

Исследования зон концентрации напряжений при циклическом нагружении с использованием тепловизионного метода контроля

И. Т. Мирсаяпов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Россия

Описан способ определения зон концентрации напряжений в конструкциях при многократно повторяющихся циклических нагружениях. Предлагается до циклического нагружения стабилизировать температурные характеристики конструкций, затем в процессе нагружения измерять их температурные поля тепловизионной аппаратурой с последующим анализом и обработкой полученных термограмм.

Ключевые слова: циклическое нагружение, конструкции, температурные поля, тепловизионная аппаратура.

При разработке физических моделей усталостного сопротивления конструктивных элементов необходимо иметь представление не только о точной картине напряженно-деформированного состояния элемента, но и о положениях, формах и размерах зон концентрации напряжений в нем. Традиционный способ измерения деформаций с использованием 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 рассчитаны на замер средней деформации на довольно значительной базе, и по этим данным нельзя точно определить направление и величину главных деформаций. Кроме того, при трещинообразовании часть датчиков пересекается развивающимися трещинами и выходит из строя. В такой ситуации определение положения, формы и размеров зон концентрации напряжений экспериментальным путем проблематично. Известный способ измерения деформаций на поверхности конструктивных элементов путем нанесения оптически чувствительных покрытий позволяет получить точную картину напряженно-деформированного состояния элемента и определить зоны концентрации напряжений. Он хорошо зарекомендовал себя при статическом нагружении, но не нашел применения в исследованиях напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов при многократно повторяющихся нагрузках. При циклическом нагружении из-за больших колебаний испытательной установки наблюдаются значительные колебания образца, особенно при высоких уровнях и больших амплитудах внешней нагрузки, происходят также колебания и перемещения поляризационно-оптической системы. Это отрицательно влияет на точность и достоверность получаемых результатов.

С целью обнаружения положений, форм и размеров зон концентрации напряжений при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил в балках были проведены усталостные испытания с применением тепловизионного метода контроля, который позволяет проводить дистанционную

регистрацию, визуализацию и предварительный анализ экспериментальных данных.

При циклическом нагружении в упругопластических материалах наряду с упругими деформациями происходит развитие пластических деформаций. С увеличением числа циклов нагружения отмечается непрерывное повышение 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, остальная, относительно малая доля, расходуется на развитие повреждений усталости. При этом, чем выше напряжение, тем больше площадь петли и тем больше энергии переходит в тепло.

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 областях. Кроме того, температурные аномалии возникают только в наиболее напряженных зонах, где активно развиваются пластические деформации. Такое распределение температуры нагрева перенапряженных участков на поверхности конструктивных элементов при циклическом нагружении можно попытаться использовать для нахождения зон концентрации напряжений, так как температура в них, должна, по-видимому, быть больше, чем в менее напряженных местах, и поэтому они 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 характера анизотропии материала конструкции. Для получения наглядных термограмм в процессе циклического нагружения в качестве материала конструкции целесообразно применять анизотропный материал с достаточным пластическим ресурсом – это бетон или чугун. Бетон, например, обладает ярко выраженными упругопластическими 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 $E_{b0} = \sigma_b / \varepsilon_{el}$ соответствует мгновенному нагружению образца до относительно небольших напряжений ($\approx 0,3 \sigma_{bu}$), при которых возникают в основном только упругие деформации. Графически E_{b0} выражается тангенсом угла наклона касательной к кривой зависимости $\sigma - \varepsilon$ в точке начала координат. Модуль полной деформации 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 $\varepsilon_b = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$, где ε_{el} и ε_{pl} – соответственно упругие и неупругие (пластические) деформации бетона. Модуль полной деформации $E_b = d\sigma_b / d\varepsilon_b$ является величиной переменной и может быть выражен тангенсом угла наклона касательной к кривой зависимости $\sigma - \varepsilon$ в любой рассматриваемой точке этой кривой.

