

Оценка предельных напряжений цикла сварных конструкций с высокими остаточными напряжениями по результатам испытаний малогабаритных образцов без остаточных напряжений

В. А. Дегтярев, Б. С. Шульгинов

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Предложено уравнение, позволяющее определять пределы выносливости сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей с высокими остаточными напряжениями по результатам испытаний малогабаритных образцов без остаточных напряжений. Установлена причина независимости амплитуды напряжений от среднего напряжения цикла для сварных соединений с высокими остаточными напряжениями.

Ключевые слова: диаграмма предельных напряжений цикла, предел выносливости, остаточное напряжение, пределы текучести и прочности, амплитуда напряжений цикла, среднее напряжение цикла.

Введение. Принято, что для определения параметров уравнения кривой усталости крупногабаритных сварных деталей или элементов конструкций необходимо испытывать на усталость крупногабаритные сварные образцы с высокими остаточными напряжениями растяжения (ОН) [1]. Остаточные напряжения считаются высокими, если соблюдается условие $\sigma_{\text{ост}} > 0,5\sigma_T$, где σ_T – предел текучести основного металла при растяжении [2]. Известно, что для таких образцов предельная амплитуда цикла напряжений σ_{ap} от внешней нагрузки не зависит от среднего напряжения цикла σ_m (без учета $\sigma_{\text{ост}}$), т.е. диаграмма предельных напряжений цикла (ДПНЦ) параллельна лучу, выходящему из начала координат под углом 45° , и описывается уравнением

$$\sigma_{Rp} = \sigma_{ap} + \sigma_m = \frac{2\sigma_{ap}}{1 - R_\sigma}, \quad (1)$$

где σ_{Rp} – предел выносливости детали (сварной крупногабаритный образец) с высокими ОН; R_σ – коэффициент асимметрии цикла напряжений от внешней нагрузки [1].

В настоящее время убедительное экспериментально обоснованное объяснение, почему ДПНЦ расположена под углом 45° , отсутствует. Кроме того, такие испытания довольно дорогие, поскольку проводятся на крупногабаритных образцах, что связано с большим расходом материала и наличием дорогостоящего оборудования большой мощности. В свою очередь, определение ДПНЦ сварных образцов без ОН не требует больших материальных затрат, хотя считается, что результаты испытаний таких соединений в расчетах на прочность крупногабаритных конструкций использовать нельзя [2].

Цель данной работы заключалась в обосновании методики определения предельных напряжений цикла крупногабаритных сварных соединений с высокими остаточными напряжениями по результатам испытаний на усталость малогабаритных сварных образцов без остаточных напряжений.

Анализ результатов усталостных испытаний. В настоящее время диаграммы предельных напряжений цикла сварных соединений с высокими ОН определяются только по напряжениям от внешних нагрузок без учета остаточных напряжений [1–3], хотя они значительно влияют на сопротивление усталости сварных соединений. Рассмотрим это влияние в условиях многоциклового нагружения. В работах [4, 5] показано, что в сварных соединениях высокие остаточные напряжения при циклическом нагружении изменяются, стабилизируясь через некоторое число циклов. Остаточные напряжения, которые при дальнейшем циклическом нагружении не изменяются, называют установившимися. В [4] принято, что при воздействии внешней нагрузки установившееся остаточное напряжение в зоне концентрации напряжений определяется уравнением

$$\sigma_{\text{ост}}^y = \sigma_T - \alpha_\sigma \sigma_{\text{max}}, \quad (2)$$

в [5] –

$$\sigma_{\text{ост}}^y = \frac{\sigma_T}{\alpha_\sigma} - \sigma_{\text{max}}, \quad (3)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений; σ_{max} – максимальное номинальное напряжение цикла в зоне концентратора от внешней нагрузки.

В табл. 1 приведены данные сравнительного анализа влияния максимального напряжения σ_{max} отнулевого цикла от внешней нагрузки на установившиеся остаточные напряжения, полученные после 10^5 цикл для пластин с концентратором напряжений, остаточные напряжения в которых вызваны продольной наплавкой. Для углеродистых сталей исходное значение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^n$ достигало предела текучести материала, для стали 09Г2С оно составляло $0,7\sigma_T$. В табл. 1 приведены разности Δ_1 и Δ_2 между расчетными и экспериментальными (фактические) значениями установившихся остаточных напряжений соответственно, определенные по зависимости

$$\Delta = \sigma_{\text{ост}}^y - \sigma_{\text{ост}}^{y.э}. \quad (4)$$

Видно, что разность между расчетными данными по формуле (3) и фактическими значениями установившихся остаточных напряжений в 73% случаев меньше, чем по формуле (2), что свидетельствует о некотором преимуществе формулы (3). Однако расчеты и по формуле (3) дали большую погрешность (от 51 до –69 МПа). В первом приближении это можно объяснить тем, что изменения ОН происходят не только вследствие пластической деформации материала в зоне концентрации напряжений, но и изменения теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ , что пока не учитывается. Поэтому, с одной стороны, использование коэффициента α_σ в исходном состоянии не совсем корректно, с другой – его определение в реальных сварных соединениях представляет значительные технические трудности.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные и расчетные установившиеся остаточные напряжения
в зависимости от величины максимального напряжения σ_{\max} отнулевого цикла

