1 – корпус камеры; 2 – рабочая камера; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – ход запира-
 ния; 5 – рабочий стол; 6 – уплотнение; 7, 8 – цилиндры-дозаторы топлива и окисли-
 теля; 13, 14, 15, 16, 17, 18 – магистрали топлива и окислителя; 19, 20, 21 – магистра-
 ли подачи смеси; 22, 23 – свечной узел; 24, 25 - клапан запираения топлива; 26, 27 –
 клапан запираения кислорода; 28, 29 – предохранительный клапан; 31, 32 – подводя-
 щие магистрали топлива и кислорода

Последние усовершенствования смесителей термохимических машин связаны с повышением точности дозирования массы компонент топливной смеси в цилиндрах-дозаторах. Для этого фирмой Kennametal Inc. (США) предложено применять систему регулирования давления на основе цифровых контроллеров (рис. 2.41). На рисунке сохранена нумерация элементов схемы согласно тексту патента. Решение позволяет обеспечить точность дозирования массы компонент смеси в цилиндрах дозаторах за счет применения управляемого регулятора давления (138, 140). Массовые доли компонент смеси задаются контроллером или оператором установки. В этом смысле система более универсальна, так как не требует замены цилиндров-дозаторов для изменения компонентного состава смеси. Однако данное решение не устраняет недостатков смесителей, связанных с неточностью соблюдения состава смеси в течение наполнения.

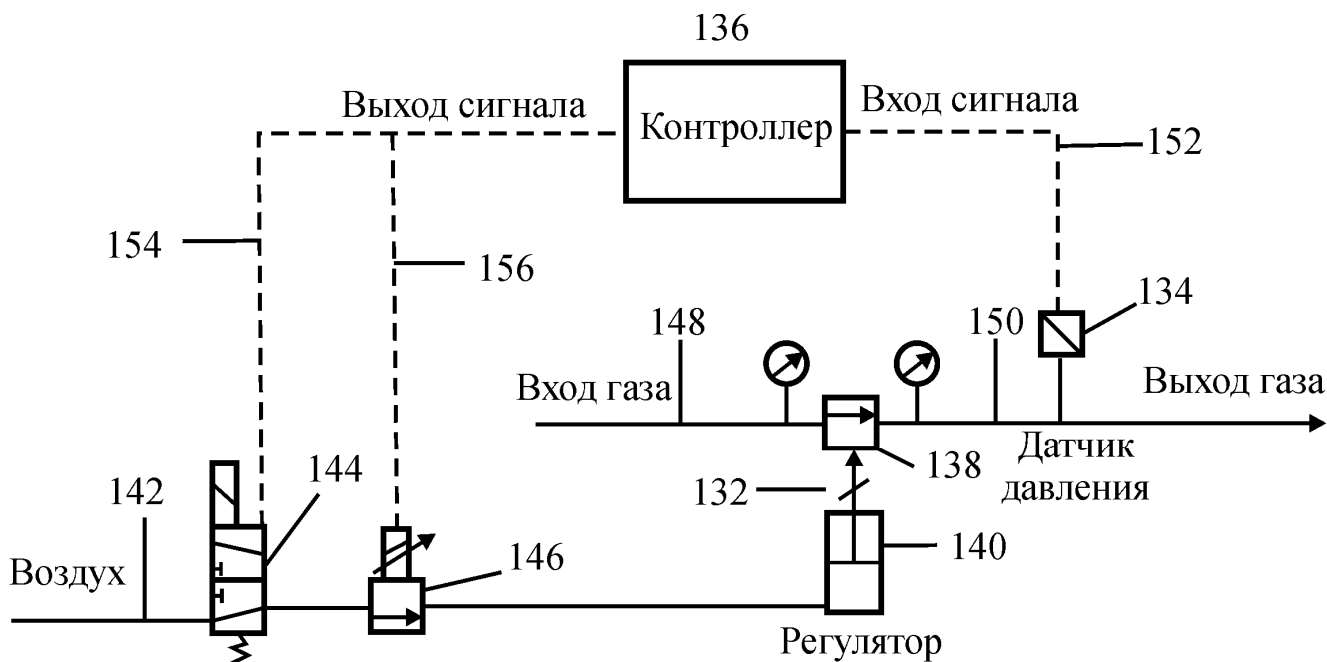


Рисунок 2.41 – Схема системы регулирования давления для подачи в цилиндры-дозаторы термоимпульсной установки [106]

2.4.2 Совершенствование систем дозирования энергии термоимпульсного оборудования

В качестве основных направлений совершенствования систем дозирования энергии термоимпульсного оборудования за счет повышения качества топливной смеси можно выделить следующие:

- повышение равномерности состава топливной смеси;
- обеспечение универсальности системы наполнения по виду топлива;
- автоматическая коррекция систем контроля при изменении внешних условий;
- повышение точности измерения управляющих параметров;
- обеспечение безопасности работы системы наполнения.

В работе [107] было проведено моделирование процесса смесеобразования в камере термоимпульсной машины с установленным в ней корпусом агрегата двигателя ЛА. Корпус имеет сложную форму с множеством сквозных, пересекающихся и глухих отверстий (рис. 2.42). С точки зрения работоспособности агрегата наиболь-

шее значение имеет качественная очистка внутренних полостей, поэтому основное внимание при оценке степени однородности топливной смеси было сконцентрировано на внутренних объемах.

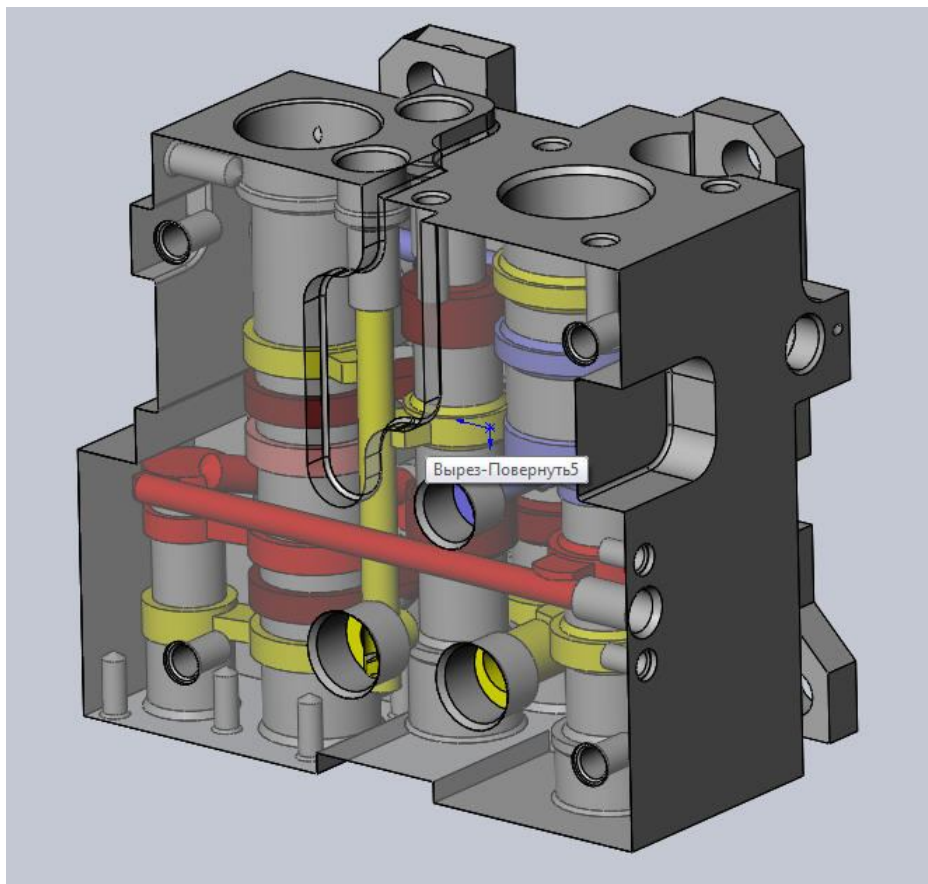


Рисунок 2.42 – Твёрдотельная модель корпуса агрегата двигателя

Для исследования процессов смесеобразования использовалась описанная выше модель, основанная на применении системы уравнений Навье – Стокса. Для анализа расслоения смеси на этапе выдержки перед зажиганием уравнения записывались с учетом действия силы тяжести.

Для оценки степени однородности смеси строилась функция распределения для массовой концентрации метана в камере, т.е. гистограмма, показывающая относительный объем внутренней области агрегата, в котором массовая концентрация метана находится в заданном диапазоне.

Моделирование производилось для двух способов наполнения: последовательного (подача метана – подача воздуха – выдержка) и совместного (подача готовой

смеси со стехиометрическим соотношением компонентов - выдержка). Время выдержки в обоих случаях составляло 0,1 сек.

На рис.2.43 приведены результаты моделирования смесеобразования для случая последовательного наполнения. Результаты приведены для случая оптимального расположения корпуса на рабочем столе с точки зрения однородности смеси.

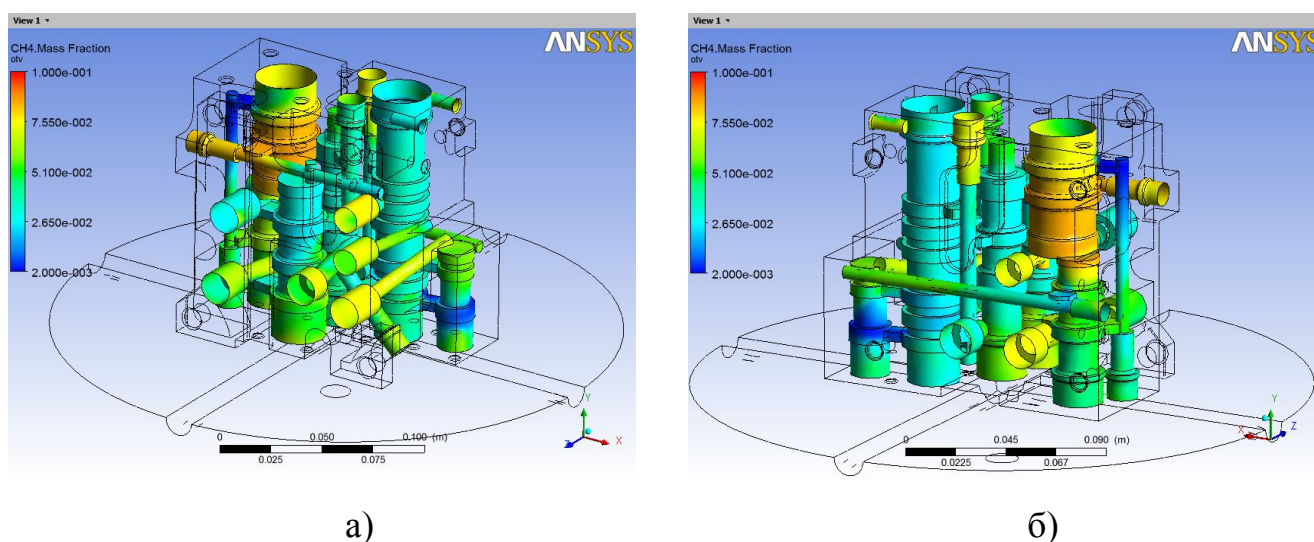


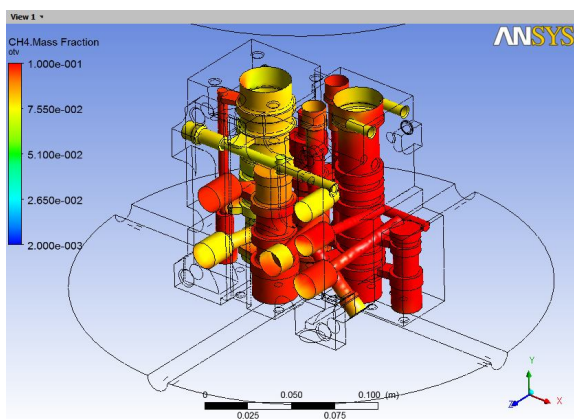
Рисунок 2.43 – Степень однородности смеси при последовательном наполнении:

а), б) – распределение массовой концентрации во внутренних полостях

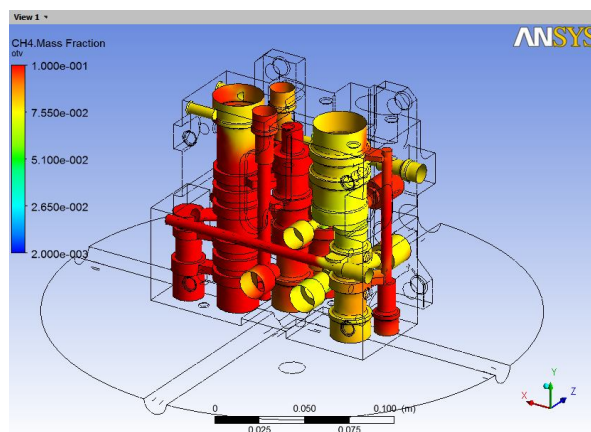
При таком способе наполнения во внутренних областях наблюдается значительный разброс значений массовой концентрации метана (от 0,2 до 9%). При этом образуются области с массовой концентрацией метана ниже предела воспламенения. Несмотря на расширение предела воспламенения с ростом давления до 5% внутреннего объема будут заполнены смесью с недостаточной для горения концентрацией горючего.

Наличие зон с недостаточной концентрацией метана приведет к тому, что на этих поверхности детали будет воздействовать только импульс давления, и они практически не подвергнутся воздействию термического импульса. Поэтому гарантировать качественную очистку данных поверхностей нельзя.

При совместном наполнении картина распределения массовой концентрации метана во внутренних полостях корпуса совершенно иная (рис. 2.44).



а)



б)

Рисунок 2.44 – Степень однородности смеси при совместном наполнении:

а), б) – распределение массовой концентрации во внутренних полостях

Состав смеси практически однороден – разброс значений массовой концентрации метана находится в диапазоне 7,7...10%, что соответствует пределам воспламенения. Дополнительное выравнивание состава смеси может быть произведено за счет увеличения времени выдержки до 1 с.

С учетом интенсивного перемешивания продуктов сгорания при прохождении ударных волн при такой степени однородности смеси можно утверждать, что условия обработки всех внутренних поверхностей корпуса будут практически идентичными.

Таким образом, в результате моделирования процесса смесеобразования при последовательном и совместном наполнении, установлено, что для обеспечения необходимой для качественной термоимпульсной очистки степени однородности смеси ($\pm 3\%$) следует рекомендовать смесеобразование по схеме совместного наполнения компонентами. Для повышения равномерности состава смеси во всем объеме камеры целесообразно переходить к совместному наполнению компонентами топливной смеси с использованием специальных смесителей.

Применяющиеся на сегодняшний день смесители (фирм Robert Bosch GmbH., Extrude Hone Inc., Anlagen Technik Luhden GmbH, Kennametal Inc.) обеспечивают только интегральную точность дозировки компонент топливной смеси, не обеспечи-

вая заданный компонентный состав в течение наполнения. Как следствие компонентный состав смеси по окончании наполнения неизбежно будет неоднородным. Увеличение времени выдержки смеси перед зажиганием в случае обработки деталей ЛА сложной формы может оказаться не эффективным. Во-первых, это время зависит от степени неоднородности смеси после наполнения, которая, в свою очередь, зависит от формы обрабатываемых деталей. Во-вторых, чрезмерное увеличение времени выдержки при работе на смесях с сильно отличающейся плотностью компонент (например, пропан-бутан + кислород) может привести к расслоению смеси.

Еще одним недостатком систем наполнения, применяющихся на сегодняшний день в термоимпульсных машинах, является контроль процесса по давлению. Такой способ контроля цикла наполнения достаточно очевиден и прост в реализации. Погрешности измерения давления, вызванные гидравлическим сопротивлением измерительного тракта, могли быть достаточно просто учтены при настройке системы управления наполнением. Для этого при наладке непосредственно в корпус камеры сгорания на место свечного узла устанавливался высокоточный датчик давления, по показаниям которого проводилась коррекция данных штатных датчиков давления системы наполнения.

Растущие требования к точности энергии привода импульсных машин привели к разработке нового способа контроля процесса наполнения камеры – по времени наполнения [108]. В этом варианте настройка системы управления по-прежнему производилась по показаниям образцового высокоточного датчика. Однако целью проведения наладки являлось получение регулировочных зависимостей давления в камере от времени наполнения при стабилизированном сетевом давлении. Основным преимуществом такого способа являлось отсутствие каких-либо дополнительных штатных датчиков и возможность задания времени наполнения с высокой точностью, определяемой тактовой частотой процессора АСУ (10^{-6} с и выше).

Однако и такой способ контроля процесса наполнения имеет недостаток. Он связан с особенностями при работе камер термоимпульсных машин с высокой цикличностью. Как указывается в [109], при работе с частотой более 2 циклов в минуту,

через 120...180 циклов температура внутренних стенок камеры устанавливается на уровне 120...140°C. Это приводит к тому, что топливная смесь нагревается в процессе наполнения в ходе теплообмена со стенками камеры. В случае, когда контроль процесса наполнения осуществляется по давлению в камере, это приводит к тому, что от цикла к циклу происходит уменьшение энергии термоимпульсных машин до 15...20% за счет уменьшения массы заряда.

Контроль подачи смеси по времени наполнения не решает задачу обеспечения точности дозирования энергии для камер с изменяющейся при работе температурой стенок. Это связано с тем, что настройка системы управления по-прежнему производится по давлению в камере сгорания. Частично проблема может быть решена за счет введения в систему датчика контроля температуры камеры. Однако, для случая термоимпульсного оборудования такое решение неперспективно. Результаты моделирования смесеобразования показывают, что в процессе наполнения распределение температур газа вблизи стенок является крайне неравномерным. Это распределение определяется не только характеристиками потока на впускном клапане, но и формой детали, находящейся в камере. Поэтому оценить влияние потока на показание датчика температуры для случая камеры термоимпульсной машины невозможно. Автоматическая коррекция систем дозирования энергии при изменении температуры камеры требует применения других способов контроля наполнения.

Для повышения гибкости и технологических возможностей система дозирования энергии должна обладать универсальностью относительно вида используемого топлива. Это, в частности, означает, что она должна обеспечивать автоматическую переналадку исполнительных механизмов на заданное соотношение компонент топливной смеси.

Указанные требования могут быть удовлетворены при выполнении блока наполнения камеры по схеме, приведенной на рис. 2.45 [110]. Для создания давления в сети топлива и окислителя по-прежнему предполагается использование вспомогательных цилиндров. Ключевым отличием предлагаемой схемы от применяющихся является включение в тракты топлива и окислителя клапанов постоянного перепада

давления. Данные клапаны поддерживают заданный уровень разности давления между камерой и газовыми магистралями $\Delta P = P_m - P_k = P_o - P_k = const$, где P_k – давление в рабочей камере, P_m , P_o – давление топлива и окислителя соответственно. Клапан обеспечивает увеличение давления топлива и окислителя во входных магистралях смесителя в соответствии с ростом давления в рабочей камере. Величина перепада давления ΔP задается из условия реализации подкритического перепада давления, для которого $P_k/P_{m(o)} \leq \beta$, где $\beta = (2/k + 1)^{\frac{k}{k-1}}$, k – показатель адиабаты газа [97].

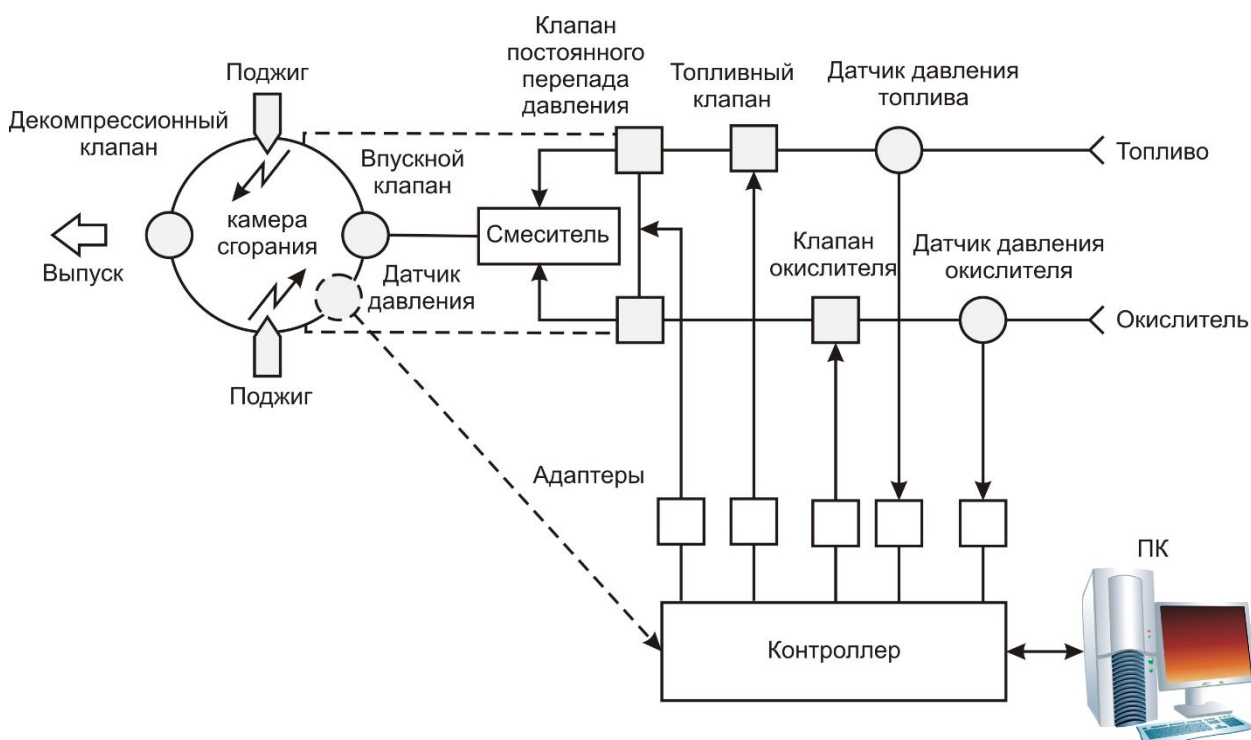


Рисунок 2.45 – Схема усовершенствованной системы наполнения камеры термоимпульсной установки

Постоянство перепада давления в удаленных от воздействия высоких температур участках магистралей обеспечивает постоянство массового расхода. Поэтому в любой момент времени наполнения при входе в смеситель будет соблюдаться заданное соотношение между компонентами топливной смеси. Для изменения этого соотношения достаточно изменить проходное сечение магистрали окислителя на входе в смеситель. Это может быть сделано при помощи управляемого дросселя (на

схеме не указан) как в ручном, так и в автоматизированном режиме. Такая схема смесеобразования позволяет использовать любые виды газообразного топлива – природный газ, пропан-бутановые смеси, ацетилен, водород. В качестве окислителя могут использоваться воздух или кислород.