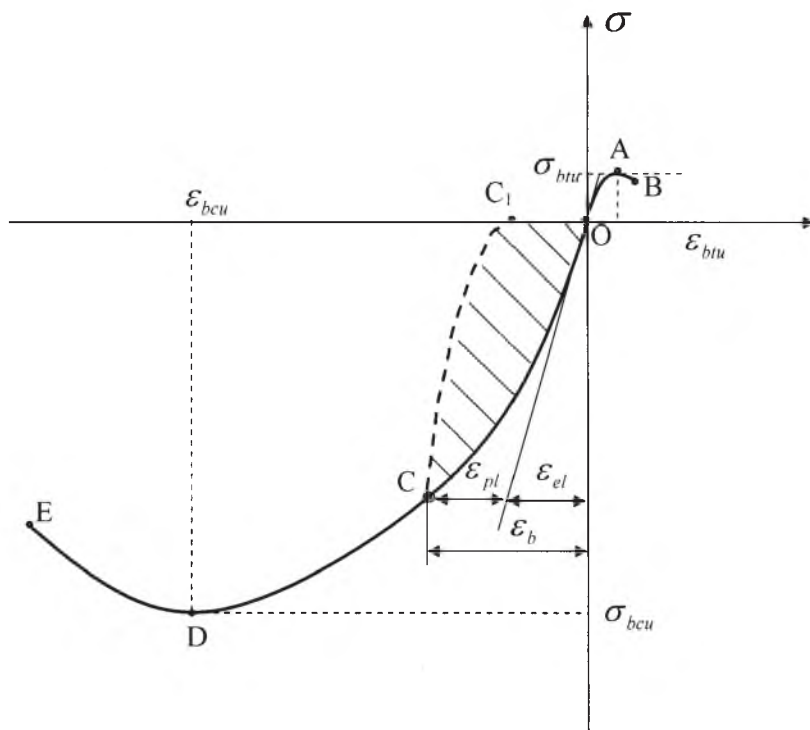


Рис. 1. Диаграмма деформирования бетона при одноосном кратковременном нагружении.

При воздействии многократно повторяющейся нагрузки увеличиваются как упругие, так и неупругие (остаточные) деформации бетона. Нарастание деформаций бетона носит плавный характер и происходит в течение всего циклического нагружения. Наиболее заметные изменения циклических деформаций имеют место примерно до $2 \cdot 10^5$ цикл. При этом неупругие деформации из-за виброползучести бетона увеличиваются значительно интенсивнее, чем упругие. Это зависит от уровня максимальных напряжений цикла и коэффициента асимметрии цикла напряжений. При $N=1$ цикл вследствие развития мгновенных пластических деформаций при первой загрузке и разгрузке образуется петля гистерезиса, например при сжатии линии 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 $\sigma_b < R_{b,rep}$, 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 $\rho=0$ составляет $R_{b,rep} \approx (0,5 \dots 0,55) \sigma_{bu}$. Если $\sigma_b > R_{b,rep}$, т.е. действующие в бетоне напряжения оказываются больше предела выносливости, то в процессе циклического нагружения диаграммы деформаций бетона в координатах $\sigma - \varepsilon$ изменяются

не только количественно, но и качественно – вначале выпуклая диаграмма преобразуется в прямолинейную, а затем – в вогнутую (рис. 2).

Преобразование выпуклой диаграммы 1 в прямолинейную 2 (рис. 2) обусловлено тем, что в процессе циклического нагружения проявляется большая часть пластических деформаций первого рода, и бетон начинает работать упруго. Второе качественное преобразование – трансформация прямолинейной диаграммы $\sigma - \varepsilon$ в вогнутую (на рис. 2 кривые 3, 4) связано с образованием и развитием микротрещин в бетоне.

