

В. А. Товстоног, В. И. Томак,
С. В. Цветков, К. В. Чирин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕПЛОПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

Приведено описание разработанного экспериментального комплекса для теплопрочностных испытаний материалов и элементов конструкций при высокоинтенсивном нагреве, его эксплуатационные характеристики и результаты демонстрационных испытаний жаростойких материалов.

Разработка перспективных конструкций высокоскоростных летательных аппаратов связана с проблемой выбора конструкционных материалов, стойких к воздействию высоких температур, в широком диапазоне скоростей нагрева, сопряженного с силовым нагружением. Подобные задачи возникают также при анализе работоспособности ответственных конструкций в условиях экстремальных ситуаций техногенных аварий или природных катастроф, сопровождающихся высокотемпературным воздействием, например при массивованных пожарах. Решение этой проблемы обуславливает необходимость проведения теплопрочностных испытаний как материалов в целях определения физико-механических характеристик, так и элементов натуральных конструкций или их моделей при расчетных (ожидаемых или прогнозируемых) параметрах теплового и силового нагружения.

Для решения ряда практически важных задач необходимо получение данных о физико-механических характеристиках материалов или несущей способности конструкции при большой скорости нагрева и заданном законе изменения параметров нагрева и силового нагружения, что в настоящее время не обеспечено промышленным испытательным оборудованием и методиками. Так, существующие испытательные машины, используемые для проведения исследований при высоких температурах, обычно комплектуются высокотемпературными печами сопротивления и рассчитаны на проведение испытаний *стандартных* образцов материалов в стационарных условиях нагрева с характерным временем выхода на рабочий температурный режим, измеряемым десятками минут [1–3]. Предельно достижимая температура нагрева определяется стойкостью нагревательных элементов в рабочей среде и при работе в воздушной (окислительной) атмосфере (т.е. в условиях, соответствующих эксплуатационным) не превышает 1100...1300 °С для жаростойких сплавов сопротивления,

1400...1500 °С для карбидкремниевых нагревателей и 1700 °С для нагревателей из дисилицида молибдена [4]. Существенно то, что реализация высокоскоростных режимов нагрева с подобными нагревательными элементами практически невозможна. Другие типы нагревательных устройств, основанные на электроконтактном, индукционном, электронно-лучевом или лазерном методах нагрева имеют определенные ограничения по типу испытуемых материалов (металл, диэлектрик), форме и размерам нагреваемых объектов.

В связи со сказанным наибольшие возможности открываются при использовании нагревателей, выполненных на основе трубчатых источников излучения — газоразрядных (ГИИ) или галогенных ламп с телом накала (ГЛН); наиболее полные систематизированные данные по таким источникам нагрева и нагревательным устройствам на их основе приведены в работе [5]. Применительно к рассматриваемой задаче большим преимуществом нагревательных устройств на основе трубчатых ГИИ или ГЛН является возможность реализации управляемого нагрева объектов с пространственно развитой поверхностью, что открывает возможность проведения исследований не только на образцах материалов, но и на элементах реальных конструкций или их маломерных моделях. Вместе с тем, нагревательные устройства на основе трубчатых источников излучения могут быть достаточно просто совмещены со стандартными испытательными машинами силового нагружения, что позволяет создать комплекс для проведения теплопрочностных испытаний образцов материалов и элементов конструкций при высокоскоростном программированном нагреве.

Нагревательные устройства, созданные на основе водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения, позволяют реализовать нагрев при плотности потока излучения до 200...300 Вт/см² и соответственно температурах, достигающих 2000...2500 °С. Однако их применение сопряжено с рядом проблем, таких как существенная неравномерность поля излучения, связанная с большой дискретностью установки ГИИ в нагревательном блоке, необходимость достаточно сложной системы водяного охлаждения и, что самое важное, отсутствие материальной базы для *серийного* производства наиболее совершенных ГИИ типа ДТП10/200, допускающих работу на форсированных режимах с длительностью до десятков минут. Поэтому при разработке экспериментального комплекса использовались нагревательные блоки на основе наиболее мощных (по мощности на единицу длины источника) трубчатых ГЛН КГ220-2000, выпускаемых отечественной промышленностью.

