

## УТОЧНЕННЫЙ КРИТЕРИЙ ПИСАРЕНКО-ЛЕБЕДЕВА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Приводиться уточнений вариант критерію Писаренко-Лебедева для оцінки граничного напруженого стану матеріалів будівельних конструкцій, складеного з урахуванням максимальних залишкових розтягуючих напружень, які діють в локалізованій зоні.

Приводиться уточненный вариант критерия Писаренко-Лебедева для оценки предельного напряженного состояния материалов строительных конструкций, составленного с учетом максимальных остаточных растягивающих напряжений, действующих в локализованной зоне.

The improved variant of Pisarenko-Lebedev criterion for estimation of a stress limit state for materials of building structures is presented. It has been obtained with taking into account the maximal residual tensile stresses acting in a localized zone.

Конструктивные элементы (КЭ) зданий и сооружения, получившие в процессе эксплуатации сверхнормативный крен, могут быть выполнены как из металлических, так и неметаллических материалов. Поэтому разработка обобщенного критерия оценки предельного состояния КЭ является сложной и актуальной проблемой. Без объективной оценки напряженного состояния (НС) зданий и сооружений, получивших сверхнормативные крены, и их КЭ невозможно выбрать оптимальный способ восстановления их плано-высотного положения, разработать алгоритм управления технологическим процессом на основе определения остаточного эксплуатационного ресурса зданий, а также провести оценку эксплуатационного ресурса сооружений после их восстановления.

Одним из направлений решения указанной проблемы может быть разработка способа применения известных обобщенных критериев для оценки НС зданий, сооружений и их КЭ, что, безусловно, требует повышения достоверности контроля НС конструктивных элементов известными обобщенными критериями, например на основе дополнительных исследований физических взаимосвязей между основными физико-механическими параметрами, входящими в уравнение обобщенных критериев. Из известных обобщенных критериев наиболее полно структура их построения представлена в критерии Писаренко-Лебедева [1]. Возможности этого критерия и анализ взаимосвязи его основных физических параметров рассмотрим с учетом следующих ограничений, допущений, известных физических закономерностей, использованных в обобщенном критерии, а также с учетом известных технических средств для практической реализации критерия и эксперимен-

тального его исследования при оценке НС материалов КЭ на примере изготовления их из металлических материалов:

1. Рассматривается наиболее характерный случай плоского напряженного состояния /ПНС/ КЭ сооружений.

2. Разрушение материалов КЭ происходит на ниспадающем участке полной диаграммы деформирования, то есть в области за пределом прочности материалов КЭ (рис.1) [2].

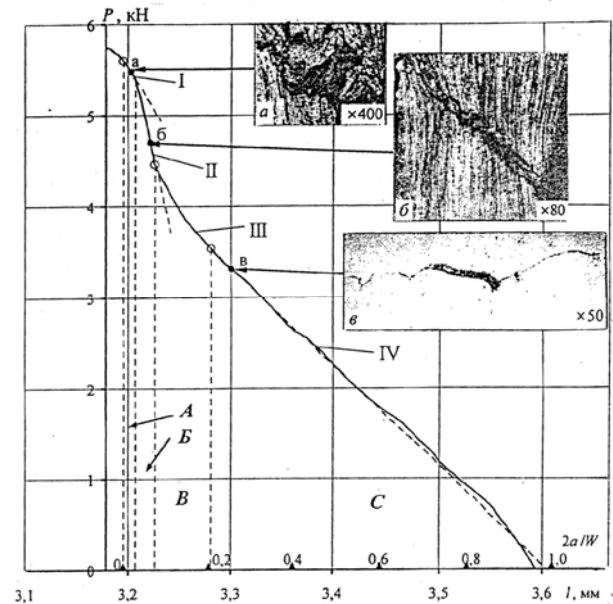


Рис.1. Характер ниспадающего участка полной диаграммы деформирования  $P = \varphi(\Delta l)$  для углеродистой стали

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $P$  – растягивающая нагрузка;  $\Delta l$  – удлинение образца;  $W$ ,  $a$  – соответственно ширина плоского образца и длина моделируемой в нем тре-

щины. I, II, III, IV – соответственно участки возникновения вязкой трещины в образце, выхода макротрещины на поверхность образца, переориентации макротрещины и участок продвижения макротрещины по широкой стороне образца.

3. В качестве допустимого напряжения принимается предел прочности  $\sigma_B$  материала КЭ, а в качестве предельного напряжения  $\sigma_{II}$  принимается напряжение, соответствующее выходу макротрещин на поверхность материала КЭ (участок II на рис. 1) [2].

