



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПОЛИЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. С. КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложены методика и аналитические зависимости для расчетной оценки циклической долговечности материалов, а также сварных соединений при поличастотном нагружении по исходным данным, отвечающим одночастотному нагружению. Проведенная экспериментальная проверка полученных зависимостей на крупномасштабных, в том числе сварных, образцах подтвердила их достоверность в широких пределах варьирования параметров поличастотного нагружения, спектр которого состоит из 3–7 составляющих.

Ключевые слова: металлические конструкции, сварные соединения, поличастотное нагружение, циклическая долговечность, расчет

Элементы мостов, подкрановых балок, изделий транспортного и энергетического машиностроения, судов, самолетов и многих других металлоконструкций в процессе эксплуатации подвергаются одновременному воздействию нескольких, отличающихся по амплитуде и частоте, переменных нагрузок. В общем случае эти нагрузки, обусловленные действием внешних и внутренних факторов, могут произвольно изменяться во времени и иметь случайный характер. В частности, пролетные строения мостов нагружаются автомобильным и железнодорожным транспортом; морские глубоководные стационарные платформы испытывают воздействие морских волн; металлические конструкции сооружений башенного типа, трубчатые конструкции — воздействие внутреннего и внешнего давления, а также воздушных или газовых потоков.

При существенном различии частот отдельных нагрузок со случайным изменением амплитуд и фаз такие сложные по спектру виды нагружения можно упрощенно представить детерминированными поличастотными режимами, имеющими простую форму цикла:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t)$$

или полигармоническими режимами (рис. 1), в которых все составляющие изменяются по гармоническому закону:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i),$$

где A_i , ω_i — соответственно амплитуды и угловые частоты гармонических составляющих; φ_i — на-

чальные фазы (частота и начальная фаза каждой составляющей обычно являются случайными величинами в некоторой полосе частот $\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$ и интервале фаз $0 \leq \varphi \leq \pi$).

Поскольку отдельные элементы механически связанных систем отличаются фильтрующими (избирательными) свойствами, то широкополосный спектр нагрузок обычно возбуждает в них относительно узкополосную реакцию. При этом во многих сооружениях преобладающее значение имеют лишь нагрузки с наименьшими частотами, так как с повышением частоты составляющих в резонансной области нагружения их уровни существенно снижаются. Это позволяет схематизировать реальную нагруженность таких изделий поличастотными режимами, ограничиваясь во многих случаях двумя–семью спектральными составляющими.

При поличастотном нагружении отдельные составляющие могут существенно отличаться по частоте, в результате чего сопротивление усталости материалов и сварных соединений может зависеть не только от взаимного отношения параметров составляющих, но и от номинальных значений частот.

Имеющиеся отечественные и зарубежные экспериментальные данные показывают, что дополнительное наложение высокочастотной составляющей на основной цикл переменных напряжений вызывает ускоренное накопление повреждений и интенсивное снижение циклической долговечности материалов и сварных соединений. В частности, при двухчастотном нагружении установлено, что отрицательное влияние второй составляющей увеличивается с повышением относительных значений ее амплитуды и частоты [1, 2]. Можно предположить, что увеличение спектрального состава нагрузок также будет сопровождаться снижением ресурса изделий, однако количественно определить сопротивление усталости материалов и соединений при поличастотном нагружении затруд-

