



УДК 624.012.35.45

Илшат Т. Мирсаяпов – кандидат технических наук, доцент**Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)****ЗОНЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ
В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК****АННОТАЦИЯ**

В статье излагается способ определения зон концентрации напряжений в железобетонных конструкциях при многократно повторяющихся циклических нагружениях. Для определения зон концентрации напряжений предлагается до циклического нагружения стабилизировать температурные характеристики конструкций, затем при пассивной тепловой стимуляции объекта исследований измерять температурные поля железобетонных конструкций тепловизионной аппаратурой в процессе циклического нагружения с последующим анализом и обработкой полученных термограмм; при этом зоны концентрации напряжений в железобетонных конструкциях соответствуют аномальным областям термограмм с превышением температуры более 0,3 °С и за счет этого зоны концентрации напряжений четко выделяются на термограммах объекта исследований.

Ilshat T. Mirsayapov – candidate of technical science, associate professor**Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)****ZONES OF TENSION CONCOCTIONS AT CYCLIC LOADING IN OPERATIVE RANGE
OF CROSS-SECTION FORCES OF FERRO-CONCRETE BEAMS****ABSTRACT**

The way of determination of zones of tension concoctions in ferro-concrete constructions under repeatedly reiterative cyclical loadings is stated. For the determination of zones of tension concoctions is suggested to stabilize the temperature features of the constructions followed by the cyclical loadings, then under the passive heat stimulation of the studying object to measure the temperature fields of ferro-concrete constructions by heatvision equipment during the cyclical loadings process with the following analysis and processing of received thermograms. The zones of tension concoctions in ferro-concrete constructions correspond to the anomalous areas of thermograms, with excess of temperature more than 0,3 °C, consequently, the zones of tension concoctions are clearly indicated at thermograms of the studying object.

При разработке физических моделей усталостного сопротивления конструктивных элементов необходимо иметь представление не только о точной картине напряженно-деформированного состояния элемента, но также и о положениях, формах и размерах зон концентрации напряжений в нем. Традиционный способ измерения деформаций с помощью электротензометрии не позволяет получить достаточно подробную и полную информацию о деформированном состоянии в условиях плоского напряженного состояния, тем более в условиях образования трещин в процессе циклического нагружения. Это связано с тем, что розетки тензорезисторов замеряют средний размер деформаций на довольно значительной базе и по этим измерениям нельзя верно определить направление и размер главных деформаций. Кроме того, в условиях трещинообразования и развития трещин часть датчиков пересекается с ними и выходит из строя. В

такой ситуации определение положения, формы и размеров зон концентрации напряжений экспериментальным путем становится проблематичным. Известный способ измерения деформаций на поверхности конструктивных элементов с помощью оптически чувствительных покрытий, позволяющий получить точную картину напряженно-деформированного состояния элемента и определить также зоны концентрации напряжений, хорошо зарекомендовавший себя при статическом нагружении, не нашел применения в исследованиях напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов при многократно повторяющихся нагружениях. Так как при циклическом нагружении происходят значительные колебания самого образца, из-за больших колебаний испытательной установки, особенно при высоких уровнях и больших амплитудах внешней нагрузки, происходят также колебания и перемещения и

поляризационно-оптической системы. Это отрицательно сказывается на точности и достоверности получаемых результатов.

В связи с этим в Казанском государственном архитектурно-строительном университете, с целью выявления положений, форм и размеров зон концентрации напряжений в зоне совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил в балках, автором были проведены усталостные испытания с применением тепловизионного метода контроля, который дает возможность дистанционной регистрации, визуализации и предварительного анализа экспериментальных данных.

При циклическом нагружении в упруго-пластических материалах наряду с упругими деформациями происходит также развитие пластических деформаций. С увеличением количества циклов нагружения происходит непрерывное увеличение и накопление пластических деформаций. Как известно, при циклическом нагружении накопленная энергия пластической (неупругой) деформации в основном может превратиться в тепловую. Площадь петли пластического гистерезиса численно равна необратимой работе деформирования в каждом цикле [1]. Основная часть этой работы переходит в тепло и рассеивается путем теплообмена, а некоторая, относительно малая доля, расходуется на развитие повреждений усталости. При этом, чем выше напряжение, тем больше площадь петли и тем больше энергии переходит в тепло.