Управляющим параметром для дозирования заряда при такой схеме является время наполнения, которое определяется по зависимости $t_{\text{нап}} = M/g_{\text{см}}$, где M – заданная масса заряда, а $g_{\text{см}}$ – массовый расход смеси через впускной клапан. Стабильность скорости течения и высокая точность обеспечения заданного времени наполнения гарантируют соблюдение высокой точности массы заряда в камере независимо от изменения температуры стенок или перепадов магистрального давления.

Основой системы управления процессом служит программируемый контроллер и набор соответствующих адаптеров. Для обеспечения равномерности состава во всем объеме камеры при проектировании клапанов постоянного перепада давления, смесителя и впускного клапана необходимо использовать моделирование процесса смешения компонентов при помощи современных пакетов вычислительной газодинамики.

3 ИОННАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ

Как уже отмечалось ранее технологии финишной очистки должны являться одним из элементов технологических систем производства высокоточной техники. При этом ни один из рассмотренных методов, включая термоимпульсную обработку детонирующими газовыми смесями, не может самостоятельно решить вопрос качественной очистки поверхностей.

Практический опыт применения термоимпульсных технологий в промышленности показывает, что они гарантировано обеспечивают качество отделки и очистки в комбинации с предварительной и окончательной ультразвуковой мойкой в водных растворах [24, 25]. Зарубежный опыт применения термохимического оборудования также показывает, что оно эффективно в комбинации с другими методами предварительной очистки и окончательного травления и промывки деталей.

В этой связи необходимо выделить случаи, когда условия эксплуатации деталей требуют нанесения покрытий. К качеству очистки поверхностей для этого предъявляются особенно высокие требования, которые не могут быть обеспечены описанными выше методами. Однако и в этом случае комбинированные технологии могут стать основой для обеспечения высокого и гарантированного уровня качества. Однако рассмотренная в предыдущем разделе термоимпульсная очистка для этих задач должна быть только предварительным этапом подготовки поверхностей к нанесению покрытий, а окончательная очистка и активирование должно производиться при помощи методов очистки в вакууме, например – при помощи ионной очистки.

3.1 Современное состояние развития технологии и оборудования

Наиболее остро проблема нанесения защитных покрытий проявила себя при разработке, серийном производстве и ремонте авиационных двигателей четвертого поколения, когда уровни температурных и силовых нагрузок на лопатки турбины и компрессора значительно возросли. Их поверхностные слои стали претерпевать не-

упругие объемные деформации 0,6...0,8 % и более, а при низкой деформируемости основной несущей фазы материала изделия защитные покрытия стали растрескиваться на ранних стадиях эксплуатации ГТД – в структуре нередко образовывались поры, отслоения от основного металла [111,112, 113, 114].

В настоящее время основными задачами технологов являются освоение и применение методов получения смешанных диффузионно-покровных покрытий, позволяющих уменьшить недостатки других групп покрытий.

Одним из перспективных методов решения проблемы придания заданных свойств рабочим поверхностям деталей является нанесение на них жаростойких покрытий. Метод экономически оправдан при защите деталей транспортных и энергетических машин, которые работают в тяжелых внешних условиях (повышенные температуры, вибрация, эрозия, коррозия и т.д.).

К таким покрытиям предъявляют довольно жесткие требования [115]:

- создавать эффективный барьер на пути диффузии атомов газовой среды в основу и из неё;
- иметь эрозионную и коррозионную стойкость;
- прочно сцепляться с поверхностью детали;
- сохранять однородность состава и равномерность покрытия по всей поверхности защищаемой детали;
- макро- и микродефекты в покрытии не допускаются.

Основными элементами создаваемых защитных покрытий могут быть металлы, образующие высокотемпературные окислы, которые имеют высокую прочность. Так, например, для создания жаростойких покрытий в качестве основы часто используется алюминий [116], который взаимодействует с материалом подложки и образуют интерметаллид (MeAl). При выдержке в окислительных средах на поверхности алюминиды образуется пленка оксида алюминия, которая защищает деталь от воздействия компонентов окружающей среды. При повреждении слоя оксида расположенный под ним алюминид снова окисляется с образованием защитной окалины [116, 113]. Таким образом, жаростойкие покрытия на основе алюминиды металлов

являются покрытиями с самовосстанавливающимися защитными функциями.

Так же покрытия должны отвечать ряду основных требований:

- иметь высокую жаростойкость в конкретных условиях воздействия газовой среды. Это требование обеспечивается способностью материала покрытия к образованию тонкой защитной оксидной пленки с хорошей адгезией к металлу и минимальной диффузионной проницаемостью;

- обладать высокой фазовой и структурной стабильностью защитного покрытия. Покрытие должно характеризоваться низкой скоростью диффузионного взаимодействия с защищаемым материалом, быть достаточно инертным, стабильным по толщине в течение всего срока его эксплуатации;

- отличаться достаточными величинами прочности, вязкости и пластичности слоя покрытия, предотвращающими возможность преждевременного разрушения под действием термомеханических циклических нагрузок;

- иметь хорошую технологичность, обеспечивать возможность защиты деталей сложной конфигурации;

- обладать однородностью химического состава и структуры, быть равномерными по толщине, не иметь технологических дефектов. Покрытия не должны образовывать хрупких соединений с компонентами основы в процессе эксплуатации, которые отрицательно сказываются на механических свойствах изделия.

Исходя из изложенного выше, можно сформулировать требования, предъявляемые к поверхностям изделия, на которые будет нанесено покрытие:

- поверхность должна иметь допустимую величину шероховатости. Высота микронеровностей должна быть соизмерима с толщиной покрытия и определяться их требованиями и назначением (для ионно - вакуумных методов напыления толщина покрытия находится в диапазоне 60...300 мкм [116, 113]);

- механические загрязнения должны отсутствовать [117, 118, 119];

- отсутствие физически- и химически- сорбированных частиц непосредственно перед напылением после предыдущих методов обработки, для обеспечения

химической связи подложка – покрытие [113, 118];

- не допускается наличие дефектного слоя (макро- и микродефектов), обусловленного методом изготовления (его толщина соизмерима с величинами микронеровностей, образовавшихся при предшествующих операциях обработки) [119, 120, 121].

Совокупность требований, предъявляемых и к покрытию, и к поверхности изделия и должно определять технологию получения готового изделия.

В настоящее время ионно-вакуумные технологии рассматривают как наиболее перспективные для машиностроения, поскольку они позволяют одновременно повышать износо- и коррозионную стойкость материала готовых деталей, совмещая тем самым в одном процессе традиционные операции диффузионного газонасыщения и нанесения гальванических защитных покрытий. При этом ионно-вакуумные покрытия характеризуются более высокими эксплуатационными свойствами, например высокой адгезией, несопоставимой с гальваническими покрытиями, и существенно более низкими температурами процесса по сравнению с диффузионным газонасыщением. Это позволяет улучшить эксплуатационные свойства поверхностных слоев, избегая ухудшения механических свойств изделия.

Методы вакуумной ионно-плазменной обработки являются также наиболее универсальным и высокоэффективным средством изменения свойств поверхности, вследствие широкого выбора наносимых покрытий и подложек, контролируемости процесса и возможности его автоматизации, а также экологической чистоты. При этом модифицирование поверхности обеспечивает значительное ресурсосбережение как за счет существенного удлинения срока службы изделий, так и экономии дорогостоящих легирующих элементов.

Исследованию структурных, технологических и служебных характеристик ионно-вакуумных покрытий посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых [113, 118, 122, 123, 124, 125], накоплен большой опыт применения этих покрытий в различных отраслях техники [114, 116, 123]. Эти исследования выявили наличие специфических проблем, сдерживающих более широкое применение ион-

но-вакуумных технологий в промышленности:

- в ряде техпроцессов повышение температуры вызывает структурные изменения в материале изделия, что приводит к ухудшению их механических свойств [117];
- достаточно большая трудоемкость процесса подготовки поверхности детали перед нанесением покрытия усугубляется отсутствием объективных критериев и методик оценки состояния поверхности подложки перед нанесением покрытия [113, 118, 123];
- реализация технологии для деталей больших размеров и сложной формы затруднена вследствие неравномерности нанесения покрытий и неадекватного качества очистки поверхности от загрязнений в различных зонах изделия [113, 117, 124].

Необходимо подчеркнуть, что эти проблемы имеют еще более выразительный характер применительно к другим методам нанесения покрытий, однако только при использовании ионно-вакуумных методов существует принципиальная возможность их решения.

В настоящий период основным направлением развития вакуумных ионно-плазменных технологий является разрешение проблем подготовки и активации обрабатываемых поверхностей, совмещенных с технологическим циклом нанесения покрытий, а также с разработкой методик оценки эффективности этих процессов. Это позволит формировать покрытия высокого качества и стабильно получать высокие значения адгезионной прочности соединения покрытия с подложкой, а самое главное – увеличить производительность операции напыления защитных покрытий на изделия.

3.2 Оборудование для чистки деталей ГТД в вакууме

При очистке поверхности лопаток от загрязнений бомбардировкой ионами аргона (ионно-плазменное травление) удаление поверхностных слоев материалов осуществляется за счет их физического и химического распыления энергетическими ионами инертных газов или ионов, химически не реагирующих с обрабатываемым

материалом, так как ионы легко ускорить до необходимой скорости. При таких методах обработки поверхности различные дефекты, такие как конусы, кратеры, пирамиды (их появление обычно связывают с начальным затемнением, загрязнением, наличием примесей или дефектами отдельных участков поверхности [115, 119, 126, 127]), устраняют путём создания оснастки, которая позволяет вращать заготовку (например, лопатку). При таком движении происходит постоянное изменение угла падения ионов, что способствует к удалению дефектов с поверхности [115, 119]. Также следует отметить, что эти дефекты развиваются вследствие различия в коэффициентах распыления у самого дефекта и поверхности [128].

Существующие методы обработки не всегда обеспечивают необходимое качество покрытия, к тому же всегда есть теоретические предпосылки создания принципиально новых технологий на основе использования совокупности известных физических, химических и других явлений.

Для повышения качества жаростойких покрытий необходимо очистить поверхность изделия. Однако конкретных критериев чистоты поверхности и её состояния перед нанесением покрытий не существует. Но проанализировав предысторию изготовления изделия, можно сделать вывод о том, что на его поверхности присутствуют физически и химически сорбированные частицы [129, 126].

Каждому типу травления присущи свои особенности. При ионном травлении для удаления поверхностных слоев материала применяют поток ионов инертных газов, обладающих кинетической энергией; при плазмохимическом травлении для удаления поверхностных слоев материала используют энергию химических реакций между ионами и радикалами активного газа или пара и атомами или молекулами обрабатываемого материала с образованием летучих стабильных соединений; при ионно-химическом травлении для удаления поверхностных слоев материала используют как кинетическую энергию ионов химически активных газов, так и энергию их химических реакций с атомами и молекулами материала.

Процессы ионного распыления обычно реализуются в системах с автономными ионными источниками (АИИ), которые генерируют энергию большую, чем энер-

гия связи загрязнений с подложкой. Автономные ионные источники можно разделить на две большие группы:

- электростатические АИИ, в которых ионный пучок формируется с помощью электростатической ионно-оптической системы. На выходе из нее осуществляется компенсация объемного заряда ионного пучка с помощью инъекции в него электронов из термокатода. Компенсация заряда ионного пучка в прежде всего необходима при травлении диэлектрических материалов;
- плазменные ускорители, которые в отличие от электростатических АИИ создают поток ионов с уже компенсированным объемным зарядом.

Технологическим требованиям, предъявляемым к источнику, соответствуют плазменные ионные ускорители (ПИУ), которые часто называют источниками Кауфмана [126, 127, 130]; распылительные системы дугового типа; магнетронные распылительные системы (МРС) [115, 119, 131]; ускорители с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП) и ускорители с анодным слоем (УАС) [132, 133, 134, 135].

Плазменные системы на основе разряда постоянного тока в скрещенных электрическом (Е) и магнитном (Н) полях при низком давлении. Они широко используют как при фундаментальных научных исследованиях, так и в разнообразных технологических приложениях. К таким устройствам относятся: источники ионов Холловского типа; источники ионов и электронов на основе разряда с осциллирующими электронами (ячейка Пеннинга, ионный магнетрон); ускорители с анодным слоем, ускорители с замкнутым дрейфом и протяженной зоной ускорения, и т.д.

С конца 50-х начала 60-х годов в рамках космической программы по созданию электрических космических двигателей были созданы ионные источники на основе разряда Пеннинга с накаливаемым катодом, в которых вместо одного из торцевых катодов была размещена вытягивающая ионы сетка или более сложная ионно-оптическая система. Эти источники ионов были названы источниками Кауфмана. Описание работы и возможностей этих ИИ приведены в работах [126,130, 132, 133, 135]. В конце 50-х годов Жариновым А.В. был предложен принцип ускорителя с

анодным слоем [114].

Ускорители с азимутальным дрейфом электронов (УАС), а также другие устройства, основанные на разряде постоянного тока со скрещенными электрическим E и магнитным H полями, имеют широкое практическое применение благодаря их простоте и надежности конструкции. Так УАС, помимо космической тематики, используют для получения ионных пучков различных веществ с энергией ионов от десятков электрон-вольт до нескольких десятков килоэлектрон-вольт при токе в пучке до нескольких ампер. Причем величину ионного тока можно изменять на несколько порядков без снижения эффективности ускорения, что делает их особенно привлекательными для различных физических исследований и приложений.

Ионные источники Холловского типа обладают рядом бесспорных достоинств, которые позволяют им оставаться конкурентоспособными в стремительно развивающейся области технологии – плазменной обработке поверхности твердого тела:

- это высокая надежность и стабильность работы при возможности использования любых, в том числе химически активных газов;
- значительная (до 95 %) токовая эффективность; возможность изменения энергии ионного пучка в широком диапазоне (0,2...3 кэВ);
- возможность управлять плотностью тока и химическим составом пучка;
- отсутствие накаливаемых катодов и сложных в изготовлении вытягивающих сеток;
- относительная простота конструкции ионного источника и системы его питания [136].

В то же время, следует отметить ряд недостатков ионных источников Холловского типа:

- неоднородность травления, обусловленная кольцевым профилем ионного пучка;
- необходимость откачки с высокой скоростью.

В настоящее время наибольшее распространение получил АИИ Кауфмана

(рис. 3.1, а), а также источник с использованием мультикатодной и мультиполюсной систем (рис. 3.1, б), в котором можно снизить напряженность магнитного поля без увеличения потерь в области разряда и одновременно повысить однородность ионного пучка. Использование односеточной ионно-оптической системы (рис. 3.1, в) позволяет значительно расширить энергетические возможности АИИ Кауфмана и получить значения плотности тока до 1 mA/cm^2 при энергии $20 \dots 200 \text{ эВ}$ [135, 137]. Изготовление сеток из графита позволило увеличить их стойкость к агрессивным газам, а применение сеток из кремния – повысить точность их изготовления и уменьшить их деформацию в процессе работы.

Ионные источники изготовленные на основе УАС, содержат кольцевой анод и электромагнитную систему, состоящую из катушки соленоида, катода и магнитопровода (рис. 3.1, г). С помощью катушки соленоида создается радиальное магнитное поле в ускоряющей промежутке – зазоре между полюсными наконечниками. Электроны, совершая замкнутый холловский дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях, ионизуют атомы рабочего газа, в результате чего происходит формирование трубчатого ионного пучка [134]. Большим преимуществом ускорителей такого типа, является отсутствие ионно-оптической системы, что существенно упрощает конструкцию и увеличивает ресурс работы. Объёмный заряд ионного пучка скомпенсирован, и высокая плотность пучка может быть достигнута и при сравнительно невысокой энергии ионов. Во-первых, при этом повышается энергетическая эффективность процесса распыления максимальная при энергии ионов $0,3 \dots 0,5 \text{ кэВ}$. Во-вторых, при ионном травлении материалов для очистки их поверхности перед осаждением пленок желательно по возможности иметь поток низкоэнергетических ионов, чтобы в процессе травления не вызывать радиационные повреждения ранее созданных структур.

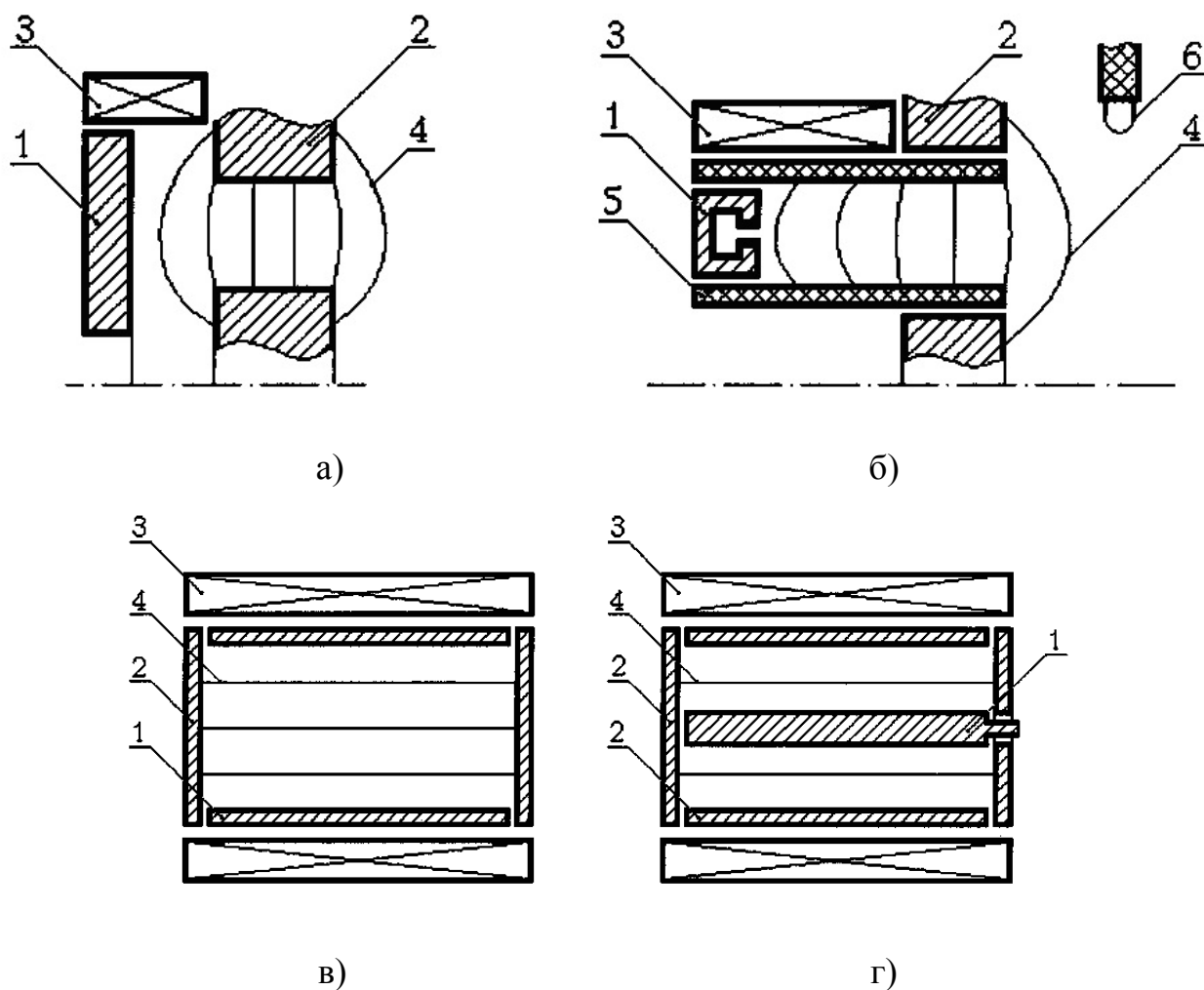


Рисунок 3.2 – Принципиальные схемы источников ионов:

- а) схема УАС; б) схема УЗДП; в) схема ячейки Пеннинга; г) схема ионного магнетрона; 1 – анод; 2 – катод; 3 – силовые линии магнитного поля; 4 – диэлектрический канал; 5 – катушка магнитного поля

Ионные источники на основе УЗДП по существу относятся к тому же классу плазменных ускорителей, что и УАС, однако отличаются от последних более низкой энергией ионов (50...250 эВ) и большими плотностями тока (2...20 мА/см²) [134, 135].

