

МЕТОД ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Р.С.Ахметханов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова, 101990,
Малый Харитоньевский пер. 4, Москва, Российская Федерация
ahtan54@mail.ru

Доклад посвящен тепловому контролю деталей конструкции в процессе их эксплуатации. Реальные конструкционные материалы имеют различные дефекты и трещины; они имеют свои характерные геометрические особенности и не имеют того идеального вида, который принимается при расчетах их на разрушение.

Поверхность излома трещины, формирующаяся при разрушении конструкционных материалов, характеризуется наличием неровностей самых различных размеров и форм в зависимости от механических свойств материала. В зависимости от структурных особенностей конструкционного материала образца контроля (ОК) и условий деформирования (температура окружающей среды, скорость деформирования) вид излома меняется.

Первым шагом разрушения является образование субмикроскопических трещин, и они далее развиваются до размеров микротрещин, отдельные субмикротрещины сливаются в микротрещины.

Например, важной особенностью вязкого разрушения является образование множества микротрещин и их рост, а далее с увеличением деформации некоторые из них сливаются друг с другом. При этом процессе необходима большая величина пластической деформации для распространения вязкой трещины и разрушения материала. При данном процессе происходит превращение энергии механического деформирования (пластической деформации) конструкционного материала в окрестности трещины в тепловую энергию и вследствие этого повышается средняя температура в области этих деформаций.

Таким образом, при разрушении происходит нарушение термодинамического равновесия объекта с окружающей средой на его поверхности возникает избыточное температурное поле, которое позволяет получить информацию об уровне пластических деформации и следовательно проводить неразрушающий контроль (ТНК) и диагностику конструкций тепловым методом.

Основные тепловые процессы в твердом теле протекают в объеме пластически деформированного материала, расположенного вдоль полос скольжения, где имеются повышенные пластические деформации. В этих зонах (полосах скольжения) при дальнейшем деформировании образца образуются свободные поверхности и по ним развиваются изломы детали.

На рис. 1 приведены графики измерения температуры в области деформации (упругой и пластической) материала при нагружении образца под растягивающей нагрузкой. На графике также показано изменение коэффициента относительного сужения поперечного сечения образца ψ при реализации простого напряженно-деформационного состояния.

В процессе этого нагружения образец до разрушения проходит три стадии: I - охлаждение образца при упругой деформации; II – процесс увеличения пластической деформации; III – переход к стадии разрушения образца.



Рис.1. Изменение температуры T образца при увеличении деформации ϵ (одноосное нагружение): σ_u – предел прочности; σ_y – предел упругости; ψ - относительное сужение поперечного сечения образца

Процесс образования тепла в объемах материала в результате пластической деформацией является «естественным проявителем» происходящих внутри этих материалов физико-химических и механических изменений. Эти свойства материалов вызваны термоупругим и термопластическим эффектами.

При упругом одноосном растяжении стального образца (стадия I) будет происходить понижение температуры деформируемого объема, а при упругом сжатии - повышение. При упругопластическом и пластическом деформировании тела (стадии II, III) происходит нагрев тела. Стадия III характеризуется большим градиентом увеличения температуры образца.

Рассмотрим модельный пример – растяжение (простое нагружение) пластины с отверстиями. Для определения напряжений в пластине был проведен расчет с помощью программы Ансис. Расчет определил распределение напряжений при различных величинах приложенной растягивающей нагрузке (рис.2). Наибольшие напряжения и деформации в области отверстий (концентраторов напряжений) и дефектов структуры материала. На рис. 2 приведены зоны с наибольшими значениями напряжений при различном уровне нагружения (два вида 1 и 2); 1 вид – это напряжения вызванные концентраторами напряжений, 2 вид – линии (полосы) скольжения при пластических деформациях.

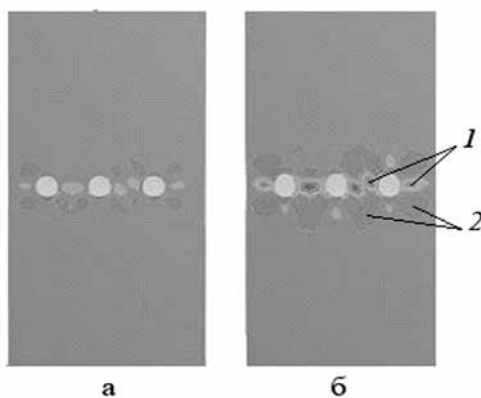


Рис.2. Уровни напряжения в образце: а - при деформации ϵ_{ij}^1 ; б - при деформации ϵ_{ij}^2 , ($\epsilon_{ij}^2 > \epsilon_{ij}^1$)

Рассмотрим термограммы при нагружении пластины с отверстиями. Пластина стальная – материала СТЗ сп. На рис. 3 приведены термограммы образца под нагрузкой при различном уровне пластической деформации (стадия 2). При меньшей нагрузке имеются зоны с повышенной температурой, которые относятся к области концентрации напряжений. При дальнейшем увеличении растягивающей нагрузки происходит увеличение температуры – появляются области с максимальной температурой.

