

ПРОЧНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Доктор техн. наук *А.Н. Романов*, Член-корреспондент РАН *Н.А. Махутов*,
кандидат техн. наук *Д.О. Резников*,
Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия,

Профессор *Д.М. Чандра Кишен*
Индийский институт науки, Бангалор, Индия

Доктор техн. наук *Л.Р. Ботвина*
Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, Москва, России

Представлены основные результаты совместного российско-индийского проекта «Исследование процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов с учетом их многоуровневого структурного состояния для обеспечения прочности, надежности, долговечности и безопасности высоконагруженных конструкций». В рамках совместного проекта было осуществлено комплексное расчетно-экспериментальное исследование процессов деформирования и разрушения образцов и конструктивных элементов выполненных из двух типов основных конструкционных материалов: (1) металлических имеющих выраженные участки упругого и пластического деформирования в широком диапазоне деформаций с сопоставимыми диаграммами деформирования в области растяжения и сжатия; (2) бетонов, имеющих сопоставимую с металлом упругую деформацию и низкую неупругую составляющую деформаций, и существенно различающиеся диаграммы растяжения и сжатия. Выполненные российскими и индийскими специалистами сопоставительные исследования прочности, деформативности, трещиностойкости, безопасности и рисков конструкций из металлических и цементных композиций показали принципиальную возможность использования унифицированных моделей деформирования, повреждения и разрушения и определяющих уравнений линейного и степенного вида с существенно различающимися параметрами этих уравнений.

Ключевые слова: прочность, декоративность, трещиностойкость, накопление повреждений, разрушение.

STRENGTH AND SAFETY OF STRUCTURES MADE OF METALLIC MATERIALS AND CEMENT COMPOSITIONS

Dr. (Tech.) *A.N. Romanov*, Corresponding Member of the RAS *N.A. Makhutov*,
Ph.D. (Tech.) *D.O. Reznikov*
Mechanical Engineering research Institute of the RAS Moscow, Russia

Professor *J.M. Chandra Kishen*
Indian Institute of Science. Bangalore, India

Dr. (Tech.) *L.R. Botvina*
Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow, Russia

The paper presents the main results of the joint Russian-Indian project "Study of the Process of Deformation and Fracture of Structural Materials in Accordance with their Multi-scale Structural State to Ensure Strength, Reliability, Durability and Safety for High Duty Structures". Within the framework of the joint project, a comprehensive computational and experimental study of the processes of deformation and fracture of specimens and structural components made of two types of basic structural materials was carried out: (1) metals with substantial segments of elastic and plastic strains; (2) concretes with elastic strains comparable to the ones in metals and a low inelastic component of strains, and significantly different tension and compression diagrams. Comparative studies of strength, deformability, crack resistance, safety and risks of structures made of metals and concretes carried out by Russian and Indian specialists have shown the fundamental possibility of application of unified models of deformation, damage accumulation and fracture and application of constitutive equations in linear and power-law forms with significantly different parameters of these equations.

Keywords: strength, deformability, crack resistance, damage accumulation, fracture.

1. Постановка проблемы

В настоящее время в нашей стране и за рубежом для высокорисковых объектов атомной, тепловой и гидравлической энергетики, нефтегазохимического и строительного комплексов всё большее применение находят композиционные материалы и несущие элементы из них. В первую очередь, это относится к двум группам композиций:

- металлы, металлические сплавы и композиционные материалы на основе металлов (наплавки, сварные соединения, многослойные композиции);
- цементы и цементные композиции (бетоны, железобетоны, бетоны, армированные неметаллическими материалами).

Проблемы прочности и безопасности неметаллических и цементных композиций были выбраны в качестве объекта совместных разработок российских и индийских специалистов в рамках российско-индийского проекта «Исследование процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов с учетом их многоуровневого структурного состояния для обеспечения прочности, надежности, долговечности и безопасности высоконагруженных конструкций» поддержанного грантами Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства науки Индии. При этом основные исследования металлов и металлических композиций выполнялись российскими специалистами (Институт машиноведения РАН – ИМАШ РАН, Институт металлургии и материаловедения – ИМЕТ РАН). Индийская сторона изучала механическое поведение цементных композиций. Ряд исследований бетонов с применением акустической эмиссии осуществлялся совместно.

В рамках совместного проекта было осуществлено комплексное расчетно-экспериментальное исследование процессов деформирования и разрушения указанных выше двух типов основных конструкционных материалов (рис. 1,2):

- металлических (рис. 1), имеющих выраженные участки упругого и пластического деформирования в широком диапазоне деформаций ($0,1 \div 0,5\%$ - упругие деформации до предела текучести σ_T ; $0,5 \div 50\%$ - пластические деформации до разрушения) с сопоставимыми диаграммами деформирования в области растяжения и сжатия [1 - 3];
- бетонов (рис. 2), имеющих сопоставимую с металлом упругую деформацию ($0,08 \div 0,1\%$) и низкую неупругую составляющую деформаций ($0,2 \div 0,3\%$), и существенно различающиеся диаграммы растяжения и сжатия [4 - 6].

Эти диаграммы характеризуются базовыми механическими свойствами (табл. 1):

- пределы текучести σ_T , когда заканчивается область упругих деформаций e_T ;

- пределы прочности σ_B , когда заканчивается область равномерных деформаций e_B при максимальных напряжениях;
- разрушающее напряжение σ_K в конечной точке K при предельной разрушающей неупругой деформации e_K .

Условные диаграммы деформирования рис. 1 перестраиваются в истинные, когда учитывается уменьшение сечения образца за счет пластических деформаций [1]. В силу малости упругих деформаций истинные и условные диаграммы упругого деформирования для сталей и бетона практически совпадают. При окончательном разрушении стального образца в точке K происходит существенное уменьшение площади поперечного сечения образца от начального F_0 до конечного F_K . Тогда относительное сужение образца

$$\psi_K = \frac{F_0 - F_K}{F_0} . \quad (1)$$

Для конструкционных сталей ψ_K бывает в пределах $0,5 \div 0,7$; для бетонов – в пределах $0,02 \div 0,03$.

