

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКИ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

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

Предложены методика, аналитические зависимости и номограммы для определения области эффективного применения упрочнения сварных соединений стали 09Г2С высокочастотной механической проковкой и оценки ее влияния на повышение циклической долговечности при двухчастотном нагружении.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварные стальные конструкции, двухчастотное нагружение, сварные соединения, повышение циклической долговечности, высокочастотная механическая проковка

Повышение циклической долговечности сварных металлоконструкций на стадии изготовления, а также после ремонта и восстановления соединений с помощью сварки является важной и актуальной задачей. Существуют различные способы повышения сопротивления усталости сварных соединений. Как правило, они основаны на снятии растягивающих или искусственном наведении благоприятных сжимающих остаточных напряжений в зоне перехода сварного шва к основному металлу. Одним из наиболее эффективных, производительных и экономичных способов создания остаточных напряжений сжатия, снижения концентрации напряжений и поверхностного упрочнения металла шва или зоны перехода сварного шва к основному металлу является механическая высокочастотная проковка с использованием ультразвуковых преобразователей [1–3]. При одночастотном нагружении такая дополнительная обработка может повысить циклическую долговечность сварных соединений конструкционных сталей в зависимости от типа соединений, класса прочности материала и асимметрии цикла в 2...10 раз. Однако реальный спектр нагружения многих элементов конструкций состоит из двух и более одновременно действующих разных по амплитуде и частоте переменных составляющих. Полученные ранее результаты экспериментальных исследований показали, что циклическая долговечность материалов и сварных соединений при двухчастотном нагружении зависит от амплитудных и частотных отношений напряжений, а также механических характеристик металлов [4]. При этом с повышением последних долговечность существенно снижается. Поскольку при механической проковке в результате упругопластического деформирования происходит поверхностное упроч-

нение металла [3], то можно ожидать снижения эффективности такой обработки изделий, которые эксплуатируются в условиях переменного нагружения с дополнительными напряжениями от вибраций.

Для оценки влияния высокочастотной механической проковки на повышение сопротивления усталости сварных соединений в условиях двухчастотного нагружения проведены экспериментальные исследования крупномасштабных образцов из низколегированной стали 09Г2С с продольными ребрами (рис. 1), имеющих высокие значения концентрации напряжений и уровня растягивающих остаточных сварочных напряжений в исходном состоянии, соизмеримые с таковыми в реальных конструкциях. Сварные швы продольных ребер образцов были выполнены ручной дуговой сваркой штучными электродами УОНИ-13/55 с полным проваром. Для получения исходных данных о сопротивлении усталости соединений при одно- и двухчастотном нагружении образцы испытывали в состоянии после сварки. Для оценки влияния упрочнения на повышение долговечности соединений в аналогичных условиях испытаний зоны перехода швов к основному металлу на длине 70 мм от края ребер образцов дополнительно обрабатывали высокочастотной

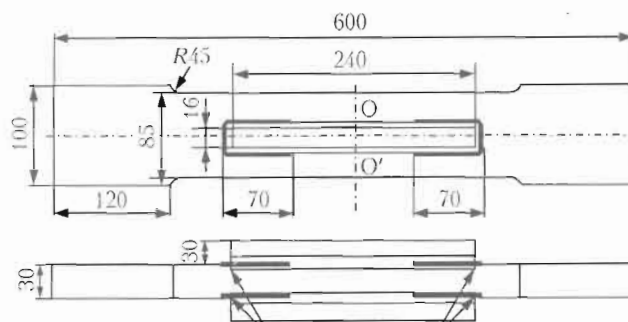


Рис. 1. Вид образца для оценки эффективности высокочастотной механической проковки в повышении сопротивления усталости сварных соединений при циклах нагружения простой и сложной формы (стрелками показано расположение зон, обработанных проковкой)

