

Натурно-модельные испытания материалов и покрытий при имитации интенсивного радиационно-конвективного теплообмена элементов теплоэнергетического оборудования.**Часть 2. Физико-технические характеристики теплового стенда тестирования материалов и покрытий теплоизолированной камеры сгорания дизеля**

¹Мерзлякин В.Г., ¹Максимов А.Д., ²Товстоног В.А., ²Чиринов К.В., ¹Абдулмянов Р.Н.
¹Университет машиностроения, ²МГТУ им. Н.Э. Баумана
(495) 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. Представлены основные физико-технические характеристики теплового стенда, позволяющие проводить натурно-модельные испытания в условиях сложного теплообмена в обеспечение выбора штатных и перспективных термостойких материалов и покрытий. Показано, что данный предварительный этап испытаний материалов и покрытий должен предшествовать традиционному тестированию отдельных узлов с теплоизолированными элементами на моторных стендах. Разработанный стенд позволяет генерировать комбинированный тепловой поток с моделированием частот и сдвигов по фазе лучистых и конвективных компонент, соответствующих индикаторным диаграммам дизелей в их эксплуатационных режимах. Рассмотрена методология формирования модельного спектра излучения раскаленных частиц сажи в диапазоне $\sim 0,8 - 1,5$ мкм с величиной теплового потока до $\sim 1 - 2$ МВт/м² на заданных площадях облучаемой поверхности камеры сгорания дизельного двигателя. Предлагаемая методология испытаний материалов при интенсивной радиационно-конвективной нагрузке может быть использована для изучения терморadiационных и температурных полей теплонагруженных элементов двигателей, турбин, аэрокосмических аппаратов, различных теплоэнергетических установок и систем.

Ключевые слова: камера сгорания, радиационно-конвективный теплообмен, натурно-модельные испытания, моделирование спектра и потока излучения, индикаторная диаграмма, тепловой стенд, теплоизолирующие материалы и покрытия.

Представленная концепция экспериментального стенда радиационно-конвективного нагрева [1] позволяет предложить методологию тепловых модельных (близких к натурным) испытаний материалов и покрытий для теплоизолированной камеры сгорания быстроходных дизелей. Станет возможным проведение исследований процессов генерации комбинированного теплового потока с моделированием спектрального распределения лучистой компоненты, ее частоты и сдвигов по фазе относительно конвективной составляющей, соответствующих заданным эксплуатационным режимам при имитации сложного теплообмена с существенной долей лучистой компоненты [2, 3].

В рассматриваемом тепловом стенде (рисунок 1) излучатель тепловой энергии выполнен в виде унифицированного однолампового модуля (на основе водоохлаждаемой ксеноновой лампы), снабженного отражателем в виде полого корпуса с патрубками для подвода и отвода хладагента. Излучение ксеноновой лампы генерируется в диапазоне длин волн $0,3 - 1,5$ мкм со значительными локальными максимумами в ближней ИК области (левый спектр на рисунке 1) с интегральным тепловым потоком излучения до $\sim 10^5$ Вт/м². Это совпадает со спектром излучения раскаленных частиц сажи в теплоизолированной камере сгорания дизеля. Поток излучения может быть увеличен до нескольких МВт/м² за счет применения набора ламп с водоохлаждаемыми рефлекторами (на рисунке 1 показан один модуль).