Истинная деформация при разрушении

$$e_K = \ln \frac{1}{1 - \psi_K} . \quad (2)$$

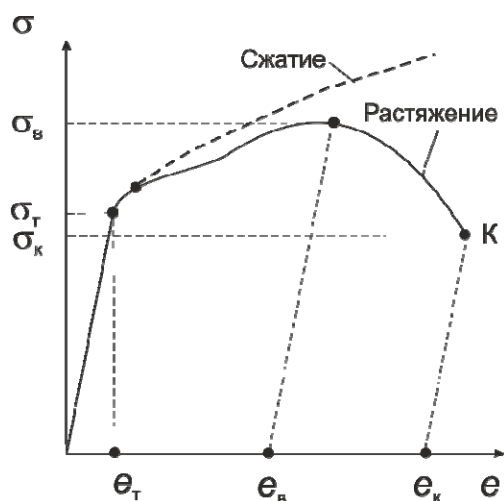


Рис. 1. Диаграммы деформирования при расширении и сжатии металлов (сталей)

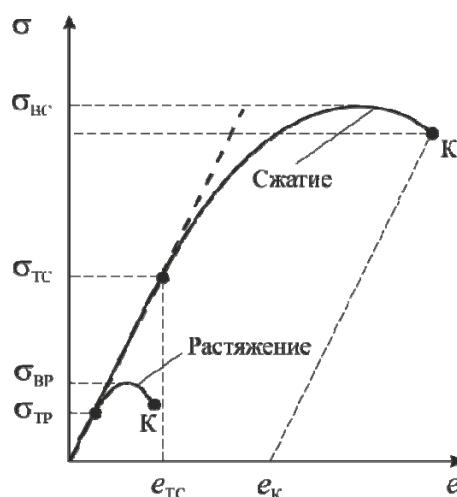


Рис. 2. Диаграммы деформирования бетона при растяжении и сжатии

Таблица 1

Базовые характеристики механических свойств

№	Материал	Растяжение				Сжатие			
		σ_T , МПа	σ_B , МПа	e_B , %	e_K , %	σ_T , МПа	σ_B , МПа	e_B , %	σ_K , %
1	Сталь	200-500	350-680	8-15	20-40	220-600	>500	>20	>30
2	Бетон	5-10	10-12	0,1-0,2	0,20-0,25	20-50	30-50	0,5-1	0,8-1,5

При указанных выше величинах ψ_k величина e_k для металлов находится в пределах $0,7 \div 1,2$.

При разрушении стали по шейке в условиях растяжения истинное сопротивление разрушению S_k оказывается существенно выше, чем условное σ_k и выше даже предела прочности σ_B

$$S_k = \sigma_k (F_0 / F_k) \approx \sigma_B (1 + 1,4\psi_k). \quad (3)$$

Для бетонов истинная и условная разрушающие деформации практически совпадают, и составляют $0,008 \div 0,015$ при сжатии и $0,003 \div 0,05$ при растяжении.

Для экспериментального определения механических свойств металлов и бетона традиционно проводятся стандартные испытания лабораторных образцов.

В связи с тем, что реальные несущие элементы конструкций могут иметь поперечные сечения F , существенно отличающиеся от сечений лабораторных цилиндрических или плоских образцов F_0 , в практике исследований испытания на растяжение проводятся на стальных образцах переменных (возрастающих сечений) – от $5 \div 10 \text{ мм}^2$ до $3 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$. В этом случае использовались испытательные машины с разрывными усилиями от 10^1 до $3 \cdot 10^4 \text{ кН}$. Изменение механических свойств при варьировании F связывается с проявлениями масштабного фактора.

Для бетонов стандартным является испытание на сжатие образцов в виде кубиков $50 \times 50 \times 50 \text{ мм}$. Исследования масштабного фактора проводится как при сжатии, так и при трехточечном изгибе призматического образца.

Из сказанного следует, что металл и бетон являются контрастными конструкционными материалами по уровню вязкости, оцениваемой произведением характеристик прочности σ_B и пластичности ψ_k . Металл (сталь) имеет вязкость в $10^2 \div 10^3$ более высокую, чем бетон.

Не случайно, что в инженерных сооружениях (зданиях, мостах, опорах, башнях) используется не чистый бетон, а армированный бетон (железо, бетон, армированный железом, или бетон, армированный композитом на неметаллической основе). Армирование резко повышает сопротивление разрушению при растяжении и сжатии. При этом традиционный железобетон рассматривается как макрокомпозит.

Несущие элементы реальных конструкций из металлических и цементных композиций имеют, как правило, зоны концентрации напряжений (отверстия, выточки, перепады сечений). Моделирование эффектов концентрации в лабораторных условиях проводится механическими испытаниями на растяжение плоских и цилиндрических образцов в двух вариантах:

- гладких образцов по рис. 3-а;
- плоских образцов с поперечным отверстием в рабочей части (рис. 3-б) и цилиндрических образцов с выточками в рабочей части (рис. 3-в).

У отверстия и у выточки возникают повышенные местные напряжения σ_{\max} , характеризующиеся теоретическим коэффициентом концентрации

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \geq 1, \quad (4)$$

где σ_n – номинальные напряжения в опасном сечении без учета концентрации.

В зонах концентрации имеет место и возрастание локальных напряжений σ_{\max} и деформаций e_{\max} с ростом P и σ_n . Величины деформаций e_{\max} при неупругом поведении материала с диаграммами деформирования по рис. 1, 2 увеличиваются существенно более интенсивно, чем напряжения σ_n и σ_{\max} .

В экспериментальных исследованиях распределения и перераспределения локальных деформаций использовались [1-4] различные методы:

- метод прецизионных делительных сеток и рисок с шагом $0,05 \div 0,2$ мм и с оптическим увеличением сеток в $100 \div 400$ раз;
- метод оптических тензочувствительных покрытий;
- метод хрупких тензочувствительных покрытий;
- метод лазерной интерферометрии и спеклинтерферометрии.

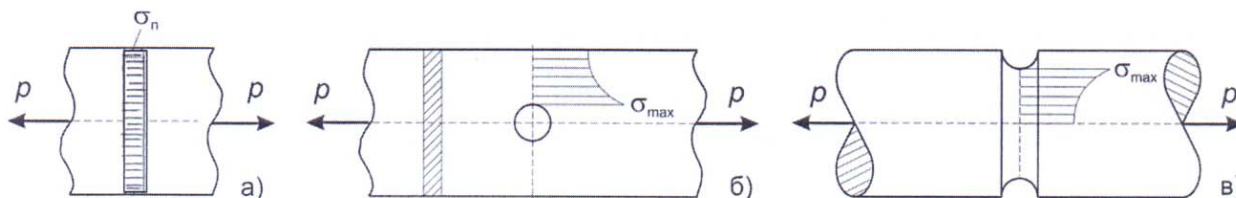


Рис. 3. Образцы для испытаний с концентрацией напряжений:
 а – гладкий (плоский или цилиндрический образец);
 б – плоский образец с отверстием; в – цилиндрический образец с выточкой

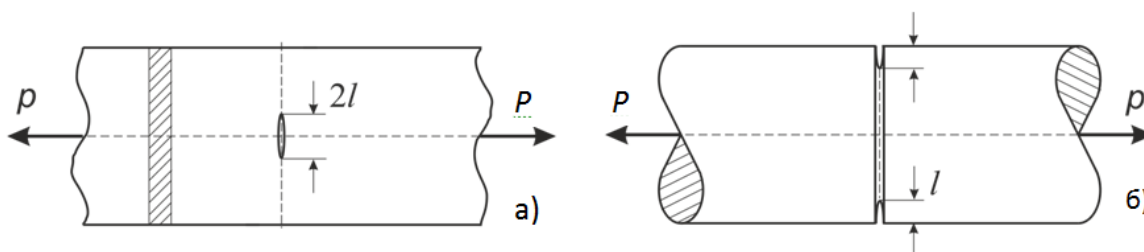


Рис. 4. Образцы с трещинами при растяжении силой P :
 а – плоский образец с центральной трещиной длиной $2l$;
 б – цилиндрический образец с кольцевой трещиной глубиной l

Метрологические данные этих методов приведены ниже.