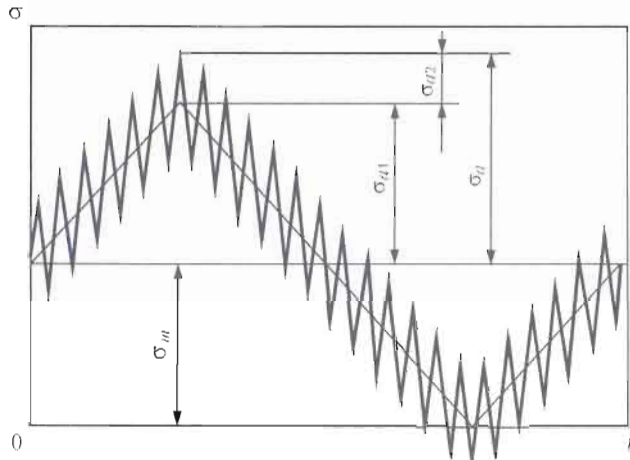


Рис. 2. Форма цикла нагружения; σ_{a2}/σ_{a1} — амплитуды соответственно низко- и высокочастотного напряжения; σ_a — суммарная амплитуда напряжений; σ_m — среднее напряжение цикла; t — время

механической проковкой. На образцах в исходном состоянии после испытаний при двухчастотном нагружении до образования усталостных трещин критических размеров роль проковки определяли на отремонтированных сваркой швах. С этой целью металл вокруг трещин удаляли пальцевой фрезой, углубления заваривали электродами УО-НИ-13/55, а зону перехода от шва к основному металлу обрабатывали высокочастотной механической проковкой. Усталостные испытания продолжали на тех же режимах нагружения до образования новых трещин таких же размеров. Усталостные испытания образцов выполняли при мягком режиме отнулевого одно- и двухчастотного осевого растяжения на сервогидравлической машине УРС 200/20. В процессе испытаний усталостные трещины, как правило, зарождались по линии сплавления лобового шва с основным металлом. Критерием завершения испытаний принимали развивающуюся усталостную трещину длиной 20 мм. Усталостные испытания при одночастотном нагружении выполняли на частоте $f_1 = 5$ Гц, частота дополнительных вибраций в условиях двухчастотного нагружения (рис. 2) составляла $f_2 = 10$ Гц. Низкочастотная составляющая двухчастотного нагружения с соотношением частот $f_2/f_1 = 100$ составляла $f_1 = 0,1$ Гц. Испытания при двухчастотном нагружении выполняли при соотношениях амплитуд напряжений высоко- и низкочастотной составляющих $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} \approx 0,2$ и $0,4$.

Полученные результаты усталостных испытаний при одночастотном нагружении образцов в исходном состоянии 1 и после высокочастотной механической проковки 2 представлены на рис. 3. Сопоставление этих данных показывает, что высокочастотная механическая проковка сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами жесткости повышает циклическую долговечность при одночастотной нагрузке в 5 раз:

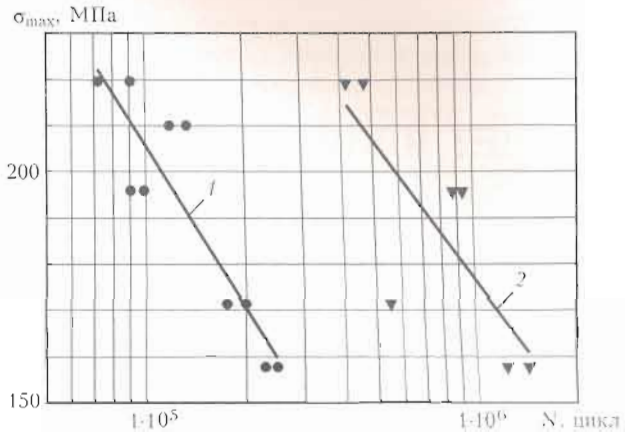


Рис. 3. Сопротивление усталости сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами жесткости при отнулевом одночастотном растяжении в исходном состоянии (1) и после высокочастотной механической проковки (2)

$$K_{1п.д} = N_{1у}/N_{1и} \quad (1)$$

где $K_{1п.д}$ — коэффициент повышения долговечности при одночастотном нагружении после проковки соединения; $N_{1у}$, $N_{1и}$ — циклическая долговечность (количество циклов) при одночастотном нагружении сварного соединения соответственно упрочненного проковкой и в исходном состоянии.