Разработанный и введенный в эксплуатацию в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана экспериментальный комплекс для теплопрочностных испытаний материалов и элементов конструкций, системы нагружения и измерений которого аттестованы подразделениями

Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ, содержит две установки на основе испытательных машин УМЭ-10ТМ с максимальным усилием до 100 кН и ЕУ-40 с усилием до 400 кН. В обеих установках использованы унифицированные нагревательные блоки на основе ГЛН КГ220-2000 с суммарной электрической мощностью до 50 кВт.

Общий вид установок приведен на рис. 1, *а* и рис. 2, *а* (см. 3-ю и 4-ю полосы обложки). В состав каждой из установок, кроме силовой машины и блока радиационных нагревателей входят: сильноточный (до 600 А в цепи нагрузки) тиристорный регулятор, позволяющий реализовать режим программного нагрева; система регистрации потока излучения, выполненная на основе водоохлаждаемого калориметра типа ФОА; система измерения сил с тензометрическим датчиком, отградуированным по образцовым динамометрам ДОРМ-3-10 и ДОСМ-10; система регистрации температур контактными ХА- и ВР-термодатчиками; система измерения деформаций с водоохлаждаемым тензометрическим датчиком деформаций с вынесенной измерительной игольчатой (вольфрамовой или керамической) базой. На рис. 1, *б* и рис. 2, *б* (см. 3-ю и 4-ю полосы обложки) показаны рабочие зоны установок.

Сигналы со всех датчиков (теплового потока, температуры, сил, деформаций), а также ток и напряжение в силовой цепи блока нагревателей посредством многоканальной кабельной цепи через модуль сопряжения LC-237А регистрируются с использованием ПЭВМ с заданным шагом по времени.

Характеристики режимов нагрева. При проведении экспериментальных исследований важное значение имеют такие параметры нагрева испытуемого объекта, как скорость нагрева, определяемая плотностью потока излучения, и распределение температуры по нагреваемой поверхности и объему образца, определяемые характеристиками нагревателя, геометрическими параметрами объекта нагрева, его теплофизическими свойствами, а также конструкцией узлов передачи сил. С этими параметрами тесно связана и методика проведения эксперимента по определению тех или иных характеристик. Очевидно, что при проведении высокотемпературных исследований практически невозможно обеспечить условия, принятые при проведении исследований в области нормальных температур. Это связано с процессом нестационарного теплообмена в системе блок радиационных нагревателей–образец–устройство силового нагружения, когда температурное поле в образце определяется совокупностью большого числа факторов разной природы. Их влияние должно учитываться при разработке методики эксперимента, которая может быть основана как на результатах прямых измерений, так и на использовании методов решения обратных задач.

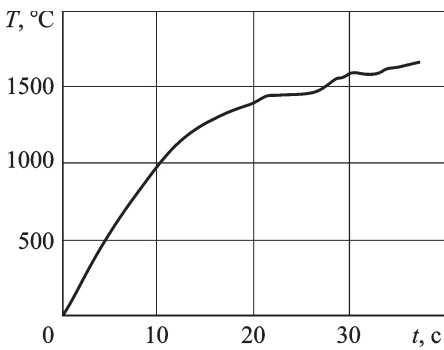


Рис. 3. Термограмма нагрева образца жаростойкой стали

нагрева (скорость нагрева и максимальную температуру) и такую важнейшую эксплуатационную характеристику, как ресурс работы блока нагревателей.