4. За допустимую величину напряжения принимается предел прочности материала строительной конструкции.

5. В формировании НС материалов КЭ участвуют как касательные  $\tau$ , так и нормальные  $\sigma$  напряжения.

6. Возникновение макротрещин происходит в локализованном объеме материала, в котором действуют растягивающие ориентированные остаточные механические напряжения  $\sigma_{oc}$  и напряжения  $\sigma_1$  от внешних нагрузок [3].

7. Анализ структуры обобщенного параметра критерия и физическая связь между параметрами, входящими в его структуру, проводится на примере использования критерия для оценки НДС магнитоэластичной углеродистой стали, типа Ст. 3.

8. Принимается, что процесс разрыхления «х» происходит в условиях действия сдвиговых деформаций в различных плоскостях скольжения [4] (рис. 2).

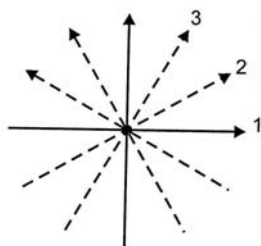


Рис. 2. Система скольжения «плоского кристалла»: 1, 2, 3 – плоскости скольжения

9. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_{oc}$  в материале КЭ происходит по закону негармонических колебаний с разной амплитудой, при этом изменения величины информационного сигнала от остаточных напряжений происходит на уровне информационного сигнала, определяемого исходными структурным и дефектным состоянием материала КЭ [5, 6].

10. При проведении экспериментальных исследований взаимосвязи параметров, определяющих структуру обобщенного критерия, используется стенд (рис. 3), включающий в свой

состав стандартный бесконтактный электромагнитный преобразователь (рис. 4) с экстремальной функцией преобразования [7] и устройства для измерения и обработки информационного сигнала с преобразователя.

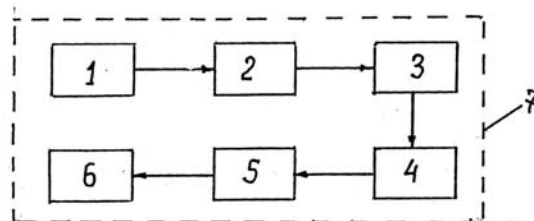


Рис. 3. Структурная схема построения экспериментального стенда контроля НС материала КЭ: 1 – блок питания (автономный); 2 – генератор; 3 – вихревой преобразователь (ИП); 4 – детектор; 5 – фильтр; 6 – устройство измерения и обработки выходных сигналов; 7 – экспериментальный стенд

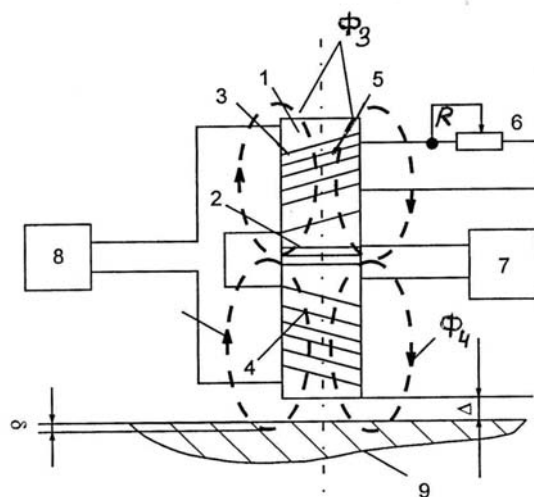


Рис. 4. Конструкция накладного электромагнитного вихревого преобразователя (ВТП):

1 – магнитопровод; 2 – измерительная петлеобразная обмотка; 3, 4 – секции обмотки возбуждения; 5 – короткозамкнутая обмотка; 6 – переменный резистор; 7 – измерительный прибор; 8 – источник переменного тока; 9 – эталонный образец материала или ферромагнитная пластина

На рис. 4 приняты следующие обозначения:  $\Phi_3$ ;  $\Phi_4$  – соответственно корректирующий и информационные потоки возбуждения;  $\Delta$  – начальный воздушный зазор;  $\delta$  – глубина проникновения магнитного потока  $\Phi$  в материал КЭ или ферропокрытие на поверхности КЭ.

11. Для моделирования плоского напряженного состояния, как показано в работе [1], наиболее эффективно используется плоская оболочка, например, домкрат конструкции НИИСК, так как в этом случае становится возможным изменять величину главного окружного напряжения  $\sigma_o$  и главного радиального на-

пряжения  $\sigma_R$ , что следует из расчетного соотношения, полученного в работе [1]:

$$\sigma_O = \sigma_R = \frac{PR}{2t}, \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка,  $t$  – толщина стенок,  $R$  – радиус сферы.