Характеристики трещиностойкости конструкционных материалов (металлических и цементных композиций) определяются экспериментально на образцах с трещинами (рис. 4) или с предельно острыми надрезами аналогично тому, как это делалось при испытаниях образцов с конструктивной концентрацией напряжений по рис. 3.

На плоских металлических образцах (рис. 4-а) в зоне вершины трещины наносились сетки с шагом $0,05 \div 0,2$ мм для измерения локальных деформаций ϵ_{max} . Эти же деформации измеряли методами тензочувствительных покрытий и спеклинтерферометрии [1, 2, 7].

Для образцов с трещинами в их вершине создается предельно высокая концентрация напряжений по выражению (4) ($a_\sigma \rightarrow \infty$). Местные упругие напряжения в соответствии с решениями механики разрушения распределяются по степенному закону

$$\sigma_r = K_I / \sqrt{\pi r} \quad , \quad K_I = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi l} \quad ; \quad (5)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений;

r – расстояние от вершины трещины до интересующей нас точки на её продолжении.

По (5) при $r \rightarrow 0$ напряжения $\sigma_r \rightarrow \infty$.

При лабораторных испытаниях образцов из металла и бетона большое внимание уделялось процессам деформирования, повреждения и разрушения, изучаемых с применением эффекта акустической эмиссии, при измерениях высокочастотных акустических сигналов (при частотах от 100 кГц до 1,2 мГц), создаваемых движением дислокаций и в деформируемом образце или ростом трещин в разрушаемом образце [1, 3, 4, 7, 8]. Пока-

затем развитием дислокаций, микропластических деформаций и роста трещин при увеличении нарезок P на образцы по рис. 1, 2, 3, 4 служит число импульсов акустической эмиссии, их энергия и частотный спектр. Тарировка чувствительности метода акустической эмиссии на металлическом алюминиевом образце с хрупким тензочувствительным покрытием при изгибе сосредоточенной силой P (рис. 5).

Метод акустической эмиссии показал свою эффективность.

Реальные объекты из металлических и бетонных материалов в процессе эксплуатации подвергаются действию циклических нагрузок. Экспериментальные исследования закономерностей циклического деформирования, образования и развития циклических суб-микро-микро-мезо-макротрещин проводились на гладких образцах (рис. 3-а), образцах с концентрацией напряжений (рис. 3-б, 3-в) и образцах с трещинами (рис. 4-а, 4-б). В процессе испытаний измерялись локальные деформации ϵ_{\max} , растущие длины трещин l , перераспределение локальных деформаций ϵ_{\max} .

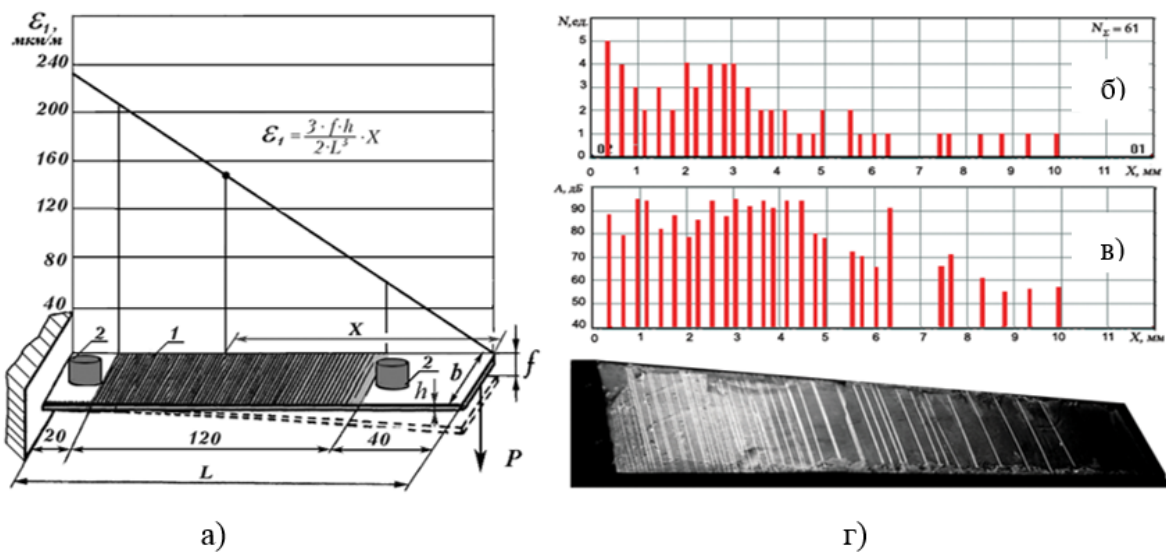


Рис. 5. Расположение тензоиндикатора (1) и преобразователей АЭ (2) на калибровочных балках, а также локационные картины распределения сигналов АЭ (б), амплитудного распределения их значений (в) и распределения трещин в хрупком слое тензоиндикатора (г)

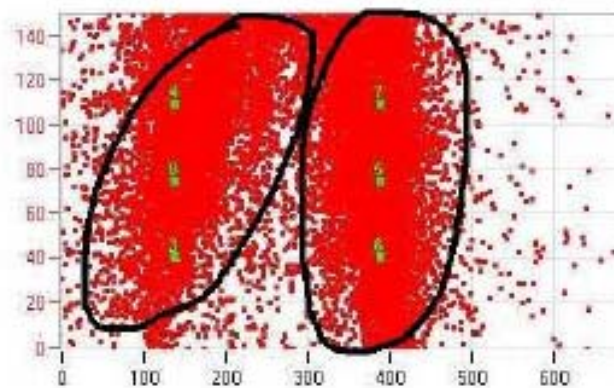


Рис. 6. Локация акусто-эмиссионных событий для образца из бетона при разрушении по первой и смешанным модам [4]

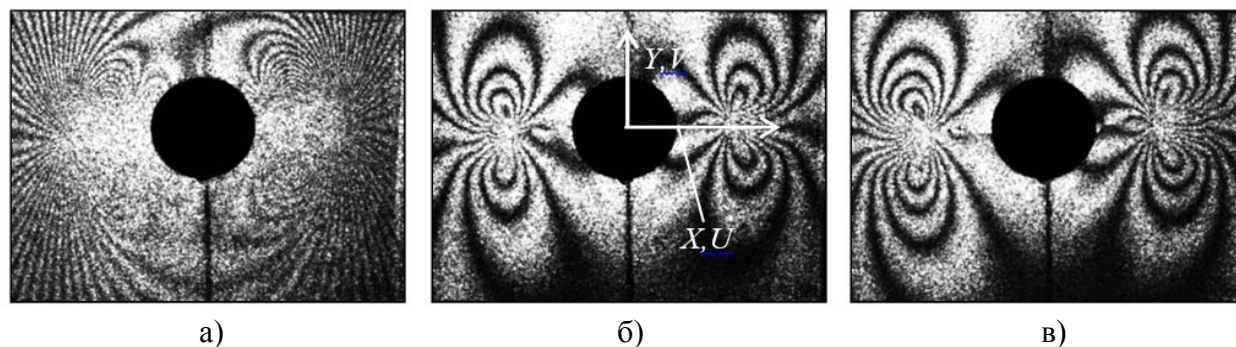


Рис. 7. Интерферограммы полей приращений остаточных перемещений, характеризующих возникновение и развитие усталостных трещин от отверстия:

а) между 7000 и 11000 циклами;
 б) между 11000 и 11100 циклами; в) между 11100 и 11150 циклами

Метод акустической эмиссии показал свою эффективность при исследовании процессов накопления повреждений и разрушения образцов и элементов конструкций, выполненных из бетонов (рис. 6) [4].