С учетом ограничений по режиму эксплуатации ГЛН и в целях достижения максимальной плотности потока излучения при минимальной неравномерности поля излучения разработаны блоки радиационных нагревателей с двухрядным расположением ГЛН в шахматном порядке. Токоподводы и отражательный экран — водоохлаждаемые, а температурный режим кварцевых оболочек ГЛН определяется радиационным теплообменом в системе блок ГЛН–отражательный экран–нагреваемый объект и условиями естественной конвекции. Предельная температура оболочек ГЛН $\approx 1200^\circ\text{C}$, ее превышение ведет к разрушению ГЛН. С увеличением плотности упаковки ГЛН в блоке ужесточается температурный режим, что ведет к снижению ресурса работы, а следовательно, и к ограничениям по предельно достижимым параметрам нагрева.

Для блока с двухрядной установкой 19 ГЛН при межосевом расстоянии 12,5 мм измеренная плотность потока излучения на расстоянии 25 мм от плоскости внешнего ряда ГЛН составляет $q_r = (96 \dots 100) \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$. При этом температура тыльной поверхности образца из жаростойкой стали 13Х20 толщиной 2 мм достигает $\sim 1600^\circ\text{C}$ при скорости нагрева до 100 К/с (рис. 3). Однако время работы с установленным образцом составляет не более 2...3 мин, превышение этого значения приводит к разрушению ГЛН (рис. 4). Как показал анализ ряда экспериментов, это связано с локальным перегревом оболочек ГЛН излучением образца (при температуре 1500...1600°C существенная доля излучения образца ($\approx 25\%$) приходится на область непрозрачности $\lambda \gtrsim 4 \text{ мкм}$ спектра пропускания оболочки ГЛН).

Таким образом, реализация более длительных режимов нагрева связана с облегчением температурного режима оболочек ГЛН, что мо-

Такой подход позволяет с наибольшей эффективностью использовать технические возможности экспериментальной базы.

В процессе экспериментальной отработки комплекса использованы блоки радиационных нагревателей с разной плотностью упаковки ГЛН в блоке. Этот параметр непосредственно влияет на неравномерность поля излучения, плотность теплового потока, а следовательно, и на предельно достижимые характеристики

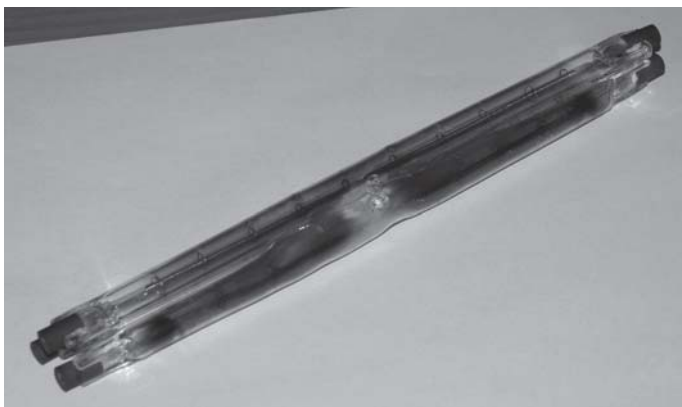


Рис. 4. Фрагмент блока разрушенных ГЛН

жет быть достигнуто увеличением межосевого расстояния. Проведенные расчеты показали, что для условий, реализованных в экспериментальных установках, расстояние между осями ГЛН в блоке должно быть ≈ 18 мм, что подтверждено последующим опытом практической работы; параметры такого блока приведены далее.

Основная характеристика нагревательного блока — плотность потока излучения на поверхности образца. Эта величина хорошо контролируется и является стабильной на заданном режиме работы блока нагревателей, по ней можно контролировать и управлять режимом нагрева при установлении корреляции между плотностью потока излучения и температурным режимом нагреваемого объекта, что, однако, требует предварительной калибровки системы нагрева при подготовке серии испытаний. Выбирая плотность потока излучения основным параметром регулирования и включая датчик потока в контрольно-измерительную цепь, можно контролировать работу блока дискретных нагревателей: так, отключение (разрушение) даже одного источника излучения (ГЛН) приводит к заметному изменению ($\approx 7\%$) плотности потока излучения.

