

М.Г. СТАКЯН, Н.В. ПИРУМЯН, А.Ю. САФАРЯН

**ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ
НАПРЯЖЕНИЙ**

Рассматривается влияние концентрации напряжений, как приоритетного фактора в условиях комплексного воздействия ряда основных факторов (режима нагружения, материаловедческого, масштабного, поверхностных микронеровностей, упрочнения и суммарного процесса), на сопротивление усталости строительных конструкций, которое оценивается соответствующими относительными коэффициентами и исходным пределом выносливости. Для оценки данной взаимосвязи представлена многопараметрическая функциональная связь. Построена номограмма для расчета оптимальных параметров, относительных коэффициентов и их применения в расчетных процедурах

Ключевые слова: строительная конструкция, сопротивление усталости, действующий фактор, концентрация напряжений, номограмма.

Введение. Проектирование, создание и совершенствование конструкций и технологического оборудования – это творческий процесс, продиктованный современными потребностями в определенной сфере человеческой деятельности. Конструкции должны соответствовать современному уровню техники, быть конкурентоспособными, обеспечить решения предложенных задач с минимальной материалоемкостью и финансовыми затратами. Такой подход предполагает повторное проектирование конструкций и выбор из них оптимального варианта, который должен иметь современный вид.

Развитие техники и непрерывное совершенствование строительных конструкций (местные и маршрутные газотранспортные системы – ГТС) в связи с предложением многофункциональных задач в значительной степени осложняют расчетный процесс и требуют применения методов автоматического проектирования для решения трудоемких задач и многопараметрического учета действующих факторов. Уточнение расчетных процедур конструкций связано с предварительным исследованием их режимов нагружения, которые носят неслучайный и сложно-циклический характер, вызванный комплексным воздействием значительного числа внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся: режим производственного цикла конструкции, дневные и

сезонные отклонения погоды, атмосферное воздействие, вибрации и сейсмичность среды, а также применение упрочняющих технологий. К внутренним относятся: геометрические формы элементов, тип соединений (участки сварных швов трубопроводов ГТС), микроструктурное состояние материала, микрогеометрия рабочих поверхностей и концентрации напряжений в элементах конструкций. В итоге ответственные элементы и соединения конструкций работают в режиме циклического сложно-напряженного состояния, и их отказы в подавляющем большинстве случаев носят усталостный характер (примерно 75%). Поэтому в целях повышения уровня эксплуатационной надежности конструкций необходимо выполнить методы вероятностных расчетов с применением принципов математической статистики и параметрической надежности, обеспечивающих уровень надежности неразрушения примерно на $P(N) = 0,96...0,99$ [1-3].

Для изучения процессов усталостного разрушения, которое является основным показателем несущей способности конструкций, выполнен большой объем теоретических и экспериментальных исследований [4-7] с целью выявления уровня воздействия каждого из вышеуказанных факторов, а результаты сгруппированы, и параметры каждого фактора в отдельном виде представлены в справочной литературе. Использование в конструкциях низко- и среднеуглеродистых сталей предполагает применение упрочняющих технологий, благодаря которым несущая способность элементов, в зависимости от степени пластичности материалов, повышается примерно на 150...200%, а срок службы – в 2,0...2,5 раза. К числу наиболее распространенных методов упрочнения относится поверхностное пластическое деформирование (ППД) рабочих поверхностей элементов конструкций, которое благодаря созданию в поверхностных слоях остаточных сжимающих напряжений предотвращает возникновение циклических повреждений. Из указанных методов наиболее распространенным является пластическое деформирование специальным инструментом с круглообкаточными роликами (шариками), под воздействием нормальной силы и продольной подачи которого на обработанной поверхности создается оптимальная микроструктура и упрочненный слой. Совместное влияние указанных факторов, которое сравнительно мало изучено, в значительной степени меняет структуру несущей способности конструкций. При этом возможно как повышение усталостной прочности (упрочняющие технологии), так и ее значительное снижение в зависимости от концентрации напряжений, микрогеометрии поверхностей и влияния коррозии.

Целью работы является изучение усталостной прочности конструкций при комплексном воздействии факторов и составление номограмм для их графической оценки с применением программных средств.

