

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов И.С., Нестеренко, Тверковкин Б.Е. Прочность элементов конструкций при облучении. Минск. 1990, -144с. 3. И. С. Куликов, Б. Е. Тверковкин “Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов” Мн., «Наука и техника» 1984. 4. Клус С.А., Куликов И.С. НДС неравномерно нагретого полого короткого цилиндра с учетом тепловой и радиационной ползучести. – Республиканский межведомственный сборник «Машиностроение», Минск, 2008, т.1,с.179-182.

УДК 539.3

Мойсейчик Е.А., Стефанович Р.В., Филатов С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ РАМЫ ПО СОБСТВЕННОМУ ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ МАТЕРИАЛА

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ

Минск, Беларусь

Определение напряжений с использованием теплового излучения применяется при необходимости бесконтактного измерения напряжений в элементах конструкций [1]. В основу такого подхода положена взаимозависимость между напряженно-деформированным и тепловым состояниями твердого тела [2]. Такая зависимость проявляется при упругой, упруго-пластической и пластической стадиях работы различных материалов. На основании исследований Кельвина, Био зависимость между изменениями температуры материала ΔT и напряженно-деформированного состояния (σ_{ij} , ε_{ij}) можно представить уравнением [1]:

$$\Delta T = \frac{T}{\rho C_\varepsilon} \sum_{ij} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \varepsilon_{ij} + \frac{Q}{\rho C_\varepsilon}, \quad (1)$$

$ij = 1, 2, 3,$

где ρ , C_ε - соответственно, плотность и теплоемкость материала при температуре T . Частные производные в (1) легко вычисляются с помощью уравнений, связывающих напряжения, деформации и температуру в изотропном упругом теле. Для адиабатических условий, когда $Q=0$, это уравнение сводится к виду

$$\Delta T = \frac{E \alpha_L T}{\rho C_\varepsilon (1 - 2\nu)} \sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii}, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii}$ – сумма изменений трех линейных деформаций, E , ν , α_L – соответственно, модуль упругости, коэффициент Пуассона, температурный коэффициент расширения материала при температуре T . Учитывая связь между C_ε и C_p (удельные тепловыделения при постоянных деформации и давлении) и выражая линейные деформации через нормальные напряжения, уравнение (2) можно записать в виде

$$\Delta T = -\frac{\alpha_L}{\rho C_p} T \sum_{i=1,2,3} \sigma_{ii} . \quad (3)$$

Обозначая дробь через K_m это уравнение можно представить выражением (4):

$$\Delta T = -K_m T \Delta \sigma . \quad (4)$$

Для нелегированных и слаболегированных сталей при комнатной температуре $K_m = 3,09 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$; для высоколегированных сталей - $K_m = 4,36 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$. Выражение (4) справедливо при адиабатическом нагружении в упругой стадии деформирования однородных изотропных материалов при температуре T .

При деформировании металлов, других материалов поверхности разрушения излучают энергию [1,3], в основном инфракрасного диапазона. Изменение потока фотонов инфракрасного излучения ($\Delta \Phi$) можно получить, дифференцируя уравнение Стефана-Больцмана [1]:

$$\Delta \Phi = 13eB'T^2 \Delta T . \quad (5)$$

Заменяя ΔT выражением (4) представляем (5) в виде

$$\Delta \Phi = -3eB'T^3 K_m \Delta \sigma , \quad (6)$$

где B' – постоянная Стефана-Больцмана для фотонной эмиссии ($1,52041 \cdot 10^{15} \text{ фотон} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^3$)

Зависимость (4) экспериментально подтверждена для различных стадий работы материалов [1]. Выражение (6) положено в основу определения напряжений методами SPATE, Sira [1].

В настоящей работе исходя из выражения (6) и с использованием ИК-термографии выявлялись наиболее нагруженные точки рамы CMS.HE.GE.100-01-00 из нержавеющей стали при ее статическом растяжении и выполнена оценка стадий работы материала в таких точках.

Исследуемая рама имеет прямоугольную в плане форму с трапециевидальным, прямоугольным сечением рабочих элементов (рис.1).

Материал рамы - сталь 03X2016AG6 по ТУ 302.02.028.89 и ТУ 05764417-049-96 с механическими характеристиками: $\sigma_s = 680 - 730 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 385 - 450 \text{ МПа}$; $\delta = 41 - 56 \%$; $\psi = 67 - 78\%$. Рама изготовлена из сляба толщиной 200 мм с применением газовой резки и последующей механической обработкой поверхностей. Нормальный коэффициент излучения поверхности составляет 0,13-0,16.