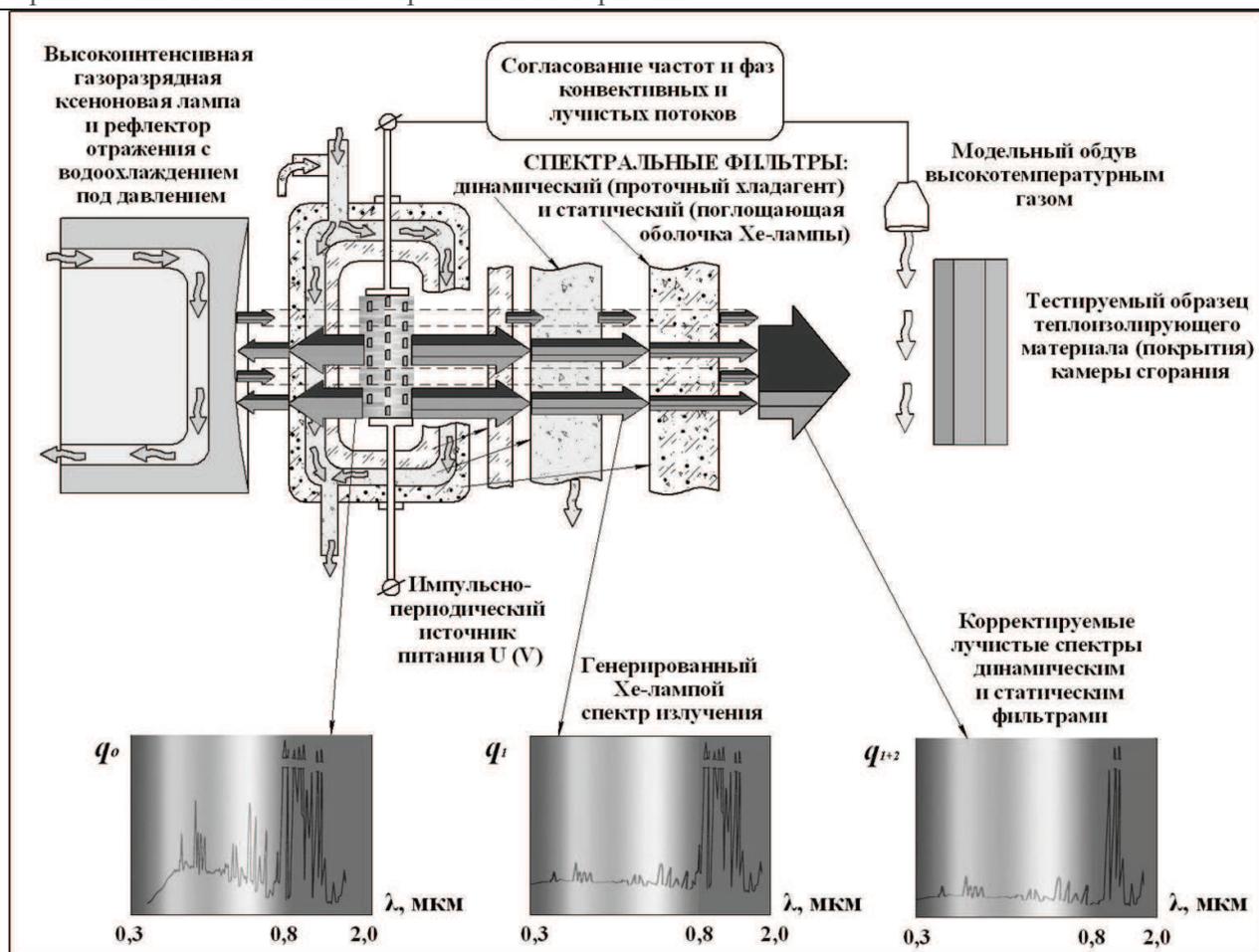


Рисунок 1. Принципиальная схема теплового стенда имитации лучисто-конвективного воздействия в теплоизолированной камере сгорания дизельного двигателя

Для этапа спектральной селекции терморрадиационных потоков используются дисперсные фильтры, поглощающие и незначительно рассеивающие лучистую энергию в заданном диапазоне длин волн.