Ионные источники магнетронного типа (ИМТ) (рис. 3.1, г) занимают промежуточное положение между УАС и УЗДП. ИМТ состоят из «холодного» катода с кольцевым зазором шириной два мм и плоского анода, подсоединенного к источнику ВЧ-мощности. Расстояние анод – катод составляет 10 мм. В центральной части

катода расположен постоянный магнит диаметром 50 и толщиной 10 мм из редкоземельного сплава, создающий в кольцевом зазоре катода высокую плотность магнитного потока (около $0,4 \text{ Вб/см}^2$). В результате замкнутого дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях, образуется высокоинтенсивный поток ионов, имеющий трубчатую форму. ИМТ прост по конструкции, пригоден для продолжительной работы в активных газах и обеспечивает большие токи разряда при сравнительно небольшом напряжении. Очистка ИМТ происходит материалом катода, с условием, что напряжение, подаваемое на катод, будет несколько больше напряжения дуги. Это приводит к тому, что чистка поверхности изделия производится потоком металлической плазмы малой плотности.

Источник с седловидной конфигурацией магнитного поля содержит полый водоохлаждаемый катод в виде цилиндра, в котором размещены два графитовых стержня, выполняющих роль анодов. Электроны под действием электрического поля анодов колеблются относительно центральной точки «седла» и, имея сложную траекторию движения, ионизируют рабочий газ. При потенциале анода 3 кВ ток разряда достигает 300, а эквивалентный ток ионного пучка 20 мА. Апертура катода выполнена в виде графитовой сетки. Поток частиц из источника полностью нейтрализован в результате захвата ионами вторичных электронов на сетке.

Плазменные ионные ускорители (ПИУ) с асимметричным магнитным полем, используемые ранее, имели достаточно простую конструкцию, которая до сих пор применяется при создании небольших ионных источников. Однако, используя такую конструкцию, оказалось невозможно добиться необходимой равномерности ионного пучка, что при создании крупных ионных источников негативно сказывалось на качестве обработки изделий, а также приводило к неравномерному износу ионно-оптической системы. Для крупных ПИУ более удачным решением явилось применение газоразрядной камеры (ГРК) многополюсного типа. В этом случае удастся получить внутри ГРК столб однородной плазмы большего диаметра [133]. Как следствие, при помощи ПИУ этой конструкции можно получать более равномерные пучки ионов. В современных ускорителях такого типа плотность потока ускоренных

частиц достигает $0,3 \dots 0,4 \text{ А/см}^2$ при энергии частиц 1 кэВ. ПИУ отличается равномерным распределением ускоренных частиц по сечению пучка.

Существует достаточно много конструкций ИМТ, однако для эффективного удаления загрязнений с поверхности мишени распылением применима так называемая распылительная пушка, в которой ионизируются молекулы газа, ионы ускоряются электростатическим полем, коллимируются в пучок заданной геометрии и направляются на очищаемую поверхность. При этом плотность тока, которую можно извлечь из плазмы источника не превышает $0,05 \dots 0,5 \text{ А/см}^2$ при энергии частиц $400 \dots 800 \text{ эВ}$. Однако в системах такого типа в процессе распыления начинают принимать участие (помимо рабочего газа) ионы генерируемого вещества (металл), то есть при определенных углах распыления они могут внедряться в поры и щели, в которых скапливаются газы и загрязнения, изменяя состав очищаемой поверхности. Также возможно появление физических неоднородностей на поверхности. Магнетронной распылительной системе характерна малая скорость распыления, что не удовлетворяет поставленным технологическим задачам [115, 118, 128].

В настоящее время для нанесения жаростойких покрытий на лопатки ГТД в большинстве случаев используют системы дугового типа. Перед процессом напыления изделие очищают в вакуумной камере источником этой системы, при работе которого на поверхность детали могут поступать ионная, нейтральная и капельная фаза из источника. В процессе такой очистки может происходить «замуровывание» загрязнений и впоследствии приводить к скалыванию покрытий в процессе и после напыления. При этом количество заряженных частиц, которые можно извлечь из плазмы дугового источника не превышает $0,1 \dots 0,2 \text{ А/см}^2$ при энергии $1 \dots 2 \text{ кэВ}$ [118, 135].

В ускорителях с замкнутым дрейфом электронов энергия ионов достигает 1,5 кэВ при плотности потока ускоренных частиц $0,2 \text{ А/см}^2$. Основными недостатками являются: поток ионов имеет сечение кольцевидной формы; использован дорогостоящий и сложный в изготовлении катод-компенсатор; применены диэлектрические экраны, распыление которых вносит погрешности в компонентный состав по-

крытия [115, 118].

В связи с возможностью независимого управления режимами для поставленной технологической задачи были выбраны УАС и ПИУ. УАС обладают рядом достоинств, к которым следует отнести простоту конструкции, высокую надежность и достаточно большой ресурс. Однако ускорители данного типа имеют трубчатую форму ионного пучка, но в технологическом отсеке лопатки будут размещаться при помощи специальной оснастки (кассет) с возможностью вращения вокруг горизонтальной оси, пересекая все области пучка, что сведет этот недостаток до минимума. ПИУ лишены этого недостатка, но в то же время следует отметить, что ускорители такого типа имеют существенно более сложную конструкцию.

Одним из основных факторов уменьшения стоимости готового изделия является не только сокращение времени операций, но и длительности паузы между операциями. Например, нанослой атомов остаточной атмосферы в вакуумной камере ($P=10^{-5}$ мм рт. ст.) сорбируется поверхностью обработанного изделия за время около одной секунды [132, 134]. Поэтому, целесообразно комбинировать некоторые виды операций (например, очистку и напыление в вакуумной камере). При сокращении непосредственно времени очистки изделия ГТД автономными ионными источниками необходимо учесть, что при накоплении заряженными частицами определенной энергии может произойти перегрев поверхностных слоёв изделия ГТД, приводящий к изменению свойств материала (процессам оплавления, фазовым переходам и т.п.).

Автономные ионные источники типа УАС и ПИУ достаточно известны и используют их для очистки и модификации поверхностей изделий в отдельных технологических установках и процессах уже давно [137]. В работах [137, 138] приведен аналитический расчет времени обработки изделий полупроводниковой промышленности при снятии слоя материала заданной толщины, в работе [139] – расчет режимов очистки поверхностей изделий автономными ионными источниками с упоминанием о перегреве материала изделия, однако в комплексе методик расчет режимов ионной очистки деталей ГТД с учетом воздействия температур и сложного

движения изделий многообразной формы (лопаток) относительно автономного источника ионов отсутствует. Поэтому, проанализировав процесс ионной очистки поверхности деталей ГТД с помощью уже известных автономных ионных источников, основной целью была определена разработка методики и научных принципов выбора и назначения режимов ионной очистки деталей ГТД с учетом воздействия температур на обрабатываемые изделия.

Таким образом, применяемые современные технологические установки позволяют обрабатывать лишь ограниченный круг изделий, в основном твердосплавный инструмент и детали авиационной техники из жаропрочных сплавов, которые допускают нагрев до высоких температур. Однако при достаточно длительном процессе обработки и эти материалы могут нагреться выше температур фазовых переходов [140, 141]. Поэтому существует необходимость в разработке научно обоснованных методов выбора и назначения режимов ионной очистки деталей ГТД с учетом тепловых ограничений для увеличения производительности очистных операций. При этом следует полностью удалить физические, хемосорбированные загрязнения и дефектный слой при сложном движении деталей (лопаток ГТД изготовленных из различных типов материала) относительно автономного источника ионов.

3.3 Параметры технологических источников для ионной очистки

3.3.1 Определение участка действия теплового потока при планетарном движении деталей

При рассмотрении общей модели процесса целесообразно использование теории R-функций [142, 143].

В научных исследованиях и инженерной практике при расчете процессов теплообмена в энергетических устройствах все чаще возникает необходимость учета реальной геометрии элементов, более точного учета условий их взаимодействия с окружающей средой, учета зависимости тепловыделения от координат, времени и т.д. Это приводит к необходимости решать соответствующие задачи теплообмена

при определенных граничных и начальных условиях. Для этого используют как аналитические, так и численные методы.

Метод R-функций позволяет перейти от формального алгебрологического описания геометрических объектов к построению их уравнений в обычном смысле этого слова.

Методы решения задач теплопроводности при действии движущихся источников тепла достаточно хорошо разработаны для областей канонической формы. Рассматриваемая задача поставлена для детали произвольной геометрической формы, совершающей сложное планетарное движение относительно источника тепла. Для этого случая определение участка поверхности, на который воздействует тепловой поток в каждый момент времени, представляет собой отдельную задачу. В ходе моделирования её решали аналитически.

При решении тепловой задачи поток ионов от источника рассматривали в виде цилиндра, который расположен перпендикулярно плоскости ZOX , смещен по оси Z от плоскости стола на расстояние h и имеет радиус r . При попадании внутрь его на поверхности лопатки, обращенные к источнику, действует тепловой поток интенсивностью q . При обработке детали устанавливали на столе, вращающемся с угловой скоростью ω_1 . Сами детали вращались вокруг собственной оси с угловой скоростью ω_2 (рис. 3.2).

В системе координат детали (X_l, Y_l, Z_l) однозначно заданы координаты поверхностных узлов ее сетки конечных элементов. Тогда в системе координат установки (X, Y, Z) координаты этих точек можно записать в виде:

$$\begin{cases} z = z_1 \\ x = x_1 \cos(-\omega_2 t) + y_1 \sin(-\omega_2 t) + R \cos(\omega_1 t) \\ y = -x_1 \sin(-\omega_2 t) + y_1 \cos(-\omega_2 t) + R \sin(\omega_1 t) \end{cases}, \quad (3.1)$$

где R – радиус окружности, на которой производится установка детали на столе.

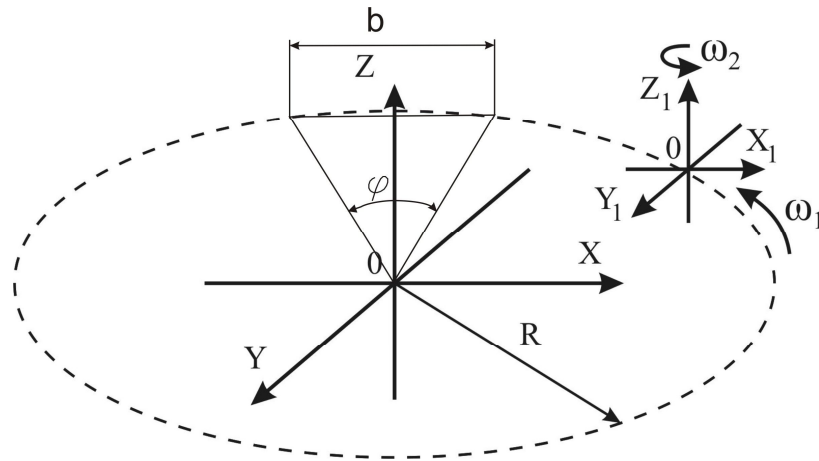


Рисунок 3.2 – Схема связи между системами координат детали и установки

При записи формулы (3.1) без потери общности приняли, что в исходный момент времени ($t = 0$) начало системы координат лопатки находится в точке $(R, 0, 0)$ стола.

Уравнение для описания области, занимаемой потоком ионов вида

$$\Omega(x, y, z, t) = \begin{cases} > 0, \text{ внутри пятна} \\ = 0, \text{ на границе} \\ < 0, \text{ снаружи пятна} \end{cases}, \quad (3.2)$$

имеет следующий вид:

$$\Omega = r^2 - x^2 - (z - h)^2. \quad (3.3)$$

Для придания ему свойств «переключателя» применили функцию Хевисайда.

Очевидно, что

$$F_1(x, y, z, t) = H\left(H(\Omega) - \frac{1}{4}\right) = H\left\{\begin{array}{l} 3/4, \text{ внутри пятна} \\ 1/4, \text{ на границе} \\ -1/4, \text{ снаружи пятна} \end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l} 1, \text{ внутри пятна} \\ 1, \text{ на границе} \\ 0, \text{ снаружи пятна} \end{array}\right\}. \quad (3.4)$$

Для определения элементов сетки, в которых будет действовать тепловой поток такой прием нужно повторить еще дважды. Во-первых, при повороте оснастки лопатка дважды будет проходить область, описываемую уравнением (3.4). Для того, чтобы исключить тепловое воздействие при прохождении пятна в удаленной зоне, и считая, что источник расположен в полупространстве, где значения координат $y < 0$, вторую функцию-переключатель записали в виде:

$$F_2(x, y, z) = H(-y). \quad (3.5)$$

Величины направляющих косинусов (n_{x1}, n_{y1}, n_{z1}) в системе координат детали после построения сетки известны. Для n_y можно записать выражение:

$$n_y = \cos(\vec{n}, y) = \cos(\vec{n}, y_1 + \varphi) = n_{y1} \cos(\omega_2 t) - n_{x1} \sin(\omega_2 t). \quad (3.6)$$

При наличии затененных зон условия $n_y > 0$ недостаточно для описания участка поверхности, на который действует тепловой поток (рис. 3.3). Этот случай возникает тогда, когда условие $n_y > 0$ выполняется для нескольких точек с разными координатами по Y и одинаковыми по X, Z . Исключение затененных участков поверхности выполнили проведено при записи третьей функции-переключателя в виде:

$$F_3(x, y, z, t) = H\left(\min_y(H(n_y)) - \frac{1}{4}\right). \quad (3.7)$$

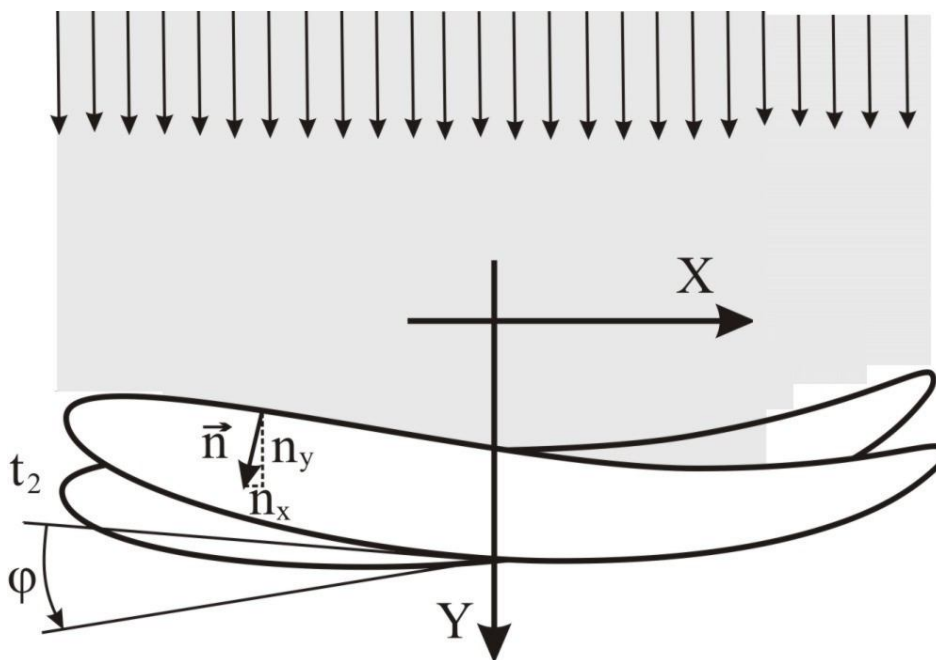


Рисунок 3.3 – Схема определения участка воздействия теплового потока

Общее выражение для определения участка воздействия теплового потока от ионного источника на деталь произвольной формы получили, перемножая построенные функции:

$$F(x, y, z, t) = F_1 \times F_2 \times F_3. \quad (3.8)$$

В элементах сетки поверхности, попадающих в область, облучаемую потоком ионов, эта итоговая функция равна единице, в остальных элементах – нулю. Таким

образом, граничное условие для всей незакрепленной части детали $\Omega_1 \cup \Omega_2$ получили в виде:

$$q(x, y, z) = F \times (\sigma(\varepsilon T_{пл}^4 - \varepsilon_{\partial} T_{\partial}^4) + \frac{j_i}{e_i} E_i + k_c E_{кин} \frac{1 - n_y}{2} - k_{расп}(W_{кин}, \theta) \frac{j_i}{e_i} E_{связи}) - \sigma(\varepsilon_{\partial} T_{\partial}^4 - \varepsilon_{окр} T_{окр}^4). \quad (3.9)$$

3.3.2 Оптимизации параметров ионной очистки с учетом теплового состояния детали

Предложенная математическая модель позволяет определить необходимые параметры установки, приняв заданные условия снятия покрытия.

Подготавливая процесс ионной обработки, необходимо выполнить следующие условия:

- загрязнения и дефектный слой должны быть удалены со всей поверхности пера лопатки;
- максимальная температура, достигнутая в процессе обработки поверхности, не должна превышать температуру фазового перехода для материала изделия [144].

Задачу оптимизации процесса ионной очистки можно сформулировать исходя из температурных ограничений следующим образом. Функцией задачи оптимизации является время обработки:

$$Ц = \min(t). \quad (3.10)$$

Условием, при выполнении которого прекращается процесс ионной очистки, является получение необходимого количества распыленного материала на всей поверхности детали, предназначенной для последующего нанесения покрытия. Его можно быть записать следующим образом:

$$\min_{\Omega_1} (N_{расп}) = \min_{\Omega_1} (k_{расп}(W_{кин}, \theta) \frac{j_i}{e_i}) = [N_{расп}], \quad (3.11)$$

где $N_{расп}$ – количество атомов, распыленных ионной бомбардировкой.

С технологической точки зрения более удобным видом записи выражения (3.11) является его представление в виде, задающем не количество распыленных атомов, а размер снимаемого слоя. При известном размере атомного слоя δ_a такое выражение записано в виде:

$$\min_{\Omega_1}(\delta_{расч}) = \min_{\Omega_1}(k_{расч}(W_{кин}, \theta) \frac{J_i}{e_i \delta_a}) = [\delta_{расч}]. \quad (3.12)$$

Для оценки качества очистки введены дополнительные количественные критерии, которые построены на основе функции распределения толщины распыленного слоя.

Функция распределения построена следующим образом. По оси X отложены значения толщины распыленного слоя. Диапазон между его минимальным и максимальным значением δ_{min} и δ_{max} разделен на N интервалов. В качестве групповых частот использованы величины относительной площади поверхности детали $\bar{S}_i = S_i/S_\Sigma$, на которой толщина распыленного слоя находится между величинами δ_i и δ_{i+1} . Для оценки степени однородности очистки применены функции, определяющие математическое ожидание величины $\delta_{расч}$:

$$M\delta_{расч} = \sum_N \bar{S}_i \delta_i, \quad (3.13)$$

и среднее квадратичное отклонение $\delta_{расч}$:

$$\sigma\delta_{расч} = \sqrt{D\delta_{расч}} = \sqrt{\sum_N (\delta_{расч} - M\delta_{расч})^2 \bar{S}_i} \leq [\Delta\delta_{расч}]. \quad (3.14)$$

Таким образом, задача выбора технологического режима очистки сводится к минимизации целевой функции (3.10) с ограничениями на величину объема распыленного слоя, заданными выражениями (3.12), (3.14) и температуры детали, полученную в результате расчета с использованием сформулированной выше математической модели вида $max(T) \leq [T]$.

3.4 Методика выбора режима ионной очистки

Методика выбора технологических параметров ионной очистки (характери-

стики ионного потока, а также скорости вращения стола и установленных на нем деталей) рассмотрена на примере задачи очистки турбинных лопаток авиационных ГТД. Назначение режимов проведено в два этапа. На первом предложено проводить приближенную оценку количества оборотов и скорости вращения стола, исходя из конструктивных ограничений. На втором – производить уточненный расчет скоростей вращения стола и лопаток с учетом теплового состояния обрабатываемых деталей.

Общая длительность обработки складывается из двух промежутков времени – периодом пребывания лопатки в потоке ионов аргона и времени вне ионного потока (рис. 3.1). Для равномерной обработки необходимо чтобы лопатка в потоке ионов совершала целое количество оборотов, при этом начало обработки не должно зависеть от ориентации пера лопатки, т.е. от ориентации оси Z_l . При движении лопатки относительно осей Z и Z_l не происходит её разгона или торможения.

Для определения времени пребывания лопатки в потоке необходимо рассмотреть рис. 3.1, из которого следует

$$\gamma = \omega_1 t_1,$$

где γ – угол поворота лопатки вокруг оси Z_l , рад; ω_1 – угловая скорость вращения лопатки вокруг оси Z , рад/с; t_1 – время пребывания лопатки в потоке ионов аргона, с.

Отсюда время t_1 определится в виде:

$$t_1 = \frac{b}{\omega_1 R}, \quad (3.15)$$

где b – хорда, м; R – радиус вакуумного отсека, м.

Определяется количество оборотов лопатки вокруг своей оси:

$$\varphi = \omega_2 t = 2\pi n,$$

где φ – угол сектора, в котором лопатка находится в вакуумном отсеке, рад; ω_2 – угловая скорость вращения лопатки вокруг оси Z_l , рад/с; t – время движения лопатки в вакуумном отсеке, с; n – количество оборотов лопатки вокруг своей оси.

Отсюда

$$n = \frac{\omega_2}{2\pi} \times \frac{b}{R\omega_1}. \quad (3.16)$$

Количество оборотов зависит от угловых скоростей вращения лопатки относительно своей оси и оси стола вакуумного отсека.

Перебрав комбинации количества оборотов вращения лопатки вокруг осей Z и Z_1 , в соответствии с возможностями редуктора для привода вращения в вакуумной камере установки были выбраны такие значения: $n_1 = 13/60$ и $n_2 = 1/60$.

В соответствии с размерами вакуумной камеры по формуле (3.15) рассчитывается время пребывания лопатки в потоке ионов аргона:

$$t_1 = \frac{0,21}{0,415} \times \frac{60}{13 \cdot 2\pi} = 22 \text{ (с)}.$$

Далее следует определить количество удаляемых частиц материала подложки, необходимых для снятия дефектного слоя. Для этого использовано уравнение потери массы мишени, обусловленной распылением [139]:

$$\Delta m = \frac{SAIt}{26.6} \quad (3.17)$$

где S – коэффициент распыления, атом/ион; Δm – потеря массы материала подложки, мкг; I – ток падающих ионов, мкА; t – время облучения, час; A – массовое число атома мишени.