В этой связи можно предположить, что при усталостных испытаниях конструктивных элементов циклическое нагружение является тепловой стимуляцией материала в областях усиленного развития неупругих деформаций (например, в местах концентрации напряжений) и это должно привести к некоторому повышению температуры материала конструкций в этих зонах. Можно предположить также, что температурные аномалии возникают только в наиболее напряженных зонах, где активно развиваются пластические деформации. Это распределение температуры нагрева перенапряженных участков на поверхности конструктивных элементов при циклическом нагружении можно попытаться использовать для нахождения зон концентрации напряжений, так как температура в этих зонах должна быть больше, чем в менее напряженных местах, тем самым эти зоны должны выделиться на поверхности элемента.

Очевидно, что параметры динамики температурных полей при циклическом нагружении зависят от уровня максимальной нагрузки цикла, частоты нагружения, пластического ресурса и свойств анизотропии материала конструкции. Поэтому для получения наглядных термограмм в процессе циклического нагружения в качестве материала конструкции целесообразно применять анизотропный

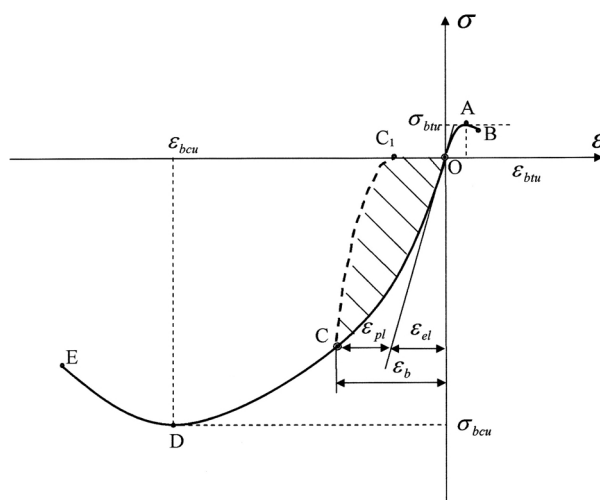


Рис. 1. Диаграмма деформирования бетона при одноосном кратковременном нагружении

материал с достаточным пластическим ресурсом. Для этих целей идеально подходит бетон или чугун. Бетон, например, обладает ярко выраженными упруго-пластическими свойствами даже при невысоких уровнях напряжений. При однократном статическом нагружении зависимость между напряжениями и деформациями в бетоне нелинейная (рис. 1). Начальный или мгновенный модуль упругости

бетона $E_{b0} = \frac{s_b}{e_{el}}$ соответствует мгновенному

загружению образца до относительно небольших напряжений ($\approx 0,3s_{bu}$), при которых возникают в основном только упругие деформации. Графически E_{b0} выражается тангенсом угла наклона касательной к кривой зависимости $s - e$ в точке начала координат. Модуль полных деформаций бетона E_b соответствует нагружению бетона, когда в нем проявляются как упругие, так и неупругие деформации. При однократном кратковременном нагружении полные деформации бетона можно представить в виде $e_b = e_{el} + e_{pl}$, где e_{el} и e_{pl} – соответственно упругие и неупругие (пластические) деформации бетона.

Модуль полной деформации $E_b = \frac{ds_b}{de_b}$ является

величиной переменной и может быть выражен тангенсом угла наклона касательной к кривой зависимости $s - e$ в любой рассматриваемой точке этой кривой.

При воздействии многократно повторяющейся нагрузки происходит увеличение как упругих, так и неупругих (остаточных) деформаций бетона. Нарастание деформаций бетона носит плавный характер и происходит на всем протяжении



циклического нагружения. Наиболее заметные изменения циклических деформаций происходят примерно до $2 \cdot 10^5$ циклов. При этом неупругие деформации, из-за виброползучести бетона, увеличиваются значительно интенсивнее, чем упругие. Интенсивность увеличения деформаций зависит от уровня максимальных напряжений цикла и коэффициента асимметрии цикла напряжений. При $N = 1$, вследствие развития мгновенных пластических деформаций, при первой загрузке и разгрузке образуется петля гистерезиса, например, при сжатии линия OCC_1 на рис. 1. Площадь петли гистерезиса численно равна необратимой работе деформирования в каждом цикле. Основная часть этой работы переходит в тепло и рассеивается путем теплообмена. С увеличением количества циклов нагружения происходит постепенная выборка неупругих деформаций и площадь петли гистерезиса постепенно уменьшается, достигая в пределе стабильной величины.

