

ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.01 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессора НОЦ И.Н. Бутакова, д.ф.-м.н. Коротких А.Г. на диссертационную работу Ли Линь «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность работы. Диссертационная работа Ли Линь «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения» посвящена решению актуальной задачи, связанной с разработкой новых методов и аппаратных комплексов для визуализации и измерения основных параметров в процессе горения различных горючих материалов, в частности порошков металлов. Особое внимание в работе уделено разработке оптической системы усиления яркости изображения – лазерному монитору для изучения морфологии и определения отражательной способности поверхности горючих материалов.

Процесс горения частиц металлов в окислительной среде в основном характеризуется парофазным диффузионным механизмом, который протекает на границах «оксид – газ» и «металл – оксид» и контролируется диффузией металла и кислорода через оксидный слой. Скорость окисления металла контролируется диффузией окислителя в реакционную зону, диаметром частиц, толщиной оксидного слоя и температурой реакции. Горение металла, в частности алюминия, сопровождается ярким свечением и высоким выделением тепла, что затрудняет наблюдение за процессом с использованием видеокамер, изменением структуры поверхности и режимами горения металла. Для большинства металлов имеются отрывочные сведения, касающиеся влияния температуры на коэффициент отражения при определенной длине волны, которых недостаточно для прогнозирования оптических свойств частиц металлов при их лазерном инициировании, воспламенении и горении в широком диапазоне температур. Оптические методы на основе интерференции лазерного излучения позволяют определять характер рассеяния света объектом исследования. Изменение оптических свойств поверхности частиц металла в процессе их горения, в частности, изменение коэффициента корреляции цифровых спекл-изображений может являться количественной характеристикой процесса горения, с помощью

которой возможно определение скорости и продолжительности стадий горения горючего материала.

Общая характеристика диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа представлена на 163 страницах, содержит 95 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 162 источника.

Во **введении** обозначена проблема исследования, актуальность темы диссертации, практическая значимость и научная новизна работы, определены цель и задачи исследования, которые заключаются в следующем.

Целью работы являлась разработка аппаратно-программного комплекса для наблюдения и измерения параметров высокотемпературного горения нано- и микропорошков металлов и их смесей в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка макета лазерного монитора для скоростной визуализации и проведение исследования процесса горения нанопорошков металлов и их смесей.
2. Разработка способа количественной оценки коэффициента отражения поверхности частиц нанопорошка металлов при наблюдении с помощью лазерного монитора.
3. Определение характера влияния параметров работы усилителя яркости на характеристики излучения.
4. Разработка метода мониторинга на основе анализа спекл-изображений для наблюдения изменения характеристик отражения нано- и микропорошков металлов.
5. Проведение оптимизации параметров обработки лазерных спекл-изображений и оценка влияния источника излучения на точность измерений.
6. Разработка программного обеспечения, позволяющего проводить анализ спекл-изображений, а также изображений, полученных с помощью лазерного монитора.

В первой главе выполнен обзор научных работ и анализ полученных ранее результатов по теме исследования. Представлены данные по удельной теплоте сгорания металлов, практическому использованию порошка алюминия в твердых ракетных топливах и взрывчатых веществах, влиянию оксидного слоя частиц на воспламенение и полноту сгорания алюминия, а также спектральные характеристики горения алюминия и композитов на его основе. Описаны существующая аппаратура и методы измерения температур, масс образцов в процессе нагрева и окисления металлов, элементного и фазового состава порошков и прессованных образцов алюминия. Особое внимание уделено описанию методов визуализации горения частиц металлов и твердых топлив с

использованием лазерной подсветки, лазерного проекционного микроскопа на парах бромида меди и лазерной спекл-визуализации поверхности исследуемых образцов, позволяющих получать качественные изображения без засветки.