Постановка задачи и обоснование методики. Для выполнения данного исследования применены следующие методы:

- *конструкционной механики* – для учета комплексного воздействия факторов усталостного процесса, представленных в виде относительных коэффициентов, представляющих отношения медианных пределов выносливости исходных и рассматриваемых факторов, которые получены при усталостных испытаниях стальных образцов [8-10]:

а) масштабного коэффициента:

$$K_{d\sigma} = \sigma_{Rd_{гЛ}} / \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} \leq 1; \quad (1)$$

б) коэффициента концентрации напряжений:

$$K_{\sigma} = \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} / \sigma_{Rdк} > 1; \quad (2)$$

в) коэффициента микроповерхностного состояния:

$$K_{F\sigma} \sigma_{RFd} / \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} \leq 1; \quad (3)$$

г) коэффициента упрочнения:

$$K_{v\sigma} = \sigma_{Rvd} / \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}} \geq 1; \quad (4)$$

д) суммарного коэффициента:

$$K_{\sigma D} = K_{\sigma} / (K_{d\sigma} \cdot K_{F\sigma} \cdot K_{v\sigma}); \quad (5)$$

- *математической статистики* – для определения регрессионных уравнений параметров взаимосвязанных факторов, полученных в результате усталостных испытаний, применяя стандартные программные средства;

- *системного анализа взаимодействия факторов* – для классификации, оформления систем регрессионных уравнений факторов и количественной оценки их взаимодействия;

- *номографическое представление систем уравнений* – для графического представления функциональных связей параметров с целью их определения и применения в уточненных расчетах на усталостную прочность элементов конструкций.

Идентичность структур коэффициентов (1) - (5) и их общая взаимосвязь в усталостном процессе позволяют представить их в виде многопараметрической функции

$$\Phi[(\Delta h, d, \bar{\alpha}_{\sigma}), (K_{d\sigma}, K_{\sigma}, K_{F\sigma}, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}, \bar{\sigma}_{Rd_{0гЛ}})] = 0, \quad (6)$$

где $\Delta h, d$ – толщина упрочненного поверхностного слоя и диаметр испытанного образца, мм; $\bar{\alpha}_{\sigma}$ – медианное значение теоретического коэффициента концентрации напряжений. Функция (6) в расчетной практике представляется

в виде систем параметрических уравнений, в каждой из которых приоритетным является один из рассмотренных факторов, показатели которого действуют как аргументы данной системы, а показатели остальных – параметры уравнений. Из взаимодействующих факторов в [11] подробно рассмотрено влияние упрочняющей технологии, как приоритетное, на показатели сопротивления усталости элементов конструкции. В данной работе будет представлено аналогичное влияние концентрации напряжений как очередного значимого фактора. Система параметрических уравнений для данного случая имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 K_{d\sigma} &= \psi_1(\bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = \alpha_\sigma, \\
 K_{d\sigma} &= \psi_2(K_\sigma, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_\sigma, \\
 K_{v\sigma} &= \psi_3(K_\sigma, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_\sigma, \\
 K_{v\sigma} &= \psi_4(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_{\sigma D}, \\
 \bar{\sigma}_{R(v)} &= \psi_5(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h), x = K_{\sigma D}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Медианные пределы выносливости, представленные в (1) – (4), получены в результате проведения 16 серий усталостных испытаний образцов из стали 40Х при переменном сложном нагружении, по которым и рассчитаны указанные относительные коэффициенты. Совокупность данных $K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{F\sigma}, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}, \bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$, согласно системе (7), статистически обработана [12-14], и получены регрессионные связи ($R^2 > 0$) для параметрических уравнений (7).

Результаты исследования. В табл.1 представлены интервальные значения факторов $\bar{\alpha}_\sigma, \Delta h$ для оптимальных коэффициентов, а также изменения пределов выносливости $\delta\bar{\sigma}_R = (K_{\sigma D} - 1)\%$ для диаметров испытанных образцов $d = 7,5 \dots 20,0$ мм.