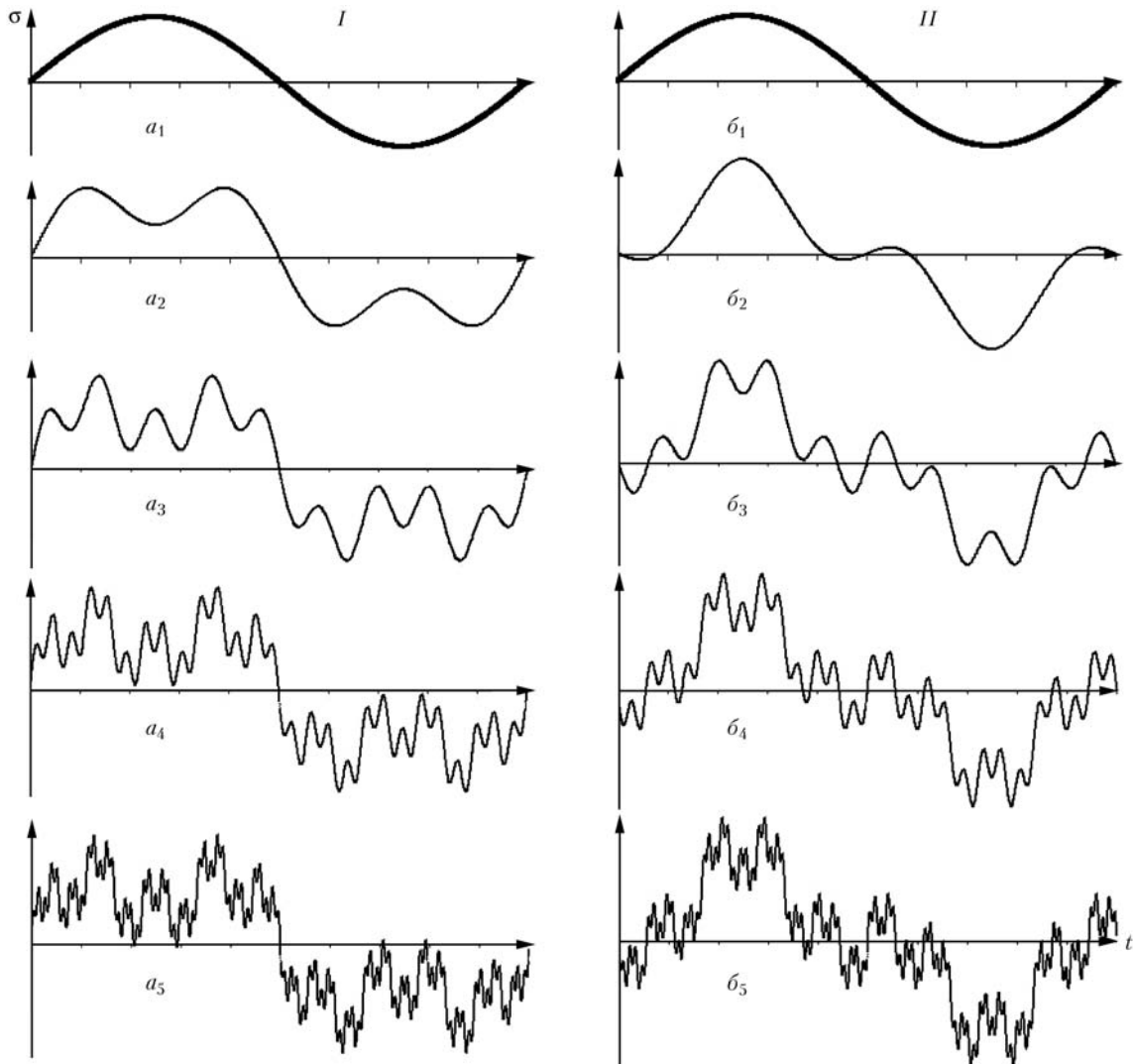


Рис. 1. Форма цикла при гармоническом a_1, b_1 и полигармоническом нагружении с двумя (a_2, b_2) — пятью (a_3, b_3) составляющими: I — начальные фазы всех составляющих $\varphi = 0$; II — начальная фаза основной составляющей b_1 равна $\varphi = 0$, всех остальных $\varphi = \pi$

нительно. Это обусловлено прежде всего тем, что существующие подходы к оценке циклической долговечности материалов при сложных видах переменного нагружения обычно базируются на гипотезе линейного суммирования повреждений. Полученные на ее основе расчетные зависимости дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными только для некоторых значений соотношений параметров и материалов, но в большинстве случаев они могут приводить к значительным погрешностям [3, 4]. Не обеспечивают приемлемой точности также предложения, основанные на использовании нелинейных зависимостей суммирования повреждаемости, трансформировании энергии и энергетической теории усталостного разрушения [4].

Многочисленные опытные данные, полученные на конструкционных сталях различных классов и уровней прочности и их сварных соединениях, показали [5], что коэффициент снижения

долговечности в условиях двухчастотного нагружения α_{1-2} можно найти из соотношения

$$\alpha_{1-2} = N_1 / N_{1-2} = (f_2 / f_1)^{\vartheta (\sigma_{a2} / \sigma_{a1})}, \quad (1)$$

где N_1, N_{1-2} — долговечности, измеряемые количеством циклов нагрузки до возникновения усталостной трещины определенных размеров при одинаковых уровнях напряжений соответственно одночастотного нагружения и низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения; f_1, f_2 — частоты; σ_{a1}, σ_{a2} — амплитуды соответственно низко- и высокочастотной составляющих; ϑ — коэффициент пропорциональности, зависящий от механических свойств материала.