На рис. 7 представлены картины перераспределения локальных перемещений, позволяющих устанавливать деформации ϵ_{\max} до образования трещины (рис. 7-а) и в процессе её развития (рис. 7-б, 7-в)

Эти испытания позволяли построить кривые усталости в широком диапазоне числа циклов нагружения N (от 10^0 до 10^8), установить скорости развития трещин $d\ell/dN$ и стадии перехода трещин циклического нагружения в магистральную трещину окончательного разрушения.

2. Исследования микроструктурных процессов деформирования и разрушения

При испытаниях образцов по рис. 3 и 4 с помощью оптических и электронных микроскопических систем изучались механизмы микроповреждений, разрыхления материалов, условий образования и роста множественных магистральных трещин [1 - 8]. Эти данные имеют существенное значение при выборе технологий создания материалов, режимов их термической и термомеханической обработки, назначении и обосновании методов фрактографии и фрактодиагностики. При этом удастся увязать механизмы деформирования и разрушения с параметрами микроструктур и акустической эмиссии на разных стадиях деформирования и разрушения (рис. 8).

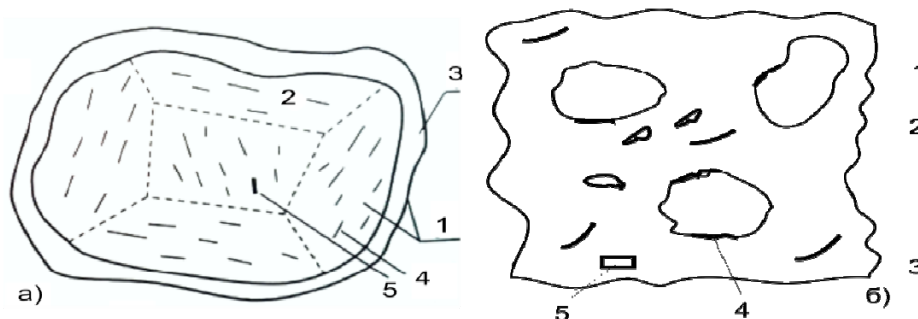


Рис. 8. Внутризеренная структура

Металлический материал: 1 – зерно; 2 – фрагмент зерна; 3 – граница зерна;
 4 – микродефекты; б – бетон: 1 – цемент; 2 – наполнитель, 3 – дефекты в цементе,
 4 – дефекты на границе с наполнителем, 5 - поры

В металлических материалах эти процессы развиваются с преобладанием пластического деформирования (за счет движения дислокаций, микросдвигов при фрагментации), а в бетонах – с преобладанием роста микро-мезодефектов и пор при ограниченных нелинейных деформациях (см. рис. 1, 2).

3. Уравнения состояния и расчеты на прочность

На базе обобщенных данных по исследованиям закономерностей деформирования различных по составу и структуре конструкционных материалов (в том числе металлы, бетоны) с использованием развиваемых моделей (рис. 1, 2, 7) деформирования, повреждения и разрушения в качестве унифицированного уравнения состояния выбрано [1 - 4] степенное уравнение, связывающее напряжения σ и деформации e (в истинных координатах) по рис. 1, 2

$$\sigma = \sigma_T (e / e_T)^m, \quad (6)$$

где σ_T – предел текучести;

e_T – деформация предела текучести;

m – показатель упрочнения в упругой и упругопластической области.

Деформация предела текучести на участке упругого деформирования $0 \leq \sigma \leq \sigma_T$ равна

$$e_T = \sigma_T / E, \quad (7)$$

где E – модуль продольной упругости.

Таким образом, определяющими параметрами материала оказываются σ_T , E , m .

Выражение (6) может быть записано в унифицированной форме (рис. 9)

$$\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_T, \quad \bar{e} = e / e_T, \quad \bar{\sigma} = \bar{e}^m. \quad (8)$$

По выражению (8) единственным базовым параметром диаграмм деформирования металла и бетона оказывается показатель упрочнения

$$m = d\sigma / de. \quad (9)$$

Как видно из рис. 1 и 2, показатель упрочнения металла меньше, чем у бетона.

Для сталей величина $m=0,05 \div 0,25$, для бетонов $m=0,3 \div 0,6$.

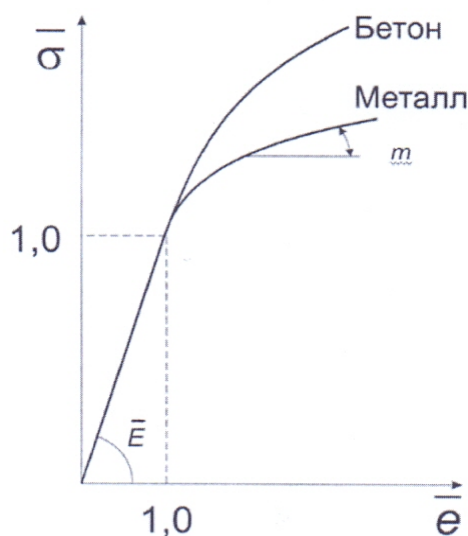


Рис. 9. Диаграмма деформирования в относительных координатах для металла и бетона

На участке упругого деформирования при $0 \leq e \leq e_T$ на основе (6) и (8)

$$\sigma = eE; \bar{\sigma} = \bar{e}; m=1=\bar{E} \quad (10)$$

На участке неупругого (упругопластического) деформирования при $e_T \leq e \leq e_K$

$$\sigma = \sigma_T (e / e_T)^m; \bar{\sigma} = \bar{e}^m; 0 \leq m \leq 1. \quad (11)$$

При отсутствии экспериментальных диаграмм деформирования показатель упрочнения для сталей может быть определен через характеристики стандартных механических свойств в точках перехода от упругого к упругопластическому деформированию (σ_T, e_T) и окончательного разрушения (S_K, e_K).

$$m = \frac{\ell_g(S_K / \sigma_T)}{\ell_g(e_K / e_T)} \quad (12)$$

Для металлов и бетонов в зонах концентрации (отверстия и выточки по рис. 3) локальные напряжения σ_{max} и деформации e_{max} оказываются выше номинальных напряжений $\sigma = \sigma_n$ и деформаций $e = e_n$.

В области упругих деформаций при $0 \leq e \leq e_T$.

$$\sigma_{max} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_n; \bar{\sigma}_{max} = \alpha_\sigma \cdot \bar{\sigma}_n; e_{max} = \alpha_e \cdot e_n; \bar{e}_{max} = \alpha_e \cdot \bar{e}_n, \quad (13)$$

где α_σ, α_e – теоретические коэффициенты напряжений и деформаций соответственно.

