

УДК 620.178.325.2

Емельянов О.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: oleg_emelianov58@mail.ru

Зимонин Е.А. – ассистент

E-mail: zimonin@mail.ru

Пелипенко М.П. – аспирант

E-mail: mxm@bk.ru

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ВЛИЯНИЕ СЖИМАЮЩЕЙ ЧАСТИ ЦИКЛА ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО НАГРУЖЕНИЯ НА КИНЕТИКУ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

АННОТАЦИЯ

Используя метод конечного элемента, выполнены исследования кинетики напряженно-деформированного состояния материала в окрестности вершины трещины при различных режимах знакопеременного циклического нагружения. В результате исследований установлены зависимости влияния уровня сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на размер зоны циклических пластических деформаций, величину и протяженность остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в окрестности вершины трещины при разгрузке, и на величину эффективного размаха КИН в последующих полуциклах растяжения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические конструкции, циклическое нагружение, сжимающая часть цикла, коэффициент интенсивности напряжений, остаточные сжимающие напряжения, рост трещины.

Emelyanov O.V. – candidate of technical sciences, associate professor

Zimonin E.A. – assistant

Pelipenko M.P. – post-graduate student

Nosov Magnitogorsk State Technical University

INFLUENCE OF COMPRESSIVE PART OF SIGN-VARIABLE CYCLE LOADING ON THE STRESS-DEFORMED CONDITION IN CRACK TOP

ABSTRACT

Using method of finite element, researches of kinetics of stress-deformed condition of material in top of crack at various modes of sign-variable cyclic loading are executed. Hence researches dependence of influence of level of compressive part of cycle of sign-variable cyclic loading on size of zone of cyclic plastic deformations, size and extent of residual compressive stresses, formed in top of crack at unloading, and on size of effective range of stress intensity factor in following half-cycles of tension are obtain.

KEYWORDS: metal construction, cyclic loading, compressive part of cycle, stress intensity factor, residual compressive stress, crack growth.

Практика эксплуатации металлических конструкций, воспринимающих циклические нагрузки, свидетельствует о том, что их несущие элементы подвержены усталостным разрушениям. Одной из основных причин снижения несущей способности элементов является развитие усталостных трещин, образовавшихся из исходных дефектов, расположенных в зонах конструктивной концентрации напряжений.

В настоящее время долговечность конструкции рассматривается с точки зрения кинетики роста усталостной трещины (РУТ). При этом в качестве силового параметра, характеризующего распределение напряжений в окрестности вершины трещины, используют коэффициент интенсивности напряжений (КИН).

Для расчета распространения усталостной трещины в реальных условиях эксплуатации необходимо удобное выражение для оценки скорости роста трещины в широком диапазоне значений коэффициента асимметрии цикла нагружения.

Анализ различных моделей роста усталостных трещин, выполненный Сильвой [1, 2], показал, что модели, основанные на концепции закрытия усталостной трещины, не подходят для описания развития усталостных трещин при знакопеременном циклическом нагружении.

Совершенствование методов расчетной оценки надежности и долговечности металлических конструкций, воспринимающих циклические нагрузки, требует изучения закономерностей деформирования и разрушения конструкционных сталей в вершине трещины, фактических параметров режимов нагружения сооружений, влияния асимметрии и нерегулярности цикла напряжений и т.д.

Для изучения закономерностей формирования и перераспределения остаточных сжимающих напряжений в окрестности вершины трещины при знакопеременном нагружении в настоящей работе были выполнены исследования кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) материала в вершине трещины при циклическом изменении нагрузки в диапазоне изменения $R=-0,4$.

Исследование кинетики НДС в вершине трещины было осуществлено на образцах с центральной трещиной методом конечных элементов (МКЭ). При этом использовались данные об упругих и пластических свойствах сталей Ст20, ВСт3сп, 09Г2С и 15Г2СФ в виде диаграмм деформирования, полученных с помощью малогабаритных тензорезисторов [3, 4].

Решение упругопластической (нелинейно-упругой) задачи было выполнено с использованием метода переменных параметров упругости.

Вычисление напряжений при циклическом изменении нагрузки в n -ом полупериоде нагружения осуществлялось на основании работы Москвитина В.В.

