

К 95-летию журнала «ПГС» – представляем члена редколлегии

Владимир Васильевич ЛАРИОНОВ – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Международной и Российской инженерных академий. Член редколлегии журнала «Промышленное и гражданское строительство» с 1990 г.

Окончил Московский авиационный технологический институт по специальности инженера-механика. Докторскую диссертацию защитил на тему: «Исследование работы стальных строительных конструкций в условиях малоциклового нагружения» (научный консультант – акад. Н. П. Мельников).

Работал в лаборатории прочности НИИ машиноведения АН СССР, затем в ЦНИИПроектСтальконструкции главным инженером и директором института, позднее преобразованного в ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова». По проектам института построены многие уникальные сооружения, такие как джукер под р. Москвой, металлоконструкции высотных зданий Москвы, ракетно-космического комплекса на космодроме «Байконур», крупнейшие в мире вантовые трубопроводные переходы через реки пролетами до 900 м, прецизионные радиотелескопы, зеркальные и высотные антенные сооружения, Бакинский и Астраханский заводы стационарных морских платформ, резервуары различной вместимости, мосты и морские опоры, многочисленные объекты в 12 странах.

Под руководством В. В. Ларионова и при его личном участии разработаны проекты и осуществлялся авторский надзор на строительстве Главного монумента памятника Победы на Поклонной горе в Москве, памятника в ознаменование 300-летия Российского флота, Красноярского завода тяжелых экскаваторов, кузовного производства на ЗИЛ, объектов Башкирского производственного объединения и Томского завода «Химволокно», резервуаров вместимостью 50 тыс. м³ для Кубы и Аргентины, металлургического завода в Аджаокуте (Нигерия) и др.

На протяжении многих лет является одним из лидеров научной школы «Создание оптимальных конструктивных форм инженерных сооружений из металла». Автор 140 печатных трудов, 11 авторских свидетельств на изобретения.

За 20-летнюю работу экспертом Совета по строительству и архитектуре награжден Почетной грамотой Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования РФ «За заслуги в работе по аттестации научных и научно-педагогических кадров».

Основное направление его научной деятельности – изучение прочности и долговечности строительных конструкций при повторных нагрузках.

УДК 621:539.43.001.24

Прочность сварных стальных конструкций при малоцикловом нагружении

Владимир Васильевич ЛАРИОНОВ, доктор технических наук, профессор, директор

ООО «ЦНИИ ПроектСтальКонструкция», 119607 Москва, Мичуринский просп., 37, e-mail: cniipk.info@gmail.com

Аннотация. На основе анализа нагруженности металлоконструкций в процессе эксплуатации показано, что в спектре нагрузок имеются циклы повторного характера с уровнем номинальных напряжений, близким к расчетному сопротивлению. Приведенные известные данные по концентрации напряжений в зонах конструктивного изменения сечения за счет наличия отверстий, галтелей, сварных швов и т. п. показывают, что при некотором уровне коэффициента концентрации в конструкциях возникают локальные пластические деформации, вызывающие при переменных нагрузках образование трещин малоциклового усталости.

Определены характеристики строительных сталей и зон сварного соединения при циклическом упругопластическом деформировании. На основе исследований различных типов натуральных сварных соединений при малом числе циклов установлены закономерности изменения характеристик сопротивления усталостному разрушению в зависимости от числа циклов нагружения. Получена эмпирическая зависимость расчетной кривой малоциклового усталости. Предложен инженерный метод расчета малоциклового прочности сварных циклически нагруженных конструкций в номинальных напряжениях, обеспечивающий совпадение с расчетом по нормам на малоциклового усталость.

Ключевые слова: повторность нагрузки, концентрация напряжений, локальные пластические деформации, циклические упругопластические свойства сталей, малоциклового прочность.

STRENGTH OF WELDED STEEL STRUCTURES UNDER LOW-CYCLE LOADING

Vladimir V. LARIONOV, e-mail: cniipk.info@gmail.com

Central Research Institute «Steel Construction Design» Ltd., Michurinskiy prosp., 37, Moscow 119607, Russian Federation

Abstract. On the basis of the analysis of the loading of metal constructions during operation, it is shown, that in the load spectrum there are repeated character cycles with a level of nominal stresses close to the design resistance. Presented well known data on the stress concentration in the zones of structural change in the cross-section due to the presence of holes, fillets, welds, etc. show that at a certain concentration coefficient, local plastic deformations causing cracking of low-cycle fatigue at variable loads arise in the structures. The characteristics of construction steels and welded joint zones under cyclic elastic-plastic deformation are determined. On the basis of research in various types of full-scale welded joints with a small number of cycles, the patterns of changes in the characteristics of resistance to fatigue failure depending on the number of loading cycles are established. The empirical dependence of the calculated curve of low-cycle fatigue is obtained. An engineering method for calculating the low-cycle strength of welded cyclically loaded structures in nominal stresses, ensuring a coincidence with the SNiP (Russian building regulations) calculation for low-cycle fatigue is proposed.

Key words: load repeat, stress concentration, local plastic deformations, cyclic elastic-plastic properties of steels, low-cycle strength.

К циклически нагруженным сварным строительным конструкциям относятся в первую очередь кожухи и компенсаторы воздухонагревателей доменных печей, резервуары для хранения жидкостей и газов, подкрановые балки, мосты и другие пролетные строения под подвижные нагрузки, трубопроводы больших диаметров, газгольдеры и пр. Накопление усталостных повреждений в таких конструкциях происходит в сварных соединениях, которые становятся источником концентрации напряжений за счет конструктивной формы (изменение сечения, геометрия сварного шва) и наличия дефектов (подрезы, непровары, угловатость, депланация и т. п.).