На рис. 5 приведена зависимость установившегося значения плотности потока излучения (плотность потока излучения через промежуток времени от момента включения до выхода на режим, близкий к стационарному) на расстоянии 15 мм от условной излучающей поверхности нагревательного блока (совпадает с плоскостью оболочек внешнего ряда источников нагрева) от основного параметра регулирования — питающего напряжения; эту зависимость аппроксимируем следующей формулой:

$$q_R = -7,4 \cdot 10^{-6} U^3 + 0,0041 U^2 - 0,28 U + 19, \text{ Вт/см}^2; U \in 120 \dots 240 \text{ В.}$$

На рис. 6 приведены графики изменения плотности потока излучения в зависимости от времени для ряда значений питающего напряжения. Как видно из рисунка, они монотонные и имеют два характерных

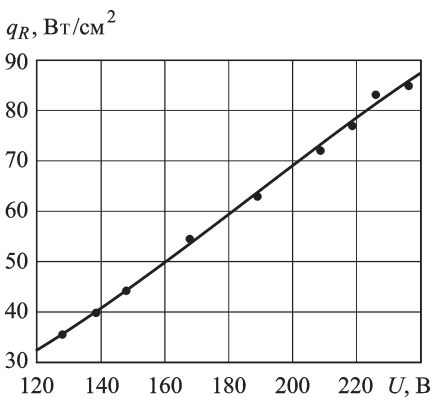


Рис. 5. Зависимость плотности потока излучения от питающего напряжения

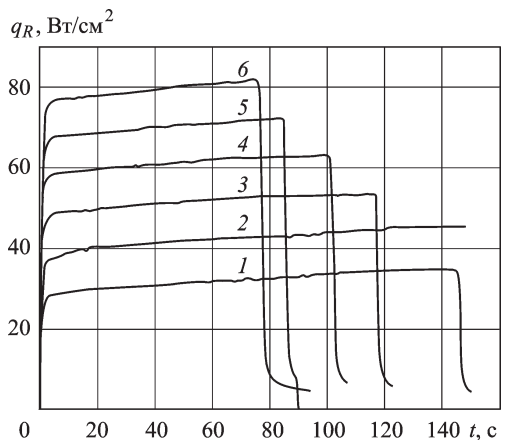


Рис. 6. Зависимости плотности потока излучения блока ГЛН от времени при питающем напряжении 130, 150, 170, 190, 210 и 240 В (соответственно кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6)

участка. Первый — короткопериодический, длительностью ~ 1 с связан с разогревом нити накала ГЛН, а второй — длиннопериодический связан с нагревом и излучением кварцевых оболочек ГЛН. Длительность этого периода в зависимости от начального значения питающего напряжения составляет 80...150 с. Существенна ($\sim 10 \dots 15\%$) также добавка, связанная с излучением оболочек ГЛН, в суммарную величину потока излучения, что необходимо учитывать при выборе режимов испытаний.

В связи с конечными размерами блока излучателей имеет место неравномерное распределение потока излучения на нагреваемой поверхности (показано на рис. 7 для центрального горизонтального сечения вдоль оси источников излучения). Видно, что поле излучения достаточно однородно в области протяженностью ≈ 80 мм, это обоснованно позволяет выбирать размер испытываемых образцов.

В целях оценки достижимой температуры нагрева измерено температурное поле плоского образца в виде пластины из жаростойкой стали 13X20 длиной 150 мм, шириной 20 мм и толщиной 3 мм. К тыльной поверхности образца вдоль длинной стороны на отрезке 100 мм с шагом 12,5 мм конденсаторной сваркой крепились термопары. Сам образец устанавливали в захваты испытательной машины на заданном расстоянии от блока ГЛН.