Если материал, вид соединения, концентрация напряжений, остаточные напряжения, асимметрия цикла, температура, критерий усталостного разрушения и прочие условия одно- и двухчастотного нагружения идентичны, то коэффициент α_{1-2} инвариантен к перечисленным параметрам на всех



уровнях напряжений в интервале между пределами выносливости и текучести материала. Это позволяет определять циклическую долговечность при двухчастотном нагружении N_{1-2} по имеющимся расчетным или экспериментальным значениям долговечности N_1 , отвечающим одночастотному нагружению:

$$N_{1-2} = N_1 / \alpha_{1-2}. \quad (2)$$

Можно полагать, что определенная зависимость коэффициента снижения долговечности существует и при большем количестве одновременно действующих переменных нагрузок, т. е. при поличастотном нагружении. Тогда, располагая сведениями о значении этого коэффициента при соответствующих параметрах поличастотного нагружения, циклическую долговечность материалов и соединений можно определять аналогичным образом. Однако поиск таких коэффициентов экспериментальным путем осложняется неограниченным количеством возможных комбинаций амплитуд, частот и составляющих. Кроме того, до настоящего времени не установлен закон накопления повреждений при одной или нескольких составляющих спектра циклических напряжений, особенно на стадии зарождения усталостных трещин.

Установление функциональной связи между параметрами поличастотной нагрузки и коэффициентом изменения циклической долговечности может существенно упроститься, если закономерности накопления повреждений в условиях одно- и поличастотного нагружения подобны. Применительно к двухчастотному нагружению вывод о подобии этих закономерностей следует из анализа полученных ранее результатов экспериментальных исследований конструкционных материалов и сварных соединений. В данном случае инвариантность коэффициента α_{1-2} к ряду конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов можно объяснить одинаковым проявлением их влияния на процессы усталости как при одно-, так и двухчастотном нагружении. В последнем случае циклическая долговечность снижается только под действием дополнительной высокочастотной составляющей, что приводит при фиксированных значениях амплитудных и частотных отношений к параллельному смещению исходной кривой усталости в область меньшей долговечности, а кинетической диаграммы усталостного разрушения — в область более высоких скоростей развития усталостной трещины. Параллельное расположение кривых усталости или диаграмм усталостного разрушения указывает на то, что закономерности процессов накопления повреждений на одинаковых уровнях одно- и двухчастотного нагружений подобны и различаются между собой лишь коэффициентами пропорциональности. Из этого следует, что при фик-

сированном уровне переменных напряжений и едином критерии усталостного разрушения, которым обычно служит усталостная трещина определенных размеров, усталостные повреждения, накопленные в условиях одно- и двухчастотного нагружения, одинаковы. Очевидно, имеет смысл принять в качестве критерия накопленного повреждения условную или реальную усталостную трещину длиной L . В этом случае сопоставление результатов усталостных испытаний можно проводить по средним значениям уровней накопленных повреждений от отдельных циклов переменной нагрузки без учета кинетики повреждаемости материала, которая для каждого вида нагружения в отдельности зависит от многих факторов. Тогда среднюю скорость повреждения за один цикл переменного нагружения V на уровне напряжений σ_a можно определить из выражения

$$V = L/N, \quad (3)$$

где L — накопленное повреждение, эквивалентное реальной или условной усталостной трещине, выраженное в единицах длины (глубины или площади); N — циклическая долговечность до накопления повреждения L , выраженная количеством циклов нагрузки.

При таком подходе накопленное повреждение в условиях одночастотного нагружения можно представить в виде

$$L_1 = V_1 N_1, \quad (4)$$

а двухчастотного нагружения в виде

$$L_{1-2} = V_{1-2} N_{1-2}. \quad (5)$$

Очевидно, что усталостные повреждения при двухчастотном нагружении вызываются совместным действием N_1 циклов основной, обычно низкочастотной нагрузки и N_2 циклов накладывающейся на нее меньшей по значению, но более высокочастотной нагрузки. В этом случае общая величина повреждений равна:

$$L_{1-2} = L_1 + L_2. \quad (6)$$

Если учесть, что для определения коэффициента снижения долговечности при двухчастотном нагружении сопоставляемые количества циклов N_1 и N_{1-2} должны выбираться при одинаковых значениях длин усталостных трещин $L_1 = L_{1-2}$, то равенство их значений $V_1 N_1 = V_{1-2} N_{1-2}$ с учетом выражения (1) позволяет получить зависимость

$$V_{1-2}/V_1 = \alpha_{1-2}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что средняя скорость накопления усталостных повреждений при двухчастотном нагружении в α_{1-2} раз больше, чем при одночастотном. Для оценки степени влияния каждой составляющей двухчастотного нагруже-