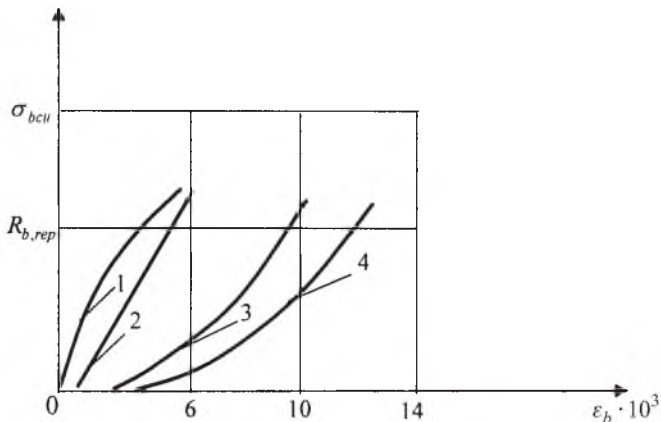


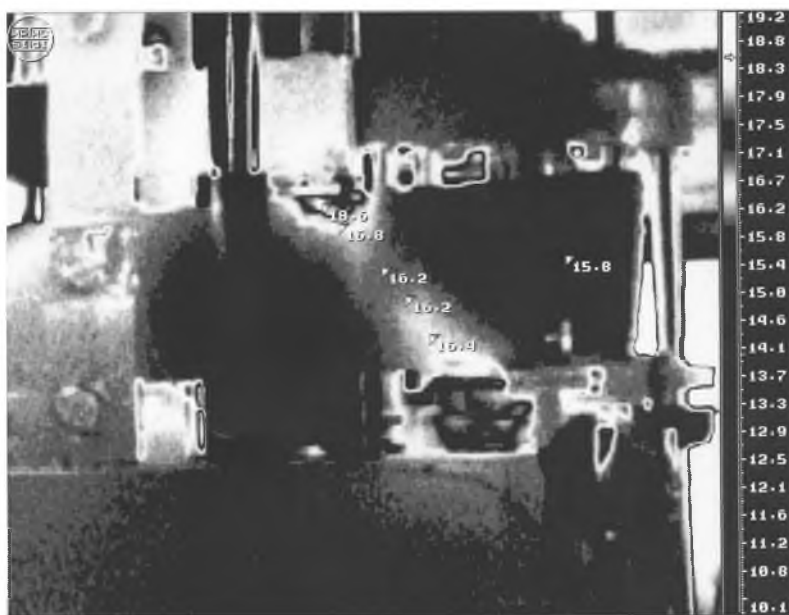
Рис. 2. Диаграммы деформирования бетона при циклическом сжатии, $\sigma_b > R_b$; 1 – $N = 1$ цикл; 2 – $N = 10^3$ циклы; 3 – $N = 10^5$ циклы; 4 – $N = 2 \cdot 10^5$ циклы.

Бетон является материалом с разным сопротивлением растяжению и сжатию: его предельная сжимаемость ε_{bcu} в среднем в десять раз выше предельной растяжимости ε_{btu} (соответственно пластический ресурс при сжатии на столько же больше, чем при растяжении), а предельные напряжения при сжатии σ_{bcu} в зависимости от марки бетона в десять и более раз превышают предельное напряжение при растяжении σ_{btu} .