Так как при этом $\sigma_{max} = E e_{max}$ и $\bar{\sigma} = \bar{e}$, то

$$\alpha_\sigma = \alpha_e. \quad (14)$$

С переходом к стадии упругопластического деформирования в соответствии с диаграммами на рис. 9 локальные напряжения $\sigma_{max}, \bar{\sigma}_{max}$ ($\bar{\sigma}_{max} \geq 1$) увеличиваются в меньшей степени, чем деформации e_{max}, \bar{e}_{max} ($\bar{e}_{max} \geq 1$). При этом вместо коэффициентов α_σ, α_e для упругих деформаций в анализ вводятся коэффициенты концентрации напряжений K_σ и деформаций K_e для упругопластических деформаций.

Многочисленными расчетами (аналитическими и численными методами) и экспериментами (методами тензометрии, сеток, голограмм, покрытий) было показано [1, 9], что с увеличением $\bar{\sigma}_n$ и \bar{e}_n коэффициенты концентрации деформаций K_e увеличиваются, а коэффициенты концентрации напряжений снижаются.

$$K_e \leq \alpha_e, K_\sigma \leq \alpha_\sigma \text{ при } \bar{\sigma}_n \geq 1 / \alpha_\sigma. \quad (15)$$

Определяющие уравнения для описания перераспределения напряжений и деформаций расчета коэффициентов их концентрации были получены [1, 9] на базе модификации решения Нейбера

$$K_\sigma \cdot K_e = \alpha_\sigma^2 \cdot F \{ \alpha_\sigma, \bar{\sigma}_n, m \}. \quad (16)$$

В решении Нейбера функционал выражения (16) $F=1$. В модифицированное выражение этот функционал был принят в форме

$$F \{ \alpha_\sigma, \bar{\sigma}_n, m \} = 1 / (\alpha_\sigma \cdot \bar{\sigma}_n)^{n(1-m) [1 - (\bar{\sigma}_n^{-1} \alpha_\sigma)]}, \quad (17)$$

где n – постоянная, принимаемая равной 0,5.

Для упругого деформирования металла или бетона $m=1$ и $F=1$.

Соответствие вида функционала F в выражениях (16), (17) данным расчетов (линии) и экспериментов (точки) представлено в [1].

Уравнения (11), (16) и (17) позволяют расчетом определить коэффициенты концентрации напряжений K_σ и деформаций K_ϵ при заданных α_σ , $\bar{\sigma}_n$, m как в области номинальных упругих напряжений ($\bar{\sigma}_n \leq 1$), так и при развитом пластическом деформировании ($\bar{\sigma}_n \geq 1$).

$$\begin{aligned} K_\epsilon &= \alpha_\sigma^{2/(1+m)} \cdot \bar{\sigma}_n^{(1-m)/(1+m)} \cdot F \text{ при } \bar{\sigma}_n \leq 1, \\ K_\epsilon &= \alpha_\sigma^{2/(1+m)} \cdot F \text{ при } \bar{\sigma}_n \geq 1, \\ K_\sigma &= \alpha_\sigma^{2m/(1+m)} / \bar{\sigma}_n^{(1+m)/(1-m)} \cdot F \text{ при } \bar{\sigma}_n \leq 1, \\ K_\sigma &= \alpha_\sigma^{2/(1+m)} \cdot F \text{ при } \bar{\sigma}_n \geq 1. \end{aligned} \tag{18}$$

Отмеченные выше особенности изменения K_σ и K_ϵ при увеличении номинальных напряжений $\bar{\sigma}_n$ для металла и бетона представлены на рис. 10.

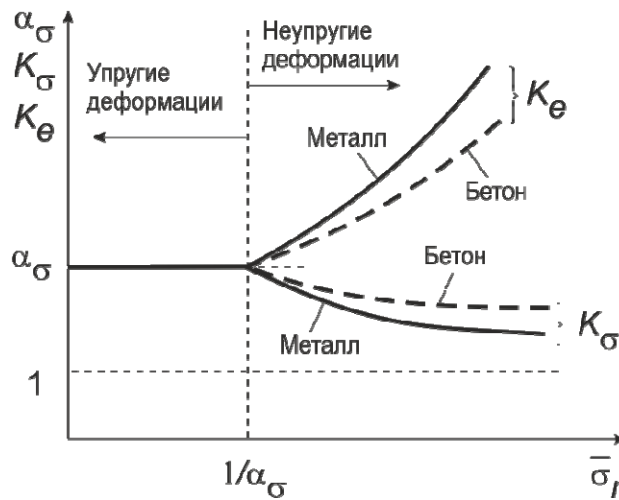


Рис. 10. Изменение коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в металле и бетоне при увеличении номинальных напряжений

Для получения условий разрушения в металле и бетоне при наличии концентрации напряжений в [1, 2, 9] было предложено использовать вместо традиционного силового критерия прочности в виде разрушающих напряжений σ_b и S_k по выражению (3) деформационный критерий в виде разрушающей деформации ϵ_k по выражению (2). Тогда по деформационному критерию разрушения условие образования трещины (или разрушения) в зоне концентрации будет описываться уравнением

$$\bar{\epsilon}_{\max} = \bar{\epsilon}_n \cdot K_\epsilon = \bar{\epsilon}_k. \tag{19}$$

Для металлических образцов с отверстием (рис. 3) при $\alpha_\sigma = 3$ величина K_ϵ при росте $\bar{\epsilon}_n$ и $\bar{\sigma}_n$ оказывается на уровне $\alpha_\sigma^2 = 9$ и выше, а величина $K_\sigma \rightarrow 1$. Тогда номинальная критическая (разрушающая) деформация по (19)

$$\bar{\epsilon}_{nk} = \bar{\epsilon}_k / \alpha_\sigma^2. \tag{20}$$

Для образцов из бетона по (18) величина K_ϵ получается на уровне 3,3-4,2, что в 2 раза меньше, чем для стали. Но для бетона разрушающая деформация $\bar{\epsilon}_k$ существенно (на 1,5 порядка) ниже, чем для металла (см. рис. 2 и табл. 1).

Эти данные указывают на высокую опасность наличия конструктивных зон концентрации в бетонных несущих элементах, особенно в зонах растяжения, где имеет место концентрация напряжений и деформаций.

Интегральная прочность, выражаемая через номинальные разрушающие напряжения $\bar{\sigma}_n$ с учетом (11) и (20), будет определяться по выражению

$$\bar{\epsilon}_{нк} = \bar{\epsilon}_{нк}^m = (\bar{\epsilon}_к / K_e)^m (1 - \psi_b), \quad (21)$$

где ψ_b - сужение образца в шейке на уровне предела прочности.