При снижении нагрузки внутри монотонной пластической зоны при вершине трещины образуется зона циклических пластических деформаций сжатия, закономерности деформирования материала которой отличны от законов деформирования материала за пределами данной области. Процесс образования зоны циклических пластических деформаций обусловлен работой внешней силы и уменьшением части накопленной потенциальной энергии в упруго работающем материале вокруг пластически деформированной зоны.

На рис. 1 для всех исследуемых сталей приведены зависимости размера зоны циклических пластических деформаций, протекающих в вершине трещины в полупериодах разгрузки и нагружения, от ΔK при $R=0$. Из рисунка видно, что рост значений K_{max} приводит к увеличению размера зоны циклических пластических деформаций. На этом же рисунке штриховой линией нанесена кривая величины циклических пластических деформаций в направлении продвижения трещины, полученная расчетом по формуле:

$$\Delta r_{ц} = \frac{\Delta K^2}{2\rho \cdot S_T^2}, \quad (1)$$

где S_T – циклический предел текучести.

Значения $\Delta r_{ц}$ в направлении продвижения трещины, полученные МКЭ, отличаются от значений, рассчитанных по формуле 1 (на графике показаны штриховыми линиями), не более чем на 20 %.

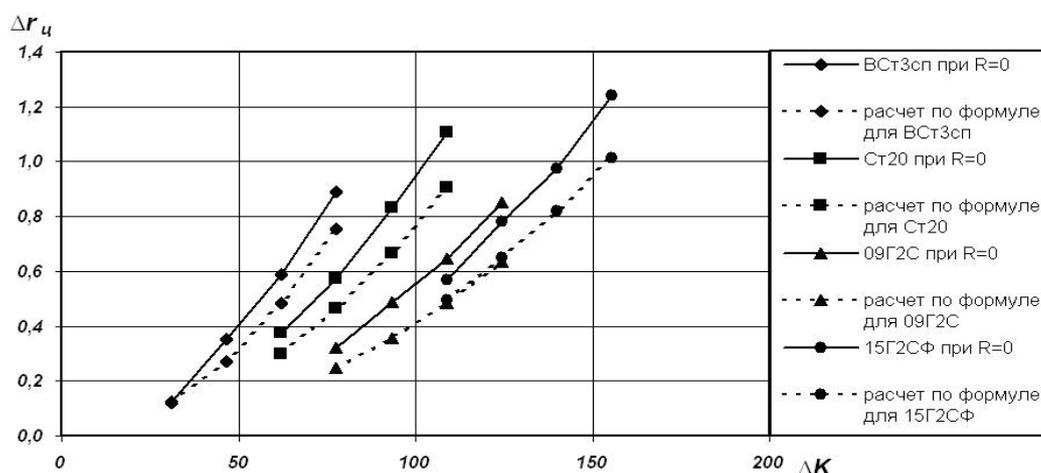


Рис. 1. Зависимость величины зоны циклических пластических деформаций $\Delta r_{ц}$ в направлении продвижения трещины от размаха ΔK

Неупругие деформации в процессе разгрузки и нагрузки (рис. 2) вызывают перераспределение напряжений внутри области, несколько превосходящей по размерам циклическую пластическую зону (рис. 3) и сопровождаются при разгрузке образованием в окрестности вершины трещины остаточных сжимающих напряжений (рис. 4). При этом протекают два противоположных процесса – роста остаточных сжимающих напряжений по мере уменьшения нагрузки и снижения остаточных напряжений в результате перераспределения напряжений вследствие протекания циклических пластических деформаций. Чем больше K_{max} , тем больше величины перераспределения напряжений в окрестности вершины трещины и снижения остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в вершине трещины при разгрузке.