И в значительной степени зависит от чистоты обработки поверхности. Отношение площади боковой поверхности к объему для элементов рамы изменялось в пределах 0,037 – 0,06.

В процессе эксперимента рама нагружалась статической нагрузкой на 100-тонной универсальной машине. Нагружение велось по схеме рис. 2.

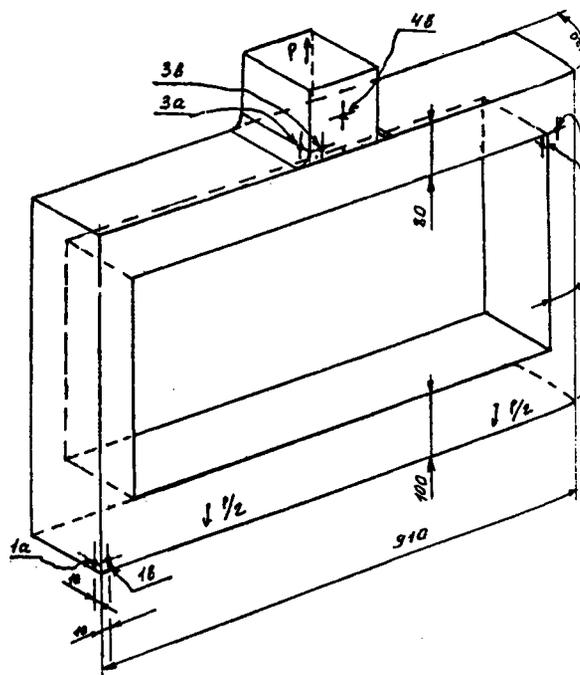
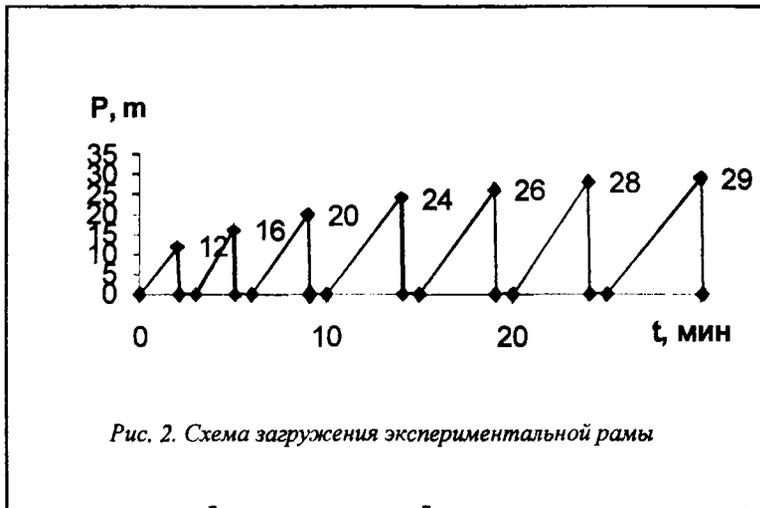


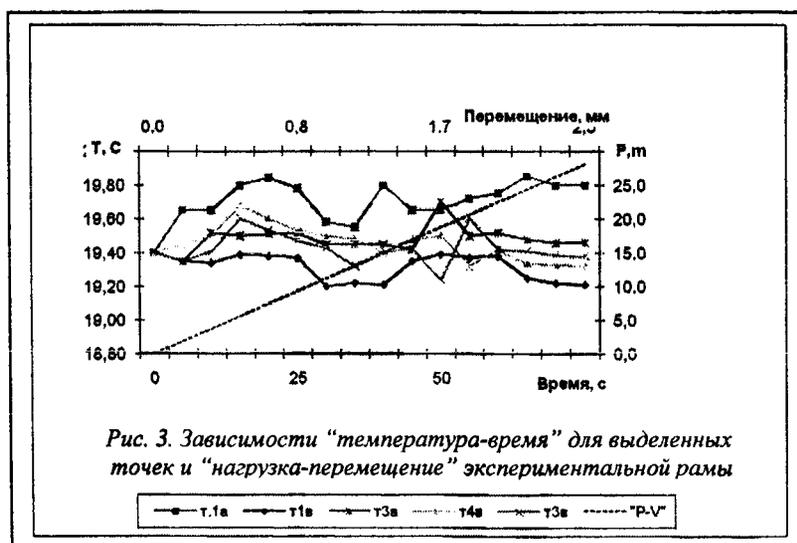
Рис. 1. Схема экспериментальной рамы



Средняя скорость нагружения изменялась в пределах 0,13-0,20 т/сек и регулировалась по показаниям силоизмерителя. Между циклами нагружений и в моменты снятия показаний по датчику перемещений возможны были паузы в изменении скорости нагружения продолжительностью до 1 минуты.