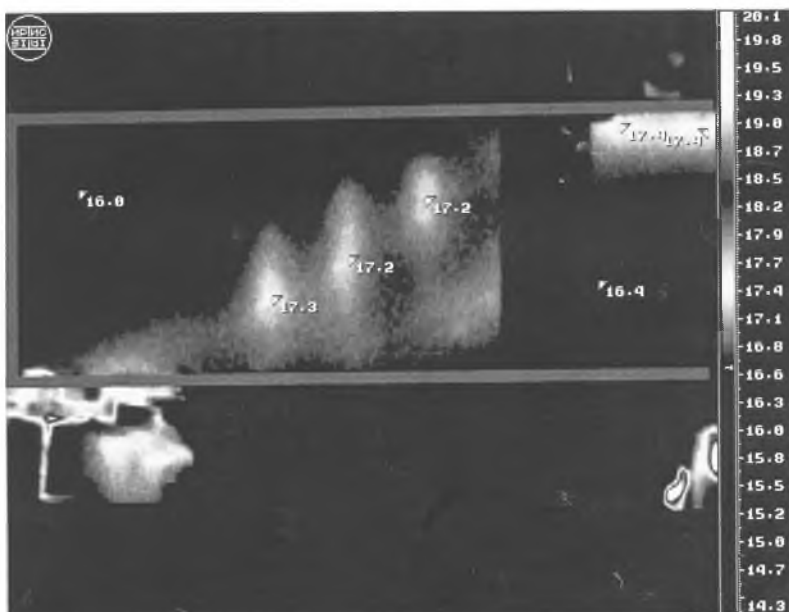
Поэтому при проведении усталостных испытаний с применением тепловизионного метода контроля в качестве опытных образцов использовали железобетонные балки прямоугольного сечения размером $120 \times 345 \times 2000$ мм, которые испытывали на поперечный изгиб как свободно опертые (на двух шарнирных опорах) и находящиеся под действием двух симметрично расположенных грузов, размещенных на расстоянии c_0 от опоры. На рис. 3 показаны термограммы только для одной приопорной зоны каждой балки. Расстояние между осями опоры и груза $c_0 = 0,96h_0$ (рис. 3,а), $c_0 = 2,5h_0$ (рис. 3,б) и $c_0 = 1,5h_0$ (рис. 3,в), где h_0 – рабочая высота сечения балок.

Температура как количественный показатель внутренней энергии тел является универсальной характеристикой физических объектов и процессов, в которых непрерывно происходят 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]. Инфракрасная (ИК) термография, как один из методов теплового контроля, позволяет проводить дистанционную регистрацию, визуализацию и анализ температурных полей

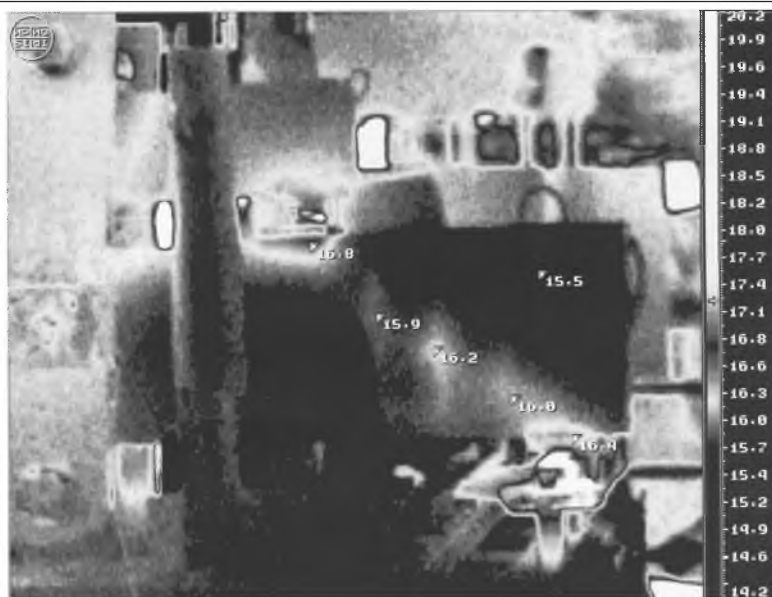
объектов. В настоящее время ИК-диагностика и методы теплового неразрушающего контроля представляют высокотехнологичную область прикладных исследований, которая объединяет достижения в теории теплопередачи, ИК-технологии и компьютерной обработки экспериментальных данных. Суть метода теплового контроля состоит в регистрации температурного поля на поверхности контролируемого изделия тепловизионной аппаратурой и последующем анализе термограмм с использованием ПЭВМ для обработки результатов и принятия решения.



а



б



6

Рис. 3. Термограммы балки после циклического нагружения при $c_0/h_0 < 1,2$ (а), $c_0/h_0 > 2,5$ (б) и $1,2 < c_0/h_0 < 2$ (в).