ния на процесс накопления усталостных повреждений следует сопоставить повреждения, накопленные в условиях одно- и двухчастотного нагружения при одинаковых количествах циклов одночастотного нагружения и низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения, т. е. $N_1 = N_{1-2}$. Тогда повреждение от низкочастотной составляющей L_1 можно определить из выражения (4), а от высокочастотной составляющей L_2 — из соотношения

$$L_2 = L_{1-2} - L_1 = V_{1-2}N_{1-2} - V_1N_1 = N_1(V_{1-2} - V_1).$$

После замены в этом выражении $V_{1-2} = V_1\alpha_{1-2}$ его значением из выражения (7), повреждение L_2 можно представить в виде: $L_2 = N_1V_1(\alpha_{1-2} - 1)$, а с учетом (4) в виде

$$L_2 = L_1(\alpha_{1-2} - 1). \quad (8)$$

Это выражение показывает, что процесс накопления усталостных повреждений L_2 от дополнительной высокочастотной составляющей происходит в $(\alpha_{1-2} - 1)$ раз интенсивнее, чем от основной низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения. На основании этого общие повреждения, вызванные совместным действием низко- и высокочастотной составляющих двухчастотного нагружения, можно представить в виде

$$L_{1-2} = L_1 + L_1(\alpha_{1-2} - 1) = L_1\alpha_{1-2}, \quad (9)$$

а среднюю скорость их накопления в виде

$$V_{1-2} = L_1\alpha_{1-2}/N_{1-2}. \quad (10)$$

По аналогии с двухчастотным нагружением общие усталостные повреждения, накопленные при поличастотном нагружении, могут быть определены в виде суммы повреждений от всех составляющих:

$$L_{1-n} = L_1 + L_2 + \dots + L_n. \quad (11)$$

После подстановки в выражение (11) соответствующих значений и несложного преобразования зависимость для определения усталостного повреждения при поличастотном нагружении L_{1-n} по данным одночастотного нагружения L_1 может быть представлена в виде

$$L_{1-n} = L_1 \left[1 + \sum_{i=2}^n (\alpha_i - 1) \right]. \quad (12)$$

По аналогии с зависимостью (9) коэффициент снижения циклической долговечности при поличастотном нагружении может быть определен из выражения (12) в виде

$$\alpha_{1-2} = 1 + \sum_{i=2}^n (\alpha_i - 1). \quad (13)$$

Эта зависимость позволяет определять циклическую долговечность при поличастотном нагружении N_{1-n} подобно (2) по формуле

$$N_{1-n} = N_1 / \left[1 + \sum_{i=2}^n (\alpha_i - 1) \right]. \quad (14)$$

При практическом использовании выражений (13) и (14) важно правильно выбрать методику определения значений α_i для отдельных составляющих по выражению (1). Реально возможны два подхода: первый — величину α_i определять по отношению к единой основной составляющей, имеющей наибольшую амплитуду напряжений σ_{a1} , т. е. $\alpha_{2,1}$; $\alpha_{3,1}$; $\alpha_{4,1}$ и т. д., и второй — величину α_i определять по отношению параметров между отдельными составляющими по ранжиру снижения амплитуд напряжений σ_{ai} , т. е. $\alpha_{2,1}$; $\alpha_{3,2}$; $\alpha_{4,3}$ и т. д.

Из рис. 1 видно, что наибольшее изменение формы цикла основной составляющей (a_1, b_1) вызвано второй по уровню и частоте составляющей. Третья составляющая оказывает наибольшее влияние на форму цикла второй составляющей и т. д. Исходя из этого можно предполагать, что при малом количестве составляющих существенных различий в определении α_{1-n} при обоих вариантах нахождения α_i не будет. Однако при большом количестве составляющих предпочтительным, а следовательно, и более общим решением будет второй вариант.