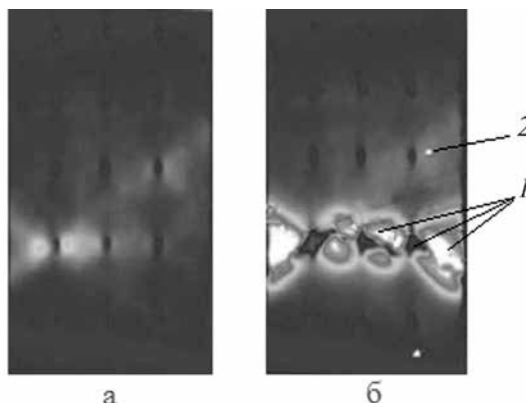


Рис. 3. Термограммы при общей деформации: а - ϵ^1_{ij} ; б - ϵ^2_{ij} ; ($\epsilon^2_{ij} > \epsilon^1_{ij}$)

Для оценки различий в изображениях термограмм введено в предлагаемый метод анализа термограмм получение и последующий анализ изображений остовов (скелета) изображения теплового поля. Скелетные линии показывают направление области повышенных пластических деформаций и направления плоскостей скольжения.

На рис. 4 приведены остовы изображений термограмм (программа ImageJ), где четко обозначены области повышенной температуры. С помощью анализа скелетных линий можно выделить локальные уровни пластических деформаций - используя эти линии, можно определить диаграммы изменения температуры по длине данных линий (профили линий). Профили линий были определены программой Gwyddion.

При начальном нагружении образца проявляются зоны с повышенной температурой в двух областях (1 и 2, рис.4а), которые характеризуют небольшие линии скольжения при пластических деформациях. В дальнейшем по мере увеличения нагрузки происходит формирование значительных линий скольжения 1,2 и 3 (рис. 4б), а также небольшая область в виде “звездочки” 4 (рис. 4б) – область дефекта.

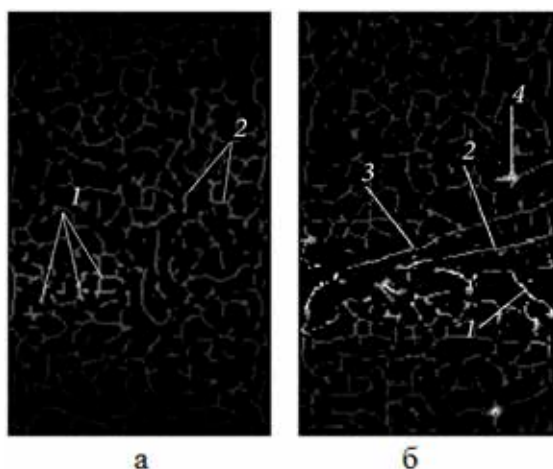


Рис. 4. Остовы изображений термограмм: а - при деформации ϵ^1_{ij} ; б - при деформации ϵ^2_{ij}

На этих изображениях (рис. 4) профилей скелетных линий присутствуют области с максимальными температурными значениями. В соответствии с термопластическим эффектом можно сказать, в этих зонах максимальные локальные пластические деформации - эти области начального разрушения образца. При мере накопления повреждений и образования трещин будут перераспределяться локальные напряжения – будет изменяться уровень напряжений по всему объему ОК. Возникшие вновь трещины будут являться концентраторами напряжений, их области будут увеличиваться с увеличением их длин.

На рис.5 приведены графики изменения температуры (профиль) линий 1,2 и 3 на рис.4б. По всем этим линиям видно, что есть области максимальной температурой (T_{max1} , T_{max2} и T_{max3}). Изменение величин T_{maxi} и длин скелетных линий с повышенной температурой l_i – являются индикаторами мест повышения пластических деформаций и зон возможного разрушения образца.