При определении потери массы следует иметь в виду некоторые эффекты, которые могут влиять на ее величину. Так, с одной стороны, ионы бомбардирующие мишень, могут быть захвачены атомами мишени, увеличивая тем самым массу мишени на Δm_1 . Но этот эффект существенно проявляется при высоких энергиях ионов [128, 141].

Для дальнейших расчетов необходимы данные о коэффициенте распыления материала обрабатываемой детали. Для этого при выполнении исследования определяли состав конкретных экспериментальных образцов. Исследования поверхностей лопаток проводили на растровом электронном микроскопе РЭМ-106 при помощи модуля «ЭДАР» (рис. 3.4).

Процентный состав элементов (рис. 3.5) в образцах соответствует диапазонам табличных значений элементов в сплаве ЖС6-К [145].

Принимая, что атомы элементов в сплаве ЖС6-К распределены равномерно в объеме и плотно упакованы [146], определили приведенное массовое число атома мишени как среднее арифметическое его составляющих, т.е.

$$A = \sum_i^k \frac{A_i \cdot C_i}{100\%}, \quad (3.18)$$

где k – соответствующий химический элемент сплава ЖС6-К.

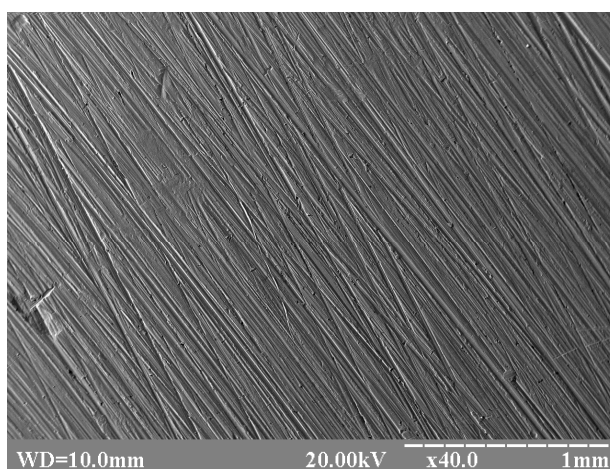


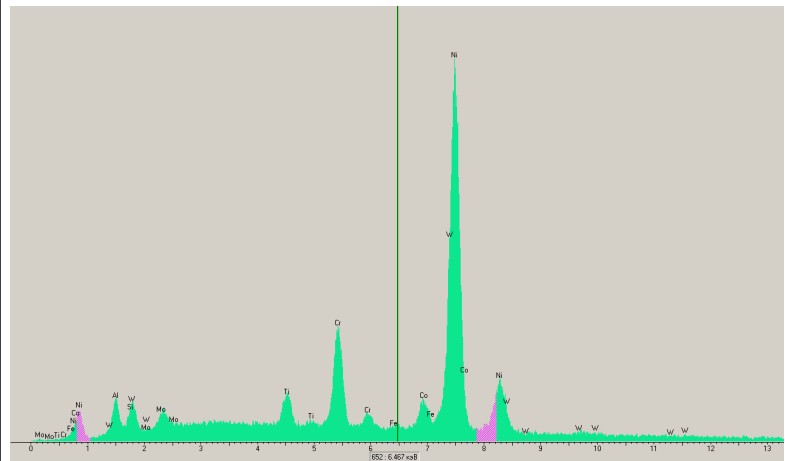
Рисунок 3.4 – Вид поверхности лопатки турбины

Коэффициент распыления для сплава ЖС6-К изменяется во времени в зависимости от угла падения частиц к нормали текущей поверхности. Приняли, что в заданном диапазоне энергий он будет изменяться по косинусоидальному закону в интервале $0^\circ \dots +60^\circ$ и $-60^\circ \dots 0^\circ$, а в интервале $+60^\circ \dots -60^\circ$ идет полировка изделия [147]. Приведенный коэффициент распыления для сплава ЖС6-К определим как среднее арифметическое его основных составляющих при энергии 1000 эВ (таблица 3.1) [148].

Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Ni K	80244	76.40
Cr K	20147	8.71
Co K	6422	4.76
W L	1038	4.42
Ti K	5787	2.35
Mo L	2666	2.13
Al K	5186	1.08
Fe K	270	0.13
Si K	90	0.02



а)

б)

Рисунок 3.5 – Результаты измерений процентного состава элементов, входящих в сплав ЖС6-К, на поверхности образца: а) содержание соответствующего химического элемента, входящих в сплав ЖС6-К, б) диаграмма распределения химических элементов на поверхности образца сплава ЖС6-К

Таблица 3.1

Коэффициенты распыления основных элементов сплава ЖС6-К при энергии 1000 эВ

Элемент	Ni	Cr	Co	W	Ti	Mo	Al	Fe
Коэффициент распыления	1,8	0,8	1,45	0,36	0,6	0,95	0,48	1,13

В соответствии с результатами микроскопии (см. рис. 3.5 а) по формуле (3.18) определяем приведенное массовое число атома мишени (таблица 3.2) и по выражению (3.19) приведенный коэффициент распыления для сплава ЖС6-К [137, 141]. Однако нужно отметить, что примесные атомы, имеющие процентное содержание > 0.02 % не учитываются из-за своей малости.

$$S = \sum_1^k \frac{S_i}{100\%}. \quad (3.19)$$

Таблица 3.2

Массовые числа основных элементов сплава ЖС6-К

Элемент	Ni	Cr	Co	W	Ti	Mo	Al	Fe
Масса элемента, г	58,71	52,996	58,933	183,85	47,9	95,94	26,981	55,847

Определив потерю массы материала подложки Δm за время одного прохода через поток ионов аргона, можно рассчитать количество частиц материала лопатки n_a , распыленных за этот проход:

$$n_a = \frac{\Delta m_1}{m_{\text{атома вещества}}}, \quad (3.20)$$

где $m_{\text{атома вещества}}$ – приведенная масса одного атома ЖС6-К, мкг.

Зная площадь обрабатываемой поверхности, можно определить массу и количество частиц материала лопатки, составляющих дефектный слой [140].

Скорость вращения стола и деталей определена при ограничениях температуры поверхности, которая, в свою очередь, найдена из решения краевой задачи. Параметрами оптимизации являются энергия заряженных частиц и скорость вращения лопатки в вакуумной камере.

При построении конечно-элементной модели лопатки использованы тетраэдры, октаэдры и призмы (рис. 3.6). Определены рациональные размеры конечных элементов из условия удовлетворения двум критериям – Aspect и Min angle. Первый критерий представляет собой отношение объема вписанной сферы к описанной вокруг элемента, а второй – минимальный угол, определяющий качество на отдельных гранях элемента. Для МКЭ расчетов приемлемы элементы с Aspect не ниже 0,3 и Min angle не менее 20°.

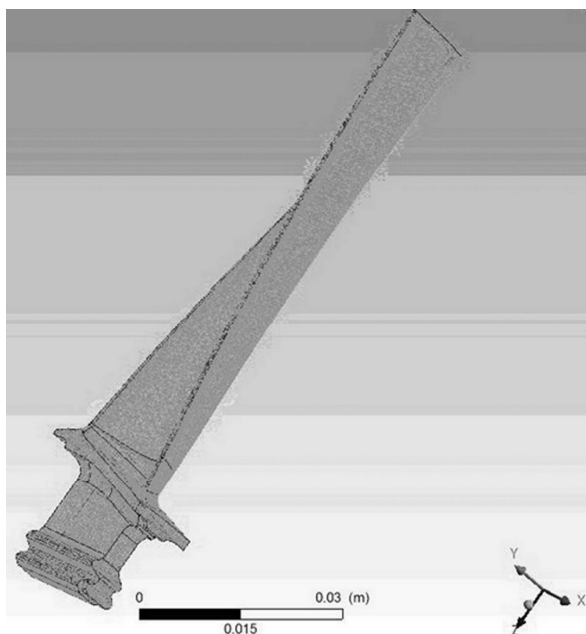


Рисунок 3.6 – Конечно-элементная модель лопатки

При моделировании визуализировали процесс прохождения лопатки через ионный пучок. При задании различных значений угловых скоростей вращения ω_1 и ω_2 контролировали соответствие результатов численного моделирования и аналитически рассчитанного времени прохождения ионного пучка.

При проведении численных экспериментов анализировали изменение температуры в контрольной точке на поверхности лопатки. В качестве таковой была выбрана точка с максимальным значением температуры (на кромке лопатки). Типичная картина изменения температуры во времени показана на рис. 3.7, зависимость температуры нагрева на поверхности лопатки от времени обработки для различных режимов ионной очистки показана на рис. 3.8.

Каждый пик увеличения температуры соответствует прохождению контрольной точки через ионный пучок. Для каждого значения скоростей вращения ω_1 и ω_2 и величины теплового потока после определенного количества циклов обработки лопатка переходит в квазистационарный тепловой режим, при котором выравнивается количество теплоты, полученное при прохождении ионного пучка и количество тепла, сброшенное излучением при дальнейшем движении лопатки в камере.

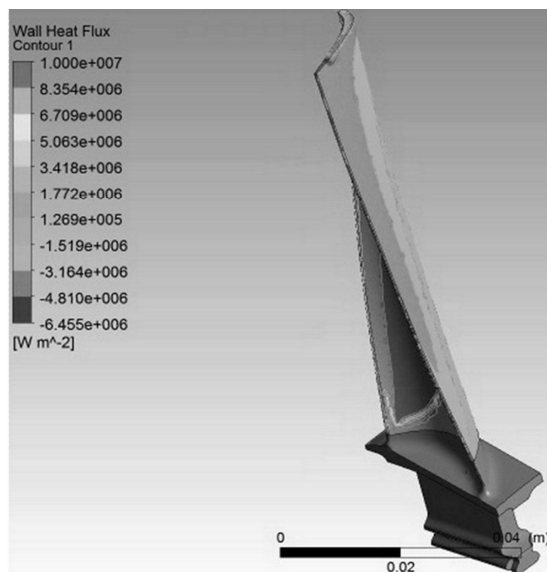


Рисунок 3.7 – Распределение теплового потока на лопатке при обработке потоком ионов аргона

Режим 1, зависимость изменения температуры для которого приведена на рис. 3.8, являлся базовым. При проведении теплового расчета было установлено, что при его реализации имеется существенный запас по максимальной температуре, достигаемой в процессе ионной очистки. При дальнейшем моделировании параметры ионного пучка были изменены. В ходе последовательных приближений для дальнейшего применения был рекомендован режим 2, для которого запас по тепловому ограничению для материала лопатки был минимальным. Сокращение времени очистки по сравнению с базовым вариантом составило не менее 10%. Для сравнения на рис. 3.8 приведен также один из графиков для режима, в для которого тепловое ограничение не соблюдалось.

Таким образом, зная такие входные характеристики детали как толщину удаляемого слоя и материал очищаемой детали были определены режимы технологических источников ионов и соответствующее время обработки. Время обработки при данных режимах уменьшилось от расчетного на 10%. При этом, такие исходные данные для материала изделия как плотность, общая суммарная площадь, теплопроводность и т.д. были сформированы на основе информации, имеющейся в CAD/CAE –системе.

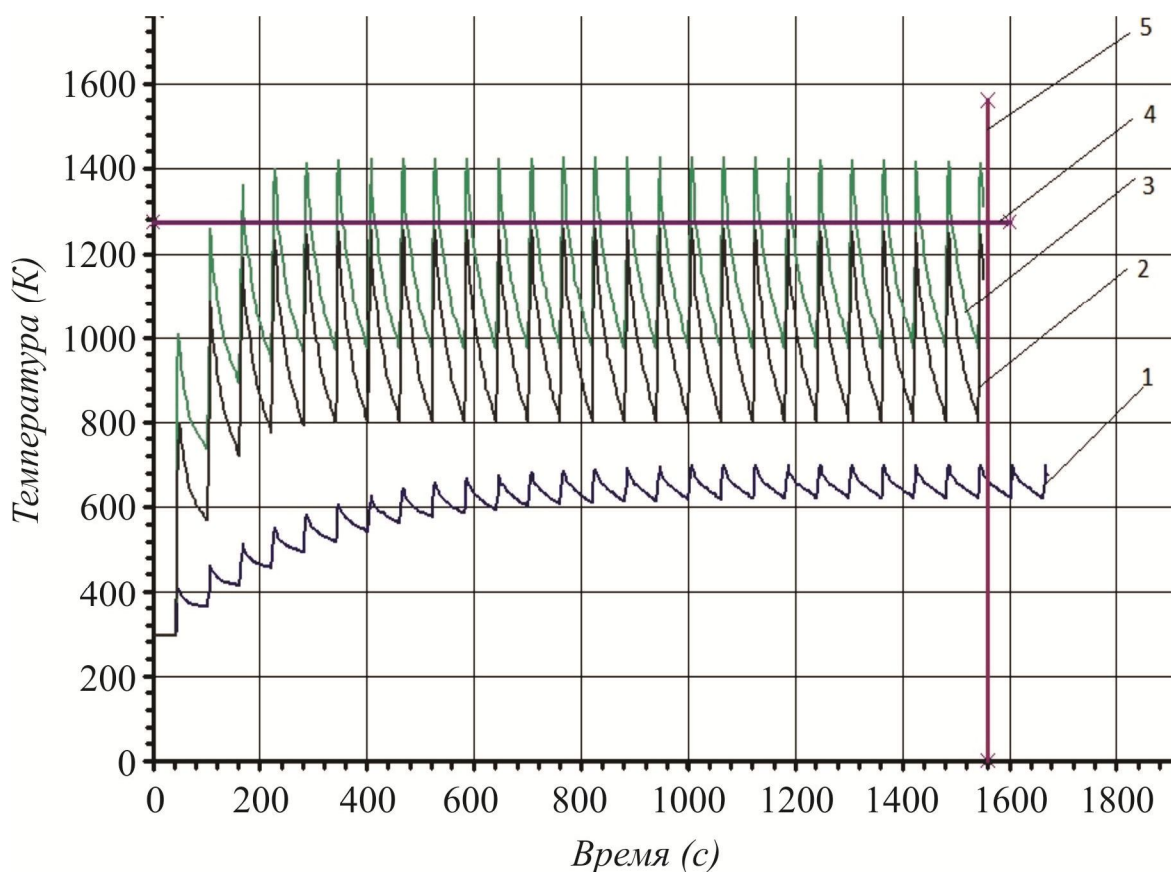


Рисунок 3.8 – Зависимость температуры нагрева на поверхности лопатки от времени обработки: 1 – 10^5 Вт/м², 2 – $0,5 \times 10^6$ Вт/м², 3 – 10^6 Вт/м², 4 – Температурное ограничение, 5 – Оптимальное время обработки

Разработанная математическая модель была использована для оптимизации режимов ионной очистки (на основе проведения численных экспериментов с ограничением по максимальным температуре и времени обработки). Так же следует отметить, что моделирование можно выполнять для изделия любой формы и из любого материала с возможностью ограничения по произвольно заданной температуре, а не только по температуре фазового перехода (например, отпуска, стеклования, диффузии).

В ранее выполненных работах выбор режимов технологических источников ионов перед напылением деталей ГТД предлагалось осуществлять в следующей последовательности:

- определение характеристики детали по чертежу и технологическому процессу;

- определение предельно допустимой температуры для материала детали;
- экспериментальное определение (методом «проб и ошибок») предельно- допустимых режимов обработки технологическим источником ионов для данной детали;
- определив оптимальные режимы обработки детали, по таблицам в зависимости от энергии рабочего газа определяют коэффициента распыления материала детали;
- расчет времени обработки изделия.

В характеристику детали входят: температуры фазовых переходов, удельная теплота плавления, теплоемкость, теплопроводность и плотность материала; шероховатость поверхностей детали; площадь поверхности и объем детали.

При использовании автоматизированных комплексов по очистке технологическим источником ионов перед напылением на поверхности деталей ГТД в условиях современного информационно интегрированного производства, исходные данные для назначения режимов обработки должны формироваться на основе информации, имеющейся в современных CAD/CAM/CAE системах.

Информация о геометрии поверхности, требованиях по величине распыляемого слоя должна импортироваться в автоматизированный комплекс непосредственно из модуля CAD. Из того же модуля должна поступать информация о материале деталей.

Однако зависимость коэффициента распыления материала обрабатываемых деталей от энергии ионов и угла их падения, а также теплофизические характеристики, как правило, отсутствуют в базах данных модулей CAD. Поэтому для автоматической настройки режимов ионной очистки эти модули должны быть дополнены специализированными базами данных, содержащими необходимую информацию.

Одно из необходимых мероприятий - предварительная очистка деталей перед ионной обработкой от микрочастиц, органических и минеральных загрязнений.

Такая очистка может быть выполнена термоимпульсным методом с использованием детонирующих газовых топливных смесей. В общем случае можно рекомендовать следующую последовательность технологических переходов:

- провести входной контроль деталей;
- обезжирить детали любым способом;
- после обезжиривания детали промыть и высушить;
- осуществить термоимпульсную обработку деталей;
- произвести ультразвуковую промывку деталей в водных растворах;
- произвести ионную очистку деталей с назначением режимов с учетом тепловых ограничений;
- произвести последующие технологические операции (модификацию поверхностного слоя при помощи ионной имплантации, нанесение покрытий) без разгерметизации вакуумной камеры;
- произвести контроль качества обработки деталей.

Выбор параметров технологических источников ионов для очистки деталей ГТД был предложен алгоритм их выбора (рис. 3.9). Алгоритм предусматривает выбор технологических параметров источника при начальном задании толщины снимаемого слоя, материала детали и формы поверхности. При задании этих начальных параметров происходит расчет мощности источника, времени обработки. Определяются оптимальные скорости движения и вращения детали, которые зависят от конструктивных особенностей приводов вращения стола в вакуумной камере. При дальнейших расчетах определяют текущую максимальную температуру на поверхности изделия, если она больше критической, то программа пересчитывает начальные технологические параметры процесса очистки детали источником ионов. Расчеты происходят до тех пор, пока не будет достигнуто основное условие – распылиться заданный слой детали и деталь не перегреется. После нахождения оптимальных параметров очистки определяют время обработки.

Предложенные разработки реализованы в виде технологических рекомендаций и программного обеспечения, которое используется для создания алгоритмов управления автоматизированными комплексами для напыления вакуумных покрытий на лопатки ГТД.



Рисунок 3.9 – Алгоритм выбора параметров процесса очистки детали источником ионов

3.5 Экспериментальная проверка методики оценки параметров технологических ускорителей для очистки

3.5.1 Оборудование и описание методики эксперимента

Схема расположения технологического ускорителя относительно измерительных зондов и заготовки в вакуумном отсеке показана на рис. 3.10.

Технологический ускоритель ионов аргона (1) смонтирован через изоляторы (2) на вакуумной камере (3) из нержавеющей стали. При помощи диффузионного вакуумного насоса ВА-8-4 обеспечивали эффективную откачку со скоростью 4000 л/с в диапазоне давлений рабочего газа $(5...6) \cdot 10^{-2}$ Па. На расстоянии 200 мм от источника

помещена мишень (5) с заземлением. Измерения параметров плазмы выполняли с помощью электростатических зондов (4).

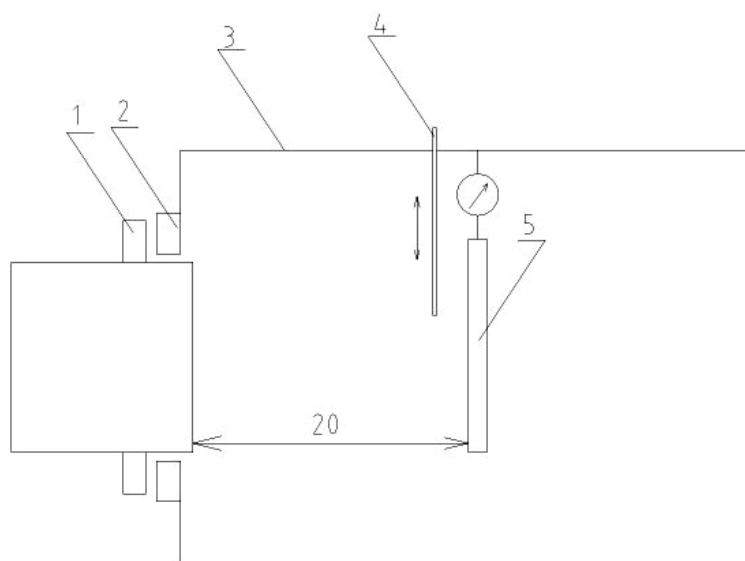


Рисунок 3.10 – Схема экспериментальной установки:

1 – технологический ускоритель, 2 – диэлектрическая вставка, 3 – камера, 4 – цилиндр Фарадея, плоский или многосеточный зонд, 5 – мишень

Подачу газовых компонентов осуществляли от специальной системы. Аргон из баллона высокого давления через редуктор подавали в ресивер, оттуда, через игольчатые натекатели, с помощью которых осуществляли тонкую регулировку потока, газ поступал в объем технологического отсека.

Серия экспериментов проводилась на АИИ типа УАС и ПИУ, которые обладают рядом достоинств и недостатков по сравнению друг с другом указанные выше.

УАС, а также другие АИИ основанные на разряде постоянного тока со скрещенными электрическим E и магнитным H полями имеют широкое практическое применение благодаря их большим возможностям, а также простоте и надежности конструкций. Помимо космической тематики, используются для получения пучков ионов различных веществ с энергией ионов от десятков электрон-вольт до нескольких десятков килоэлектрон-вольт при токе ионов до нескольких ампер, причем величину ионного тока можно изменять на несколько порядков без снижения эффективности ускорения, что делает их особенно привлекательными для различных физических

исследований и приложений.