Окончательное заключение об адекватности предлагаемого метода и выборе соответствующего варианта определения коэффициентов α_i может быть получено на основании результатов экспериментальной проверки. С этой целью были изготовлены и испытаны на усталость при одно- и поличастотном мягком осевом растяжении плоские образцы (рис. 2) с центральным отверстием, а также со стыковым сварным соединением. Как отмечалось выше, при поличастотном нагружении отдельные составляющие могут существенно отличаться по частоте, а сопротивление усталости сварных соединений может зависеть не только от взаимного отношения параметров составляющих, но и от номинальных значений частот. Учитывая, что степень влияния частоты нагружения на циклическую долговечность заметно снижается с повышением прочностных характеристик конструкционных материалов [6], для исключения или значительного ослабления влияния этого фактора на результаты исследований образцы изготавливали из высокопрочной стали с пределом текучести примерно 1000 МПа. Для получения исходных данных в условиях отнулевого одночастотного нагружения усталостные испытания образцов из основного металла выполняли при час-

тотах 3, 30 и 300 циклов в минуту, входящих в диапазон частот, в котором обычно наблюдается наибольшее изменение сопротивления усталости и который охватывает частоты основных переменных нагрузок многих сварных металлоконструкций. При поличастотном нагружении спектр состоял из нескольких, разных по частоте и амплитуде составляющих. В реальных конструкциях уровни составляющих более высоких частот ниже, чем основной переменной нагрузки и, как правило, уменьшаются с увеличением номинальной частоты, а сдвиг фаз между ними может произвольно изменяться во времени. Подобным образом задавали режимы испытаний образцов при полигармоническом нагружении. Так, отношения амплитуд напряжений трехчастотного нагружения $\sigma_{a1}:\sigma_{a2}:\sigma_{a3}$ устанавливали в пределах, близких к 1:0,4:0,2, а отношения частот $f_1:f_2:f_3$ — в пределах 1:3:9 и 1:9:81 с нулевой начальной фазой основной составляющей и нефиксированной в процессе испытаний начальной фазой $\varphi = \pi$ остальных составляющих («плавающая фаза»). Аналогично испытывали часть образцов с количеством составляющих, равным 4–7. Асимметрию и количество циклов при полигармоническом нагружении определяли по основной составляющей, имеющей наименьшую частоту и наибольшую амплитуду. В качестве критерия усталостного разрушения этих образцов принимали начальную стадию развития трещины. В процессе испытаний усталостные трещины зарождались обычно на внутренних поверхностях отверстия, расположенных по горизонтальной оси образцов и развивались по длине и глубине перпендикулярно прикладываемой нагрузке. При выходе усталостных трещин на боковую поверхность образцов и развитии их длины до 3...4 мм испытания прекращали. Результаты усталостных испытаний образцов основного материала высокопрочной стали при одночастотном нагружении представлены в графическом виде на рис. 3, кривая 1, а при полигармоническом нагружении — в таблице.

В качестве основного вида сварного соединения приняли стыковой шов, широко распространенный в несущих элементах конструкций и имеющий высокое сопротивление усталости в условиях переменного нагружения. Размеры сварных образцов (рис. 2, б) выбирали из условия возникновения в них высоких остаточных напряжений в процессе сварки и создания требуемых рабочих напряжений при усталостных испытаниях на сервогидравлической машине типа РС1 фирмы «SCHENCK» усилием 1000 кН. Образцы изготовляли из листовой высокопрочной стали толщиной 20 мм. Заготовки образцов вырезали вдоль проката с помощью аппарата для воздушно-плазменной резки металла типа «Киев-4». Поверхности пластин обрабатывали фре-