Если $s_b < R_{b,rep}$, где $R_{b,rep}$ – предел выносливости бетона, то деформации, постепенно затухая, достигают предельной величины, а стабильная зависимость между напряжениями и деформациями сохраняется при неограниченно большом числе циклов нагружения. Предел выносливости бетона при коэффициенте асимметрии цикла напряжений $r = 0$ составляет $R_{b,rep} \approx (0,5 - 0,55)s_{bu}$. Если $s_b > R_{b,rep}$ т.е. действующие в бетоне напряжения оказываются больше предела его выносливости, то в процессе циклического нагружения диаграммы деформаций бетона в координатах “ $\sigma - \epsilon$ ” изменяются не только количественно, но и качественно: вначале выпуклая диаграмма превращается в прямолинейную, а затем – в вогнутую (рис. 2). Превращение выпуклой диаграммы (1) в прямолинейную (2) объясняется тем, что в процессе циклического нагружения проявляется

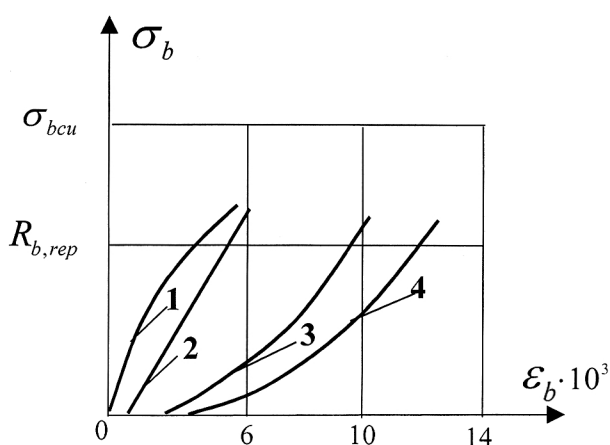


Рис. 2. Диаграммы деформирования бетона при циклическом сжатии, при напряжениях в нём

$s_b > R_{b,rep}$: 1 – $N = 1$; 2 – $N = 10^3$; 3 – $N = 10^5$; 4 – $N = 2 \cdot 10^5$.

большая часть пластических деформаций первого рода и бетон начинает работать упруго. Второе качественное превращение “ $s - \epsilon$ ” – трансформация прямолинейной диаграммы (2) в вогнутую (3 и 4) – связано с образованием и развитием микротрещин в бетоне.

Бетон является также ярко выраженным анизотропным материалом: его предельная сжимаемость ϵ_{bcu} в среднем в 10 раз выше предельной растяжимости ϵ_{btu} (соответственно на столько же пластический ресурс при сжатии больше, чем при растяжении), а предельные напряжения при сжатии S_{bcu} в зависимости от марки бетона в 10 и более раз больше предельного напряжения при растяжении S_{btu} .

Поэтому, при проведении усталостных испытаний с применением тепловизионного контроля в качестве опытных образцов были приняты железобетонные балки прямоугольного сечения размером $120 \times 345 \times 2000$ мм, нагруженные двумя симметрично расположенными грузами, размещенными на расстоянии от опоры, равном $0,96 h_0$, $1,5 h_0$, $2,5 h_0$, где h_0 – рабочая высота сечения балок.

Температура, как количественный показатель внутренней энергии тел, является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах. Анализ температурных полей позволяет получить разнообразную информацию о состоянии объектов и протекании физических процессов [2]. ИК (инфракрасная) термография, как один из методов теплового контроля, дает возможность дистанционной регистрации, визуализации и анализа температурных полей объектов. В настоящее время ИК-диагностика и методы теплового неразрушающего контроля представляют высокотехнологичную область прикладных исследований, которая объединяет достижения в теории теплопередачи, ИК-технологии и компьютерной обработки экспериментальных данных. Суть метода теплового контроля состоит в регистрации температурного поля на поверхности контролируемого изделия тепловизионной аппаратурой и последующем анализе термограмм с использованием ПЭВМ для обработки результатов и принятия решения.