На рис. 8 приведена экспериментальная зависимость установившейся температуры в центре образца в функции питающего напряжения, а на рис. 9 — термограммы нагрева в точках установки термопар. Температура нагрева достигает ≈ 1300 °С, а неравномерность в центральной части образца на базе ≈ 50 мм (кривые 4, 5, 7) не превышает 50 К, что сопоставимо с погрешностью измерения температу-

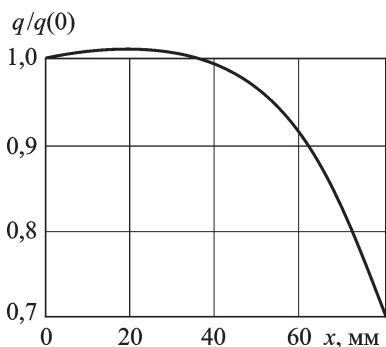


Рис. 7. Изменение плотности потока излучения вдоль осей ГЛН ($x = 0$ соответствует центральной точке блока)

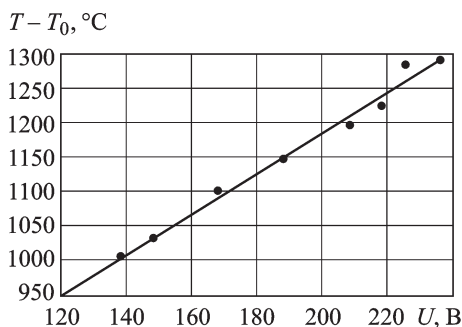


Рис. 8. Зависимость изменения установившейся температуры на тыльной поверхности образца от напряжения питания блока ГЛН

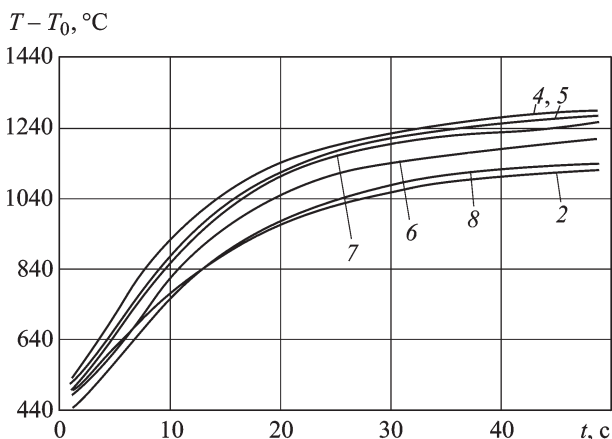


Рис. 9. Изменение температуры тыльной поверхности образца во времени в местах установки термодпар (кривая 4 соответствует центральной точке)

ры. Полученные результаты использованы при исследовании физико-механических характеристик жаростойких сплавов при различных, в том числе длительных, режимах нагрева.

При программированном нагреве, т.е. заданном временном законе изменения температуры, необходимо принимать во внимание инерционные характеристики блока нагревателей не только на этапе увеличения потока излучения, но и на этапе снижения (охлаждения). На рис. 10 приведены графики зависимости изменения потока излучения при отключении питающего напряжения и соответствующие температурные кривые охлаждения образца (кривая 2 соответствует центру образца, кривая 3 — периферийной точке на расстоянии 50 мм от центра). Как видно, имеет место синхронное изменение потока излучения и температуры. На основе проведенных оценок выявлено равновесное (сопряженное) охлаждение блока радиационных нагревателей и образца, причем отметим, что на этапе охлаждения поток излучения