Эффект концентрации напряжений, как приоритетного фактора, имеет существенное влияние на сопротивление усталости элементов конструкций, и регулирование концентрации напряжений с применением упрочняющей технологии также имеет важное практическое значение. Из коэффициентов (1) – (5) по своей структуре особыми являются $K_{v\sigma}$ и K_σ . Для испытанных образцов со средним уровнем концентрации напряжений ($\bar{\alpha}_\sigma = 1,25 \dots 1,50$) исходный предел выносливости снижается примерно на 45...95%, а при воздействии ППД ($\Delta h = 0,10 \dots 0,15$ мм) он восстанавливается и даже на 8...15% превышает исходное значение. На высоком уровне концентрации напряжений ($\bar{\alpha}_\sigma = 2,75$) снижение $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$ значительное, и оно предполагает обязательное применение ППД. Согласно экспериментальным данным, при $\Delta h = 0,15$ мм это снижение уменьшается до 6...14%, а при $\Delta h > 0,15$ мм возможно полное восстановление исходного значения $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$.

Таблица 1

Интервальные значения $\bar{\alpha}_{\sigma i}$, Δh_i , мм, $K_{\sigma}/K_{d\sigma}$, $K_{v\sigma}$, $K_{\sigma D}$ и $\delta\bar{\sigma}_R$ при $d = 7,5 \dots 20,0$ мм

№	$\bar{\alpha}_{\sigma i}$	Δh_i мм	$K_{\sigma}/K_{d\sigma}$	$K_{v\sigma}$	$K_{\sigma D}$	$\delta\bar{\sigma}_{R(v)}$, %
1	$\bar{\alpha}_{\sigma 1}$, 1,00	0	1,00...1,25	1,00	1,00...1,23	0...+23
		0,05	1,00...0,86	1,01...1,07	0,99...1,08	-1...+8
		0,10	1,00...0,88	1,07...1,15	0,94...0,99	-6...-1
		0,15	1,00...0,90	1,15...1,27	0,87...0,90	-13...-10
2	$\bar{\alpha}_{\sigma 2}$, 1,25	0	1,46...1,56	1,00	1,46...1,57	+46...+56
		0,05	1,25...1,18	1,19...1,30	1,05...0,91	+5...-9
		0,10	1,30...1,21	1,20...1,34	1,08...0,91	+8...-9
		0,15	1,34...1,32	1,25...1,37	1,07...0,96	+7...-4
3	$\bar{\alpha}_{\sigma 3}$, 1,75	0	1,68...1,95	1,00	1,68...1,95	+68...+95
		0,05	1,35...1,30	1,26...1,42	1,07...0,91	+7...-9
		0,10	1,34...1,36	1,34...1,48	1,00...0,92	0...-8
		0,15	1,36...1,38	1,42...1,60	0,96...0,87	-4...-13
4	$\bar{\alpha}_{\sigma 4}$, 2,75	0	2,56...3,00	1,00	2,56...3,00	+156...+200
		0,05	1,88...2,07	1,38...1,46	1,36...1,42	+36...+45
		0,10	1,86...2,01	1,47...1,59	1,27...1,26	+27...+26
		0,15	1,83...1,90	1,60...1,79	1,14...1,06	+14...+6

Логически последовательное рассмотрение значений коэффициентов (1) – (5) и $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$, которое следует из требований получения окончательного результата исследования, диктует необходимость представления взаимосвязанных параметрических уравнений (7) в I – IV квадрантах координатной системы (x, y) и построения соответствующей номограммы с целью ускоренного определения значений соответствующих коэффициентов графическим способом.

Основной задачей данной работы является количественная оценка приоритетных факторов (ППД, концентрация напряжений). Согласно данным усталостных испытаний, определены экспериментальные значения $K_{d\sigma}$, K_{σ} , $K_{F\sigma}$, $K_{v\sigma}$, $K_{\sigma D}$, $\bar{\sigma}_{Rd_{0гл}}$ при заданных уровнях α_{σ} и Δh , которые по 4 шт. представлены в 16 подгруппах для каждого коэффициента, и по ним определены регрессионные уравнения ($R^2 = 0,91 \dots 1,00$) функции $K_{v\sigma} = (K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_{\sigma}, d, \Delta h)$ (табл.2).