Сталь	σ_T , МПа	σ_{\max} , МПа	α_σ	$\sigma_{\text{ост}}^{\text{у.э.}}$, МПа	$\sigma_{\text{ост}}^{\text{у.}}$, МПа, по (2)	Δ_1 , МПа	$\sigma_{\text{ост}}^{\text{у.}}$, МПа, по (3)	Δ_2 , МПа	Литера- турный источ- ник
Ст. 3	270	80	1,5	120	150	30	100	-20	[6]
		130	1,5	50	85	35	50	0	
		80	2,0	40	110	70	55	15	
		130	2,0	-15	10	25	5	20	
		80	2,5	25	70	45	28	3	
		130	2,5	-35	-55	-20	-22	13	
Низко- углеро- дистая	269	50	2,5	125	144	19	58	-67	[4]
		80	2,5	40	69	29	28	-12	
		130	2,5	-25	-56	-31	-23	2	
		150	2,5	-94	-106	-12	-43	51	
Ст. 3сп	264	50	2,5	125	139	14	56	-69	[7]
		80	2,5	40	64	24	26	-14	
		130	2,5	-25	-61	-36	-25	0	
09Г2С	317	110	2,5	65	42	-23	17	-48	[8]
		134	2,5	30	-18	-48	-7	-37	

Исходя из предположения об идентичности влияния на сопротивление усталости имеющихся в сварном соединении как установившихся остаточных напряжений, так и напряжений от внешней нагрузки были проанализированы результаты усталостных испытаний сварных стыковых соединений низкоуглеродистой стали с разными исходными остаточными напряжениями $\sigma_{\text{ост}}^{\text{н}}$ [9] (табл. 2). В табл. 2 приведены экспериментально полученные при испытаниях в условиях изгиба пределы выносливости при симметричном σ_{-1} и отнулевом σ_0 цикле напряжений от внешней нагрузки при разных исходных значениях ОН. В основном в образцах исходные остаточные напряжения были растягивающие и только в одном случае – сжимающие (в табл. 2 обозначены как отрицательные). Диаграммы предельных напряжений цикла для таких образцов, построенные только с учетом действия напряжений от внешней нагрузки на базе $N = 2 \cdot 10^6$ цикл, представлены в [9] в виде семейства разных прямых, проведенных через точки, соответствующие пределам выносливости при симметричном и отнулевом циклах напряжений, что свидетельствует о влиянии исходного остаточного напряжения на предел выносливости σ_R сварного соединения.

Установившиеся остаточные напряжения $\sigma_{\text{ост}}^{\text{у.}}$ (табл. 2) в сварных соединениях вычисляли по формулам

$$\sigma_{\text{ост}}^{\text{у.}} = \sigma_T - \sigma_{Rp} \quad (5)$$

при

$$\sigma_{\text{ост}}^{\text{н}} + \sigma_{Rp} \geq \sigma_T \quad (6)$$

и

$$\sigma_{\text{ост}}^y = \sigma_{\text{ост}}^н \quad (7)$$

при

$$\sigma_{\text{ост}}^н + \sigma_R < \sigma_T, \quad (8)$$

где σ_{Rp} – предел выносливости сварного соединения с исходными ОН, соответствующими условию (6); σ_R – предел выносливости сварного соединения с исходными ОН, соответствующими условию (8). Было принято, что в случае соблюдения зависимости (8) исходные ОН изменяться не будут.

В табл. 2 приведены также суммарное напряжение $\sigma_{R\Sigma}$, определяемое по формуле

$$\sigma_{R\Sigma} = \sigma_{Rp} + \sigma_{\text{ост}}^y, \quad (9)$$

и суммарное среднее напряжение цикла $\sigma_{m\Sigma}$ при $R_\sigma = 0$:

$$\sigma_{m\Sigma} = \frac{\sigma_{0p}}{2} + \sigma_{\text{ост}}^y \quad \text{или} \quad \sigma_{m\Sigma} = \frac{\sigma_0}{2} + \sigma_{\text{ост}}^y, \quad (10)$$

при $R_\sigma = -1$ полагаем, что $\sigma_{m\Sigma} = \sigma_{\text{ост}}^y$.