Расчет строительных конструкций осуществляется в соответствии с СП 16.3330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» (гл. 12, прил. К). Получаемые при этом уровни номинальной нагруженности сварных элементов и концентрации напряжений свидетельствуют о возникновении в зонах концентрации локальных пластических деформаций. При повторном характере внешней нагрузки они приводят к образованию трещины малоциклового усталости.

Так, при обследовании воздухонагревателей доменных печей появление трещин в кожухе было зафиксировано после двух-трех лет эксплуатации, что соответствовало 5–6 тыс. циклов нагружения. В подкрановых балках

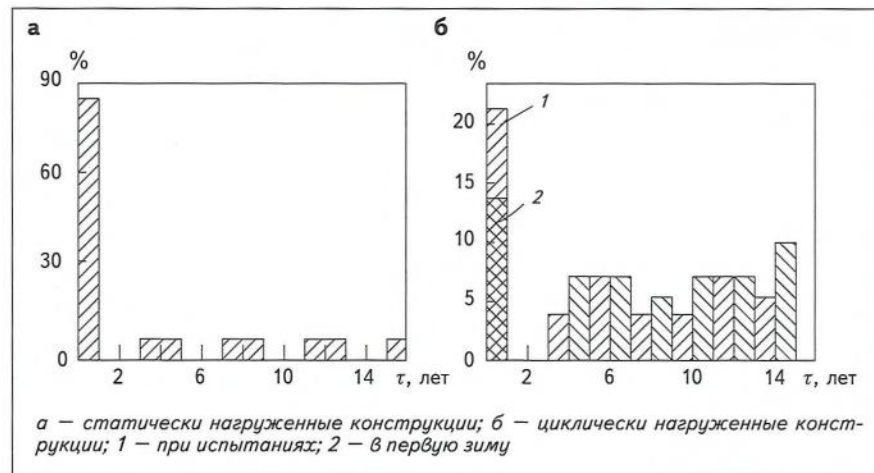
тяжелого режима работы повреждения в виде поверхностных трещин вдоль угловых швов приварки верхнего пояса к стенке наблюдались при числе циклов до $2 \cdot 10^5$, или после четырех лет эксплуатации, в газгольдерах аэродинамических станций — после $4 \cdot 10^4$ циклов нагружения.

Опасность появления трещин малоциклового усталости в сварных конструкциях связана с тем, что трещина может при определенном соотношении уровня нагрузки, климатической температуры эксплуатации, скорости нагружения и других факторов оказаться критической. Это приводит к катастрофическому хрупкому разрушению, которое может произойти в разный период эксплуатации в зависимости от наступления критического сочетания иницирующих факторов. В этом заключается опреде-

ленное отличие в разрушении циклически нагруженных конструкций по сравнению со статически нагруженными, основная масса аварий которых приходится на период эксплуатации с первыми похолоданиями. При дальнейшей эксплуатации таких конструкций число хрупких разрушений резко сокращается (рис. 1).

Для циклически нагруженных конструкций в первую зиму и во время испытаний разрушается только 34 % конструкций от общего числа зарегистрированных разрушений. При последующей эксплуатации, в течение примерно трех лет, разрушения отсутствуют, и затем число разрушений начинает увеличиваться с 4 до 10 % в год. Такой характер распределения разрушений конструкций под воздействием повторных нагрузок связан с необходимым

Рис. 1. Распределение частот разрушения, %, в зависимости от срока эксплуатации конструкций



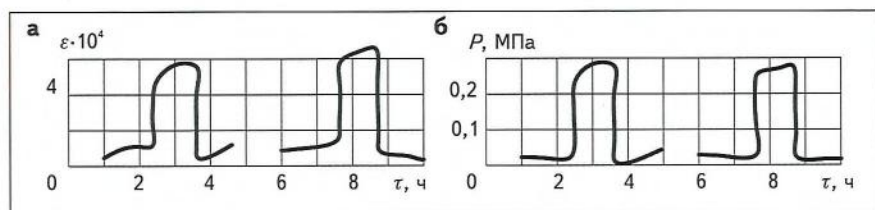


Рис. 2. Изменение кольцевых деформаций (а) и давления в стенке воздухонагревателя во времени (б)

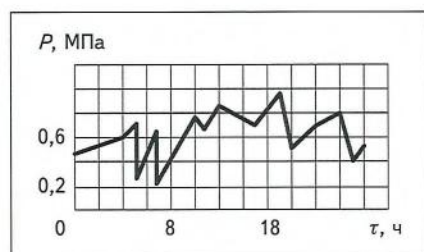


Рис. 3. Характер изменения давления в газгольдере за сутки

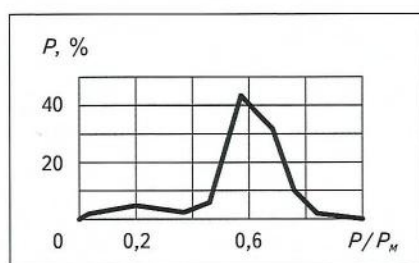


Рис. 4. Распределение нагрузок на подкрановую балку для склада готового проката (P – нагрузка на балку; P_M – наибольшая нормативная нагрузка от одного крана)

периодом подрастания дефектов до критических размеров, и поэтому в течение определенного периода разрушения не наблюдаются. При дальнейшей эксплуатации идет накопление повреждений и развитие трещин усталости до образования полного разрушения.

Для оценки малоциклового прочностии строительных сварных конструкций в рамках существующих расчетных схем необходимо располагать данными о нагруженности, значениях локальных напряжений, деформаций и о характеристиках сопротивления материалов малоциклового разрушению при различных условиях эксплуатации. При этом следует иметь в виду как стадию работы конструкций до момента появления усталостных трещин, так и их работу при наличии и росте трещины.

