



ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

П. П. МИХЕЕВ, д-р техн. наук, **В. В. КНЫШ**, канд. физ.-мат. наук, **О. В. ВОЙТЕНКО**, **В. А. БРОДОВОЙ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана методика построения расчетных кривых усталости основных типов сварных соединений применительно к эксплуатируемым конструкциям с использованием специально созданного программного обеспечения для персонального компьютера. Сопоставлены полученные расчетные кривые усталости сварных соединений с результатами усталостных испытаний крупномасштабных образцов.

Ключевые слова: сварное соединение, ограниченный предел усталости, коэффициент концентрации напряжений, кривая усталости, программное обеспечение, остаточный ресурс

Для определения остаточного ресурса сварных конструкций, исчерпавших заложенный при их проектировании срок эксплуатации, необходимо иметь характеристики сопротивления усталости сварных соединений (расчетные кривые усталости), отвечающие сопротивлению усталости реальных (обследованных) соединений эксплуатируемых конструкций. Такие кривые экспериментально получить невозможно, поскольку для изготовления соответствующих образцов потребуется нарушить целостность несущих элементов конструкций.

В качестве исходных данных для установления расчетных кривых усталости сварных соединений предлагается принимать базовые диаграммы предельных напряжений сварных соединений сталей различных классов прочности с низкими (близкими к нулевому) остаточными напряжениями. Базовые диаграммы сварных соединений регламентируются РД 50-694-90 «Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций» [1]. Поскольку в РД для выделенных групп сварных соединений коэффициенты концентрации напряжений α_σ не регламентируются, предлагается в качестве нормативных α_σ принимать их средние значения, установленные ранее для соответствующих типов сварных соединений [2, 3]. Средние значения коэффициентов концентрации напряжений для 2–7 групп элементов, соответствующих классификации согласно РД 50-694-90, приведены ниже:

группа элементов	2	3	4	5	6	7
коэффициент концентрации напряжений α_σ	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	2,3

Необходимые для построения базовой кривой усталости два значения пределов выносливости σ_{R_σ} (например, при $N = 5 \cdot 10^4$ и $N = 2 \cdot 10^6$ циклов) при заданной асимметрии цикла R_σ могут опре-

деляться непосредственно из диаграмм предельных напряжений цикла соответствующих групп сварных соединений сталей трех классов прочности.

Для последующей автоматизации процедур построения базовых кривых усталости необходимые для этого значения пределов выносливости σ_{R_σ} рекомендуется определять из соотношения

$$\sigma_{R_\sigma} = \frac{2\sigma_{-1}}{2 - D(1 + R_\sigma)} \quad (1)$$

где $D = \sigma_0 - \sigma_{-1} / \sigma_m$; σ_{-1} — предел выносливости соединения при симметричном цикле нагружения,