Первый фильтр сконструирован для селективного ослабления излучения в видимой части спектра излучения ксенона слабо рассеивающими и поглощающими частицами неорганического пигмента, например, частицами окиси алюминия в составе проточного хладагента (средний спектр на рисунке 1). Выбор требуемого размера частиц и их концентрации основан на применении разработанных методов решения уравнений переноса излучения [4] в полидисперсной среде, характеристики которой оцениваются с использованием теории рассеяния Г. Ми [5]. Например, полидисперсные частицы корунда с размерами в диапазоне 1 – 10 мкм могут обеспечить заданное ослабление излучения в видимой части спектра [6]. С этой целью средство для подвода и отвода хладагента снабжено каналом ввода пигмента-поглотителя с изменяющейся объемной концентрацией до 10%, определяемой условиями селекции исходного излучения Хе-лампы (1-й динамический спектральный фильтр на рисунке 1).

Второй этап селективного ослабления излучения обеспечивается вторым фильтром за счет легирования слабо рассеивающими и сильно поглощающими инородными примесями в составе внешней полупрозрачной оболочки (2-й статический спектральный фильтр). Двухоболочечная высокоинтенсивная газоразрядная трубчатая лампа может быть изготовлена из кварцевого стекла (лейкосапфира) с показателем поглощения не более $0,3 \text{ м}^{-1}$ и показателем рассеяния менее $0,01 \text{ м}^{-1}$ [7, 8]. При легировании оболочки добавками инородных слабо рассеивающих и сильно поглощающих примесей (например, оксиды циркония, алюминия, кремния)

должно обеспечиваться ослабление излучения Хе-лампы в видимом и частично ИК диапазонах (см. левый спектр на рисунке 2).

Для эффективного охлаждения стеклянных оболочек газоразрядных ламп коэффициент теплопроводности должен быть не менее $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [9].