В настоящее время для большинства циклически нагруженных строительных конструкций характер воздействия внешних нагрузок достаточно изучен. Исследования показывают, что типичными являются стационарный и нестационарный режимы переменных нагрузок. К стационарно

нагруженным конструкциям относятся в первую очередь воздухонагреватели доменных печей, трубы большого диаметра магистральных газо- и нефтепроводов и др. На рис. 2 приведен пример записи изменения давления и деформации в стенке воздухонагревателя в процессе эксплуатации. Видно, что нагружение происходит с постоянной амплитудой номинальных напряжений и деформаций. При этом коэффициент асимметрии цикла r сохраняется постоянным ($r = 0,2$). Статическая составляющая цикла, связанная с распором футеровки, с течением времени может несколько изменяться, однако в первом приближении это изменение можно не учитывать. В зависимости от технологии рабочего процесса число циклов нагружения воздухонагревателя в сутки может изменяться от четырех до восьми, и тогда за 20 лет эксплуатации при непрерывной работе соответствующее число циклов составит 30–60 тыс.

Для магистральных газо- и нефтепроводов повторность нагрузки связана с периодически-

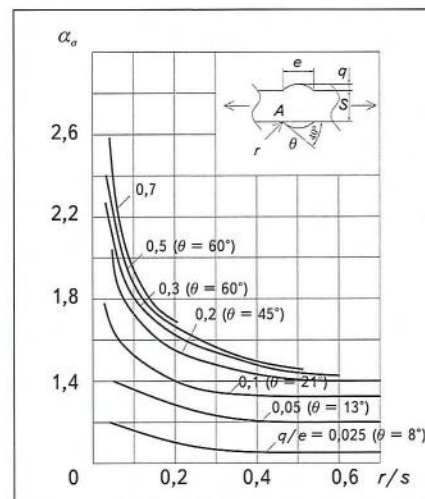


Рис. 5. Значения коэффициента концентрации напряжений для стыкового шва с формой, близкой к окружности

ми сбросами давления за счет различных технологических и эксплуатационных факторов (отключение насосно-перекачивающей станции из-за отказов электрооборудования и механического оборудования, изменение режимов перекачки и т. п.) и достигает на отдельных участках в среднем до 300 циклов в год, при этом цикл изменения давления близок к пульсирующему.

Примером нестационарной нагруженности может служить спектр нагрузок подкрановых балок и газгольдеров аэродинамических станций. Автоматическая запись изменения давления в газгольдере показана на рис. 3. Видно, что имеет место большое число циклов с малыми амплитудами наряду со значительным изменением избыточного давления (иногда от нуля до расчетного значения).

Нагруженность подкрановых балок зависит от трех переменных – вес груза на крюке крана, положение тележки на мосту крана и самого моста на подкрановой балке. На рис. 4 дано распределение вертикальных нагрузок на подкрановую балку в долях от наибольшей нормативной нагрузки от одного крана. Из

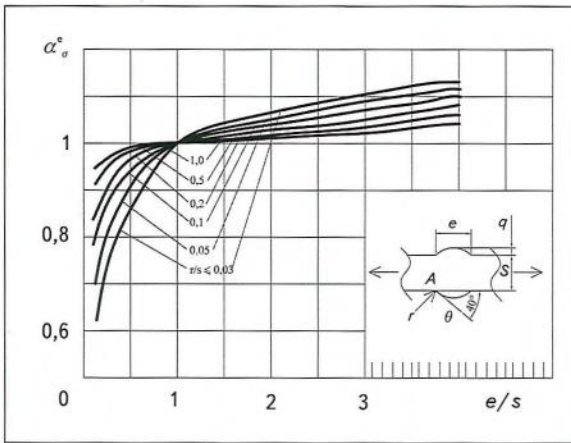


Рис. 6. Значения поправочного коэффициента для α_{σ}^e , учитывающего действительную ширину шва

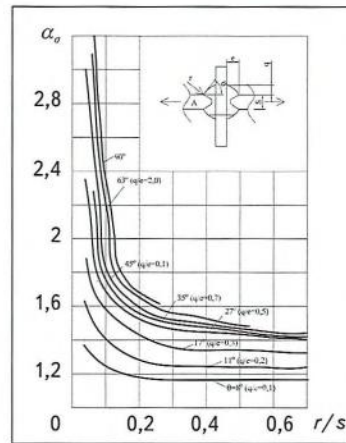


Рис. 7. Значения коэффициента концентрации напряжений α_{σ} для угловых швов

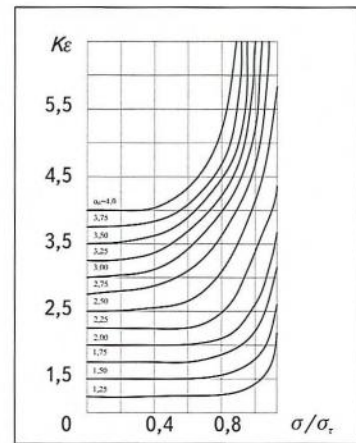


Рис. 8. Значения коэффициентов концентрации деформации K_e для стыковых и угловых швов

приведенных данных видно, что в 10 % случаев повторных нагрузок их значения достигают величины, равной 0,8 наибольшего нормативного значения. Доля накопленных малоцикловых повреждений будет в первую очередь определяться этими максимальными нагрузками и числом их повторения за период эксплуатации.

Примером конструкций, работающих в малоцикловой области нестационарных нагрузок, могут служить разборные металлические мосты, представляющие большой практический интерес при освоении труднодоступных районов. Минимальные весовые показатели и ускоренные темпы возведения требуют допущения в конструкциях мостов пластических деформаций с целью максимального использования материала, что при циклическом характере нагрузки ограничивает ресурс их работы сопротивлением малоциклового разрушению.