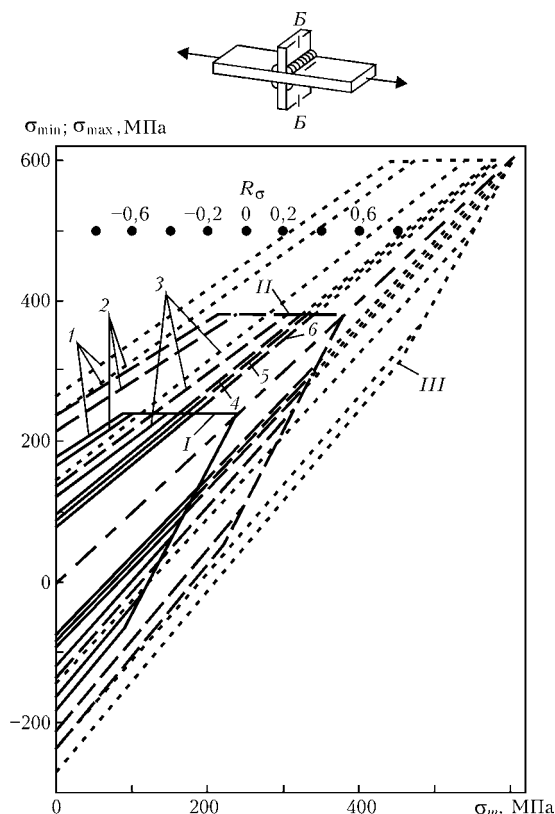


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 4б: I — низкоуглеродистые; II — низколегированные; III — высокопрочные стали; 1 — $N = 5 \cdot 10^4$; 2 — $1 \cdot 10^5$; 3 — $5 \cdot 10^5$; 4 — $2 \cdot 10^6$; 5 — $5 \cdot 10^6$; 6 — $N \rightarrow \infty$ циклов

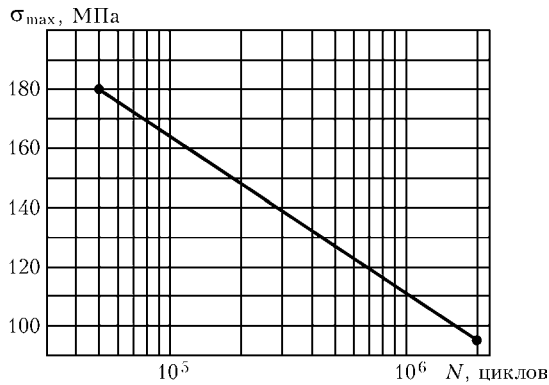


Рис. 2. Базовая кривая усталости сварного соединения класса 46 низкоуглеродистой стали, $R_\sigma = -1,0$

определяемый из диаграмм предельных напряжений цикла для заданного количества циклов; σ_m — среднее напряжение предельного цикла, определяемое из диаграмм предельных напряжений цикла для заданного количества циклов при $R_\sigma = 0$; R_σ — коэффициент асимметрии цикла; σ_0 — предел выносливости соединения при отнулевом цикле нагружения, определяемый из диаграмм предельных напряжений цикла для заданного количества циклов.

Базовые кривые усталости данной группы сварного соединения предлагается строить в координатной плоскости ($N - \sigma$) в виде прямой ($\sigma = a \lg N + b$), проходящей через точки с координатами $(5 \cdot 10^4, \sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4})$ и $(2 \cdot 10^6, \sigma_{R_\sigma}^{2 \cdot 10^6})$. В этом случае уравнение базовой кривой усталости принимает вид

$$\sigma = 0,625 \sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4} \left(\frac{\sigma_{R_\sigma}^{2 \cdot 10^6}}{\sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4}} - 1 \right) \lg N + 3,94 \sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4} \left(1 - 0,75 \frac{\sigma_{R_\sigma}^{2 \cdot 10^6}}{\sigma_{R_\sigma}^{5 \cdot 10^4}} \right) \quad (2)$$

Для представления данной методики из семи групп сварных соединений металлоконструкций выбран тип соединений с угловыми швами, соответствующий классу 46 нормативного документа [1] (рис. 1), изготовленных из низкоуглеродистой стали ($\sigma_T = 240$ МПа, $\sigma_B = 480$ МПа), для симметричного ($R_\sigma = -1,0$) цикла нагружения.

Соответствующая базовая кривая усталости, построенная по соотношению (2), приведена на рис. 2.

Построение расчетных кривых усталости сварных соединений несущих элементов эксплуатируемых металлоконструкций, необходимых для определения их остаточного ресурса, осуществляется на основе разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона методики расчетного определения ограниченного предела выносливости, отвечающего $2 \cdot 10^6$ циклам, с учетом установленных на эксплуатируемой конструкции фактических значений коэффициентов концентрации напряжений, асимметрии цикла нагружения, установившегося уровня остаточных нап-