По полученным регрессионным уравнениям, согласно (7), построена номограмма для приоритетной оценки концентрации напряжений ($\bar{\alpha}_{\sigma}$). При этом применены принципы соответствия вида фактора и идентичности их масштабных параметров (x, y) (рис.) [15].

Метод номографии позволяет решить следующие задачи:

- согласно эксплуатационным режимам проектируемого изделия, выполнить оптимальные упрочняющие технологии к элементам конструкции;

- исходя из количества серийно выпускаемых конструкций, выполнить проектные процедуры для обеспечения новой сборочной технологии с целью увеличения их выпуска;

- назначить обоснованные сроки службы конструкций и технические показатели, обеспечивающие нормальные условия их работы;

- учитывая противоположные требования к проектируемой конструкции (высокая рабочая скорость и производительность, низкое энергопотребление и материалоемкость, автоматизация рабочих процессов и др.), создать конструкцию, которая обеспечит высокую надежность и безопасную эксплуатацию, будет иметь обоснованные сроки службы и ремонтных работ.

Таблица 2

Уравнения регрессии функции $K_{v\sigma} = \psi_4(K_{\sigma D}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h)$

№	$\Delta h, \text{ мм}$	$d, \text{ мм}$	$K_{v\sigma} = \psi_4(K_{\sigma D})$	R^2
1	0,0	7,5	$K_{v\sigma} = 1,0$	1,0
2		10	$K_{v\sigma} = 1,0$	
3		15	$K_{v\sigma} = 1,0$	
4		20	$K_{v\sigma} = 1,0$	
5	0,05	7,5	$K_{v\sigma} = -0,475x^2 + 1,841x - 0,315$	0,978
6		10	$K_{v\sigma} = -0,734x^2 + 2,839x - 0,951$	0,989
7		15	$K_{v\sigma} = -1,170x^2 + 3,942x - 1,628$	0,995
8		20	$K_{v\sigma} = -1,229x^2 + 4,130x - 2,743$	0,929
9	0,10	7,5	$K_{v\sigma} = -0,371x^2 + 1,740x - 0,124$	0,934
10		10	$K_{v\sigma} = -0,743x^2 + 2,817x - 0,527$	0,963
11		15	$K_{v\sigma} = -0,847x^2 + 4,072x - 1,187$	0,983
12		20	$K_{v\sigma} = -1,342x^2 + 4,580x - 1,437$	0,941
13	0,15	7,5	$K_{v\sigma} = -0,045x^2 + 0,327x + 0,504$	0,921
14		10	$K_{v\sigma} = -0,297x^2 + 1,628x + 0,176$	0,932
15		15	$K_{v\sigma} = -0,511x^2 + 2,375x - 0,256$	0,937
16		20	$K_{v\sigma} = -0,127x^2 + 1,214x + 0,358$	0,910

В отличие от классической методологии проектирования конструкций, которая основана на дифференциальной оценке влияющих факторов, номографический метод позволяет с различным числом и сочетаниями разнохарактерных факторов комплексно оценить воздействие и выбрать оптимальные интервалы их параметров в кратчайшие сроки проектирования без выполнения сложных расчетных процедур.