В нашем случае, в силу специфики объекта исследования, а именно – изделие из тяжелого железобетона с высокой теплопроводностью, ожидаемые величины перепада температур, по поверхности которого могут составлять сотые и десятые градуса ($0,01-0,1$ °C), накладываются определенные требования по выбору тепловизора с высокой температурной чувствительностью. Также необходимо учесть тот факт, что процесс усталостного



испытания – длительный процесс, в течение которого необходимо непрерывно фиксировать возможные механические изменения (деформации, образование трещин и их развитие и т.д.) одновременно с измерением поля температур поверхности. При этом требуется также регистрировать абсолютные значения температур в аномальных зонах на поверхности объекта. С учетом данных требований был выбран тепловизор-радиометр – «компьютерный термограф – ИРТИС-2000», имеющий следующие основные технические характеристики:

- чувствительность к перепаду температур на уровне 30 °С – 0,05 °С
- мгновенное поле зрения – 1,5 мрад.
- погрешность измерения – $\pm 1\%$
- диапазон измерений – от -40 до 200 °С

Управление работами и предварительная обработка термоизображений проводятся на портативном компьютере NOTEBOOK, входящем в состав тепловизора. Экспериментальные исследования по выявлению зон концентрации напряжений в балках проводились в следующей последовательности. Первоначально балка устанавливалась на испытательный стенд и выдерживалась в лабораторных условиях не менее 24 часов с целью стабилизации ее температурных характеристик. Затем проводилась настройка тепловизионной аппаратуры с целью достижения оптимальных режимов регистрации тепловых полей поверхности балок. Далее начинался цикл усталостных испытаний по заданной программе.

Испытания многократно повторяющейся нагрузкой при различных уровнях циклической нагрузки с коэффициентом асимметрии цикла нагрузки $r = 0,33$ проводились на универсальной испытательной машине УРС-50. Все экспериментальные образцы были испытаны в заведомо жестком режиме с целью получения усталостного разрушения при заданных параметрах циклического нагружения. Температура внутреннего воздуха в помещении в момент испытаний составляла 17,2-17,7 °С. Измерение температурного поля поверхностей балок тепловизионной камерой ИРТИС осуществлялось в пределах первого цикла ($N=1$) нагружения до максимальной нагрузки цикла, а затем через определенное количество циклов нагружения $N_1, N_2 \dots N_n$ многократно повторяющейся циклической нагрузкой для того, чтобы получить динамику развития зон концентрации напряжений в зоне действия поперечных сил. При этом проводилась синхронная регистрация параметров циклического нагружения и соответствующих тепловизионных изображений на жестком диске NOTEBOOK. Тепловизионные изображения фиксировались как в режиме отдельных кадров, так и в режиме непрерывной съемки. Последнее применялось при приближении момента усталостного разрушения балки.

Проведенные усталостные испытания железобетонных балок на действие поперечных сил

с применением тепловизионного метода контроля с помощью тепловизора-радиометра ИРТИС-2000 подтверждают выдвинутое предположение о том, что в процессе циклического нагружения происходит определенный нагрев конструкции в зонах концентрации напряжений и за счет этого зоны концентрации напряжений четко выделяются на поверхности экспериментальных балок (рис. 3-5). В результате этого установлены положение, форма и размеры зон концентрации напряжений в железобетонных изгибаемых элементах в зоне действия поперечных сил при многократно повторяющихся нагружениях. Как следует из полученных термограмм балок, области концентрации напряжений в зоне действия поперечных сил имеют четко выделенные области с превышением температуры на +0,3 - +3 °С, по сравнению с температурой поверхности менее нагруженных областей (где нет концентрации напряжений). На этих термограммах температуры поверхностей балок после циклического нагружения указаны в °С. При этом в пределах самих зон концентрации напряжений распределение превышения температур имеет неравномерный характер, от +0,3 °С в средних точках зон концентрации напряжений до +3 °С и более вблизи опорных и грузовых пластин. Анализ полученных термограмм позволяет также установить, что положение и форма зон концентрации напряжений в зоне совместного действия поперечных сил и моментов зависят (в частности, для железобетонных изгибаемых элементов) от относительного

расстояния $\frac{c_0}{h_0}$ между опорой и грузом, где c_0 –

расстояние от оси опоры до оси груза. Очевидно, это связано с тем, что в зоне совместного действия поперечных сил и изгибающих моментов изменение

параметра $\frac{c_0}{h_0}$ приводит к изменению величин

составляющих плоского напряженного состояния

S_x, S_y, t_{xy} в бетоне и соотношения между ними. В результате меняются механизм работы, механизм и форма усталостного разрушения элемента и расчетная схема.