Результаты исследований сопротивления усталости при двухчастотном нагружении аналогичных образцов стали 09Г2С в исходном состоянии, а также после высокочастотной механической проковки зон перехода от шва к основному металлу соединений в исходном состоянии и после ремонта сваркой представлены в таблице.

Коэффициент снижения циклической долговечности сварных соединений при двухчастотном нагружении в исходном после сварки состоянии и после высокочастотной проковки определяли с помощью полученной ранее для сталей различных классов прочности и типов соединений аналитической зависимости, инвариантной к концентрации напряжений, остаточной напряженности, температуре, характеристике цикла, виду и уровню нагружения, а также к ряду других факторов [5]:

$$\alpha = (f_2/f_1)^{\beta(\sigma_{a2}/\sigma_{a1})} \quad (2)$$

где $\alpha = N_1/N_2$ — коэффициент снижения циклической долговечности при двухчастотном нагружении, определяемый отношением долговечностей в условиях одно- и двухчастотного нагружения при одинаковых уровнях низкочастотного напряжения, коэффициенте асимметрии цикла, остаточных напряжениях, температуре и других параметрах; N_1 — долговечность (количество циклов) сварного соединения при одночастотном нагружении; N_2 — то же при двухчастотном нагружении, исчисляемая количеством циклов низкочас-



Сопротивление усталости сварных соединений стали 09Г2С с продольными ребрами жесткости в условиях осевого отнулевого двухчастотного растяжения

Состояние образца	Максимальное напряжение σ_{1max} , МПа	σ_{a2}/σ_{a1}	Количество циклов нагружения		α (экспериментальное)	ϑ (расчетное)	ϑ (среднее)
			$N_2 \cdot 10^{-3}$	$N_1 \cdot 10^{-3}$			
Исходное после сварки	202,8	0,177	25,396	97	3,82	1,6	1,4
	206,0	0,193	22,492	90	4,00	1,53	
	203,6	0,380	8,700	95	10,92	1,37	
	210,3	0,430	7,105	76	10,70	1,19	
После проковки в исходном состоянии	230,0	0,220	36,646	300	8,19	2,1	2,1
	206,0	0,193	79,916	500	6,26	2,0	
	222,5	0,190	26,200	340	13,0	2,8	
	203,6	0,380	17,270	530	30,68	1,96	
После ремонта сваркой и проковки	230,0	0,200	37,250	300	8,1	2,20	2,0
	206,0	0,193	71,400	500	7,0	2,18	
	203,6	0,380	19,890	530	26,6	1,87	
	210,3	0,430	15,330	430	28,1	1,67	

тотной составляющей; ϑ — поправочный коэффициент, зависящий от механических свойств материала. Как видно из табл. 1, значения ϑ для упрочненных проковкой сварных соединений выше, чем для соединений в исходном состоянии. На основе этих данных по зависимости (2) построены номограммы для определения коэффициентов снижения долговечности сварных соединений стали 09Г2С при двухчастотном нагружении в исходном состоянии (рис. 4, а) в виде отношения долговечностей

$$\alpha_y = N_{1и} / N_{2и} \quad (3)$$

и после упрочнения высокочастотной механической проковкой соединений в исходном состоянии или после ремонта сваркой (рис. 4, б):

$$\alpha_{и} = N_{1у} / N_{2у} \quad (4)$$

где $N_{2и}$ и $N_{2у}$ — соответственно долговечность при двухчастотном нагружении сварного соединения, исчисляемая по количеству циклов низкочастотной составляющей в исходном состоянии и упрочненного высокочастотной проковкой.