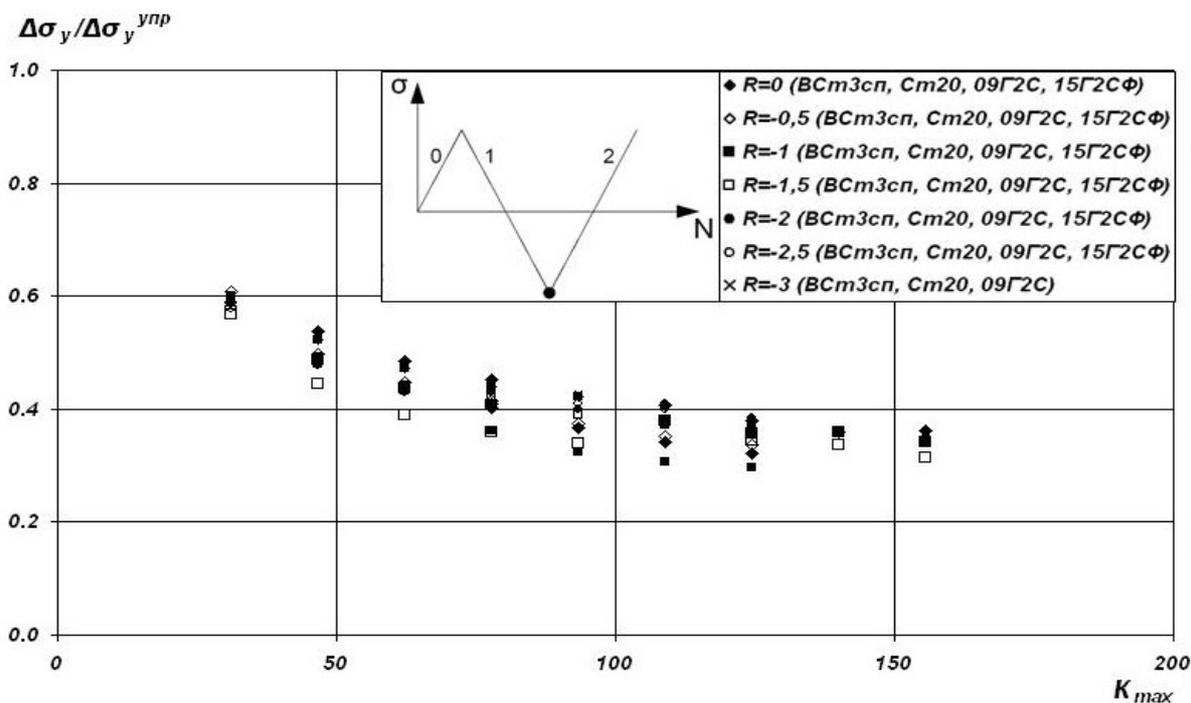


Рис. 2. Зависимость отношения $DS_y / DS_y^{упр}$ ($DS_y^{упр}$ и DS_y – размахи напряжений в вершине трещины в случае упругопластической и упругой работ материала соответственно) от величины K_{max}