12. При моделировании плоского НС в неметаллических материалах эффективно применение способа магнитоупругого тензометрирования, когда на поверхность наносится ферромагнитное покрытие, что позволяет использовать токовихревой преобразователь по схеме, приведенной на рис. 5.

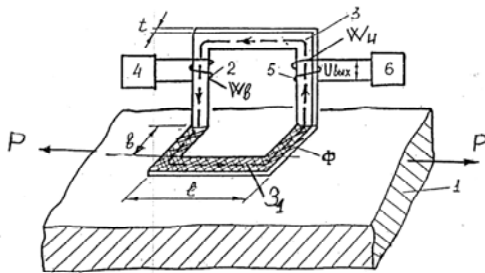


Рис. 5. Схема реализации магнитоупругого тензометрирования неферромагнитных материалов КЭ (бетон, кирпич):

1 – контролируемый материал с остаточными или действующими напряжениями; 2 – обмотка возбуждения с числом  $W_B$ ; 3 – ферромагнитный магнитопровод в форме изогнутой пластины с небольшой толщиной  $t$ ; 4 – источник переменного тока для формирования магнитного потока «Ф»; 5 – измерительная обмотка с числом витков  $W_H$ ; 6 – устройство измерения выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$ ;  $3_1$  – участок магнитопровода 3, воспринимающий деформации контролируемого материала 1;  $P$  – внешняя растягивающая сила

13. Примем, что исходное НС материала КЭ перед устранением крена объекта характеризуется начальным НС, которое включает в виде составляющей остаточное НС, величина которого определяется остаточными напряжениями, поэтому для случая плоского НС необходимо учитывать остаточные напряжения  $\sigma_{OC}$ . Определение и последующий учет остаточных напряжений позволит повысить достоверность обобщенного критерия, а также точность расчетов напряжений, действующих в материалах КЭ [8, 9].

14. Известно, что для случая плоского НС при раскрытии макротрещины основную роль выполняет главное растягивающее напряжение  $\sigma_1$ , перпендикулярное к продольной оси трещины, поэтому можно предположить, что макротрещина возникнет в локальной области, в

которой напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_{OC}$  действуют в одном направлении и совпадают по знаку, то есть они соответствуют закону суперпозиции [2].

Из известных обобщенных критериев для оценки ПНС материала КЭ наиболее приемлем критерий Писаренко-Лебедева [1]:

$$x\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} + (1-x)\sigma_1 = \sigma_p, \quad (2)$$

где  $x$  – параметр, определяющий степень участия в макроразрушении сдвиговой деформации, создающей благоприятные условия для разрыхления материала и образования макротрещин;  $\sigma_1, \sigma_2$  – главные растягивающие напряжения;  $\sigma_p$  – разрушающее одноосное растягивающее напряжение, то есть физически оно соответствует предельному напряжению  $\sigma_{II}$  (рис. 1).

В работе [1] показано, что для случая, когда материал находится в пластическом состоянии,  $x = 1$ , формула (2) совпадает с уравнением критерия Мизеса-Генки; если материал КЭ хрупкий, то с достаточной точностью можно принять, что  $x = 0$  и критерий (2) совпадает с критерием максимальных нормальных напряжений и практически все материалы имеют величину  $x$  в диапазоне  $0 < x < 1$ . Из уравнения (2) для обобщенного критерия Писаренко-Лебедева следует, что оно не учитывает НС материала, сформированное при изготовлении КЭ, то есть  $\sigma_{OC}$ . С учетом допущений п. 14 и уравнения (2) обобщенный критерий примет вид

$$x\sqrt{(\sigma_1 + \sigma_{OC})^2 + \sigma_2^2 - (\sigma_1 + \sigma_{OC})\sigma_2} + (1-x)(\sigma_1 + \sigma_{OC}) = \sigma_p, \quad (3)$$

где  $\sigma_{OC}$  – величина остаточного механического напряжения в материале КЭ перед его восстановлением, изменяющегося по закону [6]:

$$\sigma_{OC} = \sigma_o \cos 2\pi \frac{S}{l}, \quad (4)$$

где  $l$  – длина волны, на которой меняются остаточные напряжения;  $S$  – величина равная  $0.3l$ , для случая, когда  $\sigma_{OC}$  во всех направлениях изменяются одинаково [6].