Вторая глава посвящена описанию применяемых в работе методов и используемых технических средств визуализации процесса горения порошков алюминия и механической смеси алюминий/железо. В качестве объекта исследования выбраны наноразмерный порошок алюминия марки Alex, полученный методом электровзрыва проводников, и смеси Alex с нано-, микроразмерными порошками железа и алюминия марки АСД-6М в различных объемных долях. Представлено несколько различных оптических систем на основе усилителя яркости на парах бромида меди и лазерной подсветки для визуализации процесса горения порошков металлов с использованием различных цифровых высокоскоростных видеокамер, фотодиодов и линз. Предложен аппаратный способ синхронизации излучения усилителя яркости и экспозиции высокоскоростной камеры для формирования изображения одним импульсом излучения усилителя яркости.

В третьей главе представлены результаты визуализации процесса горения исследуемых порошков металлов, включая твердое топливо и термитный образец смеси порошков $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3$, с использованием методов и технических средств, представленных во второй главе. При использовании высокоскоростной камеры, лазерной подсветки и лазерного монитора получены кадры поверхности порошков металлических горючих без засветки и видимого пламени в различные моменты времени при их инициировании и горении. С применением фотодиода определены сигналы напряжений, которые соответствуют определенным значениям яркости изображений формируемых усилителем яркости, а также скорости распространения волны при горении порошковых образцов металлов сформированных в виде параллелепипеда или прессованного твердого топлива в виде цилиндра. На основе полученных данных произведена оценка изменения коэффициента отражения поверхности горящего образца.

В четвертой главе представлены результаты исследования процесса горения порошков металлов с применением метода корреляции цифровых спекл-изображений. Рассмотрены вопросы оптимизации параметров обработки лазерных спекл-изображений и влияние источника излучения на точность измерений. Представлены результаты измерения динамики лазерных спеклов при горении порошков металлов в воздухе. Для анализа данных лазерных спеклов использовался коэффициент корреляции цифровых спекл-изображений.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

Содержание **автореферата** диссертации достаточно полно и точно отражает основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и научная новизна результатов диссертации.

Достоверность результатов исследования и сформулированных в диссертации выводов обеспечивается воспроизводимостью экспериментальных данных, использованием современной регистрирующей аппаратуры, программного обеспечения и сравнительной оценкой результатов полученных другими исследователями.

В работе получены результаты, обладающие научной новизной. В частности, разработан макет лазерного монитора на основе активного элемента на парах бромида меди для исследования временных параметров и режима горения порошков металлов и их смесей, с помощью которого реализовано наблюдение поверхности образца в период его инициирования и горения. Показана возможность изучения морфологии поверхности горящего образца в режиме реального времени. Предложен метод измерения изменения отражательной способности поверхности порошка и устройство, реализующее этот метод.

Разработан аппаратно-программный комплекс для исследования динамики горения нанопорошков металлов и других рассеивающих сред на основе метода корреляции цифровых спекл-изображений. Методы позволяют дистанционно, сквозь плазменный слой, оценивать изменение поверхности горящего образца. Научная новизна полученных результатов подтверждается патентами РФ на изобретения № 2685072, 2685040, 2687308.

Значимость результатов для науки и практики.

Результаты исследования имеют теоретическую и практическую значимость в части совершенствования методики наблюдения поверхности горения металлизированных систем с исключением фоновой засветки изображений, измерения коэффициента отражения поверхности горения. Работа выполнялась в рамках Государственного задания «Наука» (проект 11.1928.2017/4.6).

Разработанные пакеты программ и результаты оценки времени свертывания крови методом анализа цифровых спекл-изображений внедрены в образовательный курс Opticl Methods in Biology and Medecine, что подтверждается актом об использовании результатов диссертационной работы от 08.05.2019 г.

Полнота опубликования результатов исследования.

Материалы диссертационной работы изложены в полной мере в статьях в рецензируемых журналах и материалах конференций: 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 6 статей в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 3 патента на изобретения, 1 свидетельство о регистрации программ для

ЭВМ, 12 статей в материалах конференций, индексируемых Scopus и Web of Science. Результаты работы докладывались на 13 конференциях в России и за рубежом.