В силу специфики объекта исследования (изделие из тяжелого железобетона с высокой теплопроводностью, ожидаемые величины перепада температур на поверхности которого могут составлять сотые и десятые градуса – $0,01...0,1^\circ\text{C}$) возникают определенные требования по выбору тепловизора с высокой температурной чувствительностью. Также необходимо учитывать, что усталостные испытания – длительный процесс, в течение которого необходимо непрерывно фиксировать возможные механические изменения (деформации, образование трещин, 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 со следующими основными техническими характеристиками:

Чувствительность к перепаду температур	
на уровне 30°C , $^\circ\text{C}$	0,05
Мгновенное поле зрения, мрад	1,5
Погрешность измерения, %	± 1
Диапазон измерений, $^\circ\text{C}$	$-400...200$

Управление работой и предварительная обработка термоизображений проводятся на портативном компьютере, который входит в состав тепловизора. Экспериментальные исследования по обнаружению зон концентрации напряжений в балках осуществляли в следующей последовательности. Вначале балку устанавливали на испытательный стенд и выдерживали в лабораторных условиях не менее 24 ч с целью стабилизации ее температурных

характеристик. Затем проводили настройку тепловизионной аппаратуры для достижения оптимальных режимов регистрации тепловых полей поверхности балок. Далее осуществляли усталостные испытания по заданной программе.

Испытания под действием многократно повторяющейся нагрузки при различных уровнях циклической нагрузки с коэффициентом асимметрии цикла нагружения $\rho = 0,33$ проводили на универсальной испытательной машине УРС-50. Все экспериментальные образцы испытывали в заведомо жестком режиме для получения усталостного разрушения при заданных параметрах циклического нагружения. Температура внутреннего воздуха в помещении в момент испытаний составляла $17,2...17,7^\circ\text{C}$. Температурное поле поверхностей балок тепловизионной камерой ИРТИС измеряли в пределах первого цикла ($N = 1$ цикл) нагружения до максимальной нагрузки цикла, затем через определенное число циклов нагружения N_1, N_2, \dots, N_n многократно повторяющейся циклической нагрузкой для того, чтобы получить динамику развития зон концентрации напряжений в области действия поперечных сил. При этом проводили синхронную регистрацию параметров циклического нагружения и соответствующих тепловизионных изображений на жестком диске NOTEBOOK. Тепловизионные изображения фиксировали как в режиме отдельных кадров, так и в режиме непрерывной съемки, применяемом при приближении момента усталостного разрушения балки.

Проведенные усталостные испытания железобетонных балок, нагруженных поперечными силами, с применением тепловизионного метода контроля с помощью тепловизора-радиометра ИРТИС-2000 подтверждают предположение о том, что в процессе циклического нагружения происходит определенный нагрев конструкции в зонах концентрации напряжений, что способствует четкому выделению их на поверхности экспериментальных балок (рис. 3). В результате установлены положение, форма и размеры зон концентрации напряжений в железобетонных изгибаемых элементах в области действия поперечных сил при многократно повторяющихся нагрузках. Как следует из полученных термограмм балок, зоны концентрации напряжений в области действия поперечных сил имеют четко выделенные области с превышением температуры на $0,3...3^\circ\text{C}$ по сравнению с температурой поверхности менее нагруженных зон без концентрации напряжений. На термограммах (рис. 3) цифрами указаны температуры (в $^\circ\text{C}$) поверхностей балок после циклического нагружения. При этом в пределах зон концентрации напряжений распределение превышения температур имеет неравномерный характер: от $+0,3^\circ\text{C}$ в средних точках зон концентрации напряжений до $+3^\circ\text{C}$ и выше вблизи опорных и грузовых пластин. Анализ полученных термограмм позволяет также установить, что положение и форма зон концентрации напряжений в области совместного действия поперечных сил и моментов зависят (в частности, для железобетонных изгибаемых элементов) от относительного расстояния c_0/h_0 между опорой и грузом. Очевидно, это связано с тем, что в зоне совместного действия поперечных сил и изгибающих моментов изменение параметра c_0/h_0 приводит к изменению величин составляющих плоского напряженного состояния $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ в бетоне и соотношения между ними. В результате изменяются механизм работы элемента, механизм и форма усталостного разрушения и расчетная схема.