Как видно из рис. 4, при фиксированных значениях отношений амплитуд и частот значения коэффициента снижения долговечности сварных соединений α_y упрочненных высокочастотной проковкой, в исходном состоянии или после ремонта сваркой больше, чем коэффициента $\alpha_{и}$ сварных соединений в исходном состоянии без упрочнения. Поскольку коэффициенты снижения долговечности при двухчастотном нагружении α_y и $\alpha_{и}$ в рассматриваемых случаях определяются аналитической зависимостью (2) и отличаются лишь значениями коэффициента ϑ , то коэффи-

циент $K_{20.c.d}$ относительного снижения долговечности при двухчастотном нагружении сварных соединений после упрочнения высокочастотной механической проковкой можно представить в следующем виде:

$$K_{20.c.d} = \alpha_y / \alpha_{и} = (f_2 / f_1)^{(\sigma_{a2} / \sigma_{a1}) (\vartheta_y - \vartheta_{и})} \quad (5)$$

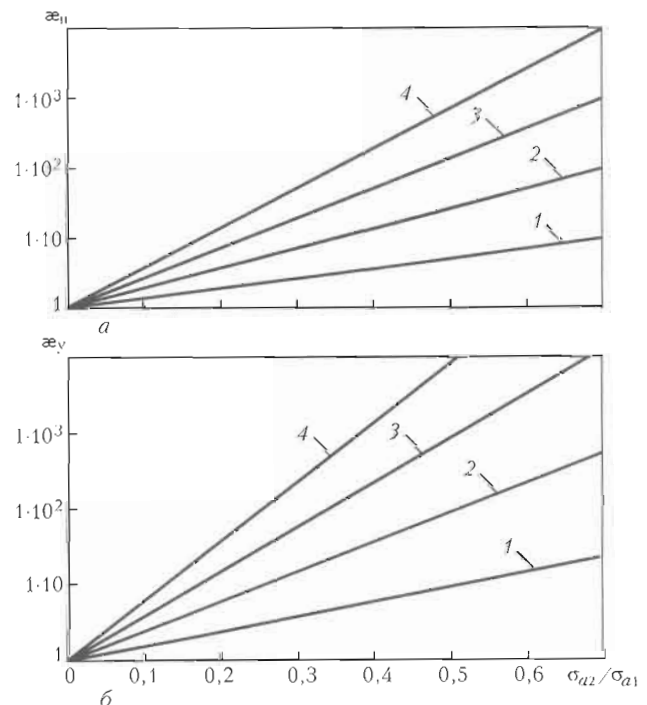


Рис. 4. Номограммы для определения коэффициента снижения циклической долговечности сварных соединений стали 09Г2С при двухчастотном нагружении в исходном состоянии (а) и упрочненных высокочастотной механической проковкой в исходном состоянии и после ремонта сваркой (б), полученные при различном соотношении частот: 1 — $f_2/f_1 = 1 \cdot 10$; 2 — $1 \cdot 10^2$; 3 — $1 \cdot 10^3$; 4 — $1 \cdot 10^4$

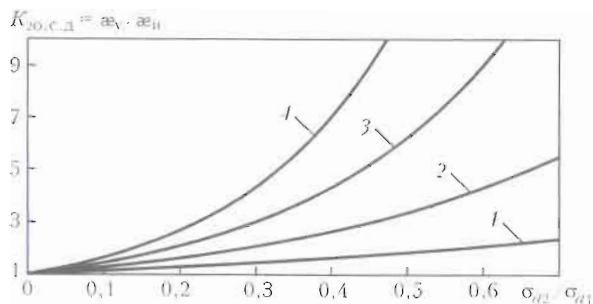


Рис. 5. Номограмма для определения коэффициента $K_{20,c,d}$ относительного снижения долговечности при двухчастотном нагружении упрочненных проковкой сварных соединений (1-4 — см. рис. 4)

С учетом полученных значений ϑ_y и ϑ_n эта аналитическая зависимость в графическом виде представлена на рис. 5. Из этого рисунка видно, что с ростом амплитудных и частотных отношений составляющих двухчастотного нагружения циклическая долговечность сварных соединений стали 09Г2С, обработанных высокочастотной механической проковкой, снижается более интенсивно, чем соединений в исходном состоянии. В результате эффективность проковки уменьшается и, начиная с некоторых значений параметров двухчастотного нагружения, механическая высокочастотная проковка может стать бесполезной или даже вредной.