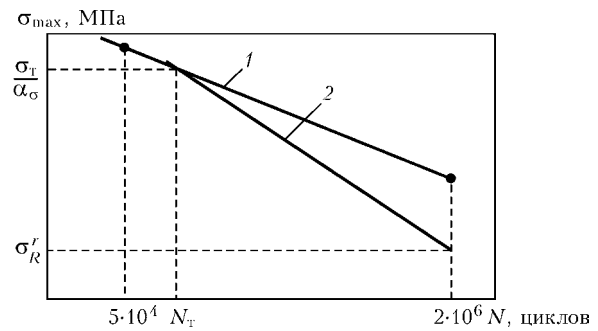


Рис. 3. Схема построения расчетной кривой усталости сварного соединения элемента эксплуатируемой металлоконструкции: 1 — базовая кривая усталости ($\sigma_{ост} = 0$); 2 — расчетная

ряжений и механических свойств металла [3, 4]. Выбирается базовая кривая усталости, определенная по ранее изложенному методу, относящаяся к типу сварного соединения с низким уровнем остаточных сварочных напряжений, усредненный коэффициент концентрации напряжений α_σ которого наиболее близок к экспериментально установленному коэффициенту концентрации напряжений α_σ^k для сварного соединения эксплуатируемого элемента металлоконструкции. Для обеспечения консервативной оценки остаточного ресурса сварной конструкции базовая кривая усталости должна отвечать усредненному коэффициенту концентрации напряжений α_σ , большему или равному экспериментально установленному α_σ^k . При этом базовая кривая усталости определяется для значения коэффициента асимметрии цикла переменного нагружения, отвечающего эксплуатационному его значению для исследуемого элемента сварной конструкции. Из установленного положения базовой кривой усталости определяется циклическая долговечность N_T , отвечающая области циклического нагружения, при которой в зонах концентратора напряжений с коэффициентом концентрации α_σ напряжения достигают значений предела текучести основного металла. Другими словами, по известному уравнению базовой кривой усталости (2) определяется количество циклов переменного напряжения N_T , отвечающее значению максимального напряжения цикла σ_{max} , равного величине σ_T / α_σ . Полученная таким образом точка с координатами $(N_T, \sigma_T / \alpha_\sigma)$ в координатной плоскости ($N - \sigma$) принимается за верхнюю точку расчетной кривой усталости сварных соединений несущих элементов эксплуатируемых металлоконструкций с присущими им сочетаниями факторов, которые определяют их сопротивление усталости (рис. 3). Известно, что такими факторами являются механические свойства основного металла, коэффициент концентрации напряжений α_σ^k , коэффициент асимметрии цикла R_σ и максимальные напряжения σ_{max} цикла внешнего переменного нагружения, установившийся уровень остаточных сварочных напряжений $\sigma_{ост}^{уст}$. Влияние всех указанных выше факторов на сопротивление усталости эксплуатируемых сварных конструкций, за исключением остаточных сварочных напряжений, отражают базовые кривые усталости, определяемые соотношением (2). В свя-