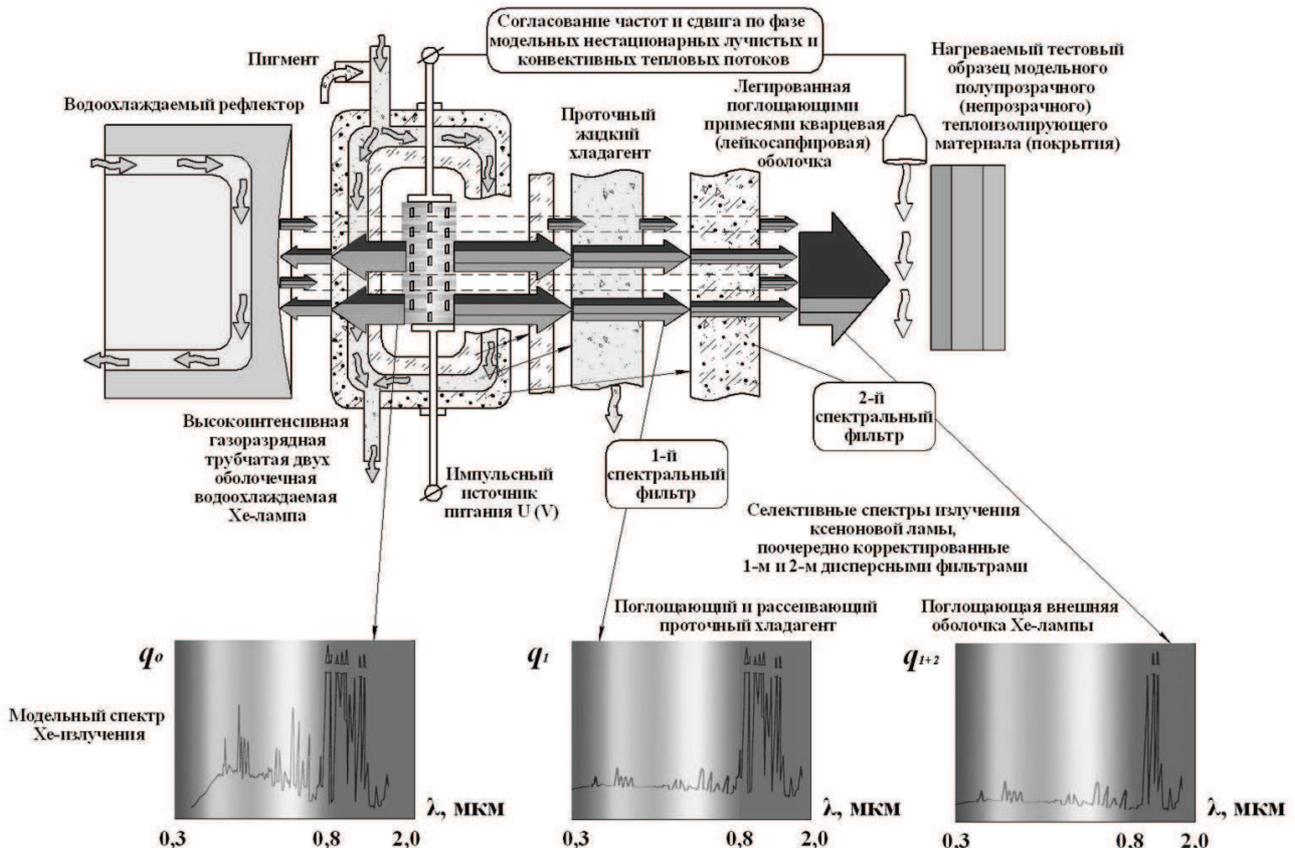


Рисунок 2. Схема стенда моделирования конвективного нагрева и лучистого теплового воздействия с помощью высокоинтенсивной газоразрядной ксеноновой лампы со спектром, формируемым полидисперсными спектральными динамическим (1) и статическим (2) фильтрами

Интегральный тепловой поток, воздействующий на тестовый образец, формируется совместно с заданным конвективным потоком при обдуве поверхности тестируемого образца высокотемпературными газами. Имитация временного режима нагрева обеспечивается заданной импульсно-периодической силовой электрической нагрузкой для ксеноновой лампы с согласованием по частоте и сдвигу фазы лучистых и конвективных компонент, соответствующих модельных индикаторных диаграмм дизеля.

Технические характеристики установки [10 – 13]:

- модульный принцип размещения нагревательных элементов, что позволяет обеспечивать наилучшее соответствие распределения тепловых потоков натурным (реальным) распределениям;
- автоматическая регулировка в процессе теплового воздействия как нагревательных элементов индивидуально для облучаемых поверхностей объекта, так и взаимного расположения набора отдельных модулей. Это позволяет, например, моделировать изменение тепловых нагрузок при изменении угла атаки, когда изменяется режим нагрева поверхностей объекта, а также оценивать влияние маневренности объекта на его характеристики в широком диапазоне режимов эксплуатации двигателя (турбины);
- совмещение моделирования условий нагрева с одновременным силовым и динамическим воздействием путём приложения силовых статических сосредоточенных (точечных) и распределённых нагрузок в заданных точках (узлах) или областях поверхностей объекта,

что позволяет приблизить условия испытаний к различным режимам эксплуатации, вплоть до натурной имитации тепловых потоков по величине и времени воздействия.

Предлагаемый способ тепловых испытаний материалов и изделий реализуется следующим образом:

- размещают и регулируют положение различного размера панелей терморadiационных нагревателей относительно криволинейных поверхностей объекта, до их облучения;
- терморadiационные нагреватели размещают набором отдельных модулей, индивидуально для каждой облучаемой поверхности объекта;
- устанавливают параметры теплового воздействия, как по величине теплового потока, так и по требуемому диапазону длин волн;
- регулируют положение терморadiационных нагревателей относительно облучаемых поверхностей объекта (в процессе теплового воздействия для достижения требуемых его параметров) как индивидуально, так и изменением взаимного расположения отдельных модулей по результатам контроля температурными датчиками;
- одновременно с тепловым воздействием осуществляют контролируемые воздействия на поверхности объекта силовыми и динамическими нагрузками, а также окислительной средой;
- воздействие окислительной средой осуществляют на режимах, приближённых к натурной эксплуатации поверхностей объекта;
- силовые и динамические воздействия в условиях окислительной среды осуществляют путём приложения силовых статических сосредоточенных (точечных) и распределённых нагрузок в заданных точках (узлах) или областях поверхностей объекта;
- режимы силовых, динамических воздействий и окислительной среды выбирают с учётом условий теплового воздействия на облучаемые поверхности объекта.