Для подтверждения структуры уточненного критерия (3) были проведены экспериментальные исследования плоской оболочки, изготовленной из листового материала (рис. 6). Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 7.



Рис. 6. Конструкция плоской оболочки с размеченными областями для контроля параметров НС (1...n точки установки вихретокового преобразователя)

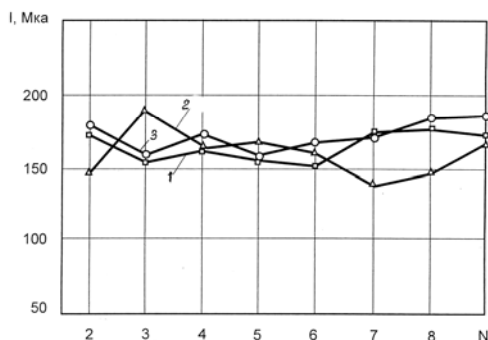


Рис. 7. Распределение значений выходного сигнала I вихретокового преобразователя (ВТП) по точкам установки N на плоской мембране оболочки: 1, 2, 3 – соответственно зависимости, полученные при исходном состоянии; нагружении внутренним давлением; обжатии до исходного состояния; N – точки контроля; I – выходной сигнал ВТП в микроамперах (MkA)

## ВЫВОДЫ

1. В качестве предельного параметра НС материалов КЭ целесообразно принять величину напряжения, соответствующего моменту возникновения макротрещины на поверхности материала (рис. 1). Дальнейший рост макротрещины неконтролируем, а разрушение даже одного КЭ может вызвать лавинообразное увеличение на 60...70 % действующих нагрузок в КЭ без трещин и привести к возникновению аварийной ситуации [10].

2. Из экспериментальных зависимостей выходного сигнала вихревого преобразователя от точек его установки на поверхности мембраны, следует, что зависимости 1, 3 качественно идентичны (рис. 7). Это позволяет применить принцип суперпозиции к остаточным напряжениям и напряжениям от внешней нагрузки. Из графиков 1...3 следует, что применение основных положений теории ферромагнетизма [6] о волнообразном изменении остаточных напряжений в ферромагнитных материалах справедливо и качественно описывается формулой (4).

3. Зависимость 2 показывает, что магнитоупругий метод может быть использован для определений напряжений в ферромагнитных материалах КЭ. Относительное изменение выходного сигнала вихревого преобразователя по точкам контроля при постоянном давлении в

оболочке достигает по сравнению с выходными сигналами при исходном состоянии плоской мембраны величины порядка 17; 22.5 % (см. точки контроля №№ 2, 3 рис. 7).

4. При контроле изменения НС конструктивного элемента измерительными вихретоковыми преобразователями (ВТП) исходная относительная величина механических напряжений может быть определена на основе анализа волнового изменения сигналов ВТП.

5. Уточненное критериальное уравнение Писаренко-Лебедева предельного состояния НС материалов КЭ как для металлических (непосредственно в материале), так и неметаллических (магнитоупругое тензометрирование), позволяет повысить достоверность оценки НС при устранении кренов зданий и сооружений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев – К.: Наук. думка, 1976. – 416 с.
2. Чаусов Н. Г. Особенности разрушения пластичных листовых материалов / Н. Г. Чаусов, А. А. Лебедев // Проблемы прочности, 2003, №4. – С. 5-13.
3. Фридман Я. Б. Механические испытания материалов. Часть 2. – М.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
4. Костюк А. Г. Пластичность и разрушение кристаллического материала при сложном нагружении. – М.: МЭИ, 2000. – 180 с.
5. Шокарев В. С. Определение магнитной проницаемости для оценки остаточных механических напряжений. Сб. науч. тр. Строительство «Механика и физика разрушения строительных материалов» Под ред. О. Е. Андрейкива, И. И. Лучка, В. В. Божидарника – Вып. 5 / В. С. Шокарев, В. И. Чаплыгин, А. С. Трегуб. – Львов: Каменяр, 2002. – 260 с.
6. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. – М.: Мир, 1987. – 419 с.
7. Чаплыгин В. И. Накладной вихретоковый преобразователь / В. И. Чаплыгин, С. А. Сергеев, В. И. Осокин, Н. Ф. Потапова. – Патент 2011189. – Бюл. № 7, 1994.
8. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – М.: Машиностроение, 1971. – 199 с.
9. Долгов К. А. Определение напряжений в двухслойном покрытии // Проблемы прочности, 2005, №4. – С. 121 – 132.
10. Гениев Г. А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. / Г. А. Гениев, В. И. Колчунов, Н. В. Клюева и др. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 216 с.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.