Замечания по диссертационной работе.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. На стр. 15 диссертации, в табл. 1.1 указаны данные по удельной теплоте сгорания некоторых металлов и горючих, которые не соответствуют опубликованным результатам [Яновский Л.С, Дубовкин Н.Ф., Иванов В.Ф. Энергоемкие горючие. – Казань: АБАК, 1997. 131 с.]. Отсутствует ссылка на источник информации.
2. В описании методики измерения и визуализации процесса горения порошков металла не указано разрешение лазерного монитора и его влияние на качество получаемых изображений, в частности для наноразмерных частиц алюминия и железа. Также отсутствует обоснование выбора высокоскоростной камеры, которая имеет не достаточно четкое изображение при цифровом увеличении и высокой скорости съемки.
3. На стр. 85 диссертации сообщается, что «железо оказывает каталитическое влияние на сжигание алюминия». Следует пояснить о каком влиянии железа на каталитическое горение алюминия идет речь и какие реакции возможны для указанной системы в присутствии воздуха.
4. На стр. 85, в п.2.6 и табл. 2.2 не указаны составы композиций $Al+Fe_2O_3$ и твердого топлива на основе порошка алюминия АСД-6М, для которых представлены результаты в третьей главе. Отсутствует описание термограмм ТГ-ДСК анализа исследуемых образцов порошков металлов, представленных на рис. 2.23.
5. На стр. 97 сказано, что горение нанопорошка алюминия в воздухе протекает в два этапа: в низкотемпературном (600–800 °С) и высокотемпературном (до 2000–2100 °С) интервалах температур. При этом указывается, что «окисление алюминия преобладает в этой фазе. Затем процесс горения ускоряется и переходит в тепловой взрыв». В тексте диссертации не понятно, в какой фазе протекают реакции окисления алюминия. С какой погрешностью измерялась температура горения алюминия в опытах и какие признаки наблюдались теплового взрыва?
6. На стр. 106–108 диссертации представлена методика и результаты определения изменения коэффициента отражения поверхности образцов металлов в процессе их воспламенения и горения, которая основана на зарегистрированных значениях интенсивности излучения поверхности образца и прямой корреляции коэффициента отражения (стр. 106). На каких физических законах основано данное утверждение? Проводилась ли

сравнительная оценка коэффициента отражения для алюминиевых порошков с имеющимися в литературе данными?

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости представленных результатов и общей положительной оценки работы. Диссертация Ли Линь содержит описание разработанных лабораторных макетов систем визуализации для исследования горения металлов и их смесей. Предложен новый метод мониторинга на основе анализа цифровых спекл-изображений для количественной оценки изменения отражения поверхности объектов и разработано программное обеспечение для анализа спекл-изображений и изображений, получаемых с помощью лазерного монитора. Таким образом, тема и содержание диссертации соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

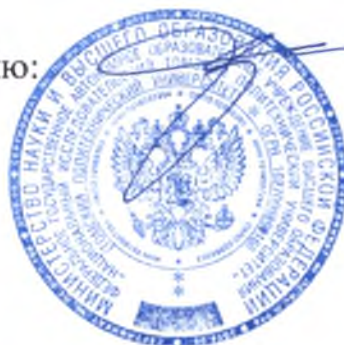
Считаю, что диссертационная работа «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения» соответствует требованиям Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а ее автор Ли Линь заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Дополнительный член диссертационного совета ДС.ТПУ.01

 11.11.2019 г. Коротких Александр Геннадьевич
(дата, подпись)

Доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор научно-образовательного центра И.Н. Бутакова инженерной школы энергетики
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, уч. корп. 4, оф. 234,
e-mail: korotkikh@tpu.ru, тел. (3822) 701777, доп. 1680

Подпись Коротких А.Г. удостоверяю:
Ученый секретарь




О.А. Ананьева