Согласно заложенному в предлагаемом способе принципу испытаний материалов и изделий, реализуются и режимы испытаний в условиях воздействия вибрации с параметрами частоты и амплитуды воздействий, соответствующих натурным режимам, что позволяет определять спектр собственных частот всего изделия, в том числе и в условиях нагрева. Таким образом, реализация одновременного теплового, силового и динамического воздействий в режимах, соответствующих натурным, позволяет получать функциональные характеристики объекта и существенно сокращать стоимость создания реальных образцов.

Воздействия одновременно с ранее указанными факторами окислительной средой на поверхности (реальных размеров) с нанесёнными защитными покрытиями позволяют оценить стойкость этих покрытий на режимах, соответствующих условиям эксплуатации (что невозможно осуществить на малых (лабораторных) образцах, когда проявляется масштабный эффект).

На малых образцах и реальных поверхностях (в силу существенного различия их резонансных частот), покрытие (в условиях воздействия совокупности тепловых, силовых и динамических нагрузок) может иметь совершенно разные характеристики стойкости (расслоение, отслоение и т.п.). Возможность многократного повторения испытания при вариации режимов моделирования внешних условий воздействия повышает их эффективность, чего нельзя достичь, например, при ограниченном числе испытаний на моторном стенде в силу их большой трудоемкости и высокой стоимости.

Заключение

Предлагаемый метод и разрабатываемая на его основе установка обеспечивают уникальные тепловые режимы лучистого воздействия в заданных спектральных диапазонах (в интервале $\sim 0,3 - 2$ мкм) с плотностью потока излучения до 4 МВт/м^2 моделируемых тепловых источников на значительных (десятки кв. см) площадях нагрева с возможностью дополнительной конвективной, кондуктивной, силовой нагрузок и обеспечивают стендовые тепло-

прочностные испытания, физическую диагностику, а также становится возможна реализация режима лучевой обработки (формообразования) фрагментов изделий и деталей машин.

Разработанная установка позволяет впервые получить интенсивный модельный во времени и в пространстве лучистый нагрев (подобно лазерному или солнечному), но на больших площадях облучения:

- крупногабаритных изделий (стенок камер сгорания печей, дизелей и турбин, оболочек ловушек перегретого теплоносителя ядерных реакторов, корпусов летательных аппаратов при аэродинамическом нагреве излучением погранслоя и пр.);
- значительных природных образований (фрагментов биологических, снежно-ледяных массивов и мёрзлых грунтов, водных бассейнов и пр.) при моделировании заданного селективного спектра внешних терморadiационных источников (различного рода ИК-нагревателей, солнца, природных и промышленных пожаров и пр.).

Применяемые для данной установки методики натурно-модельных испытаний или технологии формообразования материалов и сред (при имитации заданного режима терморadiационного и конвективного воздействия) позволяют решать многие актуальные естественно-научные проблемы и научно-технические задачи [14 – 20]:

- 1) создание и тестирование новых и штатных материалов тепло-огнезащитных спецсредств, термостойких (термобарьерных, теплозащитных и теплоизолирующих) материалов и покрытий элементов теплоэнергетического оборудования и транспортных средств, включая аэрокосмические (особенно для перспективных разработок нового поколения космических самолетов);
- 2) разработка технологии получения медицинских керамических и керамометаллических биосовместимых имплантатов, ИК термообработки пищевых продуктов и пр.;
- 3) прогнозирование и анализ процессов и явлений, обусловленных терморadiационным воздействием техногенных и природных источников излучения, включающих:
 - выбор режимов эксплуатации промышленных и транспортных объектов и их влияние на природную среду при соответствующих экологических ограничениях,
 - оценку влияния катастрофических пожаров на природные среды, промышленные и бытовые сооружения,
 - изучение процессов непрерывного (импульсно-периодического) солнечного облучения различных объектов, в частности, представляющих особый интерес – космических, арктических и антарктических станций и оборудования, загрязненных ледников и морских акваторий и др.