Таким образом, малоцикловое нагружение с большими амплитудами давления сочетается с циклическим нагружением с относительно более высокими частотами и меньшими амплитудами. Доля накопленных за определенный период эксплуатации мало- и многоциклового поврежде-

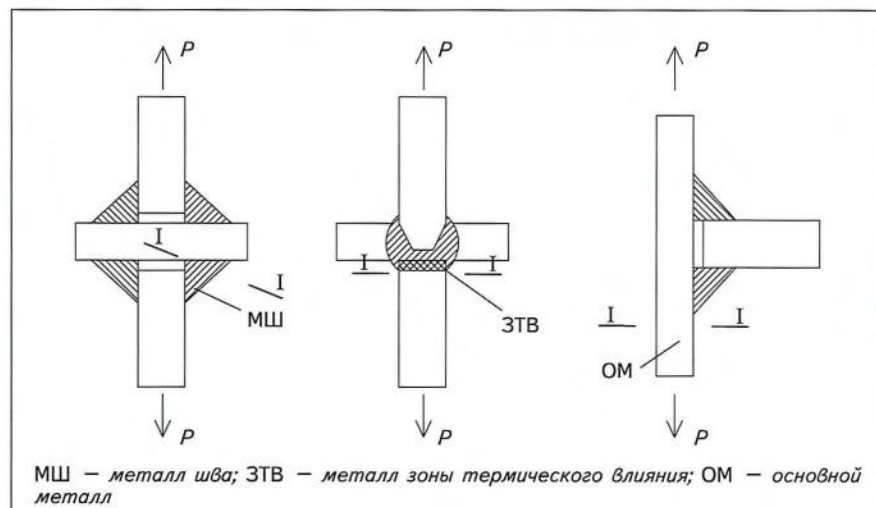
ний будет зависеть от величины коэффициента концентрации напряжений, определяющего уровень местных напряжений в зонах разрушения.

Для перехода от значений внешних нагрузок (номинальных напряжений) к локальным напряжениям и деформациям необходимо располагать значениями коэффициентов концентрации соответственно напряжений (при упругих деформациях) и деформаций K , если местные напряжения превышают предел текучести материала. Для геометрических концентраторов напряжений типа отверстий, галтелей, выточек

и пр. такие данные в области упругих деформаций широко представлены в работах [1, 2]. Применительно к сварным соединениям стальных конструкций были проведены исследования зон концентрации напряжений и деформаций в стыковых и угловых швах при простейших способах нагружения (растяжение, изгиб) с применением методов фотоупругих покрытий [3].

Так, например, коэффициент концентрации напряжений α_{σ} для валика шва, описанного окружностью и имеющего ширину, равную толщине свариваемых пластин (при $r/s = 1$), определяется по

Рис. 9. Схема выбора расчетных сечений 1-1 в сварных соединениях



МШ — металл шва; ЗТВ — металл зоны термического влияния; ОМ — основной металл

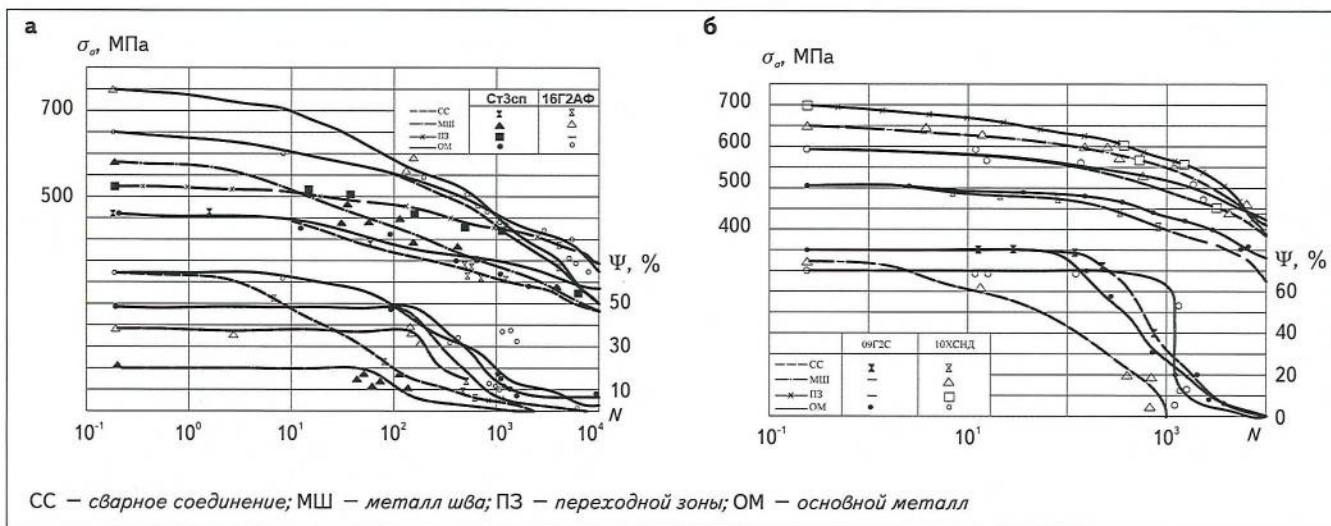


Рис. 10. Кривые малоциклового усталости и изменения пластичности металла различных зон сварных соединений строительных сталей Ст3сп, 16Г2АФ (а) и 09Г2С, 10ХСНД (б)

рис. 5, а коэффициент α_{σ}^e , учитывающий действительную ширину валика шва, — по рис. 6.

При растяжении и изгибе тавровых сварных соединений с разделкой кромок, а также при изгибе тавровых соединений без разделки кромок и изгибе нахлесточных соединений с лобовыми швами коэффициент концентрации α_{σ} в месте перехода углового шва к основному металлу можно установить по графическим зависимостям на рис. 7 для точки А.