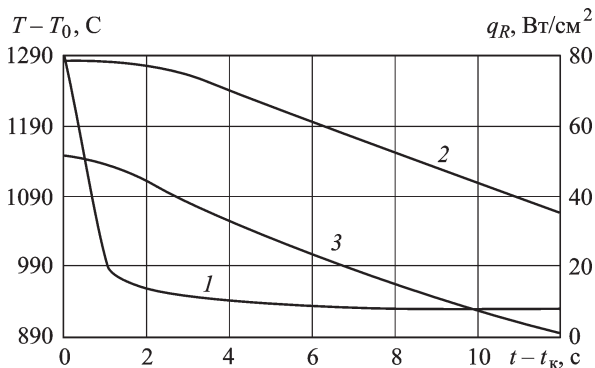


Рис. 10. Изменение плотности потока излучения (1) и температуры в центральной (2) и периферийной (3) точках образца при отключении питания блока излучателей

(оболочек ГЛН) изменяется крайне медленно, а характерное время составляет десятки секунд.

Исследование физико-механических характеристик материалов при высоких температурах можно проводить на образцах с учетом особенностей температурного режима нагрева, а именно неравномерности поля температур. Так, ширина образца не должна превышать указанных ранее значений области допустимой неравномерности поля излучения, а база при измерении относительного удлинения (или деформации) должна выбираться из условия допустимой неравномерности температурного распределения вдоль оси образца.

Установка, выполненная на основе машины УМЭ-10ТМ, позволяет проводить испытания образцов на растяжение и сжатие при скорости деформирования 0,005... 100 мм/мин, а установка, выполненная

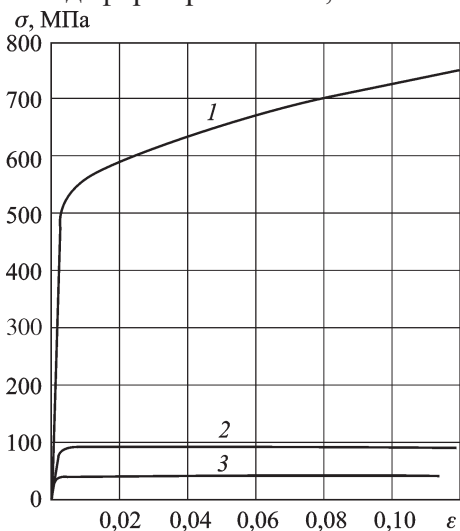


Рис. 11. Диаграммы деформирования образцов жаростойкой стали при нормальной температуре (кривая 1), при 1000 (2) и 1100 °С (кривая 3)

на основе машины ЕУ-40, — при стационарной нагрузке до 400 кН или заданной скорости ее изменения в диапазоне 0,01... 2 кН/с. Режим нагрева, как было сказано ранее, может быть стационарным или изменяться по заданной программе путем регулирования питающего напряжения посредством высокоточного тиристорного регулятора.

На рис. 11 приведены полученные диаграммы деформирования жаропрочной стали в режиме стационарного нагрева при нормальной и высоких температурах, а на рис. 12 — фотографии образцов, испытанных при температурах 1000 и