Кроме того, данная установка позволит исследовать оптические и терморadiационные характеристики тестируемых материалов и сред путем диагностирования вариаций их спектральных пропускательных (отражательных) способностей в зависимости от спектров моделируемой терморadiационной лучистой нагрузки внешней среды.

Предлагаемое техническое решение позволяет сократить количество натурных испытаний изделий машиностроительного производства и транспортных средств, например, гиперзвукового космического самолета, натурные испытания которого в настоящее время ограничиваются однократным пуском и являются чрезвычайно дорогостоящей разработкой. Указанный способ позволяет смоделировать возникающие тепловые нагрузки с применением тепловых стендов различного назначения в условиях, характерных для машиностроительного производства, эксплуатации деталей машин, энергетического оборудования и транспортных средств (включая аэрокосмические), тестирование которых в реальных условиях невозможно или сопряжено с существенными эксплуатационными, техническими и технологическими проблемами и ограничениями.

Литература

1. Мерзликин В.Г., Максимов А.Д., Товстоног В.А., Крохалев И.Н. Натурно-модельные испытания материалов при имитации радиационно-конвективного теплообмена в камере

- сгорания дизеля. Часть 1. Физико-математическое моделирование тепловых режимов термостойких материалов и покрытий // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. № 2(20), т. 2. С. 63 – 67.
2. Чирков А.А. Об уровне научных исследований теплопередачи в двигателях внутреннего сгорания. Ярославский технологический институт. – М. «Вестник машиностроения». 1962. № 6. – С. 112-124.
 3. Pflaum W. Die Wärmeübertragung bei Dieselmotoren mit unci ohne Auflagung. «Motor Technische Zeitung». - 1961. - № 3. - S. 570.
 4. Адзериho К.С. Лекции по теории переноса лучистой энергии. – Минск: Изд. БГУ, 1975. 192 с.
 5. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
 6. Петров В.П., Рябцев Е.И., Сутугин В.Г., Мерзликин В.Г. Оптические свойства высокоотражающей керамики // Тематический сб. «Вопросы авиационной науки и техники». ВИАМ. Сер. авиационные материалы. -1989. - С. 39-43.
 7. Мерзликин В.Г., Сутугин В.Г., Стифеев Л.К., Худяков С.В. Методика регистрации оптических и терморadiационных характеристик с компенсацией влияния индикатрисы отражения теплоизолирующих и теплозащитных материалов и покрытий камер сгорания быстроходных дизелей. Известия МГТУ МАМИ. Т. 10, № 2(12), 2011.
 8. Товстоног В.А., Мерзликин В.Г., Мосолов Ф.Ф. Постановка и решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойных рассеивающих средах. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2008, № 2, с. 12- 27.
 9. Елисеев В.Н., Товстоног В. А. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № 1. С. 57 – 70.
 10. Товстоног В.А., Мерзликин В.Г. и др. Излучатель тепловой энергии. Правообладатель машиностроительный университет (МАМИ). Положительное решение о выдаче патента от 09 июня 2014 г. по заявке № 2013123324.
 11. Мерзликин В.Г., Товстоног В.А. и др. Способ тепловых испытаний материалов и изделий. Заявка на способ. Правообладатель машиностроительный университет (МГМУ МАМИ). Заявка на способ. Регистрационный № 2013123326 от 22 мая 2013 г.
 12. Елисеев В.Н., Товстоног В. А. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2011. № 1. С. 57 – 70.
 13. Merzlikin V., Eliseev V., Gazhur A., Prediger V. Stand modeling of radiant and convective impact for the heat-insulated combustion chamber. FISITA World Automotive Congress. Maas-tricht, 01 – 06 June 2014. Congress CD-ROM, paper № F2014-CET-143, p.p. 1 - 8.
 14. Dannecker R., Noll B., Hase M., Krebs W., K Schildmacher.-U., Koch R., Aigner M. Impact of radiation on the wall heat load at a test bench gas turbine combustion chamber: measurements and CFD simulation. URL: <http://inzheneriy.su/slovar/sapr/vliyanie-teploobmena-izlucheniema-sumarnyy-teplovoy-potok-v-stenku-modelnoy-kamery-sgoraniya-gazov.html> (дата обращения 12.12.2012).
 15. Siegel R. Internal Radiation Effects in Zirconia Thermal Barrier Coatings. AIAA J. Thermophysics Heat Trans. 1996.- Vol. 10, no. 4, p. 707-709.
 16. Manara J., Arduini-Schuster M., Rätzer-Scheibe H.-J. and Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings. Surface and Coatings Technology. 2009. Vol. 203. Issue 8. P. 1059-1068.
 17. Merzlikin V.G., Sidorov O.V., Cheranев S.V., Rettberg R. Development of principles and