Для элемента конструкции из стали и бетона при наличии концентрации ($\alpha_\sigma = 3$) с учетом своих величин $\bar{\epsilon}_к$, K_e и m можно получить относительные величины номинальных критических (разрушающих) напряжений $\sigma_{нк}$ (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Исходные расчетные характеристики для металла и бетона

№	Материалы	Растяжение			Сжатие		
		σ_T , МПа	ϵ_k , %	m	σ_T	ϵ_k	m
1	Сталь	280	70	0,22	-	-	
2	Бетон	10	0,25	0,35	30	1,5	0,40

Таблица 3

Характеристики прочности для элемента конструкции с отверстием из металла и бетона

№	Материал	α_σ	K_e	$\bar{\epsilon}_к$	ψ_b	$\bar{\sigma}_{нк}$ растяжение	$\bar{\sigma}_{нк}$ сжатие
1	Сталь	3	9	300	0,15	2,25	-
2	Бетон	3	4,2	6	0,01	1,15	1,25

Приведенным расчетным относительным величинам номинальных разрушающих напряжений $\bar{\sigma}_{нк}$ по табл. 2, 3 соответствуют свои абсолютные предельные характеристики прочности для элемента конструкции с отверстием: при растяжении для стали $\sigma_{нк} = 630$ МПа, для бетона $\sigma_{нк} = 11,5$ МПа. При сжатии бетона прочность возрастает до $\sigma_{нк} = 37,5$ МПа.

Трещины в металле и бетоне создают предельно высокую концентрацию напряжений в её вершине (см. рис. 4). Для пластины с трещиной, имитируемой центральным эллиптическим отверстием с радиусом закругления ρ и длиной 2ℓ .

$$\alpha_\sigma = 1 + 2\sqrt{\ell/\rho}. \quad (22)$$

При $\rho \rightarrow 0$ по выражению (22) теоретический коэффициент концентрации $\alpha_\sigma \rightarrow \infty$.

Это согласуется с выражением (5). В таком случае расчет прочности в классическом представлении по выражению (21) теряет смысл. В линейной механике разрушения распределение напряжений на расстоянии r от вершины трещины описывается уравнением (5) и тогда

$$\sigma_r = \sigma_n \sqrt{\ell/r}; \quad \epsilon_r = \epsilon_n \sqrt{\ell/r}. \quad (23)$$

Для расчетов с учетом (4) можно ввести понятие переменного по r коэффициента концентрации напряжений

$$\alpha_{\sigma r} = \sqrt{\ell/r}. \quad (23)$$

Используя (18) можно получить распределение напряжений σ_r и деформаций e_r у вершины трещины для стадий упругого ($m=1$) и неупругого (упругопластического) деформирования ($0 \leq m \leq 1$). Это позволяет по аналогии с анализом концентрации напряжений K_σ и деформаций K_e по (18) в нелинейной области получить коэффициенты интенсивности напряжений $K_{I\sigma}$ и деформаций K_{Ie} . В относительных координатах « $\bar{\sigma}$ — \bar{e} » по (6) и (8) зависимости (5), (18), (23) позволили получить

$$\begin{aligned} \bar{K}_{Ie} &= \bar{K}_I^{P_{ke}}, \quad \bar{K}_{I\sigma} = \bar{K}^{K\sigma} \\ P_{ke} &= \frac{2-n(1-m)(1-\bar{\sigma}_n)}{1+m}; \quad P_{k\sigma} = \frac{m[2-n(1-m)(1-\bar{\sigma}_n)]}{1+m} \\ \bar{K}_I &= \bar{\sigma}_n \sqrt{\pi \ell}. \end{aligned} \quad (24)$$

Результаты сопоставления расчетных и экспериментально определенных (методом секток) интенсивностей локальных деформаций \bar{e}_{\max} ($1 \leq \bar{e}_{\max} \leq 200$) у вершины трещины подтвердили приемлемость степенных уравнений (5), (19), (24).

Условия разрушения элемента с трещиной в соответствии с деформационным критерием разрушения по аналогии с (21) записываются [1] в форме

$$\bar{K}_{Ie} = \bar{\sigma}_{nk}^{(1-m)/m(1+m)} \cdot \bar{K}_{Ic}^{P_{ke}} = \bar{K}_{Iec}, \quad \bar{K}_{Iec} = \bar{e}_k \sqrt{2\pi \ell}, \quad (25)$$

где \bar{K}_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений при хрупком разрушении, определяемый стандартными испытаниями.

Для металлических или бетонных образцов или элементов конструкций с одинаковыми трещинами величины \bar{K}_{Iec} зависят в основном от предельной пластичности \bar{e}_k (табл. 2, 3). У стали эти характеристики существенно (в 80- 120 раз) выше, чем у бетона. Тогда сопоставимая величина номинальных разрушающих напряжений $\bar{\sigma}_{nk}$ у стали и бетона будут

$$\bar{\sigma}_{nk} = \bar{e}_k^{m(1+m)/(1-m)}. \quad (26)$$

В табл. 4 приведено расчетное сопоставление этих напряжений для стали и бетона.

Таблица 4

Разрушающие напряжения при наличии трещин для стали и бетона

№	Материал	\bar{e}_k	m	$\bar{\sigma}_{nk}$
1	Сталь	500	0,22	8,7
2	Бетон	4	0,35	2,7

Отношение разрушающих напряжений $\bar{\sigma}_{nk}$ для стали и бетона равно 3,2. Но отношение пределов текучести для стали и бетона по табл. 2 равно 28. Таким образом, наличие трещин оказывается одним из важных факторов снижения трещиностойкости конструкций из бетона.

4. Обоснование безопасности высокорисковых конструкций по критериям прочности и риска

Сформированные в п. 3 многоуровневые модели упругого и упругопластического деформирования металлических и бетонных материалов позволяют вести расчетные обоснования безопасности по критериям прочности и риска ответственных конструкций.

Исходными для оценки безопасности [1] на основе системы выражений (1) – (26), описывающих процессы деформирования и разрушения принимаются следующие положения:

- все особенности и тонкости микро-мезо-макропроцессов деформирования, повреждения и разрушения в разноуровневых компонентах структур металлических и цементных композиций проявляются через диаграммы деформирования по рис. 1, 2, 6, для которых выделяются характерные точки (σ_T , σ_B , S_K , ψ_K) и описываются уравнения состояния по выражениям (6)- (12);

- понимание структурно-механических факторов сводится к обоснованному выбору материалов и технологий их изготовления, направленных на повышение прочности и пластичности;

- для расчетного анализа напряженно-деформированных состояний несущих элементов конструкций используются аналитические выражения (13)÷ (20);

- предельные состояния на стадии образования и развития трещин моделируются аналитическими методами на базе деформационных критериев разрушения по выражениям (1)- (3), (19)- (26).

Указанные выше положения могут быть использованы для сопоставительного анализа безопасности металлических и бетонных материалов и конструкций по следующей процедуре.

Как показано в п.п. 1- 3, применительно к металлам и бетону возможно обоснование и применение ряда основополагающих закономерностей и механизмов деформирования и разрушения, определяющих уравнений и их параметров.

Обобщенные модели процессов деформирования и разрушения $M_{\sigma e}$ в форме выражений (6), (8), (11), (12), (18), (21), (24) – (26) в металлах и бетоне определяют форму кривых деформирования, связывающих текущие значения напряжений σ и деформаций e , в расчетах и экспериментах при заданных силовых воздействиях P и размерах сечения F_S несущих элементов

$$\{\sigma, e\} = F \{M_{\sigma e}, P, F_S\}, \quad (27)$$

где $M_{\sigma e}$ – обобщенный параметр материала, учитывающий его основу, структуру, термомеханическую обработку, исходную технологическую дефектность.