УАС имеет не такую сложную, как у ПИУ, конструкцию системы электропитания и управления, для проведения операций по подготовке поверхностей деталей, не требующих высокой точности соблюдения всех параметров техпроцесса. Примером подобного рода операций и служит процесс очистки деталей от остаточных загрязнений перед нанесением покрытий.

Так как разрабатываемый ускоритель предназначен для использования совместно с уже существующим оборудованием, при его конструировании была предусмотрена возможность его установки на стандартные фланцы и подключения к стандартной системе охлаждения. Кроме того, для его питания можно применять уже существующие системы электропитания, которые ранее применялись при проведении предварительной чистки деталей. В ходе проведения проектных работ был выбран УАС, имеющий наиболее простую конструкцию, что в будущем обеспечило простоту его изготовления и эксплуатации (рис. 3.11).

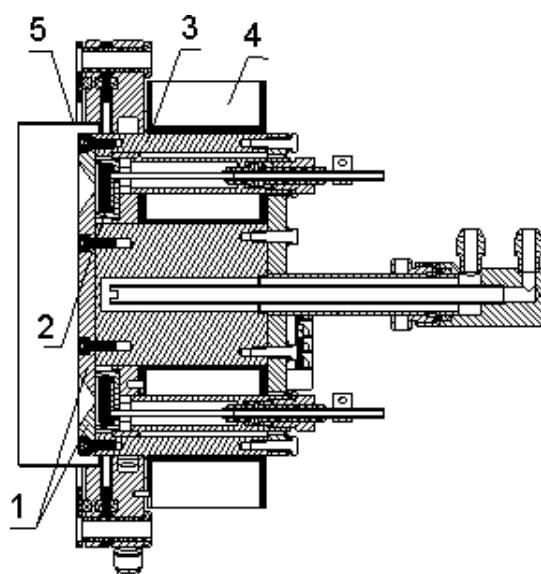


Рисунок 3.11 – Схема ускорителя с анодным слоем для предварительной очистки поверхности; 1 – полюсные наконечники 2 – анод, 3 – магнитопровод, 4 – соленоид, 5 – вставка

Цилиндрический корпус (3) выполнен из стали Ст3, которая обладает хорошими магнитными свойствами. Полюсные наконечники (1) также изготовленные из стали

Ст3 и одновременно являющиеся катодом, заземлены, что увеличивает надежность и безопасность при эксплуатации устройства. При включении электромагнита (4) внутри цилиндрического корпуса в ускоряющей промежутке создается радиальное магнитное поле необходимой конфигурации, которое замыкается полюсными наконечниками. Анод-коллектор (2), выполненный из нержавеющей стали X18H10T, представляет собой цилиндрическую замкнутую полость диаметром 170 и высотой 20 мм с щелевой подачей газа. В процессе проведения экспериментов для исключения появления разряда между источником и поверхностью камеры в конструкцию была добавлена нейтральная вставка (5), которая заземлена через резистор большого сопротивления для обеспечения токов утечки заряда с нейтральной вставки. Во избежание пробоев между магнитными полюсами и анодами соосно с ними также расположены диэлектрические вставки. Такая конструкция отличается от существующих тем, что большинство элементов магнитной системы расположены вне вакуумной камеры, что обеспечивает простой монтаж и эксплуатацию ускорителя.

Так как разработанный УАС предполагается устанавливать на технологическое устройство для нанесения жаростойких защитных покрытий «Булат» и «МАП», в котором использован источник дугового типа, то рабочий газ подается непосредственно через анод. Это позволяет работать при более глубоком вакууме и расширяет возможности регулирования параметров источника ионов.

Рабочий газ – аргон через коллектор поступает в анод-коллектор (2) и подается в ускоряющий канал. Для регулирования магнитного поля в пределах 0...700 мТл использован электромагнит (4). Электроны, совершая замкнутый холловский дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях, ионизируют атомы рабочего газа, в результате чего ионный пучок приобретает трубчатую форму. В процессе проведения экспериментов варьировали ширину и глубину ускоряющего канала. Заземленную через датчик тока мишень (5) располагали на расстояниях 0,2...0,5 м. В качестве мишени использовали серию лопаток типа ЖС6-К.

Экспериментальный УАС, изолированный от камеры для возможности измерения ионного тока пучка, формировал слабо расходящийся кольцевидный в сечении

пучок ионов рабочего газа.

Не смотря на все свои достоинства, описанные выше, ПИУ имеют довольно сложную конструкцию, поэтому при разработке была применена ГРК с радиальным магнитным полем. Это позволило существенно упростить конструкцию всего ускорителя в целом, добившись при этом достаточно высокой равномерности ионного пучка. Схема технологического ПИУ с диаметром ионно-оптической системы (ИОС) 140 мм представлен на рис. 3.12.

Газоразрядная камера (3) представляет собой цилиндр из нержавеющей стали, на котором укреплены остальные узлы ускорителя. Магнитная система (6) содержит шесть радиальных магнитопроводов с катушками, замкнутых на периферийный и центральный полюсные наконечники. Анод выполнен в виде диска с коллектором, через который в газоразрядную камеру подают основной расход рабочего тела. В ускорителе применён газоразрядный полый катод (ГРПК), установленный в центральном полюсном наконечнике. В катоде в качестве эмиттера электронов использована вставка, изготовленная из высокоэмиссионного материала LaB_6 . Для запуска катода и поддержания стабильного разряда в ГРПК использован вольфрамовый нагреватель. За катодом (по потоку) установлен отражатель (5), образующий вместе с центральным полюсным наконечником катодную щель (4), через которую электроны из прикатодной плазмы поступают в объём газоразрядной камеры. ИОС представляет собой узел, состоящий экранного (6), ускоряющего (7) и замедляющего электродов. Роль замедляющего электрода выполняет кольцо из нержавеющей стали, которое является элементом экранного кожуха ускорителя. Применение сферических электродов в конструкции ИОС даёт следующие преимущества [112, 134, 135]:

- ионно-оптическая система сферической формы имеет высокую жёсткость, что позволяет применять электроды меньшей толщины. Это позволяет повысить плотность ионного пучка;
- однонаправленное перемещение электродов, вызванное температурными напряжениями, позволяет сохранять постоянным межэлектродный зазор. Это резко уменьшает число пробоев, позволяя ускорителю работать при меньших зазорах ме-

жду электродами ИОС, что также позволяет добиться большей плотности ионного пучка.

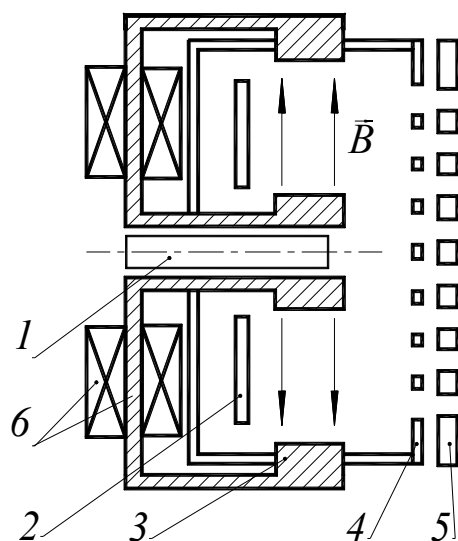


Рисунок 3.12 – ПИУ с радиальным магнитным полем:

- 1 – катод, 2 – анод, 3 – газоразрядная камера, 4 – экранный электрод,
5 – вытягивающий электрод, 6 – магнитная система

Разработанная ИОС является поджатой, у которой диаметр отверстий в экранном электроде больше, чем в ускоряющем. ИОС данной конструкции может работать при меньших расходах рабочего газа при одном и том же ионном токе.

Следует отметить, что в электростатических ускорителях, каковым является технологический плазменный ионный ускоритель, при проектировании ИОС необходимо применять все меры, приближающие плотность ионного тока в пучке к максимальной. Одной из таких мер является максимальная прозрачность экранного электрода для ионного потока. В нашем случае эта величина равняется 0,65.

Данная модель технологического плазменного ионного ускорителя предназначена для работы с газообразными рабочими телами. Газ подаётся в газоразрядную камеру по двум каналам. Одна часть (~20÷30%) направляется в катод, а вторая часть (~70÷80%) – в анодный коллектор. Возможно применение двух различных газов. Для работы катода необходим нейтральный газ (Аргон, Криптон, Ксенон), причём для увеличения ресурса газоразрядного полого катода этот газ должен иметь чисто-

ту на уровне 0,999. В качестве основного рабочего тела возможно применение как нейтральных газов, так и реактивных (например O_2 , F_2 , Cl_2). Испытания и исследования описываемого технологического плазменного ионного ускорителя проводились на аргоне. Изучение эрозии электродов ИОС показало, что ожидаемый ресурс ускорителя, обусловленный их стойкостью, лежит на уровне 3000 часов.

На основании проведенных исследований показано, что использование в конструкции технологических плазменных ионных ускорителей газоразрядных камер с радиальным магнитным полем позволяет добиться высокой равномерности плотности ионного тока по сечению пучка. Кроме того, газоразрядные камеры подобной конструкции обеспечивают высокий коэффициент использования рабочего тела, что очень важно при невысокой производительности вакуумной системы технологической установки. Это даёт возможность сделать вывод о целесообразности применения газоразрядных камер с радиальным магнитным полем при проектировании технологических плазменных ускорителей.

Проведенные исследования также показали, что сферические ИОС позволяют получать при помощи технологических плазменных ионных ускорителей ионные пучки с высокой, регулируемой в широком диапазоне, плотностью ионного тока. При этом они обладают достаточно большим ресурсом и стабильностью параметров. Благодаря этим качествам сферические ИОС тоже могут быть рекомендованы для использования в технологических плазменных ионных ускорителях (ТПИУ).

По результатам исследований опытных образцов, обработанных ТПИУ [112], сделан вывод о целесообразности использования ТПИУ в технологии ремонта лопаток ГТД и других изделий для удаления покрытия после эксплуатации. Также ТПИУ может быть применен для снижения шероховатости поверхностей деталей, например, лопаток турбин, после нанесения на них покрытий с использованием дуговых источников с целью улучшения газодинамических характеристик проточной части ГТД.

При проектировании магнитной системы учитывались следующие моменты. В катодной щели осевая составляющая магнитного поля должна быть много больше

радиальной. Это необходимо для того, чтобы при движении электронов от оси ускорителя к периферии катодной щели в скрещенных $E \perp H$ полях создавались условия, способствующие их нагреву [112, 119, 122]. Таким образом, в объём газоразрядной камеры поступают высокоэнергетичные электроны, являющиеся причиной эффективной ионизации рабочего газа. Основное радиальное магнитное поле создаётся в зоне перед анодом, что препятствует свободному уходу электронов из объёма газоразрядной камеры и, тем самым, улучшает коэффициент их использования. В зоне перед ИОС величина магнитной индукции на порядок меньше, что улучшает равномерность распределения плотности плазмы перед экраным электродом и, в свою очередь, повышает равномерность ионного пучка.

Одними из наиболее важных параметров являются взаимное расположение обрабатываемых изделий относительно технологического ускорителя, при этом целесообразно достичь максимальной скорости проведения процесса при обеспечении максимальной равномерности обработки. Однако следует упомянуть, что при работе в данных режимах несколько снижается энергетическая эффективность работы АИИ, однако, при обработке таких дорогостоящих изделий, как лопатки ГТД, этим фактом можно пренебречь.

Согласно экспериментальным данным, представленным в [112, 119] зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов для частиц низких энергий ($\sim 0,5 \dots 1$ кэВ) в диапазоне углов $\varphi = 0 \dots 60^\circ$ имеет вид:

$$S_\varphi = S_0 s c^{3/2} \varphi, \quad (3.21)$$

где S_0 – коэффициент распыления для угла падения ионов $\varphi = 0^\circ$.

При углах $\varphi > 60^\circ$ происходит резкое отклонение зависимости $S_\varphi(\varphi)$ от (3.21) в сторону уменьшения коэффициента распыления.

Для случая бомбардировки поверхности частицами средних энергий ($\sim 1 \dots 10$ кэВ) данная зависимость принимает следующий вид:

$$S_\varphi = S_0 s c \varphi. \quad (3.22)$$

Скорость распыления может быть определена по формуле:

$$V_p = S_\phi j m_a \cos \phi / e, \quad (3.23)$$

где j – плотность ионного тока, m_a – масса атома распыляемого материала, e – заряд электрона.

Из чего следует, что для случая бомбардировки поверхности ионами средних энергий скорость распыления в диапазоне $\varphi = 0 \dots 60^\circ$ зависит от угла падения ионов не столь существенно, а более зависит от плотности ионного тока, то формула (3.23) в этом случае примет вид:

$$V_p = S_\phi j m_a / e. \quad (3.24)$$

Таким образом, можно рекомендовать проводить операции по удалению старых жаростойких покрытий, используя ионные пучки максимальной плотности и с максимальной энергией ионов, которые могут обеспечить данные АИИ. При этом достигается максимальная скорость и равномерность обработки поверхностей сложной формы.

В тоже время для случая бомбардировки частицами низких энергий формула (3.24) может быть переписана следующим образом:

$$V_p = \frac{S_0 j m_a}{e \sqrt{\cos \phi}}. \quad (3.25)$$

Функция (3.25) является монотонно возрастающей в диапазоне углов $\varphi = 0 \dots 90^\circ$. Однако, следует учитывать, что при углах $\varphi > 60^\circ$ происходит резкое отклонение значения коэффициента распыления от зависимости (3.21). Из чего следует, что при распылении плоских поверхностей ионами низких энергий оптимальным является угол падения ионов $\sim 55^\circ \dots 60^\circ$. В этом случае достигается максимальная скорость распыления при высокой энергетической эффективности работы.

Однако следует учитывать, что при углах $\varphi > 60^\circ$ происходит резкое отклонение значения коэффициента распыления от зависимости (3.21). Из чего следует, что при распылении поверхностей ионами низких энергий оптимальным является угол падения ионов $\sim 55^\circ \dots 60^\circ$, а оптимальное расстояние от технологического ускорителя до мишени соответствует принятому (рис. 3.11).

Общий вид технологических ускорителей для предварительной очистки деталей ГТД показан на рис. 3.13.



а)

б)

Рисунок 3.13 – Опытные образцы АИИ: а – УАС; б – ПИУ

Образцы технологических ускорителей ионов разработаны для существующих технологических установок типа «Булат», «МАП» и предназначены для очистки деталей непосредственно перед нанесением покрытия.

3.5.2 Результаты эксперимента

Эксперимент проводили на серии образцов – пластин, изготовленных из материала ЖС6-К. Образцы, геометрические размеры которых 10×20 мм и толщиной 2 мм, изготовлены из литейного жаропрочного никелевого сплава, для которого является характерным наличие различных фаз в структуре.

Рекомендованная для проведения исследований плотность ионного тока составила около 4 mA/cm^2 , энергия частиц – 1,6 кэВ. Пластины – образец располагали на расстоянии 200 мм от источника, и поворачивали при помощи привода вращения с расчетной скоростью.

Исследования структуры поверхностей выполняли на растровом электронном микроскопе РЭМ-106 (рис. 3.14) в отраженных лучах; морфологию поверхности пла-

стин изучали на спекл – интерферометре; исследование поверхности образца на наличие примесных включений проводили на люминесцентном оптическом спектральном комплексе. На образец наносили риски, при помощи которых исследовали одну и ту же часть поверхности до и после обработки.



Рисунок 3.14 – Электронный микроскоп РЭМ - 106 для исследования образцов

Для выполнения операции чистки поверхности потоком ионов аргона образец поступил после этапа шлифования (рис. 3.15).

В эксперименте изучение параметров шероховатости поверхностей осуществляли методом бесконтактного измерения на спекл - интерферометрическом комплексе, схема рабочего цикла которого показана на рис. 3.16. Комплекс содержит источник когерентного излучения (1), который облучает образец (2). Отражаясь, луч проходит через фокусирующую линзу (3), после которой его принимает матричный оптический фотоприемник (4). В дальнейшем данные поступают на обработку в ЭВМ.

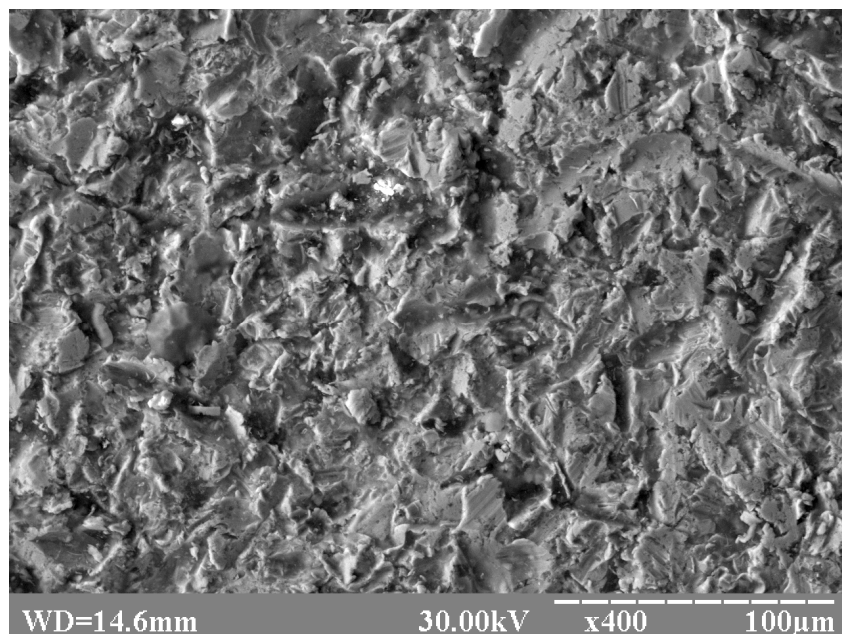


Рисунок 3.15 – Вид поверхности необработанного образца из сплава ЖС6-К

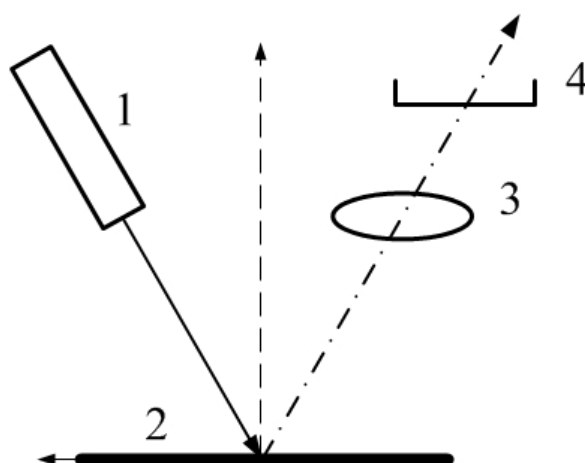


Рисунок 3.16 – Схема прохождения когерентного излучения

Известно, что отражаясь от шероховатостей поверхности когерентное излучение, формирует диффузную и зеркальную компоненты. С уменьшением высоты неровностей энергия из диффузной компоненты перераспределяется в зеркальную. В основу метода положен анализ соотношений диффузной и зеркальной компонент, сформированных одновременно на одном интерференционном изображении (спекл - картине), образовавшимся в области приема отраженного шероховатой поверхностью когерентного излучения. Известно, что случайные фазы волн, отраженных от элемен-

тарных площадок поверхности, однозначно связаны с профилем её шероховатости [149].

Оригинальность такого подхода заключена в том что, предложенный метод позволяет оценивать шероховатость поверхности, сохраняя бесконтактность и требуемую точность измерений. Методологическая погрешность при проведении измерений не превышала 10% [149, 150].

Исследование проводили в произвольно выбранных точках поверхности образца. Результаты измерений представлены на рис. 3.17.

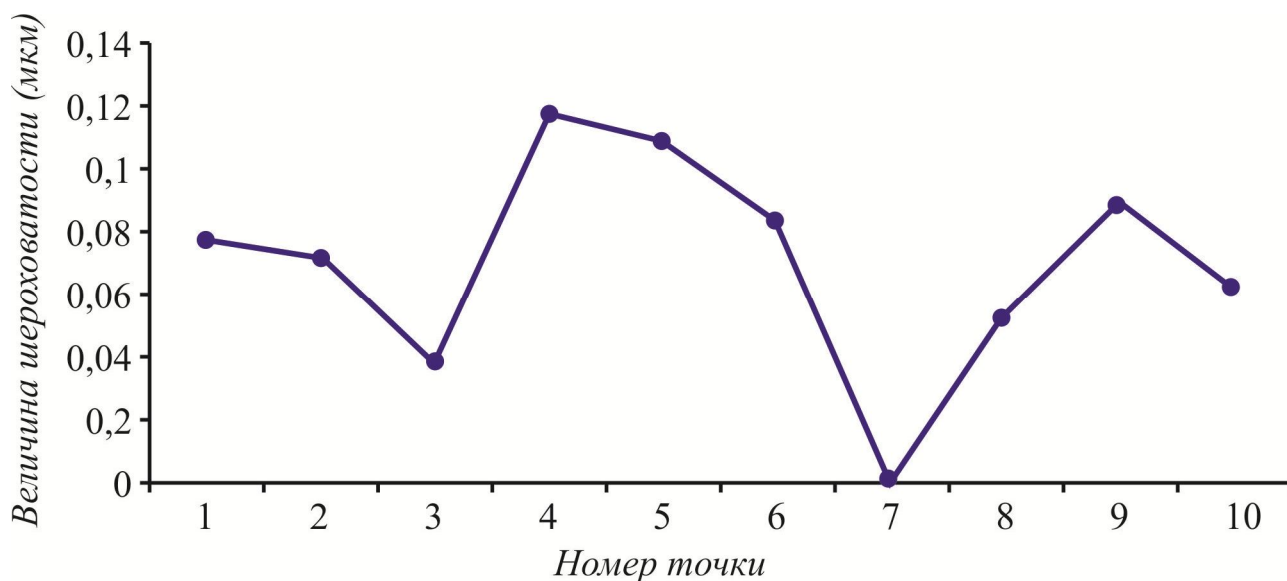


Рисунок 3.17 – Шероховатость необработанной поверхности образца из материала ЖС6-К

При количественном определении примесных включений до и после очистки использовался спектральный комплекс [151, 152]. Комплекс предназначен для регистрации спектров излучения, а также возбуждения люминесценции в спектральном диапазоне длин волн 200...2000 нм с последующей математической обработкой. Основу комплекса составляют монохроматоры МДР-2 и МДР-12 с фотоэлектронными преобразователями ФЭУ - 106 или ФЭУ - 136 и персонального компьютера. Для повышения чувствительности при регистрации оптических спектров применяли одноэлектронный режим работы ФЭУ, который предполагает охлаждение преобразователя до температур ниже комнатной. С этой целью в корпусе кожуха ФЭУ рас-

положен микроохладитель, работающий на эффекте Пельтье. В качестве источников оптического возбуждения использовали лазеры (ЛГИ - 505, лазер газовый импульсный азотный; ЛГН-517, лазер газовый непрерывный с гелий - кадмиевым наполнением) с блоками питания, и ксеноновая лампа высокого давления ДКсШ - 1000 (лампа дуговая ксеноновая шарообразная), с блоком питания и блоком поджога. Функциональная схема измерительного комплекса изображена на рис. 3.18.