При растяжении тавровых сварных соединений без разделки кромок величину α_{σ} в указанной точке А следует увеличивать в 1,5 раза по сравнению с α_{σ} при изгибе, а для нахлесточных соединений с лобовым швом — в 1,2 раза.

Наличие в сварном шве внутреннего дефекта в виде непровара шириной до 10 % толщины соединения, расположенного перпендикулярно действующему усилию, не оказывает существенного влияния на α_{σ} в месте перехода металла шва к основному металлу.

Коэффициенты концентрации деформации K_{ϵ} для стыковых и угловых швов сварных соединений малоуглеродистых и низко-

легированных строительных сталей, выполненных сварочными материалами, предел текучести которых выше предела текучести основного металла в первом приближении, идущем в запас, можно определять по графическим зависимостям на рис. 8. Горизонтальные участки кривых соответствуют упругой области деформирования в зоне концентрации ($K_{\epsilon} = \alpha_{\sigma}$).

Оценка локальных напряжений и деформаций для различного рода элементов конструкций выполнена в работе [4], а также может быть осуществлена для иных условий методом конечно-го элемента.

Накопление повреждений и развитие разрушений в зонах концентрации напряжений строительных конструкций при малоцикловом нагружении определяются характеристиками статических и циклических свойств используемых материалов.

К силовым характеристикам прочности относятся значения разрушающих напряжений в зависимости от числа циклов нагружения и степени развития разрушения, а к деформационным — диаграммы циклического упругопластического деформи-

рования, закономерности накопления односторонних деформаций и предельные разрушающие деформации при заданной базе испытания.

Исследования проводились на малоуглеродистых и низколегированных строительных сталях различной категории прочности: Ст3сп, 09Г2С, 10ХСНД, 16Г2АФ и 12ТН2МФАЮ и их сварных соединениях.

Приведенные данные показывают значительное отличие деформационных свойств различных зон сварного соединения при статическом и циклическом упругопластическом деформировании. Учитывая, что малоцикловая прочность реального сварного соединения определяется соответствующей зоной шва в расчетах на малоцикловую прочность сварных конструкций, необходимо использовать зональные характеристики прочности и пластичности сварного соединения (рис. 9).

Исследование сопротивления разрушению различных зон сварных соединений проводилось при мягком и жестком нагружении по моменту появления трещин длиной 0,5–1 мм. Испытания лабораторных образцов на

растяжение–сжатие в диапазоне чисел циклов от $1/4$ (однократное разрушение) до $5 \cdot 10^4$ были проведены при пульсирующем ($r_\sigma = 0$) и симметричном ($r_\sigma = -1$) циклах нагружения. На рис. 10 представлены результаты малоцикловых испытаний разных зон сварных соединений исследуемых марок стали при $r_\sigma = 0$ и $r_\sigma = -1$ и соответствующие кривые изменения относительного сужения площади поперечного сечения по числу циклов. Анализ экспериментальных данных показывает, что сварные соединения обладают различным сопротивлением малоциклового разрушению в зависимости от статической прочности и циклических свойств металла разных зон.

Так, малоцикловую прочность сварных соединений низколегированных сталей после 10^2 циклов нагружения определяет металл шва, тогда как для малоуглеродистой стали марки СтЗсп независимо от степени раскисления экспериментальные точки для металла шва и переходной зоны лежат несколько выше или в общей полосе разброса для основного металла, который и определяет несущую способность сварного соединения в целом. Металл переходной зоны во всех случаях занимает промежуточное положение между основным металлом и металлом шва. У сварных соединений низколегированных сталей максимальным сопротивлением малоциклового разрушению обладает сталь марки 16Г2АФ, минимальным — 09Г2С. С увеличением числа циклов до разрушения (более 10^4) циклическая прочность сварных соединений исследуемых низколегированных сталей становится примерно одинаковой.

Понижение температуры эксплуатации необходимо учитывать, так как она существенно влияет на упругопластические характеристики строительных сталей при