Измерение температуры поверхности рамы велось с помощью портативного компьютерного ИК-термографа ИРТИС-200 в спектральном диапазоне 3-5 мкм. Реперные точки контролировались в течение эксперимента контактным способом. Начальные температуры рамы и стены помещения составляли соответственно 19,4 °С и (19,3-19,4) °С. Термограф устанавливался под углом 20-25 ° к вертикальной плоскости рамы и 15-20 ° - к горизонтальной. Сканирование велось в автоматическом режиме через 0,5 секунды. Результаты сканирования записывались в память компьютера и позволяли анализировать термоизображения на любой стадии исследования. При подготовке измерений было выявлено существенное искажение теплового поля поверхности при приближении участников эксперимента к раме на расстояние 1,5-2,0 м и менее вследствие отражения теплового потока внешнего излучения человека и т.д. от исследуемой поверхности. При этом в зоне создаваемых человеком бликов фиксируемая «температура» повышается на (0,4-0,8) °С. Указанные погрешности можно исключить, выбирая характерные точки у пересечения взаимноперпендикулярных поверхностей.

По данным термографирования построены зависимости изменения температуры поверхности за время нагружения. Пример такой зависимости показан на рис.3.



Из анализа графиков «температура-время» следует, что непрерывному нагружению между моментами снятия показаний по датчику перемещений на графике соответствует неспре-

рывный подъем температуры со скоростью (0,01-0,015) °С/сек; остановка нагружения приводит к остыванию поверхности примерно с той же средней скоростью. При выбранном расположении ИК-термографа разность температур на соответствующих взаимноперпендикулярных поверхностях, примыкающим к точкам 1,2,3,4 составляет (0,2-0,4) °С. Разность температур наиболее нагретой точки (т.3) и точки 2 составляет (0,3-0,4) °С. Температура точки 2 превышает температуру реперной точки 1 на (0,1-0,15) °С. Приведенные цифры относятся к нагрузкам Р=24-29 т. При меньших величинах усилий изменения температуры трудноопределимы вследствие наложений воздействий случайных факторов, конвекции, бликов и т.д..

Достоверность полученных результатов можно оценить, сопоставляя экспериментальные температуры с величинами их расчетных соответствующих значений. Для этого с использованием программы «Quikfield» рассчитывались поля напряжений и деформаций для случаев плоского напряженного и плоского деформированного состояний и на основании указанных расчетов определялись величины температур в характерных точках 1,2,3,4. При расчетах принималось, что образец термостатирован, а теплофизические характеристики материала рамы следующие: плотность- $8,05 \times 10^3$ кг/м³; удельная теплоемкость – 0,49 КДж/(кг.К); теплопроводность – 15 Вт/(м.К). Полученные при расчетах результаты показывают, что в точках 2,3,4 при нагружении возникают растягивающие напряжения.

Работа деформации в этих зонах расходуется на искажение решетки зерен, частично обратимо запасается в зернах стали, отдельных блоках в виде энергии упругой деформации и частично выделяется в виде тепла. Нагревание образца в этих зонах является результатом двух противоположных тепловых процессов: теплообразования при пластическом деформировании и адиабатическом охлаждении при упругой работе материала /4/. Таким образом, повышение температуры исследуемых зон теплоизолированного образца может быть описано очевидной зависимостью:

$$\Delta T = (A - U - W) / C m - (\Delta T_u + \Delta T_Q), \quad (7)$$

где A – полная работа деформации в исследуемой зоне;

U – энергия упругой деформации;

W – энергия, поглощенная материалом исследуемой зоны;

C, m – теплоемкость и масса охлаждаемых зон, соответственно;

ΔT_u – адиабатическое охлаждение образца;

ΔT_Q – падение температуры образца в результате теплообмена и конвекции.

Из формулы (7) следует, что изменение температуры в точках 2,3,4 зависит как от вида напряженного состояния, объема наиболее деформированных областей металла, так и в значительной степени от способности примыкающего к активным зонам материала быстро поглощать тепло. Сопоставление данных расчетов с экспериментальными результатами замеров в соответствии (7) показывает, что фиксируемое по данным термографии повышение температуры в т. 3 составляет около (0,1 – 0,2) °С и проявляется при нагрузках (25 – 28) т. Указанное повышение температуры производится при появлении упруго-пластической стадии работы материала в т. 3.