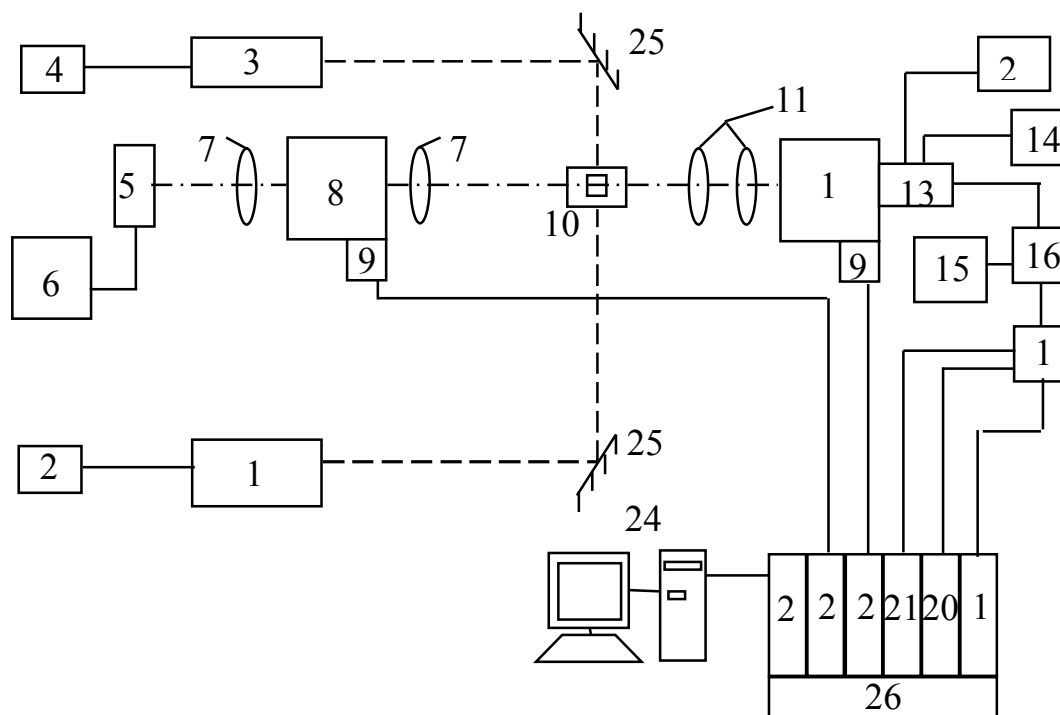


Рисунок 3.18 – Блок-схема оптического спектрального комплекса для исследования примесных включений на подложке

Подачу газовых компонентов осуществляли от специальной системы. Аргон из баллона высокого давления через редуктор подавали в ресивер, оттуда, через игольчатые натекатели, с помощью которых осуществляли тонкую регулировку потока, газ поступал в объем технологического отсека.

Автоматизированный спектральный комплекс включает в себя системы оптического возбуждения, системы фотоэлектрической регистрации и управления.

В системе оптического возбуждения предусмотрено использование:

- лазера (1) (ЛГИ - 505 с длиной волны оптического излучения 337 нм, энергией излучения 3,68 эВ и средней мощностью лазерного излучения 120 мВт) с бло-

ком питания (2);

- лазера (3) (ЛГН-517 с длиной волны оптического излучения 441,6 нм и энергией излучения 2,81 эВ и средней мощностью лазерного излучения 10 мВт) с блоком питания (4);

- ксеноновой лампы ДКсШ-1000 (5) со средней мощностью 1000 Вт с блоком питания (6). Эта лампа имеет сплошной спектр в видимой области излучений.

Лазерное излучение направлялось на исследуемый образец под прямым углом к оптической оси системы. Это необходимо для минимизации влияния возбуждающего излучения на систему регистрации. При необходимости уменьшения интенсивности возбуждающего излучения возможно применение нейтральных светофильтров с известным коэффициентом ослабления.

При использовании ксеноновой лампы (ДКсШ-1000) в качестве источника возбуждающего излучения необходимый спектральный интервал выделяли с помощью монохроматора МДР-2 (8), снабженного механизмом автоматического поворота дифракционной решетки, который, в свою очередь, через согласующее устройство типа КАМАК (19-23, 26) подключен к персональному компьютеру (ПК) типа IBM - 486 (24).

Лампы данного типа практически не имеют периода разгорания и работают на постоянном токе. Около 9 % всей мощности излучения ламп такого типа сосредоточено в ультрафиолетовой области спектра, около 35 % - в видимой и около 56 % - в близкой инфракрасной области спектра (рис. 3.19). Световая отдача возрастает с ростом мощности ламп, стремясь к определенному пределу. Лампы обладают вредным побочным эффектом, являясь генераторами сильного окислителя – газа озона (O_3), поэтому требуют сильной воздушной вентиляции и применения комбинированного водно-воздушного охлаждения.

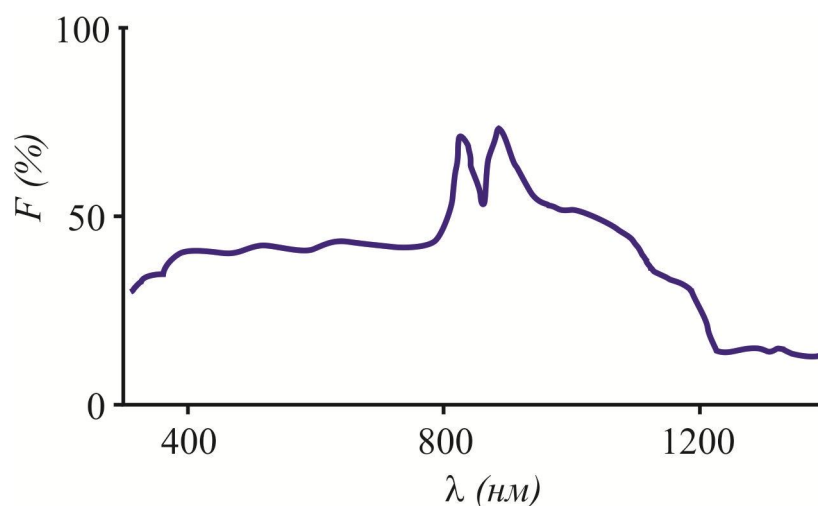


Рисунок 3.19 – Типичный спектр излучения дуговой лампы типа ДксЭл-1000

Важной характеристикой источника возбуждающего света, с учетом оптической системы экспериментальной установки, является распределение его интенсивности излучения по спектру. Получить такое распределение можно с использованием фотолюминесцентного приемника, обладающего постоянным квантовым выходом в требуемом диапазоне. Известно, что таким приемником, обладающим постоянным квантовым выходом в диапазоне длин волн 250...600 нм, является раствор родамина-В в этиленгликоле при концентрации 8 г/л.

Все спектры ФЛ и спектры возбуждения ФЛ измерены с учетом поглощения световой энергии в оптической системе экспериментальной установки.

Для дистанционного управления монохроматором последний снабжен шаговым двигателем ДШИ–200–2 (9), с понижающим редуктором. Шаговый двигатель ДШИ-200-2 через модуль управляющий (21) подключен к системе управления комплексом стандарта КАМАК (26). Такая система управления длиной волны возбуждающего излучения обеспечивает точность установки длины волны не ниже чем 1/6 нм на один шаг ротора шагового двигателя. После прохождения монохроматора возбуждающее излучение через систему фокусирующих линз (7) попадает на исследуемый образец, помещенный в кварцевый криостат (10). Излучение образца через конденсор (11) фокусируется на входную щель монохроматора МДР - 12 (12) системы регистрации. Регистрирующий монохроматор, как и монохроматор системы воз-

буждения, также снабжен шаговым двигателем ДШИ - 200 - 2 (9) для автоматического дистанционного сканирования. Система управления монохроматором МДР - 12 обеспечивает точность установки длины волны не ниже 0,01 нм. В качестве преобразования световой энергии в электрический сигнал применен фотоэлектронный умножитель ФЭУ - 136 (13) с полупрозрачным сурьмяно-калиево-натриево-цезиевым фотокатодом, электростатическим фокусированием электронов, одиннадцати-диодной системой умножения и торцевым оптическим входом. Данный тип ФЭУ применяется как приемник излучения для области спектра 300...830 нм. Для повышения чувствительности ФЭУ работает в режиме счета одноэлектронных импульсов (счет фотонов). При этом скорость счета темновых импульсов анодного тока при температуре 293 К не превышает 400 имп/с. Так как режим счета одиночных фотонов предполагает охлаждение ФЭУ – 136 до температур ниже комнатных, то в данном случае ФЭУ охлаждается до минус (25...35)°С. Для этой цели в защитном кожухе ФЭУ расположен микроохладитель, работающий на эффекте Пельтье, с блоком питания охладителя (27). При этом горячие спаи микроохладителя для отвода теплоты орошаются проточной водой. После ФЭУ одноэлектронные импульсы поступают на широкополосный высокочастотный транзисторный усилитель (16). После усилителя импульсы поступают на двухпороговый дискриминатор (17). Значения напряжения порогов дискриминации задают двумя ЦАП (21,20), входящими в комплект системы КАМАК (26), которая ими же и управляет. Далее импульсы поступают на счетчик (19), также входящий в штатный комплект системы КАМАК. Максимальная скорость счета импульсов составляет 10^5 имп/с.

Общее управление всем измерительным комплексом осуществляется при помощи КАМАК, сопряженного с персональным компьютером IBM - 486 DX (24) с использованием блока сопряжения (23).

Основные технические данные монохроматоров, входящих в состав оптического измерительного комплекса приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Сравнительные характеристики монохроматоров МДР - 2 и МДР - 12

Характеристика монохроматора	Единица измерения	МДР - 2	МДР - 12
Спектральный диапазон	нм	200 - 2500	200 – 4000
Светосила	-	1 : 2,5	1 : 3
Фокусное расстояние объектива	мм	400	300
Величина обратной линейной дисперсии (для диапазона)	нм / мм	2 (200 нм-600 нм) 4 (400 нм-1200 нм) 8 (800 нм-2500 нм)	2,4 (200 нм-500 нм) 2,4 (350 нм-1000 нм) 4,8 (700 нм-2000 нм) 9,6 (1400 нм-4000 нм)

Таким образом, при исследовании на спектральном комплексе в видимой области (300..800 нм) на необработанной пластине (рис. 3.20) из сплава ЖС6-К верхняя горизонтальная линия показывает отражение от чистой поверхности, кривая ниже - спектр исследуемой поверхности.

Пики на линии поглощения исследуемой поверхности, характерные для органики на поверхности ЖС6-К (рис. 3.20) показывают:

- широкие линии поглощения в районе 770...800 нм характерны для обертоновых колебаний групп: $-\text{CH}_2-$ и $-\text{CH}_3$;
- широкая полоса с максимумом в районе 300 нм: колебания перехода типа π^* в цепочке $-\text{HC}=\text{CH}-$;
- максимумы в районе 460, 480, 540, 600 – поглощение в бензольных кольцах (как в одиночных, так и в совокупности), содержащих окси- ($-\text{OH}$) и амино- ($-\text{NH}_2$) группы.

При исследовании в спектрах отражения ИК - области на поверхности необработанного образца из материала ЖС6-К (рис. 3.21) верхняя горизонтальная линия -

отражение от чистой поверхности, кривая ниже - спектр исследуемой поверхности.

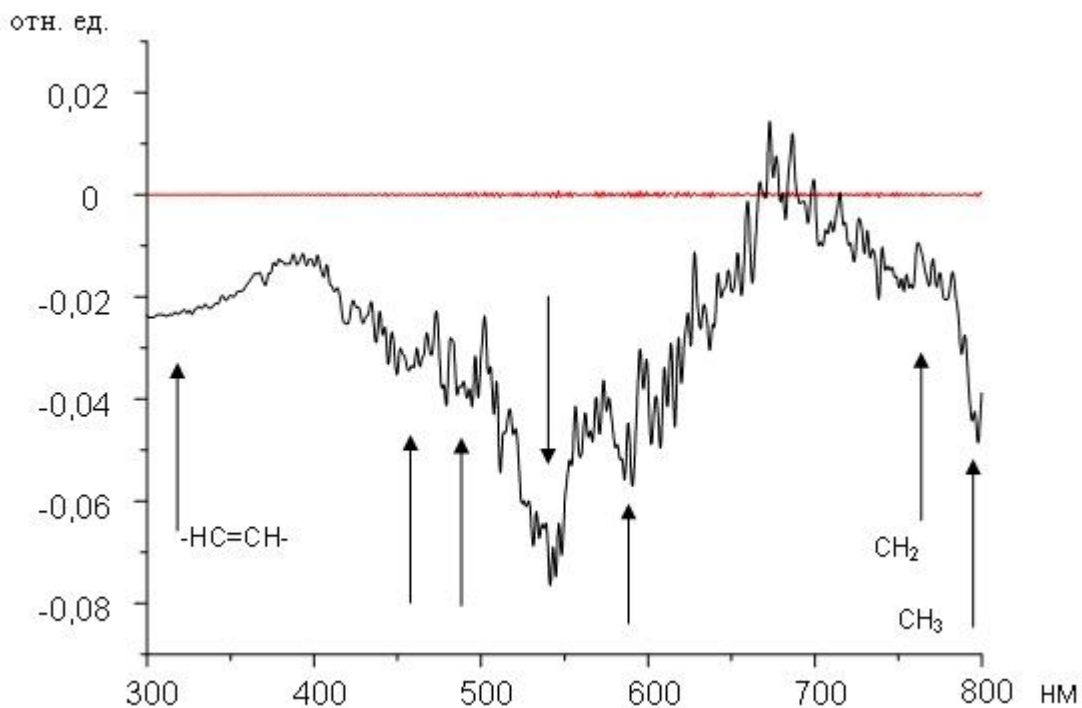


Рисунок 3.20 – Спектр отражения в видимой области (300...800 нм) на поверхности, необработанного образца из материала ЖС6-К

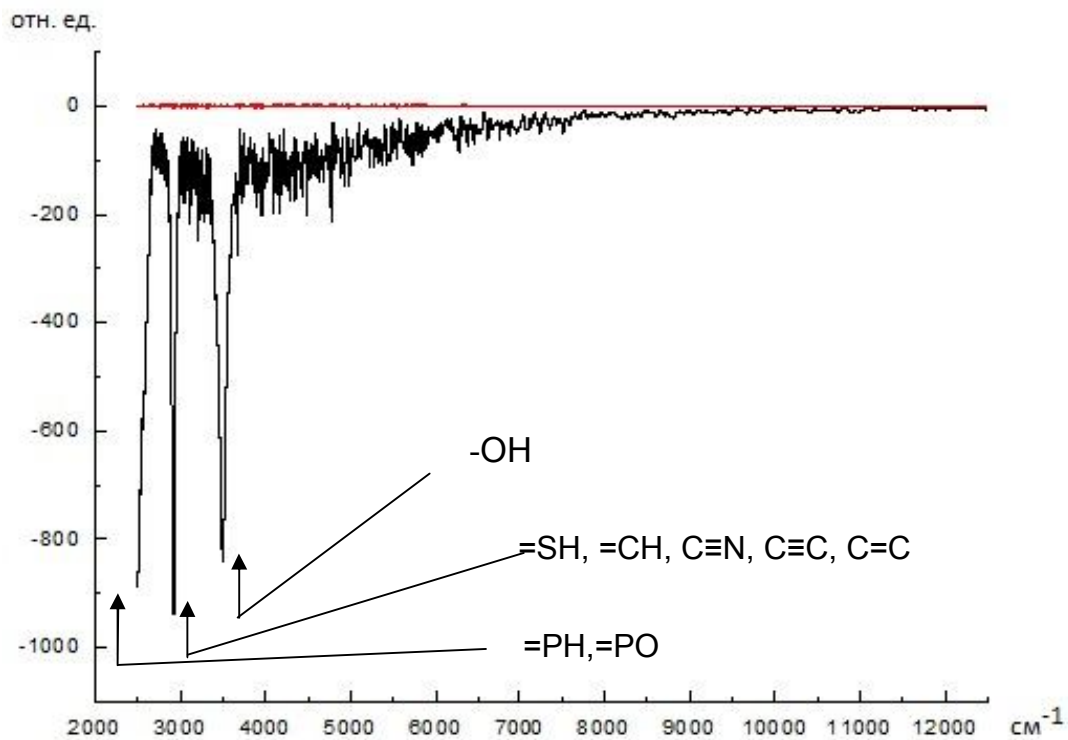


Рисунок 3.21 – Спектр отражения в ИК-области на поверхности необработанного образца из материала ЖС6-К

Анализируя спектр поглощения исследуемой поверхности на поверхности образца ЖС6-К (рис. 3.21) можно выделить следующие области:

- 2500 см^{-1} : широкая линия колебаний в системе: $=\text{PН}, =\text{РО}$ (фосфины и их оксиды, фосфорные кислоты $\text{Rn}(\text{НО})_3\text{-nPO}$);
- 2900...3050 см^{-1} : колебания в системе $=\text{SH}, =\text{CH}, \text{C}\equiv\text{N}, \text{C}\equiv\text{C}, \text{C}=\text{C}$ (алкины, амины, нитрилы, алкалы);
- 3500 см^{-1} : колебания в системе $-\text{ОН}$ (производные от высших спиртов и фенолов).

Для определения изменения массы лопатки до и после обработки использовали весы аналитические типа АДВ-200 М второго класса. Масса необработанной пластины из материала ЖС6-К составила 3,68 г.

При проведении экспериментов по выше приведенным рекомендациям, параметры технологических ускорителей соответствовали следующим диапазонам величин:

- параметры экспериментальных условий для УАС

Давление в вакуумной камере, Па	$(5...6)\cdot 10^{-2}$
Анодное напряжение, кВ	0,3...2
Напряженность магнитного поля, мТл	0...700
Плотность ионного пучка, $\text{мА}/\text{см}^2$	≤ 2

- – параметры экспериментальных условий для ПИУ

Давление в вакуумной камере, Па	$3\cdot 10^{-2}... 5\cdot 10^{-4}$
Анодное напряжение, В	50...60
Напряженность магнитного поля, мТл	около 15
Плотность ионного пучка, $\text{мА}/\text{см}^2$	$\leq 4,2$

В ходе проведенных экспериментов оценивали относительную погрешность [78], которая не превысила 5,5%. Такая высокая погрешность вызвана рядом случайных внешних факторов: изменением атмосферного давления и влажности воздуха,

степенью чистоты плазмообразующего газа и т.п.

На рис. 3.22 показан вид обработанной потоком ионов аргона поверхности лопатки ЖС6-К. На обработанном участке видно вскрытие дефектов в материале. Это связано с тем, что на лопатке могли присутствовать дефекты типа пористости (превосходящей допустимую норму), неудовлетворительная макроструктура (размер зерна), металлургические дефекты типа неслитин и отклонение химического состава от требований ТУ, что скорее всего и привело, к наличию на поверхности фаз или включений, обладающих различными коэффициентами распыления, т.е. наблюдали травление преимущественно фаз и включений с большим коэффициентом распыления.

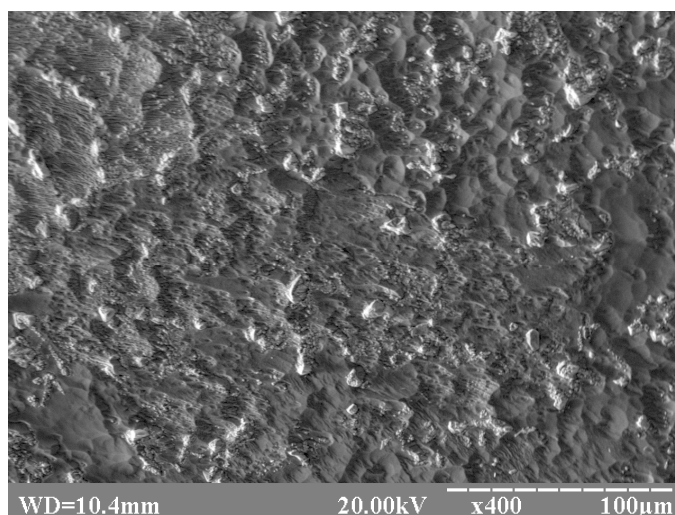


Рисунок 3.22 – Вид поверхности образца из материала ЖС6-К после обработки потоком ионов аргона

Установлено расширение и увеличение фактической площади поверхности, которая может способствовать приросту зоны контакта между покрытиями и подложкой, что, как следствие, увеличит величину адгезии [140]. При этом шероховатость поверхности на микроскопическом уровне уменьшилась (рис. 3.23), что можно объяснить эффектом «полирования», который возникает при изменении угла падения атомов аргона от нормали к поверхности при повороте лопатки относительно своей оси.