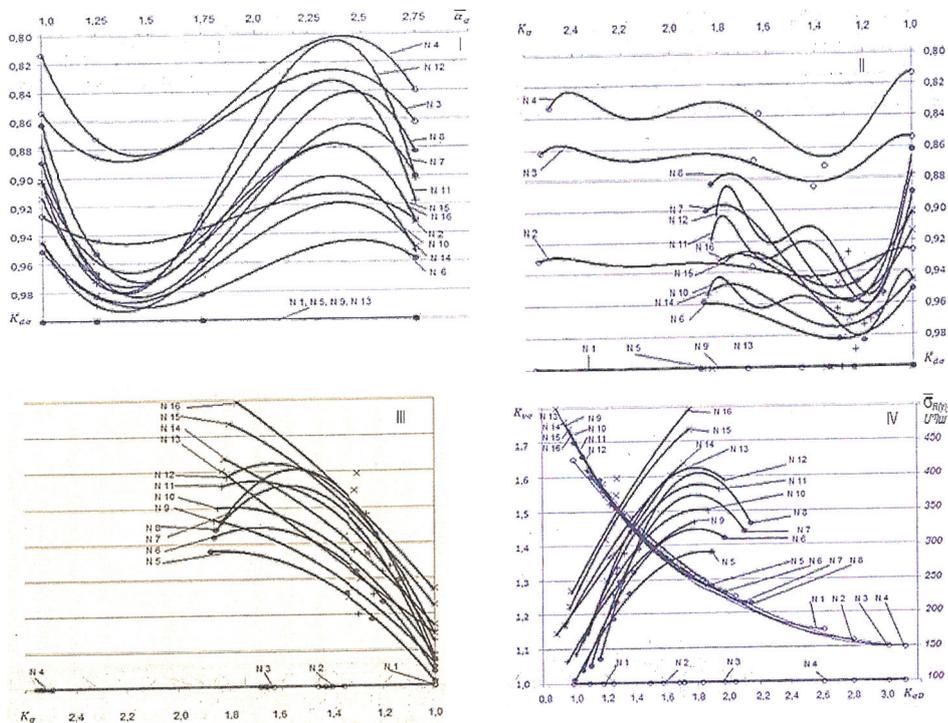


Рис. Номограмма системы уравнений (7) и функции $\bar{\sigma}_{R(v)} = \psi_5(K_{d\sigma}, \bar{\alpha}_\sigma, d, \Delta h)$.
 Обозначения: o, ●, +, x - $\Delta h = 0, 0,05, 0,10, 0,15$ мм; кривые №№1, ..., 16
 соответствуют каждому уравнению системы (7)

Выводы. Для оптимальной оценки влияния факторов составлена сводная математическая модель эффекта концентрации напряжений в виде многопараметрической функциональной связи, которая для практических целей заменена частной системой параметрических уравнений. Получены регрессионные уравнения указанной системы, которые позволяют определить взаимосвязанные оптимальные значения всего комплекса параметров без выполнения дополнительных испытаний.

Для изучения влияния концентрации напряжений выполнено комплексное исследование для разных типов конструкций, конструкционного материала (сталь 40X) и ППД (обкатка роликовым деформирующим инструментом). Показано, что выявленные функциональные связи, которые являются частными математическими моделями, подтверждают улучшение состояния поверхностных слоев и повышение прочности элементов. ППД эффективно компенсирует совместное влияние масштабного эффекта и концентрации напряжений, приближая $\bar{\sigma}_{R(v)}$ к исходным значениям гладких образцов. Анализ влияния концентрации напряжений на $K_{d\sigma}, K_\sigma, K_{F\sigma}, K_{v\sigma}, K_{\sigma D}$ и $\bar{\sigma}_{R(v)}$ при различных сочетаниях

доминантности параметров Δh , d и $\bar{\alpha}_\sigma$, выдвигаемой требованиями расчетно-технологических и эксплуатационных процедур проектируемой конструкции, показал возможность применения в расчетах ранее неучтенного комплексного воздействия коэффициентов и $\bar{\sigma}_{R(v)}$.