Очевидно, что при двухчастотном нагружении дополнительная проковка эффективна в случае, если значения коэффициента $K_{1,n,d}$ повышения долговечности в условиях одночастотного нагружения будут больше, чем коэффициента относительного снижения долговечности в условиях двухчастотного нагружения $K_{20,c,d}$.

Реальные значения эффективного коэффициента повышения циклической долговечности при двухчастотном нагружении $K_{23,n,d}$ упрочненных высокочастотной механической проковкой сварных соединений стали 09Г2С можно найти из зависимости

$$K_{23,n,d} = K_{1,n,d} / K_{20,c,d} \quad (6)$$

подставив в нее фактические значения из выражений (1) и (5). Для исследуемых сварных соединений стали 09Г2С экспериментально определены $\vartheta_y = 2,1$, $\vartheta_n = 1,4$ и $K_{1,n,d} = 5$. После подстановки этих данных в выражение (5) эффективный коэффициент повышения долговечности высокочастотной механической проковкой сварных соединений стали 09Г2С при двухчастотном нагружении определяется из аналитического выражения

$$K_{23,n,d} = 5 / (f_2/f_1)^{0,7(\sigma_{a2}/\sigma_{a1})} \quad (7)$$

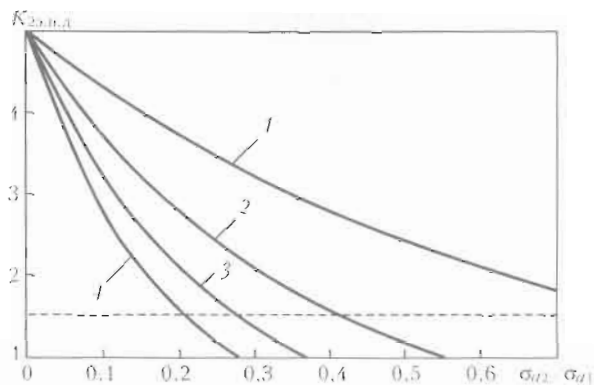


Рис. 6. Номограмма для определения области эффективного использования механической высокочастотной проковки с целью повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С при различных параметрах двухчастотного нагружения (1-4 — см. рис. 4)

или из его зависимостей, представленных на рис. 6.

Очевидно, что дополнительная высокочастотная проковка сварных соединений при двухчастотном нагружении целесообразна, если значение $K_{23,n,d}$ существенно превышает 1. Однако исходя из технических и экономических соображений можно рекомендовать принять его минимальное значение на уровне $K_{23,n,d} = 1,5$ (на рис. 6 этот уровень обозначен штриховой линией).

При значениях эффективного коэффициента повышения долговечности $K_{23,n,d} = 1,5 \div 1,0$ высокочастотная механическая проковка становится малоэффективной, а при $K_{23,n,d} < 1$ — вредной. Как видно из рис. 6, в этом случае в области эффективного применения высокочастотной механической проковки с целью повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С при увеличении соотношения f_2/f_1 от $1 \cdot 10$ до $1 \cdot 10^4$ максимальное значение σ_{a2}/σ_{a1} снижается от 0,9 до 0,2.

На основе полученных результатов исследований для повышения циклической долговечности при двухчастотном нагружении можно рекомендовать следующий порядок определения необходимости и учета упрочнения высокочастотной механической проковкой сварных соединений стали 09Г2С в исходном состоянии или после ремонта сваркой.