Масса лопатки при очистке уменьшилась до 3,47 г, из чего можно сделать вывод, что средняя величина удаленного слоя с поверхности составила 0,4 мкм, что пре-

вышает среднюю величину шероховатости до очистки. При этом органических соединений на поверхности не осталось (рисунки 3.24 и 3.25), линии – отражение от чистой поверхности, совпадающий со спектром исследуемой поверхности.

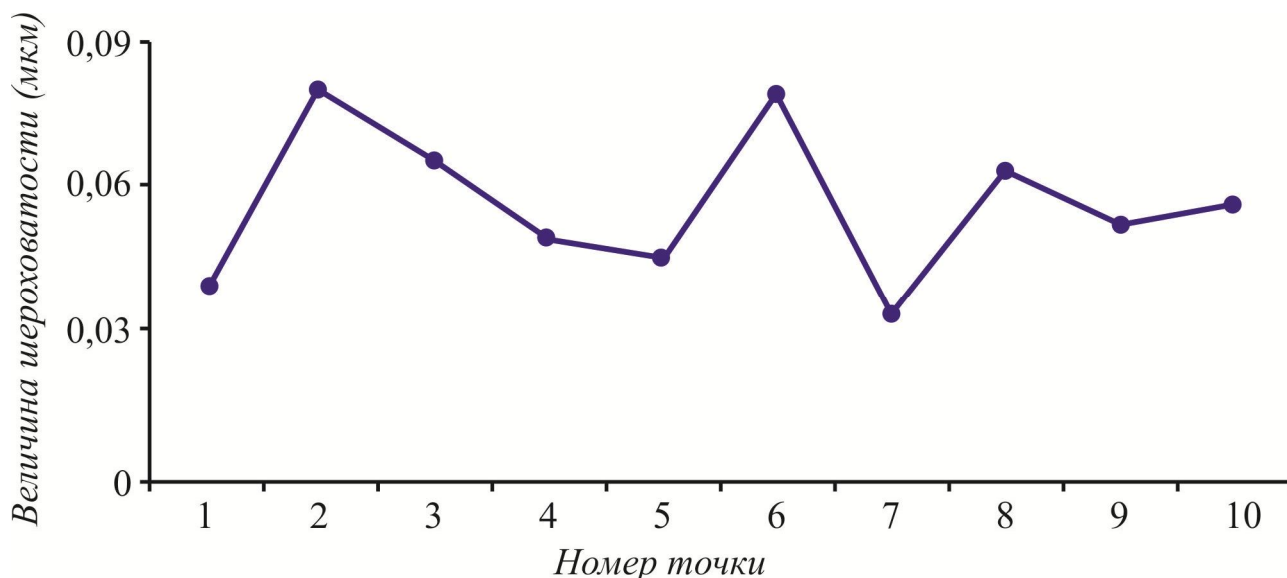


Рисунок 3.23 – Шероховатость обработанной потоком ионов поверхности образца

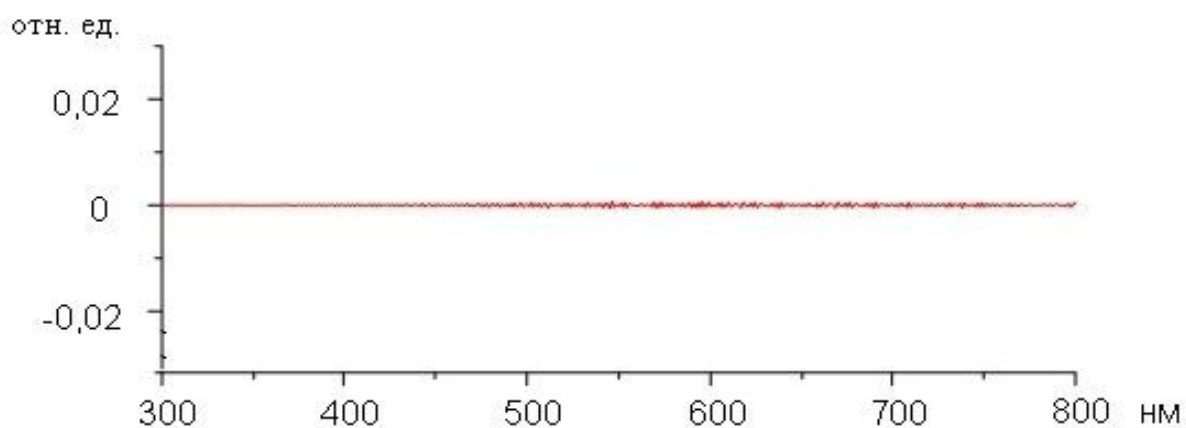


Рисунок 3.24 – Спектр отражения в видимой области (300...800 нм) от поверхности обработанного образца из материала ЖС6-К

В процессе сотрудничества с АО «Мотор Сич» в рамках программы создания перспективного оборудования для напыления защитных покрытий на лопатки авиационных двигателей проведены работы по интеграции технологии ионной очистки в имеющееся оборудование (рис. 3.26, 3.27). По указанной тематике была предложена методика расчета режимов технологических ускорителей, направленная на повыше-

ние эффективности ионной очистки деталей ГТД с учетом температурных ограничений.

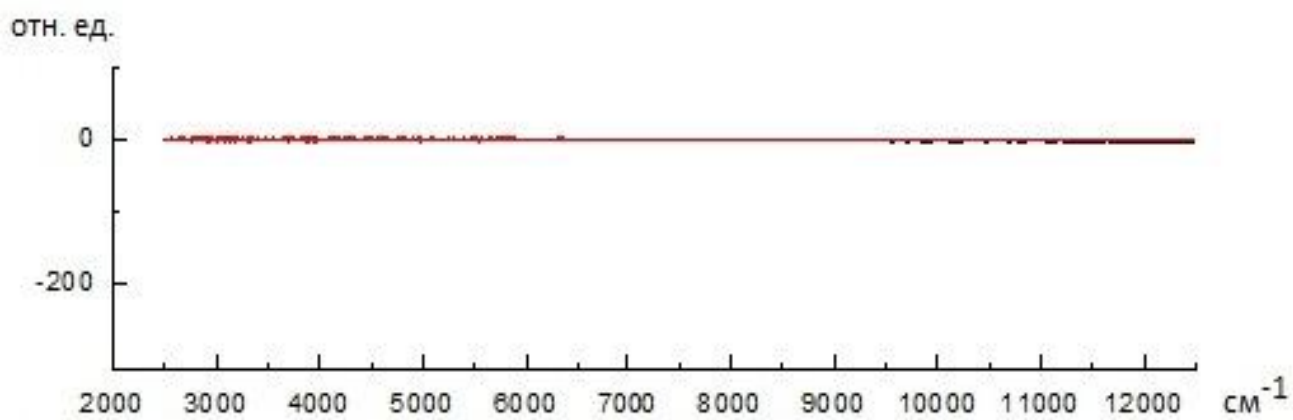


Рисунок 3.25 – Спектр отражения в ИК-области от поверхности обработанного образца из материала ЖС6-К



Рисунок 3.26 – Установка типа МАИ для ионного травления поверхности обрабатываемого изделия

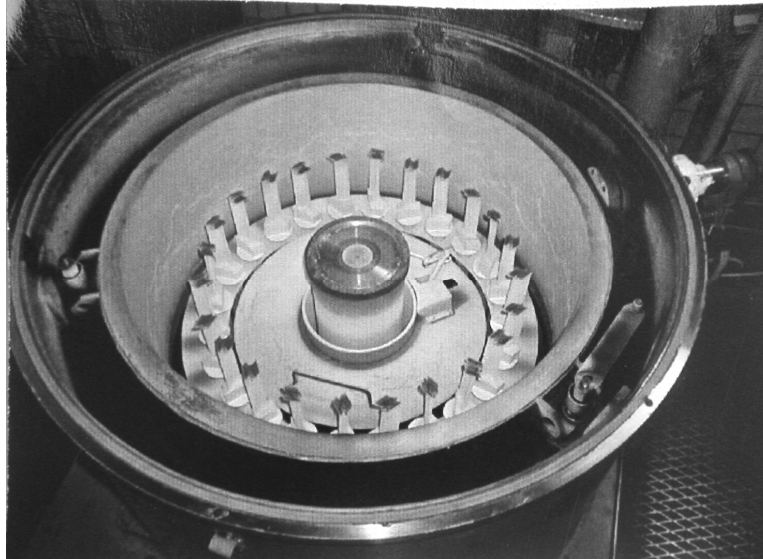


Рисунок 3.27 – Лопатки ГТД в рабочей камере установки типа МАП

Установки типа МАП позволяют проводить процессы размерного ионного травления поверхностей обрабатываемых изделий, а также ионного насыщения (модифицирования) этих поверхностей в металлической плазме вакуумного дугового разряда в целях управления структурно-фазовым состоянием поверхности изделия, а соответственно, и ее свойствами (жаростойкость, коррозионная стойкость, малоцикловая усталость и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение конкурентоспособности современного производства требует объединения множества технологий, что вызывает необходимость определения их рационального состава и сочетания в рамках единых технологических систем. Формирование таких систем должно производиться на базе знаний о взаимном влиянии их элементов.

Технологическая система, объединяющая размерную обработку, методы прецизионной обработки, технологии отделки и очистки предполагает изменение стратегии производства изделия. На сегодняшний день, даже в самых современных САМ системах, режимы обработки выбирают исходя из максимальной производительности получения заданной формы, не учитывая физики образования ликвидов. Альтернативой является их назначение на основе прогнозируемой наследственности при образовании микрорельефа, заусенцев, микрочастиц.

Чтобы удалить ликвиды в первом случае необходимо на этапе финишной обработки применить около десяти узкоспециализированных методов, включая электрохимические, механические, ультразвуковые с последующей прокачкой каналов моющими жидкостями, поскольку при обработке образуются ликвиды с различными свойствами и размерами.

Во втором случае технологические режимы механической обработки назначаются с учетом последующего удаления ликвидов. Выравнивание размеров ликвидов, их перенос в процессе изготовления детали в места, где они могут быть легко удалены, позволяет проводить операции очистки и отделки на универсальном оборудовании с ЧПУ. Это в разы снижает общую трудоемкость изготовления с одновременным обеспечением заданного уровня качества.

Методы обработки интенсивными потоками энергии имеют целый ряд важных преимуществ, которые позволяют эффективно их интегрировать в состав технологических систем производства наукоемкой техники. Рассмотренные в настоящей монографии методы являются гибкими, универсальными, легко поддаются автома-

тизации, могут интегрироваться с современными производственными информационными системами.

Для эффективного использования таких методов необходимо создание специализированных экспертных баз данных, позволяющих получать информацию, нужную для назначения режимов очистки, исходя из параметров предшествующей размерной обработки. Такие работы активно ведутся в промышленно развитых странах. Однако необходима адаптация таких систем для материалов, применяющихся в отечественной практике.

Задачи информационной интеграции подсистем размерной обработки и очистки требуют разработки специализированных САМ/САЕ модулей для создания управляющих программ оборудования финишной отделки и очистки. Отдельной задачей является разработка принципов совместного использования оборудования этих подсистем для создания заданного функционального микрорельефа поверхностей.

Настоящая монография затрагивает только часть проблемных задач, связанных с решением задачи создания нового поколения технологий финишной отделки и очистки с использованием интенсивных потоков энергии.

За ее рамками остались вопросы, связанные с лазерными технологиями очистки, которые имеют, пожалуй, наибольший потенциал роста из-за возможности дозирования энергии с высокой точностью. Эти технологии и тенденции развития оборудования для лазерной финишной очистки будут рассмотрены в последующих публикациях.

Авторы будут благодарны за любые конструктивные предложения по развитию освещения затронутых в монографии вопросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gillespie, L. Your burr technology efforts changed the world [Текст] / L. Gillespie – Deburring Technology International Inc., 2009. – 37p.
2. Gillespie, L. The Formation and properties of machining burrs [Текст] : M.S. Thesis / Gillespie La Roux. – Utah State University, Logan, Utah, 1973. – 140 p.
3. Product design influences on deburring: Society of Manufacturing Engineers (SME): Technical paper [Текст] / F. Schäfer – Dearborn, 1975. – 117p. – MR75-483.
4. Takazawa, K. Burr Technology [Текст] / K. Takazawa – Tokyo: Asakura Bookstore Company, 1980. – 230 p.
5. Burr prevention and minimization for the aerospace industry. Laboratory for manufacturing automation [Текст] / Research reports 1999–2000. University of California, Berkeley. 2002. – P.4 – 9.
6. Optimization of the face milling process: tool path and tool design. Issues, Part 1. Algorithm and tool path design. Laboratory for manufacturing automation [Текст] / Research reports 2001–2002. University of California, Berkeley. 2002. – P.61 – 68.
7. Tool path planning in conjunction with exit order sequence. Laboratory for manufacturing automation [Текст] / Research reports 2001–2002. University of California, Berkeley. 2002. – P.30 – 35.
8. Takazawa, K. Design Principle and Manufacturing Technique for the Rotary Compressor of Room Air Conditioner [Текст] / K. Takazawa // 5th International conference on deburring and surface finishing: – Kansas City, MO. – Deburring technology international, 1998. – P.35.
9. DIN ISO 13715. Technical drawings - Edges of undefined shape - Vocabulary and indication on drawings (ISO 13715:2000).
10. WBTC-STD 14/1997. An integrated international standard for burrs and edge conditions. Kansas City, MO: Deburring technology international. 1997. – 36 p.
11. Extrude Hone – finishing technologies, finishing solutions. [электронный ресурс], режим доступа: <http://www.extrudehone.com/media/files/capabilities.pdf>.

12. Барон, Ю.М. Влияние состояния кромок лезвий на эффективность режущих инструментов [Текст] / Ю.М. Барон // Инструмент и технологии. – 1997. – Вып. 5. – С.1 – 11.

13. Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов [Текст] / С.И. Планковский, А.В. Лосев, О.В. Шипуль, О.С. Борисова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №2 (69). – С.39 – 47.

14. Analysis of cutting fluid aerosol generation for environmentally responsible machining [Текст]/ Z. Chen, A. Atmadi, D.A. Stephenson et al. // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2000. – Vol. 49, Iss. 1. – P. 53 – 56.

15. Cutting fluid aerosol generation due to spin-off in turning operation: Analysis for environmentally conscious machining [Текст] / Z. Chen, K. Wong, W. Li et al. // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2001. – Vol. 123. – P. 506 – 512.

16. Songmene, V. Clean machining: Experimental investigation on dust formation – Part I: Influence of machining parameters and chip formation [Текст] / V. Songmene, B. Balout, J. Masounave // International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. – 2008. – Vol. 14, No. 1. – P. 1 – 16.

17. Songmene, V. Clean Machining: Experimental Investigation on Dust Formation – Part II: Influence of Machining Strategies and Drill Condition [Текст] / V. Songmene, B. Balout, J. Masounave // International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing. – 2008. – Vol. 14. – P. 17 – 33.

18. Khettabi, R. Effect of tool lead angle and chip formation mode on dust emission in dry cutting [Текст] / R. Khettabi, V. Songmene, J. Masounave // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 194, No. 1-3. – P. 100 – 109.

19. Khettabi, R. Particles emission during orthogonal and oblique cutting [Текст] / R. Khettabi, V. Songmene // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. – 2009. – Vol. 1, No. 1. – P. 1 – 10.

20. Khettabi, R. Effects of speeds, materials, and tool rake angles on metallic particle emission during orthogonal cutting [Текст] / R. Khettabi, V. Songmene, J. Masounave

// Journal of Materials Engineering and Performance. – 2010. – Vol. 19. – P. 767 – 775.

21. Understanding the formation of nano and micro particles during metal cutting [Текст] / R. Khettabi, V. Songmene, J. Masounave, I. Zaghbani // International Journal of Signal System Control and Engineering Application. – 2008. – Vol. 1 (3). – P. 203 – 210.

22. Основы трибологии (трение, износ, смазка) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

23. Белянин, П.Н. Промышленная чистота машин [Текст] / Н.П. Белянин, В.М. Данилов. – М.: Машиностроение. – 1982. – 224 с.

24. Жданов, А.А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностных деталей агрегатов авиационных двигателей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / Жданов Александр Андреевич. – Харьков, 2003. – 120 с.

25. Лосев, А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Лосев Алексей Васильевич. – Харьков, 1995. – 210 с.

26. Gillespie, L. Deburring and edge finishing handbook [Текст] / L. Gillespie. – SME, New York City: Industrial Press, 1999. – 404 p.

27. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

28. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах [Текст] / Б.И. Костецкий – Киев: Техника, 1970. – 395 с.

29. Айнбиндер, С.Б. Холодная сварка металлов [Текст] / С.Б. Айнбиндер. – Рига: изд-во АН Латв. ССР, 1957. – 162 с.

30. Голего, Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения [Текст] / Н.Л. Голего. – Киев: Техника, 1965. – 231 с.

31. Аксенов, А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости [Текст] / А.Ф. Аксенов – М.: Транспорт, 1970. – 255 с.

32. Никитин, Г.А. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы летательных аппаратов [Текст] / Г.А. Никитин, С.В. Чирков – М.: Транспорт, 1969. – 183 с.

33. Технологические рекомендации ТР-378-70. Обеспечение чистоты топливных и гидравлических агрегатов в процессе их производства [Текст]. – НИАТ. – 1970. – 179 с.
34. Тимиркеев, Р.Г. Количественные зависимости влияния параметров механических примесей на показатели надежности золотниковых агрегатов гидротопливных систем [Текст] / Р.Г. Тимиркеев, В.В. Плихунов, Н.Н. Губин // *Авиационная промышленность*. – 2000. – № 3. – С. 102 – 105.
35. Новичков, Б.М. Автоматизированный анализ чистоты авиационного топлива [Текст] / Б.М. Новичков // *Авиационная промышленность*. – 1999. – № 3. – С. 16 – 20.
36. ГОСТ 17216-2001 Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей [Текст]; введ. 1.01.2003. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 19 с.
37. Macpherson, P. Influence of wear debris on rolling contact fatigue [Текст] / P. Macpherson, R. Sales // *Rolling contact fatigue of bearing steels*. – ASTM STP 771. – ASTM International, 1982. – P. 255 – 274.
38. ГОСТ ИСО/ТО 10949-2007. Чистота промышленная. Руководство по обеспечению и контролю чистоты компонентов гидропривода от изготовления до установки [Текст]; введ. 1.12.2008. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 21 с.
39. Comprehensive Database of Metal Surface Cleaning Processes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.cleantool.org/suche/suche.php?idlan=2.
40. Пак, Н.И. Численное моделирование процесса термического удаления заусенцев концентрированным потоком энергии [Текст] / Н.И. Пак, С.А. Шикунов // *Обработка материалов импульсными нагрузками*. – Новосибирск, 1990. – С. 168 – 175.
41. Kane, D. Laser cleaning II [Текст] / D. Kane. - World Scientific, 2006. – 289 p.
42. Pat. 2008173652 JP. Int. Cl.5 B23K26/00; B23K26/08; B23K26/38. Deburring method/ A. Seiki. – Appl. No. JP20070007405 20070116; publ. 31.07.2008. – 13 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа к пат.: <http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=JP&NR=2008173652A&KC=A&FT=D&date=20080731&DB=>

EPODOC&locale=en_EP.

43. Pat. 0471179 EP. Int. Cl.5 B23K26/03; B23K26/06; B23K26/36; B23K26/00; B23K26/02. Process for deburring metal workpiece edges/ Н. Bergmann; Н. Lindner. – Appl. No. EP19910111106 19910704; publ. 19.02.1992. – 5 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа к пат.: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19920219&CC=EP&NR=0471179A1&KC=A1.

44. Кривцун, И.В. Комбинированные лазерно-дуговые процессы обработки материалов и устройства для их реализации [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.10 / Кривцун Игорь Витальевич. – Киев, 2002. – 393 с.

45. Влияние термохимического удаления заусенцев на качество металла деталей [Текст] / А.В. Гольдин, А.М. Зайцев, В.А. Лонг и др. // Механосборочное производство. – 1980. – № 3. – С. 33 – 34.

46. Крутиков, С.Л. Состояние и перспективы автоматизации удаления заусенцев [Текст] / С.Л. Крутиков, В.П. Божко // Механизация и автоматизация производства. – 1988. – № 8. – С. 15 – 17.

47. Brown, J. Modern Manufacturing Processes [Текст] / J. Brown. – NY.: Industrial Press Inc, 1991.– 200 p.

48. Кривцов, В.С. Термоимпульсная технология очистки поверхностей деталей агрегатов авиационных двигателей [Текст] / В.С. Кривцов, А.А Жданов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – Вып. 2. – С. 45 – 50.

49. Лапотко, В.М. Анализ пленочного охлаждения лопаток турбин в нестационарном потоке газа [Текст] / В.М. Лапотко, Ю.П. Кухтин // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 3. – С. 90 – 96.

50. Колоколов, Б.А. Термовзрывной метод удаления заусенцев [Текст] / Б.А. Колоколов, В.Н. Саранча, А.В. Лосев // Высокоскоростная обработка материалов давлением. – Вып. 6. – Х., 1977. – С. 98 – 104.

51. Разработка технологии термовзрывного удаления заусенцев применительно для предприятий Минстанкопрома [Текст] : отчет о НИР. – Ереван, 1980. – 64 с. –

Инв. № 02820069738.