Как видно из рис. 3,а, при $c_0/h_0 < 1,2$ особенностью работы изгибаемых элементов является образование полос концентрации напряжений, связанных с точками приложения сосредоточенных внешних усилий, в которых и происходит усталостное разрушение. Поэтому в процессе циклического нагружения между опорной и грузовой пластинами выделяется полоса с более высокой температурой, что является следствием концентрации сжимающих напряжений в пределах области этой наклонной полосы, в которой из-за виброползучести бетона происходит усиленное развитие неупругих деформаций. Очевидно, поэтому полоса концентрации напряжений между опорой и грузом в процессе циклического нагружения характеризуется двумя трещинами вдоль ее границ, между которыми произошло впоследствии усталостное раздробление бетона.

При $c_0/h_0 > 2,5$ (рис. 3,б) 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 (незначительные местные возмущения напряженного состояния ощутимы только вблизи этих точек), а с внутренними силовыми факторами, действующими в рассматриваемых по длине опорной зоны сечениях (моменты и поперечные силы). 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 с $c_0/h_0 > 2,5$, полученной после приложения циклической нагрузки (рис. 3,б), видно, что эти места в поперечной арматуре и область концентрации напряжений в бетоне над критической наклонной трещиной нагреваются, благодаря чему выделяются от менее нагруженных областей. Следует отметить, что температурные аномалии в поперечной арматуре проявляются даже по толщине защитного слоя бетона.

При $1,2 < c_0/h_0 < 2$ (рис. 3,в) элементы являются пограничными для двух предыдущих расчетных случаев и в них проявляются особенности как первого, так и второго. В результате усталостное разрушение происходит с образованием критической наклонной трещины, в то же время на напряженно-деформированное состояние и характер усталостного разрушения существенное влияние оказывают местные возмущения (концентрации) напряжений вблизи опорной, особенно грузовой площадок. Поэтому на термограмме таких элементов (рис. 3,в) видно, что температурные аномалии в бетоне возникают в пределах наклонной полосы концентрации напряжений между точками приложения груза и реакциями опор, а также в поперечной арматуре – в местах ее пересечения с критической наклонной трещиной.

Итак, циклическое нагружение является тепловой стимуляцией материала в определенных областях, а именно, 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. Установить зоны концентрации напряжений в конструктивных элементах можно путем определения температур-

ных аномалий методом тепловизионного контроля. Параметры динамики температурных полей при циклическом нагружении зависят от уровня максимальной нагрузки цикла, частоты нагружения, пластического ресурса и характера анизотропии.

Измерения температурных полей поверхностей балок путем покадровой съемки через определенное число циклов нагружения, а с приближением разрушения – фиксирование термограмм в режиме непрерывной съемки позволяют получить также динамику развития зон концентрации напряжений в процессе циклического нагружения при действии поперечных сил. С помощью непрерывной съемки термограмм (съемка термографического фильма) можно зафиксировать весь процесс развития зон концентрации напряжений изгибаемых элементов при $c_0/h_0 < 1,2$ с момента формирования локальной полосы концентрации напряжений до момента усталостного разрушения данного изгибаемого элемента.

Резюме

Описано спосіб визначення зон концентрації напружень у конструкціях за умови багаторазово повторюваного циклічного навантаження. Пропонується до циклічного навантаження стабілізувати температурні характеристики конструкцій, далі в процесі навантаження вимірювати їх температурні поля тепловізійною апаратурою з наступним аналізом і обробкою отриманих термограм.

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.

Поступила 10. 05. 2007