Как видно из рис. 3, при $\frac{c_0}{h_0} < 1,2$ особенностью

работы изгибаемых элементов является образование локальных полос напряжений, связанных с точками приложения сосредоточенных внешних усилий, в пределах которых и происходит усталостное разрушение. Поэтому в процессе циклического нагружения, между опорной и грузовой пластинами

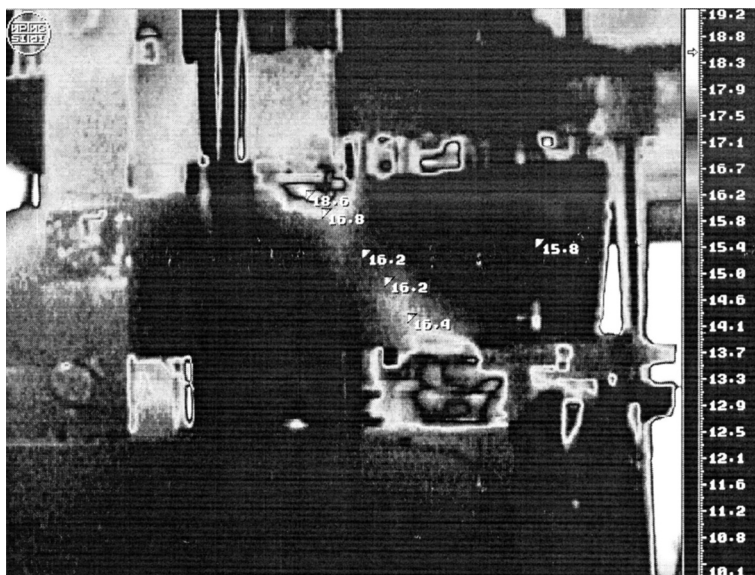


Рис. 3. Термограмма балки после циклического нагружения при $\frac{c_0}{h_0} < 1,2$

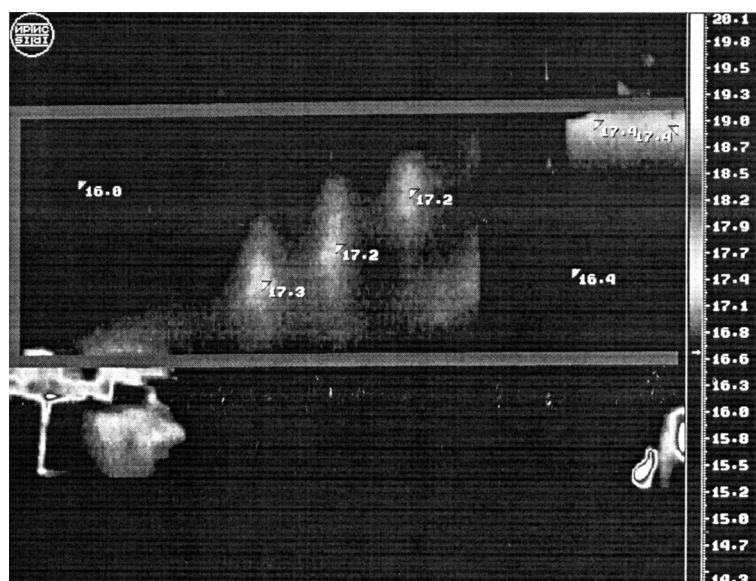


Рис. 4. Термограмма балки после циклического нагружения при $\frac{c_0}{h_0} > 2,5$