Для конструкций из металлов и бетонов на диаграмме $\{\sigma, e\}$ по рис. 1, 2, 9 следует выделить участки:

- равномерного упругого деформирования с микропластическими деформациями в структурах без учета изменения сечения F_S ;

- окончание упругого деформирования с характерной точкой с координатами σ_T , e_T на стадии перехода к неупругому равномерному деформированию с образованием макропластических деформаций и изменении сечения F_S ;

- окончание равномерного деформирования в точке предела прочности с координатами σ_B , e_B с образованием шейки и с интенсивным развитием микро-мезоповреждаемости и снижением усилий P на развитие деформаций;

- окончательное разрушение в критической точке K с координатами σ_{BK} , S_K , e_K .

Эти общие закономерности с учетом (27) представлены едиными определяющими уравнениями степенного вида с унифицированными параметрами материала и конструкции

$$\{\sigma, e\} = F \{E(\sigma_T, e_T), m, F_S\}, \quad (28)$$

где E – модуль упругости для начального линейного участка деформирования;

m – показатель упрочнения для нелинейного участка.

Экспериментальное определение параметров E, m, σ_T, e_T для лабораторных образцов из любого материала (в том числе металла и бетона) позволяет расчетом получить всю диаграмму деформирования для элемента конструкции с учетом F_S .

Деформирование и разрушения элемента конструкции сечением F_S с начальным размером F_0 при статическом нагружении осуществляется по параметрам критической нагрузки P_k , критического размера сечения F_k в зоне разрушения. По этим параметрам для несущего элемента конструкции устанавливаются:

- условное разрушающее напряжение

$$\sigma_k = P_k / F_0; \quad (29)$$

- истинное разрушающее напряжение

$$S_k = P_k / F_k; \quad (30)$$

- относительное сужение в зоне разрушения

$$\psi_k = (F_0 - F_k) / F_0; \quad (31)$$

- истинная логарифмическая деформация при разрушении

$$e_k = \ell_n [1 / (1 - \psi_k)], \quad m = \frac{\lg(e_k / e_T)}{\lg(S_k / \sigma_T)} = e_B, \quad (32)$$

где e_B – предельная равномерная деформация на уровне предела прочности.

Выражения (28) - (32) дают возможность количественно определить с учетом F_S показатель упрочнения m как главную характеристику упругого и неупругого деформирования.

Расчеты (численные и аналитические) конструкций из металла и бетона, имеющих различные размеры сечений F_S предлагается проводить с учетом расчетной оценки масштабного фактора при использовании степенных уравнений, подтвержденных экспериментами при вариации размеров сечений F_0 и концентрации F_S

$$\{\sigma_T, \sigma_B, \psi_k\} = \{\sigma_{TO}, \sigma_{BO}, \psi_{KO}\} (F_0 / F_S)^{m_{TBK}} \quad (33)$$

где m_{TBK} – характеристики материала, зависящие от стандартных механических свойств $\sigma_{TO}, \sigma_{BO}, \psi_{KO}$.

По данным выполненных в проекте исследований и литературным данным [1] для металлов $m_{TBK} \leq 0,01-0,04$. Для бетонов по литературным данным этот показатель в 1,2-1,4 раза выше.

При наличии в элементах концентрации напряжений (с теоретическим коэффициентом концентрации α_σ в упругой области) развитие неупругих деформаций создает перераспределение напряжений $\bar{\sigma}_{max}$ в зонах концентрации. Это перераспределение характеризуется коэффициентами концентрации напряжений K_σ и деформаций K_e , зависящих от α_σ , уровня относительных номинальных напряжений $\bar{\sigma}_n$ и показателя упрочнения m .

$$\{K_\sigma, K_e\} = F \{ \alpha_\sigma, \bar{\sigma}_n, m, F_S \}. \quad (34)$$

Для одинаковых условий $\bar{\sigma}_n$ и α_σ , но отличающихся m для металлов и бетонов в сторону увеличения, коэффициенты K_e у металлов будут больше, чем у бетона, а коэффициенты K_σ – наоборот.

Используя деформационный критерий разрушения для несущего элемента конструкции

$$\bar{e}_{max} = K_e \cdot \bar{e}_{nk} = K_e (\sigma_{nk}^{1/m}) = \bar{e}_k, \quad (35)$$

можно вести расчеты прочности в величинах номинальных напряжений $\bar{\sigma}_{nk}$ и деформаций \bar{e}_{nk} . Экспериментальная проверка достоверности расчетов по (3) проводилась на

стальных сосудах давления, трубопроводах, дисках турбин [1]. Для бетонных конструкций такая проверка выполнялась в традиционной форме нормативных расчетов по допускаемым напряжениям.

При наличии в элементах конструкций дефектов типа трещин с размером ℓ расчеты выполняются не в коэффициентах концентрации $\alpha_\sigma, K_\sigma, K_\epsilon$ по (34), (35), а в коэффициентах интенсивности напряжений $K_I, \bar{K}_{I\sigma}$ и деформаций $\bar{K}_{I\epsilon}$ по (24), (25)

$$\{\bar{K}_{I\sigma}, \bar{K}_{I\epsilon}\} = F\{\bar{K}_I, \bar{\sigma}_n, m, F_S\}, \quad (36)$$

где $\bar{K}_I = \bar{\sigma}_n \sqrt{\pi \ell}$ - относительный коэффициент интенсивности напряжений в элементе конструкции с дефектом ℓ по уравнениям линейной механики разрушения.

В элементах конструкций для величин $\bar{K}_{I\sigma}$ и $\bar{K}_{I\epsilon}$ качественное отличие металлов и бетонов будет таким же, как для коэффициентов концентрации K_σ и K_ϵ в лабораторных образцах (табл. 2, 3, 4).

Условия разрушения элемента конструкции при наличии трещин по деформационному критерию будет записываться аналогично выражению (35) при замене K_ϵ на $\bar{K}_{I\epsilon}$.

При одинаковых $\bar{\sigma}_n, \ell$ различие в трещиностойкости (прочности с учетом трещин) металлов и бетонов получается меньше, чем при наличии конструктивной концентрации напряжений.

Для удовлетворения заданных требований безопасности к металлическим и бетонным конструкциям по показателям прочности, пластичности, трещиностойкости необходимы разработка, обоснование вероятностных параметров его химического состава, структуры, физико-математических свойств, технологий изготовления материала и конструкций.

Реализация этих требований осуществляется [1, 2]:

- через систему стандартных, унифицированных и нестандартных испытаний на лабораторных образцах (рис. 1, 2) в статистической постановке с учетом выражений (1) – (26);
- через систему статистических исследований эксплуатационных условий нагружения с учетом расчетных параметров в выражениях (27) – (36).

Для металлических материалов по данным испытаний серий 20 – 50 образцов по этим данным строятся функции распределения прочности $P(\sigma)$ и пластичности $P(\epsilon)$ с установлением варьированных значений предела текучести σ_T , предела прочности σ_B и относительного сужения ψ_K . По ним определяются их средние $\sigma_{Bm}, \sigma_{Tm}, \epsilon_{km}$ значения и коэффициенты вариации ν_σ и ν_ϵ .