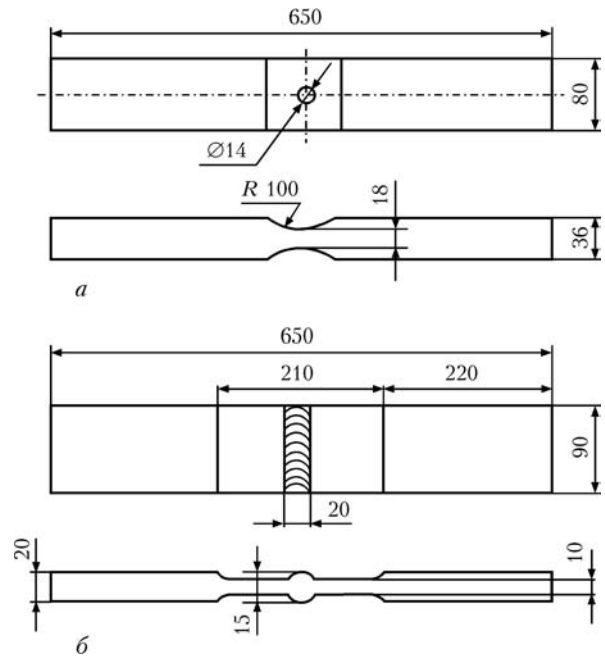


Рис. 2. Схемы образцов для усталостных испытаний при одно- и поличастотном нагружении из основного металла с центральным отверстием (а) и со стыковым сварным соединением (б)

зерованием с последующим шлифованием рабочей части до толщины 10 мм. Двустороннюю симметричную разделку кромок под сварку выполняли под углом 45° с притуплением 2 мм. Сварку образцов проводили механизированным способом на постоянном токе обратной полярности. В качестве сварочных материалов применяли электродную проволоку Св-03ГХНЗМД диаметром 3 мм и флюс марки ФИМС-20П. Для обеспечения высокой стойкости металла шва и околошовной зоны против образования трещин соединяемые кромки образцов перед сваркой подогревали до 373 К. Каждый образец сваривали отдельно за четыре прохода в горизонтальном положении, начало и конец стыкового шва располагали на вы-

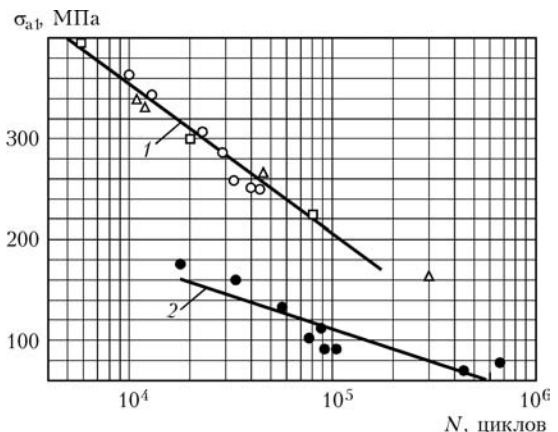


Рис. 3. Кривые усталости образцов высокопрочной стали с центральным отверстием (1) и со стыковым сварным соединением (2) при одночастотном осевом растяжении: Δ , \square , \circ — $r = 0$, соответственно $f = 3; 30; 300 \text{ мин}^{-1}$; \bullet — $r = 0,3$; $f = 180 \text{ мин}^{-1}$



Результаты усталостных испытаний образцов основного металла и сварных соединений высокопрочной стали при полигармоническом осевом растяжении ($r = 0, \vartheta = 1,67$)