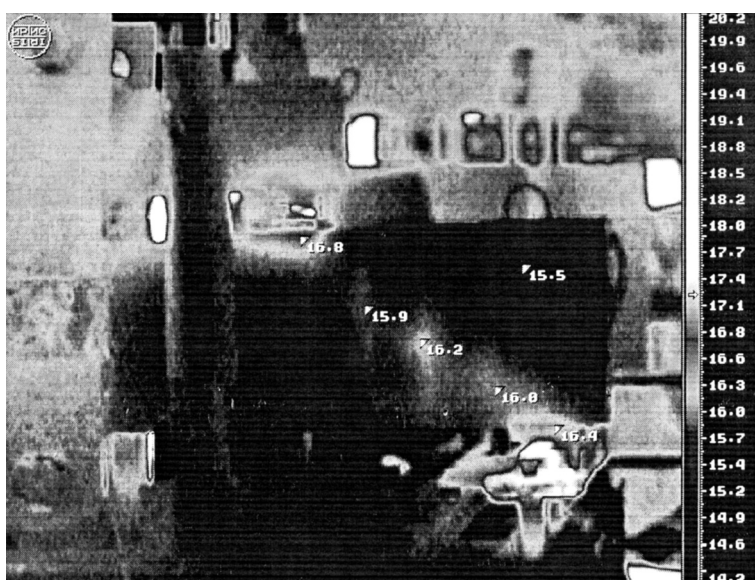


Рис. 5. Термограмма балки после циклического нагружения при $1,2 < \frac{c_0}{h_0} < 2$



выделяется полоса с более высокой температурой, что является следствием концентрации сжимающих напряжений в пределах этой наклонной локальной полосы, в пределах которой из-за виброползучести бетона происходит усиленное развитие неупругих деформаций. Очевидно, поэтому эта локальная полоса концентрации напряжений между опорой и грузом в процессе циклического нагружения выделилась двумя трещинами вдоль ее границ и впоследствии между ними произошло усталостное раздробление бетона.

При $\frac{c_0}{h_0} > 2,5$ на термограммах таких элементов

выделяется траектория наибольших главных сжимающих напряжений, вдоль которой и происходит усталостное разрушение изгибаемых элементов с образованием критической наклонной трещины, положение которой связано не с точками приложения действующих на элемент внешних усилий и реакций опор (местное возмущение напряженного состояния ощутимо только вблизи этих точек и они незначительны), а с внутренними силовыми факторами, действующими в рассматриваемых по длине опорной зоны сечениях (моментами и поперечными силами). После образования критической наклонной трещины происходит концентрация напряжений в бетоне сжатой зоны и в стержнях поперечной арматуры в местах пересечения с наклонной трещиной. Поэтому на термограмме

балок при $\frac{c_0}{h_0} > 2,5$, полученной после приложения

циклической нагрузки (рис. 4), эти места в поперечной арматуре и область концентрации напряжений в бетоне над критической наклонной трещиной нагреваются и за счет этого выделяются от менее нагруженных областей. При этом следует отметить, что температурные аномалии в поперечной арматуре проявляются даже сквозь толщу защитного слоя бетона.

При $1,2 < \frac{c_0}{h_0} < 2$ элементы находятся на границе

двух предыдущих расчетных случаев и поэтому в них проявляются особенности как первых, так и вторых. В результате усталостное разрушение происходит с образованием критической наклонной трещины, но в то же время на напряженно-деформированное состояние и характер усталостного разрушения существенное влияние оказывают местные

возмущения (концентрации) напряжений вблизи опорной и особенно грузовой площадок. Поэтому на термограмме таких элементов (рис. 5) температурные аномалии в бетоне возникают в пределах наклонного сжимающего силового потока между точками приложения груза и опорной реакции, а также в поперечной арматуре – в местах пересечения с критической наклонной трещиной.

Итак, циклическое нагружение является тепловой стимуляцией материала в определенных областях, а именно, в областях, где усиленно развиваются неупругие (пластические) деформации, что повышает температуру этих областей материала. Поэтому при циклическом нагружении в местах концентрации напряжений вследствие неупругого деформирования материала конструкции происходит определенный нагрев этих зон. Определение этих температурных аномалий методом тепловизионного контроля позволяет установить зоны концентрации напряжений в конструктивных элементах. Параметры динамики температурных полей при циклическом нагружении зависят от уровня максимальной нагрузки цикла, частоты нагружения, пластического ресурса и свойств анизотропии.

Измерения температурных полей поверхностей балок в режиме отдельных кадров через определенное количество циклов нагружения, а с приближением разрушения – фиксирование термограмм в режиме непрерывной съемки, позволяют получить также и динамику развития зон концентрации напряжений в процессе циклического нагружения при действии поперечных сил. Непрерывная съемка термограмм (съемка термографического фильма) позволила зафиксировать весь процесс усталостного

сопротивления изгибаемых элементов при $\frac{c_0}{h_0} < 1,2$ с

момента формирования локальной полосы концентрации напряжений до момента усталостного разрушения данного изгибаемого элемента.

Литература

1. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталостную и длительную прочность. – Л.: Машиностроение, 1988. – 250 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. // В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.