methods of estimation of thermal condition of semitransparent coatings in complex heat exchange combustion chambers for low-heat-rejection diesel engines. FISITA World Automotive Congress. Budapest, 30 May – 4 June 2010. Book of Abstracts, 2010. P.198. Congress CD-ROM, paper № F2010-C081, p.p. 8.

18. Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда / Л. Гидрометеиздат. 1990. 261 с.
19. Kathiravan Krishnamurthy, Harpreet Kaur Khurana, Soojin Jun, Joseph Irudayaraj, and Ali Demirci. Infrared Heating in Food Processing: An Overview// Comprehensive Reviews in Food Science and food safety. 2008. Vol. 7. С. 2 -13.
20. Спириин Р.И. Разработка технологии хлеба из целого зерна пшеницы с предварительной ИК-обработкой зерна. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.: Московский государственный университет пищевых производств. 2007. 24 с.

О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (ВСО)

д.т.н. проф. Оленин Л.Д., Очкин Д.И.
Университет машиностроения
(495) 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. Статья посвящена анализу особенностей резания в режиме высокоскоростной обработки (ВСО) с целью обеспечения качества и производительности при фрезеровании. Сформулированы требования к оборудованию, режущему и вспомогательному инструменту, а также к подготовке управляющих программ. Проанализированы причины возникновения вибраций при обработке в режиме ВСО, а также способы борьбы с ней. Изложены практические рекомендации по выбору и отладке режимов обработки, в том числе с учетом акустических характеристик технологической системы.

Ключевые слова: эффект Соломона, диаграмма стабильности, трахоидальная обработка, резонанс и диссонанс, термонатрон, дробление, акустический способ.

Высокоскоростная обработка (High Speed Machining), далее ВСО – одна из новых, наиболее быстро развивающихся технологий, способная радикально увеличить эффективность обработки. Её отличительная особенность – использование повышенной скорости резания до величины, при которой силы резания уменьшаются, что позволяет вести обработку с увеличенными подачами. В свою очередь увеличение подачи приводит к увеличению толщины срезаемого слоя и, как следствие, к уменьшению температуры и повышению стойкости инструмента.

О ВСО заговорили в 1931 году, после публикации в Германии Патента № 523594 [1] на имя Карла Соломона, однако до сих пор нет четкого определения, что считать высокоскоростной обработкой, как нет и научного объяснения эффекта, на котором эта технология основана. По современным представлениям кривая зависимости температуры в зоне резания от скорости имеет вид показанный на рисунке 1 [2]. С увеличением скорости температура в зоне резания растет пока не достигнет некоторого критического значения (точка *a*), при котором инструмент утрачивает режущие свойства. При дальнейшем увеличении скорости рост температуры замедляется и она даже несколько падает. Однако после некоторого падения рост температуры возобновляется и на участке после точки *c* условия для работы инструмента вновь становятся неблагоприятными.

Обработку возможно проводить в интервале скоростей от нуля до точки *a*. Это соответствует классической обработке. Обработку можно успешно выполнять также в интервале