Образцы	Режим нагружения образцов														Количество циклов, тыс.		Коэффициент α		
	Частота, Гц							Напряжения, МПа							Полигарм.	Одночаст.	α_{Σ}	Расчет	
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	σ_{a1}	σ_{a2}	σ_{a3}	σ_{a4}	σ_{a5}	σ_{a6}	σ_{a7}				Вар. 1	Вар. 2
Основной металл	1,62	4,86	14,58	-	-	-	-	210	84	43	-	-	-	-	25,0	91	3,6	3,20	3,64
	0,54	1,62	4,86	-	-	-	-	210	83	84	-	-	-	-	14,0	91	6,5	5,41	7,56
	0,18	1,62	14,58	-	-	-	-	189	70	25	-	-	-	-	20,0	115	5,3	5,48	6,51
	0,18	1,62	14,58	-	-	-	-	198	80	41	-	-	-	-	14,1	110	7,8	7,98	9,97
	0,06	0,54	4,86	-	-	-	-	195	76	40	-	-	-	-	6,9	105	15,2	7,69	10,08
	0,02	0,18	1,62	14,58	-	-	-	203	77	61	39	-	-	-	2,6	96	36,9	19,22	30,83
	0,02	0,06	0,18	1,62	14,58	-	-	219	93	65	46	23	-	-	3,61	75	20,8	10,00	22,47
	0,02	0,06	0,18	0,54	1,62	14,58	-	213	88	62	43	32	18	-	2,07	80	38,6	9,63	17,14
	0,02	0,06	0,18	0,54	1,62	4,86	14,58	225	67	56	46	31	22	11	2,74	66	24,1	9,21	15,50
Стыковые соединения	0,54	1,62	4,86	-	-	-	-	154	63	30	-	-	-	-	7,0	32	4,5	3,16	3,51
	0,54	1,62	4,86	-	-	-	-	141	56	29	-	-	-	-	5,0	44	8,8	3,20	3,66
	0,54	1,62	4,86	-	-	-	-	132	52	27	-	-	-	-	12,0	60	5,0	3,18	3,65
	0,54	1,62	4,86	-	-	-	-	95	28	15	-	-	-	-	30,0	80	2,7	2,50	3,39
	0,18	1,62	14,58	-	-	-	-	84	34	17	-	-	-	-	44,4	250	5,6	7,83	9,68
	0,18	1,62	14,58	-	-	-	-	123	50	25	-	-	-	-	6,0	70	11,7	7,89	9,71
	0,18	1,62	14,58	-	-	-	-	140	42	21	-	-	-	-	11,9	44	4,7	5,01	8,27
	0,18	1,62	14,58	-	-	-	-	158	48	24	-	-	-	-	4,5	28	6,2	5,10	8,31
	0,02	0,06	0,18	1,62	14,58	-	-	100	41	30	15	5	-	-	7,65	60	7,8	6,87	12,60
	0,02	0,18	0,54	1,62	4,86	14,58	-	100	38	35	29	20	10	-	2,6	60	23,0	24,56	16,10
	0,02	0,06	0,18	0,54	1,62	4,86	14,58	120	48	42	40	30	24	12	1,03	30	29,0	22,49	18,60

водных планках, предварительно приваренных к пластинам. После сварки выводные планки удаляли воздушно-плазменной резкой, а боковые грани обрабатывали фрезерованием.

Поскольку рациональное использование высокопрочных сталей в сварных конструкциях достигается при асимметричном осевом растяжении, то характеристику цикла одночастотного и основной составляющей поличастотного нагружения принимали равной $r = 0,3$. В качестве критерия завершения усталостных испытаний принимали усталостную трещину длиной 3 мм на поверхности образца. Усталостные испытания сварных образцов при одночастотном нагружении выполняли в условиях мягкого гармонического осевого растяжения с частотой 3 Гц. Усталостные тре-

щины в образцах зарождались по линии сплавления шва с основным металлом. Результаты усталостных испытаний сварных образцов при одночастотном нагружении представлены на рис. 3, кривая 2. Режимы испытаний сварных соединений при полигармоническом нагружении выбирали таким же образом, как и для образцов основного металла с тремя, пятью, шестью и семью составляющими (таблица). Расчетные значения суммарных коэффициентов снижения циклической долговечности образцов основного и сварного соединения при полигармоническом нагружении, определенные по первому α_{p1} и второму α_{p2} варианту, также представлены в таблице. Результаты сопоставления расчетных α_p коэффициентов снижения долговечности с экспериментальными α_{Σ} , представленные на рис. 4, показывают, что оба варианта расчета позволяют получить приемлемую точность при полигармоническом нагружении с тремя–семью составляющими. Однако второй вариант расчета α_{p2} предпочтительнее, поскольку обеспечивает некоторый запас долговечности при нагружении с тремя–пятью составляющими. Следует отметить, что результаты сравнения α_p/α_{Σ} имеют, на первый взгляд, повышенное рассеяние. Однако в данном случае, по-видимому, получить более высокую точность экспериментальных α_{Σ} и расчетных α_p значений затруднительно. Это связано с изменением значения и характера циклов суммарной нагрузки, которые при малых отношениях частот зависят не только от соотношений амплитуд, но и от закона изменения сдвига фаз между составляющими. В процессе нагружения эта закономерность определяется начальным сдвигом фаз, а также отношением и кратностью составляющих