Таким образом, в результате суммирования установившихся остаточных напряжений с экспериментально определенным пределом выносливости сварного соединения получим новое его значение.

С использованием данных табл. 2 представим зависимость $\sigma_{R\Sigma}$ от $\sigma_{m\Sigma}$ в виде ДПНЦ сварных стыковых соединений низкоуглеродистой стали (рис. 1). Обращает на себя внимание тот факт, что все точки хорошо ложатся на диаграмму предельных напряжений цикла сварных малогабаритных образцов без остаточных напряжений, описываемую зависимостью Гудмана:

$$\sigma_{R\Sigma}^p = \sigma_{-1} + (1 - \Psi_\sigma) \sigma_m, \quad (11)$$

где Ψ_σ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений, определяемый по двум пределам выносливости при любых коэффициентах асимметрии цикла напряжений R_σ ,

$$\Psi_\sigma = 1 - \frac{2(\sigma_{R\Sigma_2} - \sigma_{R\Sigma_1})}{\sigma_{R\Sigma_2}(1 + R_2) - \sigma_{R\Sigma_1}(1 + R_1)} \quad (12)$$

($\sigma_{R\Sigma_2} > \sigma_{R\Sigma_1}$).

При $\sigma_{R\Sigma_2} = \sigma_0$, $\sigma_{R\Sigma_1} = \sigma_{-1}$ зависимость (12) преобразуется в выражение

$$\Psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0}, \quad (13)$$

Расчетные значения пределов выносливости сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированной сталей, определенные с учетом установившихся остаточных напряжений

Сталь, вид соединения	σ_T , МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{ост}^H$, МПа	σ_R , МПа	$\sigma_{ост}^V$, МПа	Суммарные напряжения, МПа		R_σ	$\sigma_{R\Sigma}^p$, МПа	Δ , МПа	Литера- турный источник
						$\sigma_{R\Sigma}$	$\sigma_{m\Sigma}$				
Низкоуглеродистая, стыковое	300	410	300	$\sigma_{-1p} = 69,0$	231	300,0	231,0	0,540	290,0	-10,0	[1, 9]
			180	$\sigma_{-1} = 80,0$	180	260,0	180,0	0,380	252,0	-8,0	
			90	$\sigma_{-1} = 100,0$	90	190,0	90,0	-0,050	183,5	-6,5	
			0	$\sigma_{-1} = 108,0$	0	108,0	0	-1,000	108,0	0	
			-90	$\sigma_{-1} = 130,0$	-90	40,0	-90,0	-5,500	46,5	6,5	
			300	$\sigma_{0p} = 130,0$	170	300,0	235,0	0,560	291,5	-8,5	
			180	$\sigma_{0p} = 135,0$	165	300,0	232,5	0,550	291,5	-8,5	
			90	$\sigma_0 = 165,0$	90	255,0	172,5	0,353	246,5	-8,5	
			0	$\sigma_0 = 178,0$	0	178,0	89,0	0	178,0	0	
			-90	$\sigma_0 = 210,0$	-90	120,0	15,0	-0,750	126,5	6,5	
Ст. 3, крестовое	300	450	127	$\sigma_{-1} = 28,5$	127	155,5	127,0	0,530	156,0	0,5	[10]
			0	$\sigma_{-1} = 40,0$	0	40,0	0	-1,000	40,0	0	
			-153	$\sigma_{-1} = 53,5$	-153	-99,5	-153,0	2,080	-99,2	0,3	
09Г2С, стыковое	340	518	250	$\sigma_{-1} = 80,0$	250	330,0	250,0	0,510	320,0	-10,0	[1]
			0	$\sigma_0 = 215,0$	0	215,0	107,5	0	215,0	0	[12]
			250	$\sigma_{0p} = 155,0$	185	340,0	262,5	0,530	329,0	-11,0	[1]
09Г2, стыковое	343	518	0	$\sigma_0 = 235,0$	0	235,0	117,5	0	235,0	0	[11]
			230	$\sigma_{0p} = 178,0$	165	343,0	254,0	0,480	323,0	-20,0	

где σ_{-1} , σ_0 – пределы выносливости сварного соединения без ОН при симметричном и отнулевом циклах напряжений соответственно (на рис. 1 светлые точки).