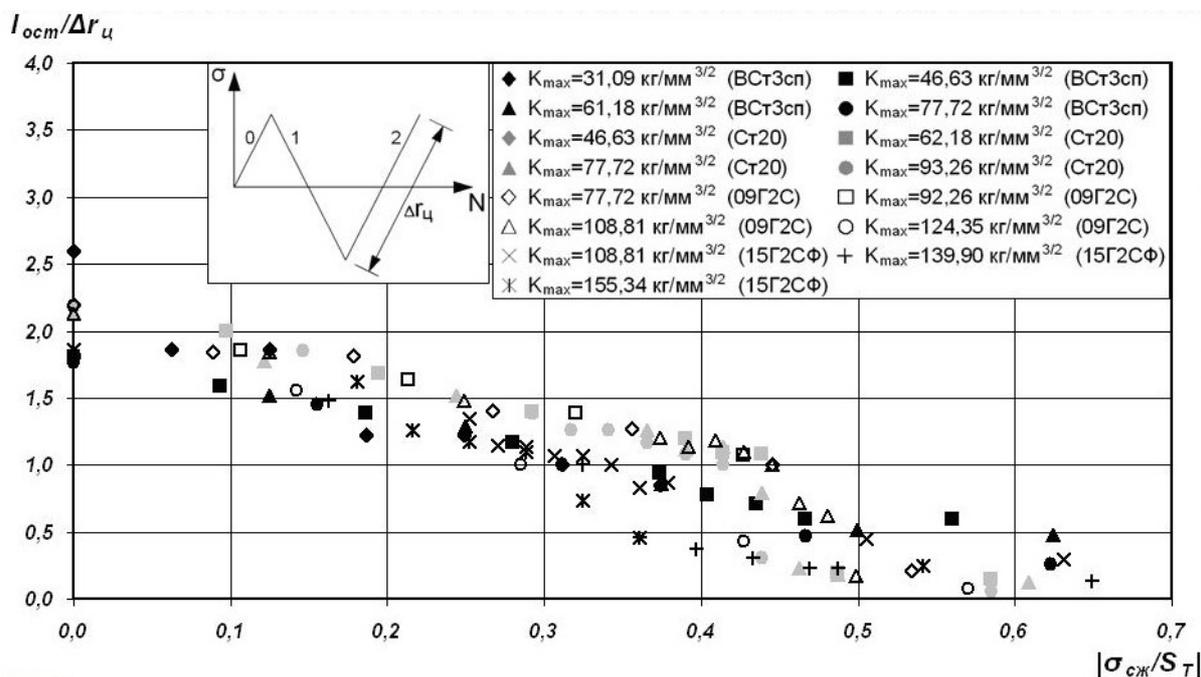


Рис. 3. Зависимость отношения $l_{осм} / \Delta r_{ц}$ от $|\sigma_{сж} / S_T|$

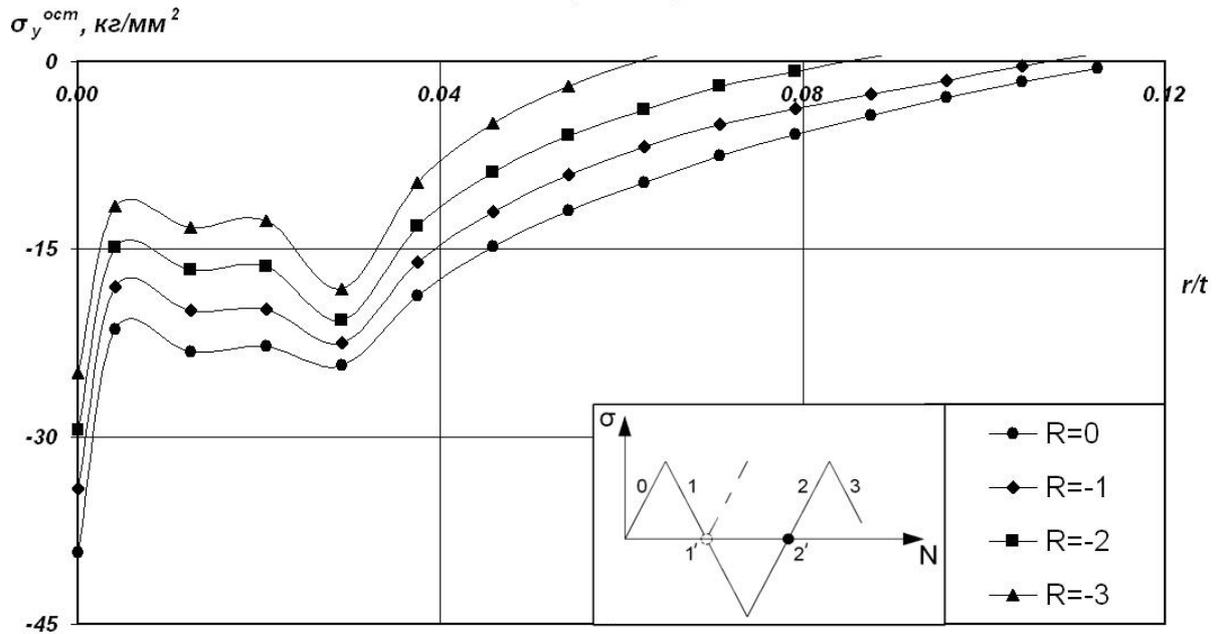


Рис. 4. Распределение остаточных сжимающих напряжений $\sigma_y^{ocm}(r)$ в окрестности вершины трещины для стали ВСт3сп при $K_{max} = 46,632 \text{ кг/мм}^{3/2}$ и $R = -3$