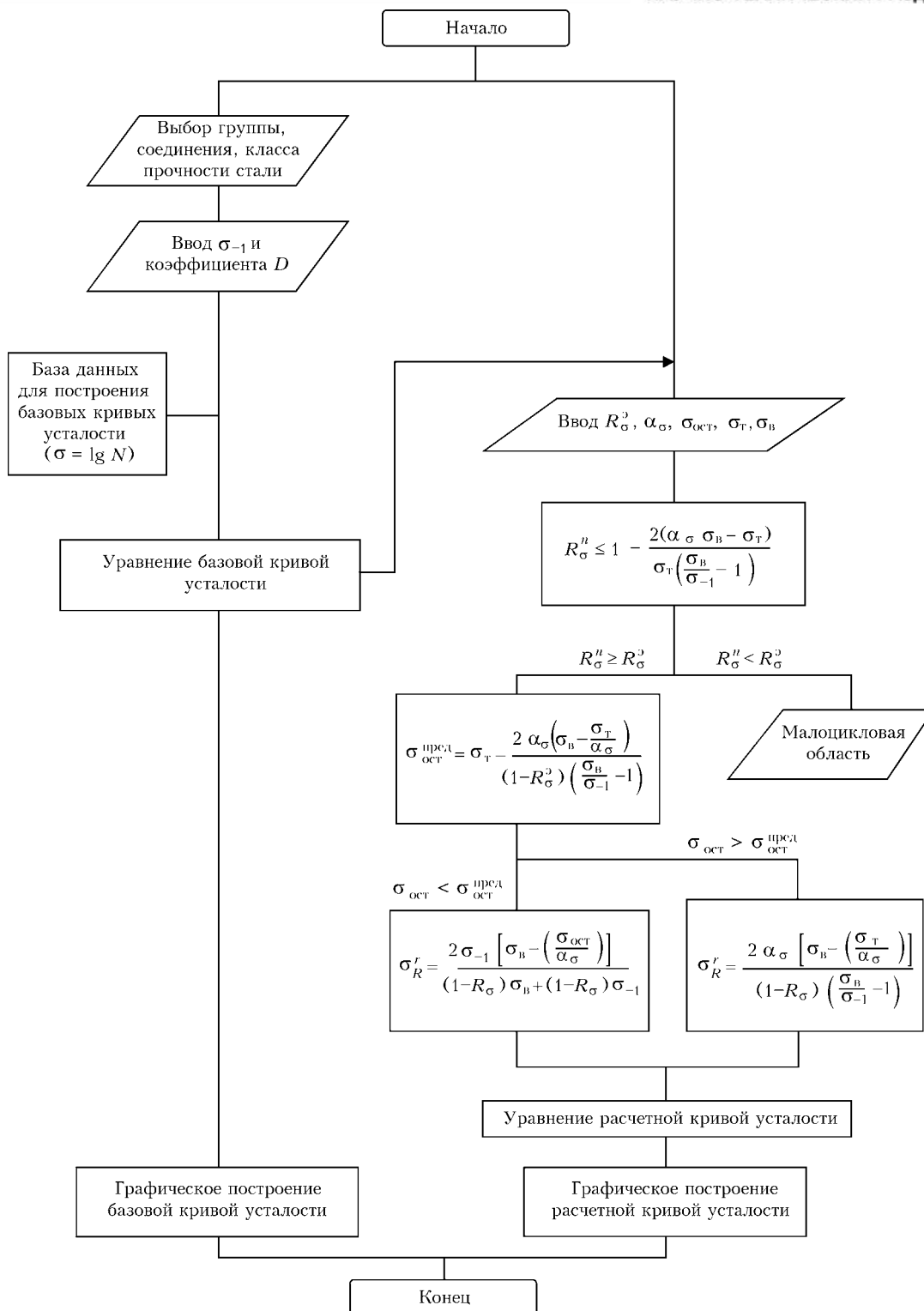


Рис. 4. Блок-схема программы построения базовых и расчетных кривых усталости

зи с этим расчетную кривую усталости предлагается устанавливать путем корректировки соответствующей базовой кривой усталости. Указанная корректировка заключается в снижении предела выносливости на базе 2 млн циклов до значения, равного пределу выносливости σ_R^r , учитывающего влияние установившегося уровня остаточных сварочных напряжений. При этом соблюдается условие совпадения расчетной и базовых кривых усталости при циклических напряжениях, отвеча-

ющих достижению в зонах концентратора с коэффициентом α_σ напряжений, равных значению предела текучести материала, поскольку в этом случае остаточные сварочные напряжения полностью релаксируют. Известные экспериментальные исследования [5] показывают совпадение ограниченных пределов выносливости сварных соединений без остаточных напряжений и с остаточными напряжениями различного уровня, если в зонах концентратора напряжений соединений реализуется