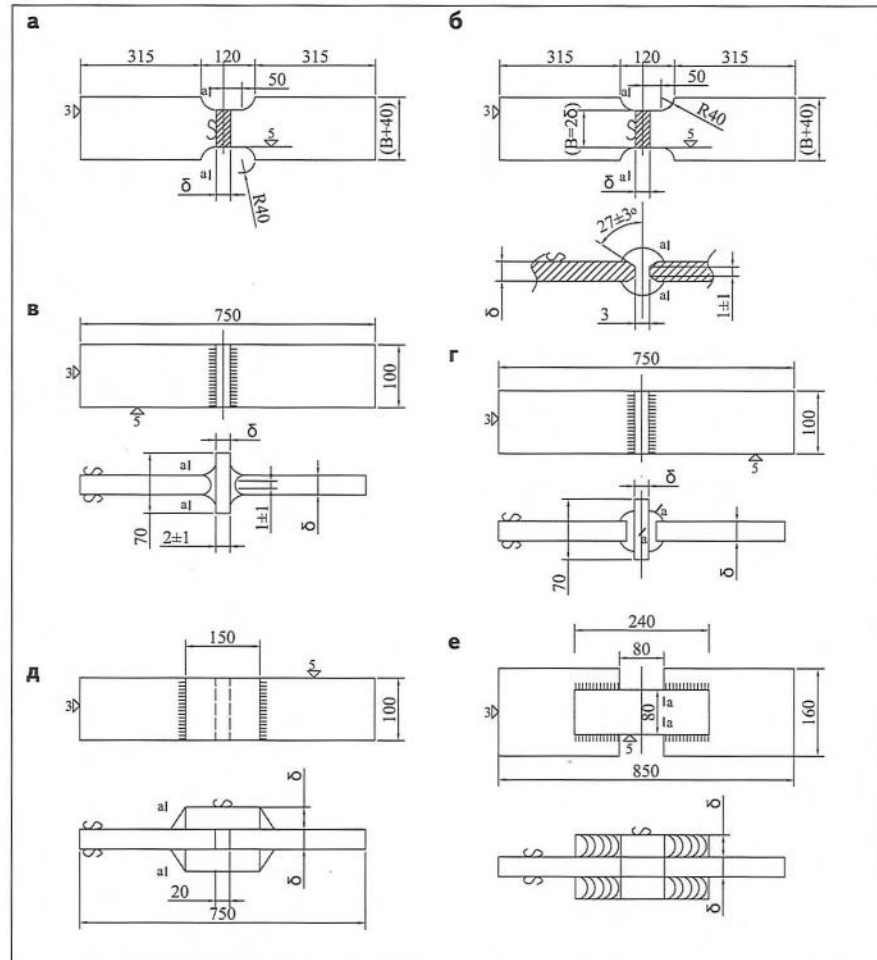


Рис. 11. Основные типы сварных образцов для малоцикловых испытаний

малоцикловом нагружении. Проведение испытаний в диапазоне температур до -196°C [5] показало, что прочностные характеристики низколегированной стали с понижением температуры при мягком нагружении ($\sigma_\sigma = \text{const}$) возрастают, а при жестком нагружении ($\sigma_\sigma = \text{const}$) падают.

В то же время диаграмма циклического упругопластического деформирования может быть описана единой зависимостью в диапазоне исследованных температур.

Приведенные выше кривые малоциклового усталости различных зон сварных соединений используются для уточненного расчета по деформационным критериям малоциклового разрушения сварных соединений в строительных конструкциях с учетом

эффектов концентрации напряжений [6].

Данные малоцикловых испытаний натуральных сварных соединений и элементов металлоконструкций применяются для непосредственной оценки их долговечности, для проверки критериев малоциклового разрушения, а также для назначения запасов прочности. Испытаниям сварных образцов предшествовали исследования малоцикловых свойств листового проката. Наряду с данными, полученными на лабораторных образцах, их целью было установить характеристики малоциклового разрушения с учетом влияния состояния поверхности и масштабного фактора, которые при испытаниях цилиндрических лабораторных образцов не выявляются. Испытанию подвер-

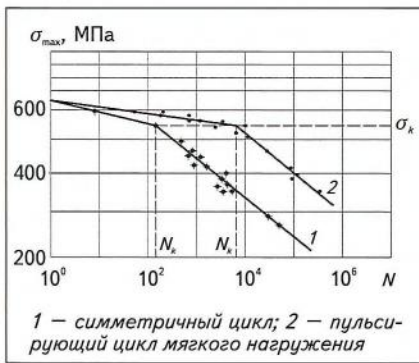


Рис. 12. Кривые малоциклового усталости стали 16Г2АФ

гались плоские образцы (рис. 11а), вырезанные поперек направления прокатки и обладающие наименьшим сопротивлением распространению трещины. На рис. 12 приведены данные для стали 16Г2АФ, полученные при пульсирующем и симметричном циклах на цилиндрических и плоских образцах.

Видно, что влиянием поверхностной окалины и масштабного фактора в первом приближении можно пренебречь. Кроме того, кривая усталости имеет четко выраженный перелом, который отвечает смене характера разрушения. Так, при уровнях напряжений ниже значения σ_k , соответствующего точке перелома, разрушение носит усталостный характер, а при $\sigma_{max} > \sigma_k$ разрушение происходит квазистатически.

На основании данных, полученных для двух степеней асимметрии цикла ($r_\sigma = 0$ и $r_\sigma = -1$), можно в первом приближении принять σ_k , не зависящим от асимметрии цикла в указанном диапазоне. Аналогичные данные были получены для остальных из указанных выше сталей. Значения σ_k для исследованных сталей составили: 390 МПа — СтЗсп, 410 МПа — 09Г2С, 530 МПа — 16Г2АФ, 680 МПа — 12ГН2-МФАЮ. Из сравнения значений σ_k для разных сталей с их пределами прочности σ_B следует, что соотношения σ_k/σ_B нахо-

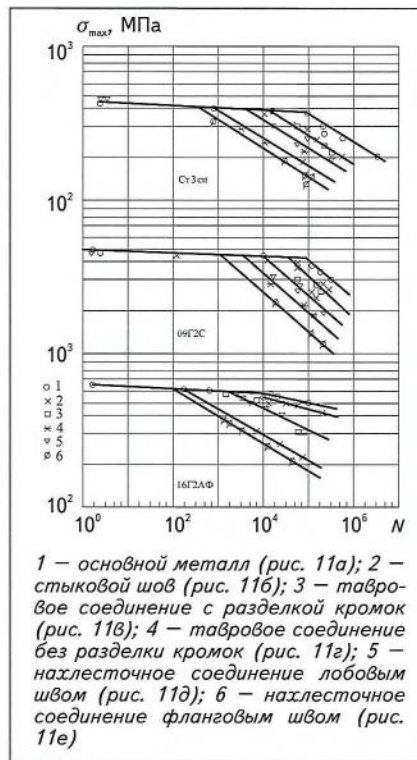


Рис. 13. Результаты малоциклового испытаний сварных соединений строительных сталей при пульсирующем цикле нагрузки

дятся в диапазоне 0,8—0,83. Зона переходных разрушений на уровне σ_k отмечается при числе циклов $5 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^5$.