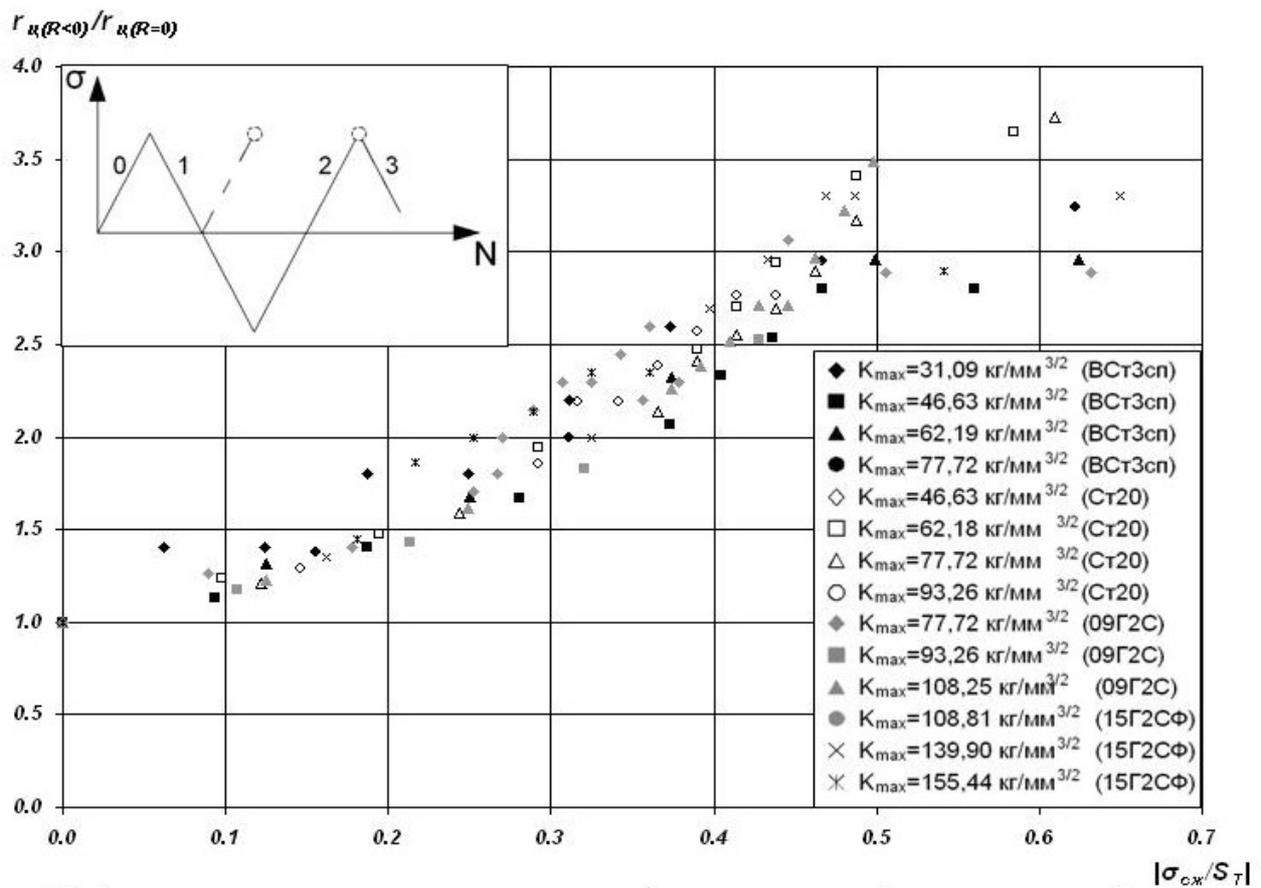


Рис. 5. Зависимость отношения $\Delta r_y^{(R<0)}/\Delta r_y^{(R=0)}$ от $|\sigma_{сж}/S_T|$

Рис. 2 иллюстрирует зависимость DS_y/DS_y^{ynp} от K_{max} (DS_y и DS_y^{ynp} – размахи напряжений в вершине трещины в случае упругопластической и упругой работ материала соответственно). Данная зависимость для циклически стабильных сталей инвариантна к марке стали, не зависит от R и с увеличением максимального КИН уменьшается.

При приложении сжимающей нагрузки берега трещины смыкаются (с этого момента трещина перестает быть концентратором напряжений) и передают силовой поток. Данный этап сопровождается накоплением потенциальной энергии в образце. При этом работа внешней нагрузки (энергия) расходуется на протекание циклических пластических деформаций сжатия в пределах монотонной пластической зоны.