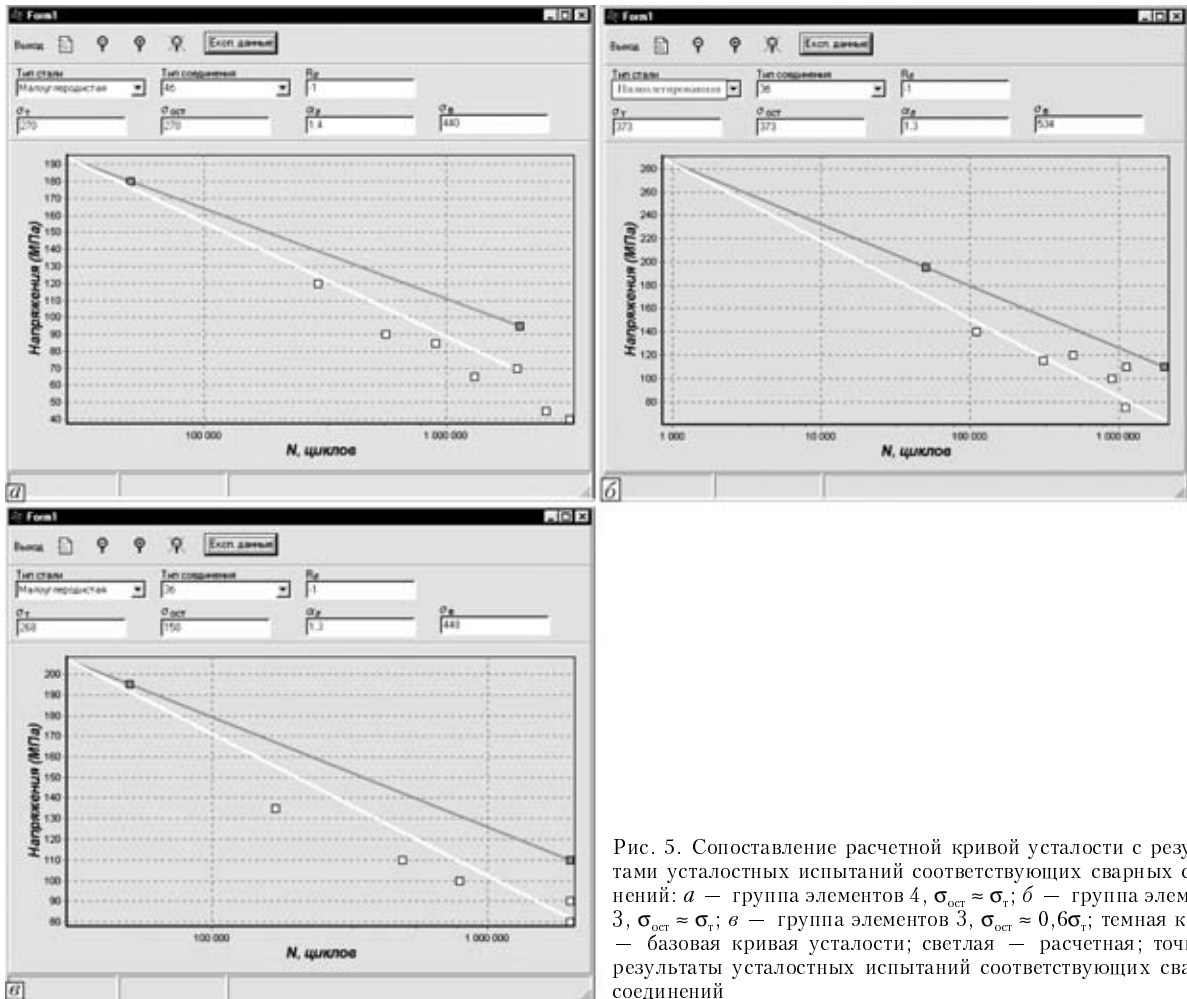


Рис. 5. Сопоставление расчетной кривой усталости с результатами усталостных испытаний соответствующих сварных соединений: а – группа элементов 4, $\sigma_{ост} \approx \sigma_T$; б – группа элементов 3, $\sigma_{ост} \approx \sigma_T$; в – группа элементов 3, $\sigma_{ост} \approx 0,6\sigma_T$; темная кривая – базовая кривая усталости; светлая – расчетная; точки – результаты усталостных испытаний соответствующих сварных соединений

цикл переменных напряжений одинакового размаха с максимальными напряжениями, равными пределу текучести материала.