Данные о прочности в области малого числа циклов нагружения (менее 10^5) для сварных соединений строительных конструкций весьма ограничены. В связи с этим представляется практически важным использовать значительный экспериментальный материал в области многоциклового усталости на основе закономерностей, позволяющих экстраполировать эти данные на область малых чисел циклов нагружения. На рис. 13 представлены результаты испытаний основных типов сварных соединений (см. рис. 11) из строительных сталей при малоциклового нагружении.

Как и гладкие образцы, в зависимости от базы испытания сварные соединения разрушались усталостно или квазистатически. Квазистатическое разрушение, а

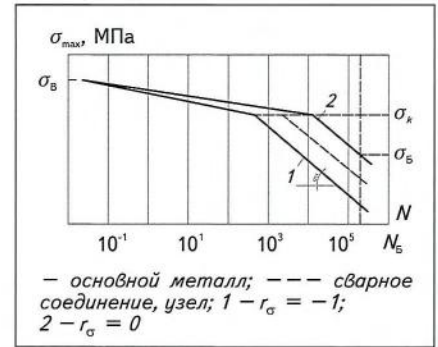


Рис. 14. Схема построения расчетных кривых малоциклового усталости в номинальных напряжениях

также разрушение образцов при однократном разрыве для всех типов происходили по основному металлу с характерным развитием значительных пластических деформаций в зоне разрушения. При усталостном разрушении возникновение трещины и дальнейшее ее развитие до критического размера наблюдались в сечении с максимальным уровнем концентрации напряжений.

Для стыкового, нахлесточного соединения с лобовым швом таврового соединения с разделкой кромок трещины образовывались на поверхности в зоне перехода от сварного шва к основному металлу. На рис. 11 сечение, в котором происходило образование усталостной трещины, обозначено буквами а—а для каждого типа сварного соединения. В соответствии с этим кривая усталости сварных соединений аналогично основному металлу может быть аппроксимирована в координатах $\lg \sigma_{max} - \lg N$ двумя прямыми разного наклона для квазистатического и усталостного разрушения.

С увеличением концентрации напряжений в сварном соединении точка пересечения двух ветвей кривой усталости N , соответствующая напряжениям $\sigma_{max} = \sigma_k$ (см. рис. 12), смещается в область меньшего числа циклов нагружения (в этом случае процесс накопления усталости

стных повреждений опережает процесс накопления одно-сторонних пластических деформаций). Для СтЗсп при переходе основного металла к нахлесточному соединению с фланговым швом значение N_k изменяется от $7 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^2$ циклов нагружения, т. е. примерно на два порядка. Для остальных исследованных типов соединений значения N_k располагаются между этими двумя значениями.

Сравнение кривых усталости различных сварных соединений исследованных сталей показывает, что участки кривых, соответствующих усталостному разрушению (как это видно на рис. 13), могут быть с достаточной степенью точности аппроксимированы параллельными линиями. Таким образом, при наличии данных по разрушению хотя бы одного уровня номинальных напряжений вся кривая усталости данного сварного соединения при числах циклов до 10^6 может быть получена с использованием приведенных выше закономерностей, а также данных [7–9] для долговечности порядка 10^5 и выше.

Расчет на усталость по СП 16.13330 ограничен снизу базовой долговечностью $N = 10^5$ циклов. Для проведения проверочного расчета при меньшем числе циклов нагружения, необходимость которого вытекает из рассмотрения условий эксплуатации конструкций, можно воспользоваться закономерностями разрушения сварных соединений в области малоциклового усталости, приведенными выше. Кривая циклической прочности сварного соединения в диапазоне от однократного нагружения до числа циклов N_5 может быть схематически представлена в двойных логарифмических координатах в соответствии со схемой, при-

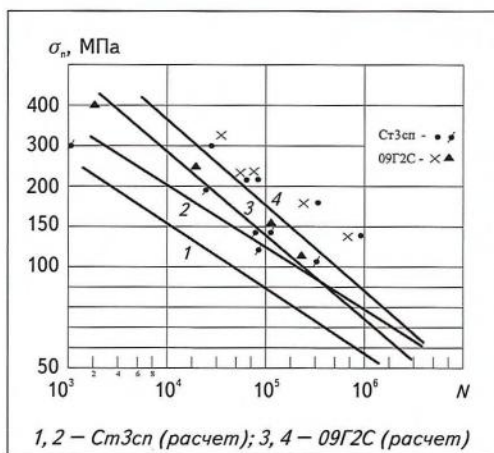


Рис. 15. Сопоставление опытных точек и расчетных линий данных для лобовых (2, 4) и фланговых (1, 3) сварных соединений при малоцикловом нагружении

веденной на рис. 14. Ограниченный предел выносливости σ_B при N_5 выбран правой точкой для построения кривой малоциклового усталости в связи с тем, что основные данные, полученные при усталостных испытаниях, относятся к долговечностям $5 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$. Тогда, располагая для данного конкретного соединения значением ограниченного предела выносливости на базе $N = 5 \cdot 10^5$, кривую малоциклового прочностии можно изобразить путем проведения ее параллельно кривой усталости основного материала, полученной на лабораторных образцах, до значения напряжения σ_k . Образованная точка ($\sigma_k - N_k$) соединяется со значением предела прочности σ_B при $N = 1/4$.

Тогда аналитически зависимость между номинальным максимальным напряжением σ_n и числом циклов N при $\sigma_B < \sigma_n < \sigma_k$ может быть записана в виде:

$$\sigma_n = \sigma_B (N_B / N)^{m_N} \dots,$$

Параметр m_N , характеризующий угол наклона кривой малоциклового усталости

σ_B / σ_T	38/23	44/29	46/33	52/40	60/45	70/60
m_N	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26

где m_N – характеристика материала.