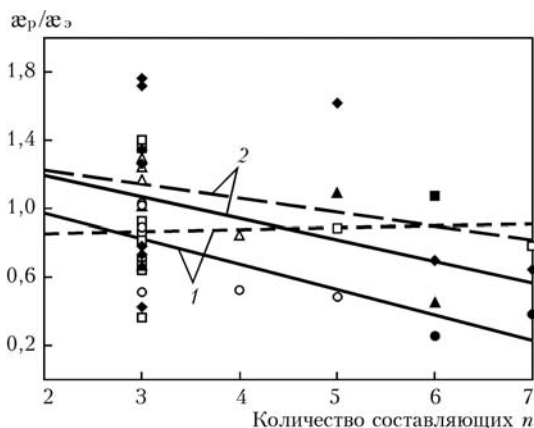


Рис. 4. Результаты сопоставления расчетных α_p и экспериментальных α_{Σ} значений коэффициентов снижения циклической долговечности образцов основного металла (ОМ) и стыкового сварного соединения (СС) при полигармоническом нагружении: 1 — первый вариант расчета соответственно ОМ (●) и СС (■); 2 — второй вариант расчета соответственно ОМ (▲) и СС (◆)



частот. Влиять на характер этой зависимости в реальных условиях эксплуатации конструкций невозможно. Поэтому в предлагаемых аналитических зависимостях используется формула (1), не учитывающая сдвига фаз между составляющими и применяемая при двухчастотном нагружении с отношением частот более 10, когда влиянием сдвига фаз можно пренебречь. Однако при некратных отношениях частот сдвиг фаз между составляющими, а соответственно характер и значение суммарной нагрузки постоянно изменяются во времени от минимальных до максимальных значений. В этих случаях эффективной суммарной нагрузкой, вероятно, будет ее среднее за время воздействия значение. При кратных отношениях частот и фиксированных сдвигах фаз между составляющими (см. рис. 1) в зависимости от их начальных значений могут быть получены максимальные или минимальные значения α . В строительных металлоконструкциях последние случаи маловероятны, а в условиях усталостных испытаний на современном оборудовании с программным управлением вполне возможны.

Выводы

1. Предложенные методика и аналитические зависимости позволяют определять коэффициенты снижения циклической долговечности материалов и сварных соединений при поличастотном нагружении.

2. По исходным данным одночастотного нагружения и заданным параметрам составляющих

поличастотного нагружения можно прогнозировать циклическую долговечность элементов металлоконструкций в этих условиях.

3. Полученные в работе результаты экспериментальных исследований циклической долговечности основного металла стали и стыковых сварных соединений подтвердили приемлемую точность методики и расчетных зависимостей. При трех–семи составляющих полигармонического нагружения основная часть результатов сопоставления расчетных и экспериментальных значений коэффициента снижения циклической долговечности согласуется с погрешностью не более 40 %.

1. Буглов Е. Г., Филатов М. Я., Коликов Э. А. Сопротивление материалов при двухчастотном нагружении (Обзор) // Пробл. прочности. — 1973. — № 5. — С. 13–17.
2. Труфяков В. И., Ковальчук В. С. Определение долговечности при двухчастотном нагружении: Сообщение 1. Обзор // Там же. — 1982. — № 9. — С. 9–15.
3. Геминев В. Н. О физических основах методов суммирования повреждаемости при нестационарных режимах нагружения (Обзор) // Прочность металлов при циклических нагрузках. — М.: Наука, 1967. — С. 36–43.
4. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч. 1. — Киев: Наук. думка, 1987. — 510 с.
5. Труфяков В. И., Ковальчук В. С. Определение долговечности при двухчастотном нагружении: Сообщение 2. Предлагаемая методика // Пробл. прочности. — 1982. — № 10. — С. 15–20.
6. Ковальчук В. С. Влияние частоты нагружения на сопротивление усталости сталей и сварных соединений // Автомат. сварка. — 1991. — № 1. — С. 30–34.

Procedure and analytical dependencies are proposed for calculation of cyclic fatigue life of materials, as well as welded joints at polyfrequency loading by the initial data, corresponding to the single-frequency loading. Conducted experimental verification of the derived dependencies on large-scale samples including welded sampled, confirmed their validity in a broad range of variation of polyfrequency loading parameters, the spectrum of which consists of 3...7 components.

Поступила в редакцию 22.02.2008

ДЕСЯТАЯ ЮБИЛЕЙНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СУДОСТРОЕНИЮ, СУДОХОДСТВУ, ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОРТОВ, ОСВОЕНИЮ ОКЕАНА И ШЕЛЬФА

НЕВА 2009

22–25 сентября 2009 г.

г. Санкт-Петербург

Тематика выставки включает обширный раздел
СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СУДОСТРОЕНИИ,
ПРОИЗВОДСТВЕ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ
БЕРЕГОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Контакт: тел./факс: +7 (812) 321-26-31, 321-27-22