Значение предела выносливости $\sigma_{R\sigma}^r$ определяется соотношениями [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{R\sigma}^r &= \frac{2\sigma_{-1}[\sigma_B - (\frac{\sigma_{ост}}{\alpha_\sigma})]}{(1 - R_\sigma^3)\sigma_B + (1 + R_\sigma^3)\sigma_{-1}}, \text{ если } \sigma_{ост}^{уст} < \sigma_{ост}^{пред} \\ \sigma_{R\sigma}^r &= \frac{2[\sigma_B - (\frac{\sigma_T}{\alpha_\sigma})]}{(1 - R_\sigma^3)(\frac{\sigma_B}{\sigma_{-1}} - 1)}, \text{ если } \sigma_{ост}^{уст} \geq \sigma_{ост}^{пред} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где R_σ^3 – эксплуатационный коэффициент асимметрии цикла; $\sigma_{ост}^{пред}$ – предельные значения остаточных напряжений

$$\sigma_{ост}^{пред} = \sigma_T - \frac{2\alpha_\sigma(\sigma_B - \frac{\sigma_T}{\alpha_\sigma})}{(1 - R_\sigma^3)(\frac{\sigma_B}{\sigma_{-1}} - 1)}$$

Эти соотношения учитывают влияние уровня установившихся остаточных сварочных напряже-

ний $\sigma_{ост}^{уст}$, действующих в сварном соединении эксплуатируемого элемента конструкции.

Изложенная корректировка базовой кривой усталости фактически заключается в ее повороте вокруг точки с координатами $(N_T, \sigma_T/\alpha_\sigma)$ на координатной плоскости $(N - \sigma)$ таким образом, чтобы скорректированная кривая усталости (которая и является расчетной) проходила через точку с координатами $(2 \cdot 10^6, \sigma_{R\sigma}^r)$. Тогда расчетная кривая усталости основных типов сварных соединений несущих элементов эксплуатируемых металлоконструкций с отдельными сочетаниями факторов, которые определяют их сопротивление усталости, может быть записана в виде

$$\sigma = \frac{\sigma_{R\sigma}^r - \frac{\sigma_T}{\alpha_\sigma}}{6 + \lg 2 - \lg N_T} \lg N + \frac{(6 + \lg 2)\frac{\sigma_T}{\alpha_\sigma} - \sigma_{R\sigma}^r \lg N_T}{6 + \lg 2 - \lg N_T} \quad (4)$$

С целью автоматизации расчетных процедур при построении базовых и расчетных кривых усталости создано программное обеспечение для персонального компьютера. Алгоритм программы написан на языке программирования C++ и работает под управлением в операционной системе Windows, NT. Блок-схема программы приведена на рис. 4. Необходимые для построения базовых и расчетных



кривых усталости данные хранятся в базе данных Paradox.

При работе с программой в форме пользователя необходимо выбрать класс прочности стали и ввести соответствующие ей значения σ_T и σ_B , группу соединения элемента, соответствующее значение коэффициента концентрации напряжений α_σ , асимметрию цикла действующих напряжений R_σ и значение уровня установившихся остаточных сварочных напряжений $\sigma_{ост}^{уст}$, после чего программа проводит проверку введенных данных и выполняет необходимые расчеты. Результаты расчетов представляются графически в виде кривых усталости в полулогарифмической шкале ($\sigma - \lg N$). При необходимости данная программа позволяет сопоставить расчетную кривую усталости с данными, полученными при экспериментальных исследованиях сопротивления усталости соответствующего соединения. Разработанная программа позволяет экспортировать данные и результаты расчета в такие программы, как Microcal Origin, MS Word, MS Excel.