Рис. 5 иллюстрирует зависимость отношения размеров зон циклических пластических деформаций $\Delta r_{\text{ц}}^{(R<0)}/\Delta r_{\text{ц}}^{(R=0)}$ ($\Delta r_{\text{ц}}^{(R\leq 0)}$ – размер зоны циклических пластических деформаций в направлении продвижения трещины при $R\leq 0$; $\Delta r_{\text{ц}}^{(R=0)}$ – то же при $R=0$) от отношения $|\sigma_{\text{сж}}/S_T|$ ($\sigma_{\text{сж}}$ – величина напряжений в полувелике сжатия; S_T – циклический предел текучести стали). Из графика видно, что увеличение сжимающей части цикла знакопеременного нагружения приводит к возрастанию размера зоны циклических деформаций. Данная зависимость для циклически стабильных сталей инвариантна к марке стали и величине K_{max} .

Протекание циклических пластических деформаций сжатия в полувелике сжатия сопровождается дальнейшим перераспределением напряжений в окрестности вершины трещины до момента пока не наступит равновесие между силами сжатия в пластически деформированной зоне и силами в упруго работающем материале вокруг нее.

Данный факт подтверждается зависимостями, приведенными на рис. 3 и 4. Из рисунков видно, что в процессе снижения нагрузки в полувелике сжатия в окрестности вершины трещины вновь образуются остаточные сжимающие напряжения, величина и протяженность которых при фиксированных значениях K_{max} тем меньше, чем больше напряжения в полувелике сжатия знакопеременного циклического нагружения. Взаимодействие остаточных сжимающих напряжений с напряжениями от внешней нагрузки при растяжении с увеличением сжимающей части цикла сопровождается ростом приведенного (эффективного) размаха напряжений (доля размаха внешних напряжений, вызывающих накопление повреждений в материале) и, как следствие, скорости РУТ. При этом отношение размера зоны протяженности остаточных сжимающих напряжений $l_{\text{ост}}$ к размеру циклической пластической зоны $\Delta r_{\text{ц}}$ для циклически стабильных сталей инвариантно к марке стали и не зависит от K_{max} .

Выводы:

1. В полувеликах разгрузки при относительной величине нагрузки $P/P_{\text{max}} = 0,54 \div 0,8$ в окрестности вершины трещины возникают остаточные сжимающие напряжения; при этом протекают два противоположных процесса – роста остаточных сжимающих напряжений по мере уменьшения нагрузки и снижения остаточных напряжений в результате перераспределения напряжений вследствие протекания циклических пластических деформаций; рост трещины возможен только в полувелике нагружения при растяжении.

2. При приложении сжимающей нагрузки берега трещины смыкаются (с этого момента трещина перестает быть концентратором напряжений) и передают силовой поток. При этом работа внешней нагрузки (энергия) расходуется на протекание циклических пластических деформаций сжатия в пределах монотонной пластической зоны. Увеличение сжимающей части цикла знакопеременного нагружения приводит к возрастанию размера зоны циклических деформаций.

3. При фиксированных значениях максимального коэффициента интенсивности напряжений величина остаточных сжимающих напряжений, формирующихся в вершине трещины в полувеликах разгрузки, их протяженность уменьшаются с увеличением сжимающей части знакопеременного цикла нагружения (уменьшением средних напряжений цикла). Взаимодействие остаточных сжимающих напряжений с напряжениями от внешней нагрузки при растяжении с увеличением сжимающей части цикла сопровождается ростом приведенного (эффективного) размаха напряжений (доля размаха внешних напряжений, вызывающих накопление повреждений в материале) и, как следствие, скорости РУТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Silva F.S. Crack closure inadequacy at negative stress ratios // International journal of fatigue, 2004, vol. 26, № 3. – P. 241-252.
2. Silva F.S. The importance of compressive stresses on fatigue crack propagation rate // International journal of fatigue, 2005, vol. 27, № 10-12. – P. 1441-1452.
3. Емельянов О.В. Влияние сжимающих перегрузок на усталостную долговечность элементов металлоконструкций: Дис. канд. техн. наук. – М., 1990. – 181 с.
4. Шувалов А.Н. Влияние испытательной перегрузки на усталостную долговечность листовых конструкций: Дис. канд. техн. наук. – М., 1982. – 236 с.