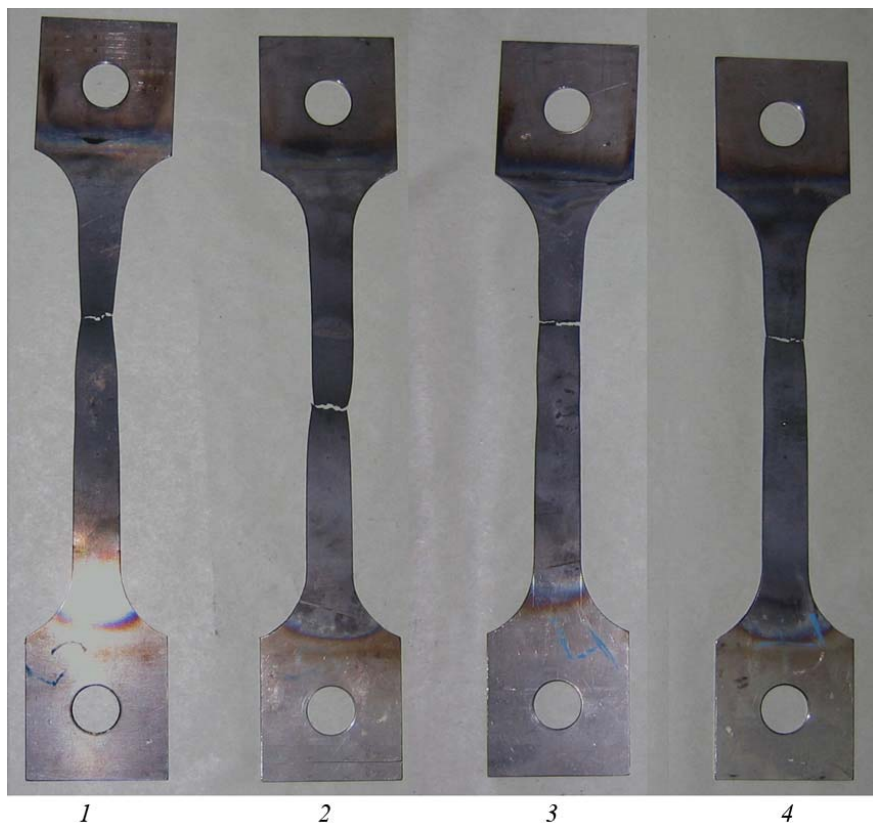


Рис. 12. Образцы жаростойкой стали, испытанные при температурах 1000 (1, 2) и 1100 °С (3, 4)

1100 °С, из сравнения которых видно различие в характере разрушения: образцы при температуре 1000 °С имеют бóльшую остаточную деформацию, что характеризуется более выраженной, чем при температуре 1100 °С, шейкой в месте разрыва.

Выводы. 1. Разработан и введен в эксплуатацию комплекс экспериментальных установок, предназначенный для проведения теплопрочностных испытаний материалов и элементов конструкций при температурах до 1500 °С на растяжение и сжатие с заданными скоростями деформирования или изменения силовой нагрузки и программированным нагреве.

2. Приведены описание и результаты экспериментальной оценки реализуемых характеристик режимов нагрева при испытаниях и результаты демонстрационных испытаний образцов жаростойкой стали при совместном нагреве и силовом нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.pkczim.ru / Завод испытательных машин. – Армавир.
2. [www.tochpribor](http://www.tochpribor.com) / “Точприбор” — производитель испытательных машин. – Иваново.

3. www.mts.com / Представительство MTS — производителя испытательной техники (США).
4. М а т е р и а л ы для электротермических установок. Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 295 с.
5. Е л и с е е в В. Н., Т о в с т о н о г В. А. Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. — 2001. — № 4. — С. 3–32.

Статья поступила в редакцию 19.12.2008



Валерий Алексеевич Товстоног родился в 1947 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, автор более 120 научных работ в области исследования процессов теплопереноса в материалах специального назначения, тепловых и теплопрочностных испытаний материалов и конструкций при комплексных воздействиях.

V.A. Tovstonog (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), senior researcher, author of more than 120 publications in the field of study of heat transfer processes in special-purpose materials, thermal and thermal structural tests of materials and constructions under complex actions.



Виктор Иванович Томак родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук., зав. отд. НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 изобретений и научных работ.

V.I. Tomak (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Ph. D. (Eng.), head of department of Power Engineering research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 inventions and publications.



Сергей Васильевич Цветков родился в 1951 г. Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Заведующий сектором экспериментальной механики композиционных материалов лаборатории композитов НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 25 научных работ и изобретений в области механики композитов.

S. V. Tsvetkov (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Section head of the laboratory for composites of Special Machinery Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 25 publications and inventions in the field of mechanics of composite materials.



Константин Вячеславович Чирин родился в 1943 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Главный энергетик Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области тепловых испытаний конструкций.

K.V. Chirin (b. 1943) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Chief power engineering specialist of the Dmitrovsky Branch of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of heat testing of constructions.