На рис. 5 сопоставлены полученные по предложенной методике расчетные кривые усталости с экспериментальными данными. В первом случае (рис. 5, а) усталостным испытаниям при симметричном цикле нагружения (консольный изгиб) подвергали крупномасштабные образцы сечением 200×30 мм с поперечными ребрами, приваренными угловыми швами. Образцы изготавливали из низкоуглеродистой стали М16С ($\sigma_T = 270$ МПа, $\sigma_B = 440$ МПа). Остаточные сварочные напряжения растяжения в образцах достигали значений, близких к пределу текучести стали.

Во втором случае (рис. 5, б) усталостным испытаниям при тех же условиях нагружения подвергали образцы сечением 200×26 мм со стыковым соединением (низколегированная сталь 10Г2С1: $\sigma_T = 373$ МПа, $\sigma_B = 534$ МПа). Так же как и в первом случае, остаточные сварочные напряжения растяжения в образцах достигают значений, близких к пределу текучести стали.

В третьем случае (рис. 5, в) при тех же условиях нагружения испытывали образцы сечением 200×30 мм со стыковым соединением, пересекаемым продольными наплавками (низкоуглеродистая сталь М16С: $\sigma_T = 268$ МПа, $\sigma_B = 448$ МПа). В отличие от предыдущих образцов, в данном случае остаточные сварочные напряжения растяжения в образцах не превышали ≈ 150 МПа. Пониженный уровень остаточных напряжений в образцах обусловлен их релаксацией под воздействием статической перегрузки, выполнявшейся перед усталостными испытаниями образцов.

рузки, выполнявшейся перед усталостными испытаниями образцов.

Приведенные на рис. 5–7 данные свидетельствуют об удовлетворительном соответствии расчетных кривых усталости сварных соединений, полученных по предложенной методике, и результатов усталостных испытаний однотипных соединений как с предельными остаточными напряжениями растяжения, так и со значительно меньшими остаточными напряжениями.

Выводы

1. Разработана методика компьютерного построения базовых кривых усталости для различных типов сварных соединений согласно классификации РД 50-694-90 на основе использования соответствующих диаграмм предельных напряжений, приведенных в РД.

2. Разработана методика построения расчетных кривых усталости сварных соединений эксплуатируемых металлоконструкций на основе изменения положения соответствующих базовых кривых усталости в зависимости от экспериментально установленных для данной металлоконструкции характеристик цикла переменного нагружения, значения коэффициента концентрации напряжений соединения, установившегося уровня остаточных сварочных напряжений и механических свойств металла.

3. Создано программное обеспечение для персонального компьютера, в котором реализована предложенная последовательность определения расчетных кривых усталости для сварных соединений эксплуатируемых металлоконструкций с целью последующей расчетной оценки их остаточного ресурса.

4. Выполненное сопоставление расчетных кривых усталости сварных соединений, полученных по предложенной методике, с результатами усталостных испытаний крупномасштабных образцов из низкоуглеродистой стали М16С и низколегированной стали 10Г2С1 свидетельствует об их удовлетворительном соответствии.

1. МУ. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. РД 50-694-90. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 84 с.
2. Труфьяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
3. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфьякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
4. Trufyakov V. I., Mikheev P. P., Kudryavtsev Y. F. Fatigue strength of welded structures. Residual stresses and improvement treatments. — Harword: Acad. publ. GmbH, 1995. — 100 p.
5. Gurney T. R., Maddox S. I. Determination of Fatigue design stresses for welded structures from an analysis of data // Metal Construction and British Welding J. — 1972. — 4, № 11. — P. 418–422.

A procedure was developed of plotting design S-N curves for the main types of welded joints for in-service structures, using a specially developed software for PC. Obtained design S-N curves of welded joints were compared with the results of fatigue testing large-scale specimens.

Поступила в редакцию 21.01.2004