Для количественных оценок безопасности металлических и бетонных конструкций используются унифицированные расчеты на прочность в напряжениях σ и деформации $\bar{\epsilon}_K$ константы материала – относительной критической (разрушающей)

$$P_\sigma = F\left\{\left(\sigma_{Tm}, \sigma_{Bm}\right), \nu_\sigma\right\}; P_\epsilon = F\left\{\left(\psi_K, \epsilon_K\right), \nu_\epsilon\right\}, \quad (37)$$

$$\sigma = \sigma_{\max}^3 = F\left\{\frac{P^3, M_{и}^3, M_{к}^3}{F_S, W_0, W_P}\right\} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{оп}}{n_\sigma} = \min\left\{\frac{\sigma_T}{n_T}, \frac{\sigma_B}{n_\epsilon}\right\}, \quad (38)$$

где σ_{\max}^3 – максимальное напряжение в опасной точке опасного сечения элемента конструкции;

$P^3, M_{и}^3, M_{к}^3$ – максимальные осевые усилия, изгибающий и крутящий момент при эксплуатации соответственно;

F_S, W_0, W_P – площадь опасного поперечного сечения, осевой и поперечный момент сопротивления соответственно;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение;

$\sigma_{оп}$ – опасное напряжение (σ_T или σ_B);

n_σ, n_T, n_B – запасы прочности по напряжениям σ , пределам текучести σ_T , пределам прочности ($n_\sigma \geq 1, n_T \leq n_B$).

В уточненных поверочных расчетах по деформационным критериям [1, 2] вместо силовых параметров в (38) с учетом выражений (2), (6) – (13), (19), (26), (27) вводятся

$$e_{max}^3, [e], e_{оп}, e_T, e_K, n_e, n_{eT}, n_{eK}.$$

$$P_e = F \{P_\sigma\}; e = e_{max}^3 = F \{\sigma_{max}^3\} \leq [e] = \frac{e_{оп}}{n_e} = \min \left\{ \frac{e_T}{n_{eT}}, \frac{e_K}{n_{eK}} \right\} \quad (39)$$

При этом важной является связь между запасами n_σ и n_e ($n_\sigma \leq n_e$).

Принимая вероятность распределения всех указанных выше параметров по (37) и (39), можно расчетом определить критическую вероятность образования недопустимых пластических деформаций при достижении σ_{max}^3 или e_{max}^3 опасной критической величины $\sigma_{оп}$ и $e_{оп}$ с учетом средних значений и коэффициентов вариации в процессе эксплуатации

$$\{P_{к\sigma}^3, P_{ке}^3\} = F \left\{ \left(\sigma_{max}^3, (\sigma_{Tm}, \sigma_{Bm}), \nu_\sigma \right), \left(e_{max}^3, e_{Km}, \nu_e \right) \right\}. \quad (40)$$

Это дает возможность определить риск R возникновения критически опасной ситуации (по развитию деформаций или разрушению) при назначенных запасах n_σ, n_T, n_B, n_e .

$$R = \max \{P_{к\sigma}^3, P_{ке}^3\} \leq [R] = \frac{R_K}{n_R}, \quad (41)$$

где $[R]$ – приемлемый риск;

R_K - критический (недопустимый) риск;

n_R – запас по рискам ($n_R \geq n_e$).

Так как коэффициенты вариации ν_σ и ν_e у металлов ниже, чем у бетонов, то для снижения рисков аварий на конструкциях из бетона запасы прочности n_σ и n_e должны быть выше. По величинам рисков R и $[R]$ в (41) принимаются решения о допустимости безопасной эксплуатации конструкций из металлических и цементных композиций.

5. Заключение

Выполненные российскими и индийскими специалистами сопоставительные исследования прочности, деформативности, трещиностойкости, безопасности и рисков конструкций из металлических и цементных композиций показали принципиальную возможность использования унифицированных моделей деформирования, повреждения и разрушения и определяющих уравнений линейного и степенного вида с существенно различающимися параметрами этих уравнений. Принципиальное количественное различие в опасную сторону несущей способности, прочности и безопасности конструкции из металлов и бетонов определяются их исходной пластичностью (ψ_K, e_K), анизотропией свойств (σ_T, σ_B) у бетонов при растяжении и сжатии (F_S) и коэффициентов вариации прочности и пластичности (ν_σ, ν_e).

Сказанное подтверждает необходимость проведения дальнейших научных исследований и практических разработок для этих двух групп конструкционных материалов с учетом их одновременного применения в уникальных высоко ответственных конструкциях (атомных электрических станциях, тепловых и гидравлических станциях, плотинах, мостах, строительных зданиях и сооружениях).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-58-48008 ИНД_оми)

Литература

1. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука. - 2017. – 724 с.
2. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Соппротивление деформированию и накопление поврежденный структурно-нестабильного материала при циклическом упругопластическом деформировании//Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2019. № 5. С. 70-76.
3. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М: Наука. - 2008. 334 с.
4. Santosh G.Shah,J.M.ChandraKishen. Use of acoustic emissions in flexural fatigue crack growth studies on concrete. Engineering Fracture Mechanics. - 2012, Volume 87, pp. 36-47
5. Bažant Z.P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal / Journal of Engineering Mechanics. - 1984. Vol. 110. №4. pp. 518–535.
6. Kirane K., Bažant Z.P. Size effect in Paris law and fatigue lifetimes for quasibrittle materials: Modified theory, experiments and micro-modeling / International Journal of Fatigue. - 2016. Vol. 83. pp. 209–220.
7. Разумовский И.А., Одинцев И.Н. Экспериментальный анализ нелинейных динамических процессов с использованием оптико-интерференционных методов//Вестник научно-технического развития. - 2012. № 8 (60). С. 35-56.
8. Ботвина Л.Р., Шувалов А.Н., Тютин М.Р., Петерсен Т.Б., Левин В.П., Федоров М.В. Влияние размера образца на механические и акустические характеристики бетона. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2019, том 85, №10. – С. 55 – 63.
9. Makhutov N, Reznikov D (2019) Generalization of Neuber’s rule for the Assessment of local stresses and strains in stress concentration zones for a wide range of applied strains. ProceedingsStructuralIntegrity 14:199–206
10. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука. - 2008. – 528 с.
11. Keerthana K., ChandraKishen J.M. Micromechanics of fracture and failure in concrete under monotonic and fatigue loadings. Mechanics of Materials.V 148. - 2020, 103490

Информация об авторах

Романов Александр Никитович, зав. отделом, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, alrom37@mail.ru

Чандра Кишен Д.М., профессор, Индийский институт науки. Бангалор. Индия (J. M. Chandra Kishen — Professor, Indian Institute of Science, Bangalore, INDIA)

Махутов Николай Андреевич, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, kei51@mail.ru

Резников Дмитрий Олегович, вед. научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, mibsts@mail.ru

Ботвина Людмила Рафаиловна, главный научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 119334, Москва, Ленинский проспект, д. 49, l.botvina@mail.ru