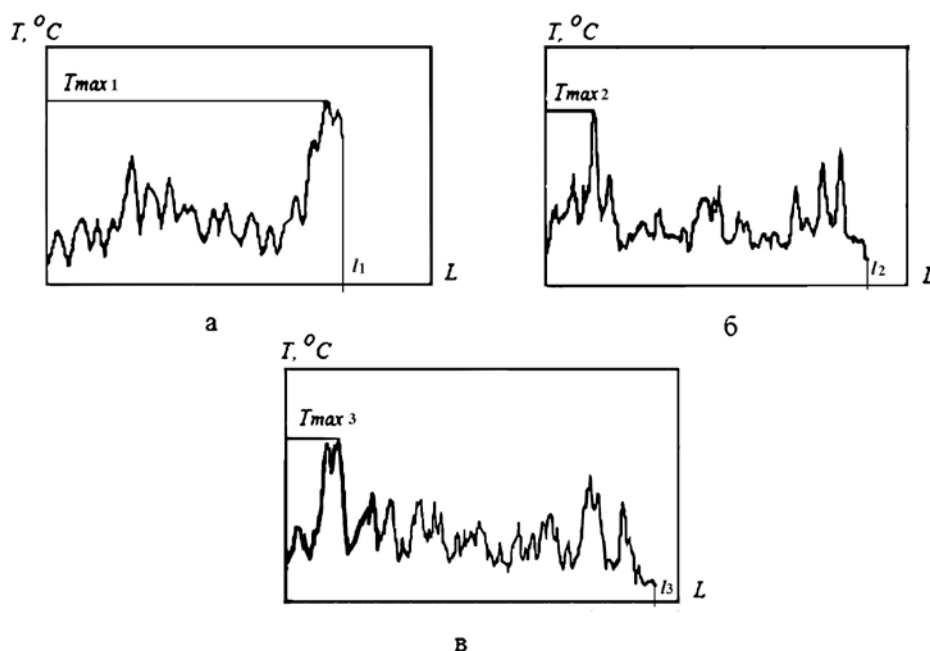


Рис. 5. Изображения профилей линии 1, 2 и 3 (рис. 4): а - поз.1; б - поз.2; в - поз. 3

Вычислим среднюю температуру i - той скелетной линии

$$ST(l_i) = \overset{\circ}{\underset{j}{\mathop{\text{a}}}}^m T_j / m; \quad j=1, \dots, m,$$

где m – число пикселей в i – той скелетной линии.

Учитывая сумму средних температур n скелетных линий K_T , получим значения весовых коэффициентов p_i для каждой учитываемой скелетной линии с максимальными значениями средних температур

$$K_T = \overset{\circ}{\underset{i}{\mathop{\text{a}}}}^n ST(l_i); \quad i=1, \dots, n;$$

$$p_i = (ST(l_i)) / K_T; \quad 1 = \sum p_i.$$

В сумме эти весовые коэффициенты будут равняться 1,0. Изменения в перераспределении пластических деформаций приведет и к изменению этих весовых коэффициентов. Максимальный коэффициент позволяет определить, где произойдет начальная стадия разрушения, и по какой из скелетных линий. А конфигурация этих учитываемых скелетных линий с максимальными средними температурами будет характеризовать возможный вид излома. В нашем случае произошло разрушение образца по концентраторам напряжений (отверстиям) и по скелетной линии поз. 1 и поз. 3 (рис.4б),

которые были направлены под углами близкими к значению 45° по отношению к направлению растягивающей нагрузки.

Таким образом, наличие термоупругого и термопластического эффекта позволяет контролировать конструкции в процессе эксплуатации. А контроль изменений температуры в различных областях исследуемых элементов конструкции позволяет определить зоны с максимальными локальными пластическими деформациями и линии скольжения пластических деформаций, по которым будет в дальнейшем развиваться разрушение конструкции.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № РФФИ 20-58-00019 Бел_а).

Список использованной литературы

1. Плохое А.В., Попслух Л.И., Плотникова П.В. Физические и механические свойства материалов. Часть 1. Новосибирск, 2017. - 445 с.
2. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. Томск. 2007. - 104 с.
3. Мойсейчик А.Е., Мойсейчик Е.А. Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования //Неразрушающий контроль и диагностика, №3, 2014.- С. 3-19
4. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. - Киев: Изд. “Наукова думка”, 1970. 305 с.
5. Petr Klapetek, David Nečas, Christopher Anderson. Руководство пользователя. <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/index.htm/>
<http://gwyddion.net/download/user-guide/gwyddion-user-guide-en.pdf>
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. - 421 с.