Проведенные исследования показали высокую эффективность применения ИК-термографии для изучения деформированного состояния конструктивных элементов в условиях их интенсивного нагружения и подтвердили обратимый характер тепловых процессов при упругих деформациях. При дальнейших экспериментальных исследованиях таких конструкций необходимо для увеличения информативности измерений повысить коэффициент излучения поверхности образца, например, ее зачернением, теплоизолировать поверхность образца, а измерение температур в наиболее нагретых зонах параллельно с ИК-термографированием проводить с помощью пленочных термопар.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальная механика: В 2-х кн: Кн.2/ Под ред. А.Кобаяси. – М.Мир, 1990. – 552 с. 2. А.Надаи. Пластичность и разрушение твердых тел. Т.2.- М.: Мир, 1969.- 863с. 3. К.В.Абрамова, А.В.Пахомов, Б.П.Перегуд, И.П.Щербаков. Инфракрасное излучение, возникающее при деформации и разрушении металлов// Журнал технической физики.- 1988, т.58, в.4.-с.817-821. 4. В.Н.Кунин. Поглощение энергии металлом при пластическом растяжении // Физика металлов и металловедение.-1959.-т.VII, в.5.-с.790-793.

УДК 621.762.4

Якубовский А. Ч., Якубовский Ч.А., Галуза И.М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО ТЕЛА НАМОТКИ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В современной технике для интенсификации процессов фильтрования, звукопоглощения, терморегулирования и прочих физико-химических процессов в конструкциях стационарных и передвижных установок часто невозможно обойтись без использования пористых проницаемых изделий (ППИ). В зависимости от условий эксплуатации установок и требований, предъявляемых к эффективности, надежности и безопасности их работы, применяют самые разнообразные ППИ. Заслуживающими внимания с точки зрения регулярности структуры, универсальности свойств и себестоимости являются изделия из проволоки. В частности, созданы новые изделия в форме пористой трубы, получаемые радиальным уплотнением проволочного тела намотки (ТН) цилиндрической формы — пористые изделия на основе навиваемой проволоки (ПИНП) [1, 2].

Не изученным вопросом в области изготовления ПИНП в связи с геометрическими ограничениями проволочного изделия, а также ввиду его структурных особенностей, является осевое уплотнение, когда цилиндрическое ТН испытывает сжимающую нагрузку в продольном направлении (рис. 1). В случае, если уплотнение осуществляется с использованием жесткой оправки диаметром D_0 (он же внутренний диаметр ТН и изделия), наружный диаметр ТН D принимает размер D_1 , а его высота (длина) H — H_1 .

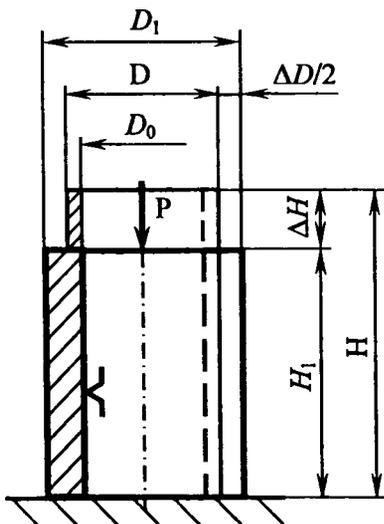


Рис. 1. Схема осевого уплотнения ТН

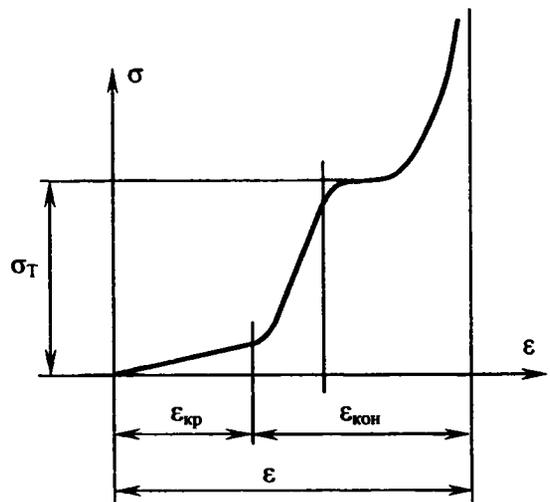


Рис. 2. Диаграмма осевого уплотнения ТН