Получена сводная номограмма, с применением которой решаются задачи выбора оптимальных параметров концентрации напряжений, уточняются характеристики работоспособности конструкций, достигаются низкие материалоемкость и себестоимость конструкций, которые в заданном сроке службы обеспечат их надежную и безопасную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проников А.С.** Параметрическая надежность машин.- М.: Изд-во МГПУ, 2002. -560с.
2. **Дашенко А.Ф., Кравчук В.С., Иоргачев В.Д.** Несущая способность упрочнения деталей машин.- Одесса: Астропринт, 2004. -160с.
3. Технологические методы обеспечения надежности машин / **И.М. Жарский и др.**- Минск: Высш. шк., 2010. -336с.
4. **Թորոսյան Մ.Ս., Ստալկյան Մ.Գ.** Լարումների կոտակման ազդեցությունը ամրացված մեքենամասերի հոգնածային դիմադրության բնութագրիչների վրա// ՃՇՀԱՀ Տեղեկագիր.- 2017.- 55, №2. - էջ12-19:
5. **Барац Я.И., Милованова Л.Р.** Обработка поверхностей отверстий методом поверхностно-пластического деформирования с образованием регулярного микрорельефа // Металлообработка.- 2006. -№3. - С.28-34.
6. **Когаев В.П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени.- М.: Машиностроение, 2003. – 232 с.
7. **Левин В.А., Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г.** Избранные нелинейные задачи механики разрушения.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 408 с.
8. **Матвиенко Ю.Г.** Диаграммы трещиностойкости тел с надрезами и трещинами// Проблемы машиностроения и надежности машин.-2004. -№3, - С.53-57.
9. Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочненных цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра / **В.Ф. Павлов и др.** // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IV Всеросс. конф. с Междунар. уч., Ч.2, -Самара. 2007. - С.171-174.
10. Математическая модель релаксации остаточных напряжений в цилиндрических образцах с концентраторами напряжений / **М.Н. Саушкин и др.** //Мат. мод. физ., эконом., техн., соц. систем и процессов: Тр. VII Межд. конф. – Ульяновск 2009. - С. 244-245.
11. **ASTM E 1820-99a.** Standart Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2001.
12. **Ստալկյան Մ.Գ.** Գիտափորձի արդյունքների վիճակագրական մշակման մեթոդները. -Երևան: ՀՊՃՀ, 2003. - 99էջ:
13. **Гуров Р.В.** Разработка программы для моделирования отделочной и отделочно-упрочняющей обработки ППД//Изв. Тульск. гос. ун-та. Сер. Техн. науки.- Тула. - 2011. -№6/2. - С.127-132.

14. **Кирпичев В.А., Саушкин М.Н., Смыслов В.А.** К математическому моделированию полей пластических деформаций, возникающих при различных видах упорочняющей обработки//Мат. мод. физ., эконом., техн., соц. систем и процессов: Тр. XVII Межд. конф., - Ульяновск.- 2009. - С.116-117.
15. **Хованский Г.С.** Основы номографии.-М.: Наука, 1986. -325 с.

Национальный университет архитектуры и строительства Армении. Материал поступил в редакцию 26.11.2025.

Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ն.Վ. ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ, Ա.ՅՈՒ. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

**ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻԱՆԵՐՈՒՄ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ
ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿՈՒՏԱԿՄԱՆ
ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ**

Դիտարկված է շինարարական կոնստրուկցիաների հոգնածային դիմադրության վրա մի շարք հիմնական գործոնների (բեռնվածության ռեժիմ, նյութագիտական, մասշտաբային, մակերևութային միկրոանհարթությունների, ամրացման և գումարային գործընթացների) համալիր ներգործման պայմաններում լարումների կուտակման ազդեցությունը որպես առաջնային գործոնի, որը գնահատվում է համապատասխան հարաբերական գործակիցներով և էլքային դիմացկունության սահմանով: Ներկայացված է տվյալ փոխազդեցությունը գնահատող բազմապարամետրական ֆունկցիոնալ կապ: Կառուցված է նոմոգրամ գործակիցների, դիմացկունության սահմանների օպտիմալ արժեքները ստանալու և դրանք հաշվարկային գործընթացներում կիրառելու համար:

Առանցքային բառեր. շինարարական կոնստրուկցիա, հոգնածային դիմադրություն, ազդող գործոն, լարումների կուտակում, նոմոգրամ:

M.G. STAKYAN, N.V. PIRUMYAN, A.YU. SAFARYAN

**ASSESSMENT OF FATIGUE RESISTANCE OF BUILDING STRUCTURE
ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT STRESS CONCENTRATIONS**

The influence of stress concentration is considered as a priority under the conditions of the complex impact of a number of crucial factors (loading mode, material, scale, surface micro-irregularities, strengthening and the total process) on fatigue resistance of building structures, which is estimated by the corresponding relative coefficients and the initial endurance limit. To assess this relationship, a multi parametric functional relationship is presented. The nomogram is created for calculating optimal parameters, relative coefficients and their application in calculation procedures.

Keywords: building structure, fatigue resistance, acting factor, stress concentration, nomogram.