1. Исходя из заданных параметров двухчастотного нагружения по аналитической зависимости (7) либо номограмме, представленной на рис. 6, для исследованного типа соединения или с учетом значения $K_{1,n,d}$ для других типов соединений и асимметрии цикла нагружения определяют значения эффективного коэффициента $K_{23,n,d}$ повышения долговечности высокочастотной проковки сварных соединений стали 09Г2С.

2. Определяют целесообразность применения механической высокочастотной проковки при условии, что коэффициент повышения циклической



долговечности высокочастотной проковки $K_{2\text{э.п.д}} = 1,5$ или более.

3. По кривой усталости I (см. рис. 3) для исследованного типа соединения или по соответствующим зависимостям или кривым усталости для других типов соединений и асимметрии цикла напряжений находят количество циклов $N_{1и}$ при одночастотном нагружении по уровню напряжений, соответствующему низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения.

4. Вычисляют коэффициент снижения циклической долговечности α_y по формуле (2) или номограмме (см. рис. 4, б), где коэффициент, зависящий от свойств материала для сварных соединений стали 09Г2С после механической высокочастотной проковки, составляет $\vartheta = 2,1$.

5. Находят расчетное число циклов напряжений низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения сварного соединения, упрочненного высокочастотной проковкой с учетом влияния высокочастотной составляющей из выражения $N_{2y} = N_{1и} / \alpha_y$.

Выводы

1. Коэффициент снижения циклической долговечности при двухчастотном нагружении сварных соединений стали 09Г2С после механической высокочастотной проковки определяется тем же аналитическим выражением, что и без проковки, но с разными значениями поправочных коэффициентов ϑ .

2. В аналитическом выражении коэффициента снижения циклической долговечности показатель степени для обработанных проковкой соединений в 1,5 раза выше, чем для необработанных. В результате этого циклическая долговечность свар-

ных соединений стали 09Г2С, упрочненных высокочастотной механической проковкой, в условиях двухчастотного нагружения снижается в большей степени, чем без проковки; с увеличением соотношений амплитуд и частот это различие возрастает.

3. В зависимости от соотношения частот составляющих двухчастотного нагружения f_2/f_1 (от $1 \cdot 10$ до $1 \cdot 10^4$) область эффективного применения высокочастотной проковки с целью повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С ограничивается соотношением напряжений σ_{a2}/σ_{a1} соответственно от 0,9 до 0,2.

4. Чтобы дополнительная высокочастотная проковка сварных соединений стали 09Г2С была оправданной, рекомендуемое минимальное значение эффективного коэффициента повышения долговечности $K_{2\text{э.п.д}}$ должно составлять не менее 1,5.

1. Михеев П. П. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой // Пробл. сварки и специальной электроталлургии: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
2. Кныш В. В., Кузьменко А. З. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Сварщик. — 2005. — № 2. — С. 19–21.
3. Лобанов Л. М., Кир'ян В. І., Кныш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фізико-хім. механіка матеріала. — 2006. — № 1. — С. 56–61.
4. Труфяков В. И., Ковальчук В. С. Определение долговечности при двухчастотном нагружении: Сообщ. 2. (Методика) // Пробл. прочности. — 1982. — № 10. — С. 15–20.
5. Ковальчук В. С. Сопротивление усталости соединений при двухчастотном нагружении // Сварные строительные конструкции / Под ред. Л. М. Лобанова: В 3 т. Т. 1: Основы проектирования конструкций. — Киев: Наук. думка, 1993. — С. 356–361.

A procedure, analytical dependencies and nomograms are proposed for determination of the field of effective application of strengthening of 09G2S steel welded joints by high-frequency mechnical peening and for evaluation of its influence on improvement of cyclic fatigue life at bifrequency loading.

Поступила в редакцию 27.06.2007.
в окончательном варианте 12.09.2007