Участок кривой малоциклового усталости при напряжениях выше $\sigma_n > \sigma_k$, как правило, не входит в инженерные расчеты, так как номинальные напряжения в элементах конструкций обычно не превышают значения расчетного сопротивления и ниже предела текучести, а сам предел текучести σ_T для строительных сталей меньше σ_k .

Проверка малоциклового прочностии для $N \leq 5 \cdot 10^5$ циклов основного металла и сварных соединений может быть произведена по формуле

$$\sigma_n = \gamma_Y R_Y (N_B / N)^{m_N} \dots,$$

где σ_n – максимальное номинальное напряжение стационарного цикла от внешней нагрузки; γ_Y – коэффициент понижения расчетного сопротивления основного металла, определяемый по СП 16.13330 для числа циклов $N_B = 5 \cdot 10^5$ с учетом асимметрии цикла и вида соединения; R_Y – расчетное сопротивление усталости основного металла по СП 16.13330; N – требуемая долговечность элемента конструкции в циклах; при $N_B = N$ расчеты по данной формуле и по СП 16.13330 совпадают; m_N – параметр, характеризующий угол наклона кривой малоциклового усталости и принимаемый по следующим данным (см. таблицу).

Для нестационарного цикла изменения напряжений максимальное эквивалентное напряжение цикла σ_n на основе гипотезы линейного суммирования повреждений следует вычислять по формуле

$$\sigma_n = (\sum_{i=0}^k \eta_i \sqrt{\sigma_{ni}})^{m_N} \dots,$$

где $\eta_i = n_i / N_i$ – относительное число циклов нагружения; σ_{ni} – суммарное номинальное напряжение (от постоян-

ной и переменной нагрузок); n_i — количество циклов нагружения напряжением; N_i — предельное число циклов до разрушения при напряжениях σ_{ni} ; K — число режимов.

На рис. 15 приведены результаты сопоставления расчета и экспериментальных данных для двух типов соединений лобовыми и фланговыми швами из сталей СтЗсп и 09Г2С. При числах циклов 10^3 – 10^6 запас по долговечности составляет не менее 5.

Приведенный выше инженерный метод расчета малоциклового прочностных в номинальных напряжениях, как и расчет по СП 16.13330, требует достаточно сложных экспериментальных исследований на натуральных узлах и соединениях конструкций в зависимости от целого ряда факторов: вида и способа нагружения, характеристик цикла, температуры, технологии изготовления и т. п. В связи с этим расчет по местным деформациям более универсальный, так как он основан на результатах испытаний лабораторных образцов, используемых для оценки прочностных конструкций в зонах концентрации напряжений.

Применимость деформацион-

ных подходов к расчету сварных конструкций определяется наличием данных по теоретическим коэффициентам концентрации напряжений в сварных швах, циклическим свойствам материала различных зон сварного соединения и по уровню остаточных сварных напряжений. Если для коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в стыковых и угловых швах листовых конструкций данные приведены выше, то для стержневых конструкций, выполняемых из фасонного проката, необходимы дополнительные исследования локальных напряжений и деформаций в зонах их концентрации. Свойства строительных сталей при малоцикловом нагружении изучены достаточно подробно, и по ним получены величины параметров для построения расчетных кривых малоциклового разрушения.

При этом указанные расчетные параметры необходимо брать для той зоны сварного соединения, в которой находится наиболее опасный концентратор напряжений. Влияние остаточных сварочных напряжений в малоциклового области в связи с их перераспреде-

лением при упругопластическом деформировании будет сказываться в меньшей степени, чем при многоциклового усталости.

При наличии в конструкциях макродефектов типа трещин (непровар, расстой и т. п.) использование указанных подходов к оценке прочностных при малом числе циклов нагружения неправомерно. В этом случае должны использоваться зависимости механики разрушения, позволяющие определять скорость роста трещины и ее критическую длину.

Вывод

Разработка и введение в строительные нормы методики оценки трещиностойкости конструкций позволят дифференцировать уровень допустимых трещиноподобных дефектов для различных типов конструкций и разных стадий их изготовления и эксплуатации. Таким образом, на основе экспериментально установленных закономерностей сопротивления сталей и сварных соединений малоциклового разрушению предложен метод оценки долговечности сварки стальных конструкций при повторно-статическом нагружении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петерсон Р. Коэффициенты концентраций напряжений. М. : Мир, 1977. 302 с.
2. Нейбер Г. Концентрация напряжений. М. : Гостехиздат, 1947. 204 с.
3. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Об исследовании деформаций и напряжений методом фотоупругих покрытий (обзор) // Заводская лаборатория. 1976. № 11. С. 1211–1217.
4. Теоретические и экспериментальные исследования напряженного состояния элементов строительных металлоконструкций: сб. науч. тр. М. : ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова, 1989. 198 с.
5. Ларионов В. В., Ханухов Х. М. Сопротивление малоциклового деформированию низколегированной стали при низких температурах // Проблемы прочностности. 1978. № 9. С. 16–19.
6. Ларионов В. В. Экспериментальная проверка деформационных критериев малоциклового разрушения сварных соединений // Проблемы прочностности. 1977. № 4. С. 35–40.
7. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. Киев : Наук. думка, 1973. 215 с.
8. Мюнзе В. Х. Усталостная прочностность сварных конструкций. М. : Машиностроение, 1968. 311 с.
9. Кудрявцев И. В., Наумченков К. Е. Усталость сварных конструкций. М. : Машиностроение, 1976. 269 с.
1. Peterson R. *Koeffitsienty kontsentratsij naprjazhenij* [Coefficients of stress concentrations]. Moscow, Mir Publ., 1977. 302 p. (In Russian).
2. Neber G. *Kontsentratsija naprjazhenij* [Concentration of stresses]. Moscow, Gostekhzdat Publ., 1947. 204 p. (In Russian).