52. Жданов, А.А. Технологии термоимпульсной отделки поверхностей прецизионных деталей в авиационной промышленности и численные исследования [Текст] / А.А. Жданов, А.В. Лосев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 19. – Х., 2003. – С. 174 – 183.

53. Термоимпульсное удаление заусенцев с регулируемым нагревом деталей [Текст] / В.П. Божко, А.В. Лосев, С.А. Родзин, С.А. Туров // Авиационная промышленность. – 1987. – № 12. – С. 15 – 17.

54. Матвеев, А.П. Снижение температуры обрабатываемых деталей при использовании термоэнергетического метода удаления заусенцев [Текст] / А.П. Матвеев, Л.Н. Шпитанков // Авиационная промышленность. – 1988. – № 8. – С. 47.

55. Отработка технологических режимов удаления заусенцев с деталей из алюминиевых сплавов газоимпульсным методом [Текст] : отчет о НИР. – Новосибирск, 1982. – 103 с. – Инв. № 02830007717.

56. Влияние термохимического удаления заусенцев на качество металла деталей [Текст] / А. В. Гольдин, А. М. Зайцев, В.А. Лонг и др. // Механосборочное производство. –1980. – №3. – С. 33 – 34.

57. Aurich, Jan C. Burrs – Analysis, Control and Removal [Текст] / Jan C. Aurich, D. Dornfeld // Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd-3rd April, 2009. – University of Kaiserslautern (Germany), 2010. – 254 p.

58. DIN ISO 13715. Technical drawings – Edges of undefined shape – Vocabulary and indication on drawings (ISO 13715:2000) [Текст] – Взамен DIN ISO 13715(1998-09); введен 01.12.2000. – ISO/ТС 10, 2000 – 12 p.

59. Разработка опытно-промышленной установки термического удаления облоя [Текст] : отчет о НИР. – Д., 1986. – 36 с. – Инв. № 02870012631.

60. Трифионов, О.В. Современное состояние технологии и оборудования для очистки от заусенцев детонирующими газовыми смесями и направления их совершенствования [Текст] / О.В. Трифионов // Вопросы проектирования и производства

конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (73).– Х., 2013. – С. 115 – 121.

61. Зверев, И.Н. Газодинамика горения [Текст] / И.Н. Зверев, Н.Н. Смирнов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 307 с.

62. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] : пер. с англ. / Ю. Варнатц, У. Маас, Р.Диббл / под ред. П.А. Власова. — М.: Физматлит, 2003. – 352 с.

63. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 721 с.

64. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Текст]/ F.R. Menter // AIAA-Journal – 1994. – № 32 (8). – P. 269 – 289.

65. Menter, F.R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions [Текст] / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Bender. – AIAA Paper 2003-0767, 2003. – 40 p.

66. Yungster, S. Computation of shock-induced combustion using a detailed methane-air mechanism [Текст] / S. Yungster, M. J. Rabinowitz // Journal of propulsion and power. – 1994. – Vol. 10, No. 5. – P. 609 – 617.

67. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows [Текст] / B.E. Launder, D.B. Spalding // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 1974. – No. 3. – P. 269 – 289.

68. Grotjans, H. Wall functions for general application CFD codes [Текст] / H. Grotjans, F.R. Menter // ECCOMAS 98 : Proceedings of the IV Europ. CFD Conf. – John Wiley&Sons. – 1998. – P. 1112 – 1117.

69. Menter, F.R. Elements of industrial heat transfer predictions [Текст] / F.R. Menter, T. Esch // Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Nov. 2001, Uberlandia, Brazil. – 2001. – С. 26 – 30.

70. Kader, B.A. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers [Текст] / B.A. Kader // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1981. – Vol. 24, No. 9. – P. 1541 – 1544.

71. Vieser, W. Heat transfer predictions using advanced two-equation turbulence

models [Текст] / W. Vieser, T. Esch, F. Menter // CFX Validation Report No. CFX-VAL10/0602. – 2002. – 73 p.

72. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Текст] / F.R. Menter // AIAA-Journal. – 1994. – Vol. 32 (8). - P. 269 – 289.

73. Stein, J. Burr Formation in Drilling Miniature Holes [Текст] / J. Stein, D. Dornfeld // CIRP Annals. – 1997. – Vol. 46. – P. 63 – 66.

74. Пестрецов, С.И. Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания [Текст] : учеб. пособие / С.И. Пестрецов; Мин-во образования и науки РФ, Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 104 с.

75. Попов, М.Е. Учёт влияния различных условий обработки резанием на параметры заусенцев [Текст]. / М.Е. Попов, К.Е. Неклёсов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2002. – Т. 2, № 2 (12). – С. 130 – 136.

76. Моделирование механизма удаления свободнолежащих на поверхности микрочастиц детонирующими газовыми смесями [Текст] / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В. Трифонов, В.Г. Козлов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2012. – Вып. 54. – С. 68 – 77.

77. Simulation of free particles removing mechanism from surface by detonable gaseous mixtures [Электронный ресурс] / S. Plankovskyy, O. Shipul, V.Kozlov, O. Trifonov, T. Szalay // Proceedings of scientific GTE conference MANUFACTURING'2012. Budapest, 14-16 November 2012. – P. 1 – 8. – Режим доступа: <http://www.gteportal.eu/manuf2012/index.php?lang=en>.

78. ГОСТ 22667-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. [Текст]. – Взамен ГОСТ 22667-77; введ. 01.07.1982. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 3 с.

79. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике [Текст] / В.С. Авдеевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.

80. Манжалей, В.И. Затухание ударных волн и теплопередачи телам после де-

тонации газа в камере [Текст]/ В. И. Манжалей // Механика реагирующих сред и ее приложения: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теорет. и прикл. механики и др.; Отв. ред. Ю. А. Березин, А. М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 123 – 132.

81. Khokhlov, A.M. Numerical simulation of detonation initiation in a flame brush: The role of hot spots [Текст] / A.M. Khokhlov, E.S. Oran // Combustion and Flame. 1999. –Vol. 119. – P. 400 – 416.

82. Lee, J.H.S. The detonation phenomenon [Текст] / J.H.S. Lee. – Cambridge University Press, 2010. – 402 p.

83. Johansen, C. Modeling the initial flame acceleration in an obstructed channel using large eddy simulation [Текст] / C. Johansen, G. Ciccarelli // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2013. – Vol. 26 (4). – P. 571 – 585.

84. Манжалей, В.И. Затухание ударных волн после детонации газа в камере [Текст] / В.И. Манжалей // Гидродинамика взрыва. – 1986. – Вып. 78. – С. 142 – 153.

85. Адонин, С. М. О теплопередаче продуктов детонации газовой смеси в камере [Текст] / С.М. Адонин, В.И. Манжалей // Динамика сплошной среды. – 1986. – Вып. 74. – С. 3 – 10.

86. Иванов, К.В. Детонационные волны в смесях с повышенным начальным давлением [Электронный ресурс] / К.В. Иванов, С.В. Головастов // 50-я научная конференция МФТИ. Секция физики высоких плотностей энергий: тез. докл. науч. конф., 23 ноября 2007 г. М., 2007. – 5.с. – Режим доступа: http://mipt.ru/nauka/conf_mipt/conf50/plen_sections/fpfe/FVPE/Ivanov.html.

87. Дерягин, Б.В. Адгезия [Текст]/ Б.В. Дерягин, П.А. Коротова. – М.-Л. АН СССР, 1949. – 244 с.

88. Зимон, А.Д. Адгезия пыли и порошков [Текст]/ А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1967. – 372 с.

89. Каргин, С.А. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование рабочего процесса судового ДВС с комбинированным смесеобразованием и принудительным воспламенением [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.08.05 / Кар-

гин Сергей Александрович. – Астрахань, 2006. – 177 с.

90. Двигатели внутреннего сгорания [Текст]/ Д. Н. Вырубов, С. И. Ефимов, Н. А. Иващенко и др.; Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.

91. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей [Текст] : учеб. для вузов / А.С. Орлин, Д.Н. Вырубов. – М.: Машиностроение, 1971. – 400 с.

92. Теплотехника [Текст] : учеб. для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др.; Под ред. А. П. Баскакова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

93. Кричевская, Т.Ю. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] : учеб. для вузов : в 3х кн. Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС / Т.Ю. Кричевская, В.Н. Луканин, М.Г. Шатров. – М.: Высшая школа, 1995. – 256 с.

94. Модели смесеобразования и горения в ДВС с непосредственным впрыском [Текст] / С.А. Чесноков, Н.Н. Фролов, В.А. Дунаев, И.В. Кузьмина // Двигателестроение. – 2005. – № 1. – С. 3 – 5.

95. Прокопенко, М.В. Прогнозування в САПР ДВЗ тривалої міцності камер згорання поршнів при експлуатації форсованих швидкохідних дизелів [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / Прокопенко Микола Вікторович. – Х., 2001. – 120 с.

96. Двигуни внутрішнього згорання [Текст] : підручн. Т. 4. Основи САПР ДВЗ / За ред. проф. А.П. Марченка, А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ “ХПІ”, 2004. – 336 с.

97. Импульсная резка горячего металла [Текст] / В.С. Кривцов, А.Ю. Боташев, А.Н. Застела и др. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2005. – 476 с.

98. Стельмах, В.А. Исследование и внедрение машин и процессов импульсной резки металла и брикетирования стружки с использованием энергии горючих газов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Стельмах Виктор Алексеевич. – Х., 1970. – 215 с.

99. Новиков, А.Е. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования высокоскоростного формования изделий из металлической стружки пла-

стическим деформированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Новиков Анатолий Егорович. – Х., 1980. – 176 с.

100. Цыганов, В.П. Исследование и внедрение технологического процесса высокоскоростной объемной штамповки титановой арматуры летательных аппаратов и двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / Цыганов Валерий Петрович. – Х., 1979. – 251 с.

101. Стриженко, В.Е. Исследование и внедрение газовых машин импульсной резки с внутренним смесеобразованием [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Стриженко Виталий Евгеньевич. – Х., 1972. – 239 с.

102. Божко, В.П. Основы технологии зачистки деталей авиационного производства высокотемпературными газовыми импульсами [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.04 / Божко Валерий Павлович. – Х., 1993. – 314 с.

103. Боташев, А.Ю. Разработка научных основ проектирования и промышленное внедрение тепловых энергоприводов импульсных машин для обработки металлов давлением [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 / Боташев Анвар Юсуфович. – Х., 2000. – 300 с.

104. Гуревич, Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры [Текст] / Д.Ф. Гуревич – М.: Машиностроение, 1964. – 267 с.

105. Pat. 2440041 DEU, Int. Cl². F23R1/12, B21D33/00. Ventilanzordnung zum gasdichten verschliessen eines brennraumes waehrend des brennvorganges [Электронный ресурс]/ Leisner E., Schildhorn W.; Assignee Robert Bosch GMBH. – filed 21.08.1974; publ.18.03.1976. – 16 p. – Режим доступа к пат.: http://v3.espacenet.com/searchReults?NUM=DE2440041&DB=EPODOC&submitted=true&locale=en_EP&ST=number&compact=false.

106. Int. Appl. PCT WO 2010017022A2, Int. Cl⁷ B23D79/00; B23K7/06; B29C37/02; B23D79/00; B23K7/00; B29C37/00. Improved gas regulator for thermal energy machining [Электронный ресурс]/ McMahon K., O'halloran E. Assignee Kennametal Inc. – filed 20.07.2009; publ. 2.11.2010. – 19 p. – Режим доступа к пат.: <http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=WO&NR=2010017022A2>

&KC=A2&FT=D&date=20100211&DB=EPODOC&locale=en_EP.

107. Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси [Текст] / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.В. Трифонов, О.С. Борисова // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 46. – Х., 2010. – С. 75 – 87.

108. Пат. 45829 Украина, МПК⁷ F02B43/00; B21D26/08. Спосіб дозування компонентів газоповітряної суміші в імпульсному тепловому двигуні [Текст] / Кривцов В.С., Мазниченко С.О., Планковский С.И., Семенихин Ю.И.; Заявитель и патентообладатель Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – № 2001074961; заявл. 14.07.2001; опубл. 15.06.2004, Бюл. № 6. – 4 с.103.

109. Лосев, А.В. Влияние прогрева камеры сгорания импульсных машин на температуру горючей смеси [Текст] / А.В. Лосев, О.С. Ладухина // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Вып. 25. – Х., 1989. – С. 90 – 92.

110. Направления совершенствования систем дозирования энергии термоимпульсного оборудования для финишной очистки [Текст] / С.И. Планковский, О.В. Шипуль, О.С.Борисова, В.Г. Козлов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 45. – Х., 2010. – С. 99 – 108.

111. Крымов, В.В. Производство газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.

112. Изготовление деталей ГТД из титановых сплавов [Текст] / В.А. Богуслав, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: Дека, 1997. –276 с.

113. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст] / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 239 с.

114. Плазмотехнология – 97: сб. научн. тр. Акад. технол. наук Украины. – ЗАО «Инс-т инновац. исслед.», Запорож. гос. ун-т [Текст] / под ред. С. А. Юхипчука – Запорожье: Видавець, 1997. – 259 с.

115. Плешивцев, Н.В. Катодное распыление [Текст] / Н. В. Плешивцев. – М.: Атомиздат, 1968. – 347 с.
116. Данилин, Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок [Текст] / Б. С. Данилин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
117. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме [Текст] / А.И. Костржицкий, В.Ф. Карпов, М.П. Кабанченко и др. – М.: Машиностроение, 1991. –176 с.
118. Контроль процессов травления материалов в низкотемпературной газоразрядной плазме [Текст] / Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев, В.А. Каплин, Э.М. Врублевский // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 1. – С. 13 – 28.
119. Технологический генератор плазмы для ионной очистки лопаток ГТД [Текст] / А.О. Гарин, Д.В. Слюсар, В. П. Колесник и др. // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. – № 10 (46). – С. 16 – 18.
120. Лосев, А.В. Удаление заусенцев с деталей сложной формы методом термического взрыва [Текст] / А.В. Лосев // Использование импульсных источников энергии в промышленности : тез. докл. – Х., 1980. – С. 152 – 153.
121. Лосев, А.В. Теоретический анализ термоимпульсного удаления заусенцев с деталей [Текст] / А.В. Лосев // Импульсная обработка металлов давлением. – Х., ХАИ. – 1997. – С.43 – 49.
122. Сборка роторов ГТД барабанно-дискового типа: типовые процессы, алгоритмы расчетов [Текст] : монография / И.Ф. Кравченко, Э.В. Кондратюк, В.А. Титов и др. – К.: КВИЦ, 2011. – 198 с.
123. Гришин, С.Д. Электрические ракетные двигатели [Текст] / С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
124. Дунин-Барковский, И.В. Основные направления исследования качества поверхности в машиностроении и приборостроении [Текст] / И.В. Дунин-Барковский // Вестник машиностроения. – 1971. – № 4. – С. 49 – 55.
125. Елизаветин, М.А. Повышение надежности машин [Текст] / М.А. Елиза-

ветин. – М.: Машиностроение, 1974. – 430 с.

126. Слюсарь, Д.В. Использование плазменного ионного ускорителя для обработки поверхностей [Текст] / Д. В. Слюсар, В. П. Колесник, О. В. Жорник // The 2nd Korea – Ukraine Gas Turbine Technology Symposium, August 25-26, 2005. – 2005. – P. 89 – 94.

127. Kaufman, H.R. Ion Source Design for Industrial Application [Текст] / H.R. Kaufman, R.S. Robinson // AIAA Journal. – 1982. – Vol. 20, No. 6. – P. 745 – 760.

128. Каминский, М.А. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла [Текст] : пер. с англ. / М. А. Каминский. – М.: Мир, 1967. – 508 с.

129. Данилин, Б.С. Энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов и систем для его реализации [Текст] / Б.С. Данилин, В.Ю Киреев, В.К. Сырчин // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – № 2. – С. 52-56.

130. Белан, Н.В. Применение плазменного ионного ускорителя при производстве и ремонте изделий авиационно–космической техники [Текст] / Н. В. Белан, В. П. Колесник, Д. В. Слюсарь и др. // Новые разработки и технологии в газотурбостроении. Материалы 2-й научно-техн. конф. – Кривой Рог: Констар. 23–25 июня, 2004. – С. 63 – 66.

131. Дороднов, А.М. Некоторые применения плазменных ускорителей в технологии [Текст] / А. М. Дороднов // Физика и применение плазменных ускорителей. – 1974.– С. 330 – 365.

132. Ляпин, Е.А. Современное состояние исследований ускорителей с анодным слоем [Текст] / Е.А. Ляпин, А. В. Семенкин // Ионные инжекторы и плазменные ускорители. – М.: Энергоатомиздат, 1990.– С. 20-33.

133. Гаркуша, В.И. Плазменные ускорители с анодным слоем [Текст] / В.И. Гаркуша, Л. В. Лесков, Е. А. Ляпин // Плазменные ускорители и ионные инжекторы: сб. науч. тр.– М.: Наука, 1984.– С. 129- 138.

134. Дороднов, А.М. Технологические плазменные ускорители [Текст] / А.М. Дороднов // ЖТФ.– 1978.– Т.48, № 9. – С. 1858-1869.

135. Гришин, С. Д. Плазменные ускорители [Текст] / С.Д. Гришин, Л. В.

Лесков, Н. П. Козлов. – М.: Машиностроение, 1983. –231 с.

136. Вакуумные дуги [Текст]: пер. с англ. / Дж. Кобайн, Г. Экер, Дж. Фаррелл и др.; под ред. Дж. Лафферти – М.: Мир, 1982.– 432 с.

137. Дороднов, А.М. Плазменные методы, генерации ионизированных потоков тугоплавких веществ [Текст] / А. М. Дороднов, В. А. Петросов // Источники и ускорители плазмы. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ». Вып. 12. – 1978. – С. 58-61.

138. Машкова, Е.С. Современные тенденции в исследовании распыления твердых тел. [Текст] / Е. С. Машкова // Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел: сб. ст. – М.: Мир, 1989. – С. 184-195.

139. Биркган, С. Е. Компьютерное моделирование процесса кратерообразования при ионном распылении [Текст] / С. Е. Биркган, Р. А. Егоров, В. А. Павлов// Физический вестник ЯрГУ. – Вып. 1. – Ярославль 2006. – С.107 -118.

140. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып.1 Физическое распыление одноэлементных твердых тел [Текст] / под ред. Р. Бериша – М.: Мир, 1984. – 336 с.

141. Фальконе, Д., Теория распыления [Текст] / Д. Фальконде/ "УФН". – 1992. – Т. 162, № 1. – С. 71.

142. Рвачев, В.Л. R-функции в задачах теории пластин [Текст] / В. Л. Рвачев, Л. В. Курпа. – К.: Наукова думка, 1987. – 230 с.

143. Рвачев, В.Л. Алгебро-логические и проекционные методы в задачах теплообмена [Текст] /В. Л. Рвачев, А. П. Слесаренко. – К:Наукова думка, 1976. – 137 с.

144. Богуслаев, В.А.. Управление точностью металлополимерных модельных прессформ для литья заготовок лопаток ГТД на основе метода аналитических эталонов [Текст] / В. А. Богуслаев, В. А. Липский, К. Б. Балушок // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 1. – С. 11-14.

145. Ройх, И.Л., Нанесение защитных покрытий в вакууме [Текст] / И.Л. Ройх, Л. Н Колтунова, С. Н. Федосов.– М.: Машиностроение, 1976. – 369 с.

146. Самсонов, Г.В. Тугоплавкие соединения: справочник [Текст]/ Г.В. Самсонов, И. М. Винницкий. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.

147. Планковский, С.И. Оценка теплового состояния лопатки при очистке потоком ионов перед напылением [Текст]/ Планковский С.И., В.О. Гарин, А.О. Гарин //Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып.49. – Х., 2011. – С. 58-67.

148. Гарин, А.О. Технологический источник для ионной очистки поверхностей лопаток ГТД перед осаждением покрытий [Текст]/ А.О. Гарин // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 6(53). – Х., 2008. – С.78–84.

149. Thomas, T. R. Rough Surfaces / Tom R. Thomas // Imp. College Press – 1999. – SE. – P. 35-49.

150. Белов, В. К. Рефлектометрический прибор для определения шероховатости поверхности / В. К. Белов, В. Г. Бочкарев // Заводская лаборатория, Металлургия. – Т. 55. – 1989. – № 6. – С. 67-70.

151. Luminescence and EPR Characterization of Vanadium Doped Semi-Insulating 4H SiC [Text]/ E. N. Kalabukhova, D. V. Savchenko, S. Greulich-Weber and others// Materials Science Forum – 2006 – V. 527–529. – P 651 – 654.

152. Исследование фотолюминесценции ионов Mn^{2+} в пластически деформированных монокристаллах ZnS [Текст] / М. Ф. Буланый, А. А. Горбань, А. В. Коваленко и др. // Изв. вузов. Физика. – 2002. –Т. 45, №12. – С. 66-70.

Ольга Володимирівна Шипуль
Євген Володимирович Цегельник
Андрій Олегович Гарін
Вадим Олегович Гарін
Олег Валерійович Трифонов

СУЧАСНІ МЕТОДИ ФІНІШНОГО ОЧИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНИМИ ПОТОКАМИ ЕНЕРГІЇ

Монографія
(російською мовою)

Редактор А.О. Гарін

Комп'ютерне верстання:
Є. В. Цегельник

Зв. план, 2013

Підписано до друку 05.02.2013

Формат 60x84 1/16. Папір офс. №2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 10,4. обл.-вид. арк. 10,66. Наклад 150 пр.

Замовлення 27. Ціна вільна.

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>

Віддруковано ФОП Лисенко І.Б.
61070, Харків - 70, вул. Чкалова, 17, моторний корпус, к. 147
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2607 від 11.09.06 р.