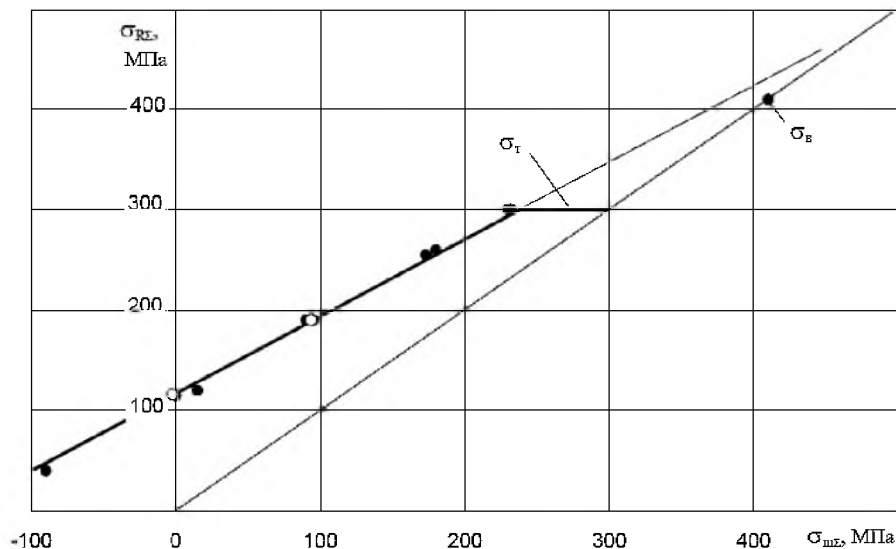


Рис. 1. Диаграмма предельных напряжений цикла сварных стыковых соединений низкоуглеродистой стали: ○ – без остаточных напряжений; ● – с учетом совместного влияния установившегося остаточного напряжения и предела выносливости.

Анализ данных табл. 2 и рис. 1 показал, что несмотря на наличие в сварных соединениях разных исходных ОН или их отсутствие, все диаграммы предельных напряжений цикла сливаются в единую диаграмму, уравнение которой можно записать в виде

$$\sigma_{R\Sigma}^p = \sigma_{-1} + (1 - \Psi_\sigma)(\sigma_m + \sigma_{ост}^y). \quad (14)$$

Значения $\sigma_{R\Sigma}^p$ приведены в табл. 2. При отсутствии ОН уравнение (14) приобретает вид (11). Факт существования единой диаграммы может быть использован на практике, когда необходимо подобрать требуемые режимы нагружения для достижения наперед заданных $\sigma_{ост}^y$ в сварной конструкции с помощью ДПНЦ сварного соединения без ОН. Из данных табл. 2 видно, что ошибка ($\Delta = \sigma_{R\Sigma}^p - \sigma_{R\Sigma}$) в определении пределов выносливости по формуле (14) и с учетом $\sigma_{ост}^y$ находится в пределах 6,5...10 МПа.

Анализ результатов испытаний крестовых сварных образцов из стали Ст. 3 [10] с разным уровнем исходных ОН также показал, что суммарные предельные напряжения цикла $\sigma_{R\Sigma}$ хорошо описываются зависимостью Гудмана. В данном случае исходные ОН при циклическом нагружении не изменяются, поскольку, суммируясь с напряжениями от внешней нагрузки, предел текучести не достигается. Значение амплитуды напряжений в зависимости от величины ОН представляет собой напряжение, соответствующее пределу выносливости при симметричном цикле от внешней нагрузки, а

среднее напряжение равно $\sigma_{\text{ост}}^y$. Ошибка Δ не превышает 0,5 МПа, что соответствует 0,3%.

Из данных табл. 2 и рис. 1 также видно, что несмотря на полученные разные значения $\sigma_{\text{ост}}^y$ в зависимости от напряжений внешней нагрузки (пределов выносливости), по достижении суммой этих напряжений предела текучести материала наблюдается единый предельный цикл напряжений, максимальное и минимальное напряжения которого определяются следующими соотношениями: $\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{ост}}^y + \sigma_{Rp} = \sigma_T$; $\sigma_{\text{min}} = \sigma_T - 2\sigma_{ap}$. Во всех случаях суммарное напряжение не превышает предела текучести материала.

Поэтому сверху ДПНЦ можно ограничить пределом текучести. Коэффициент асимметрии цикла напряжений, при котором пересекаются ДПНЦ и горизонтальная прямая на уровне предела текучести, определяется по формуле

$$R_T = \frac{2\sigma_{m\Sigma}}{\sigma_{R\Sigma}} - 1. \quad (15)$$

Его значение ввиду разброса экспериментальных данных изменяется в пределах 0,54...0,56 (табл. 2).

На практике для построения ДПНЦ сварных соединений часто ограничиваются определением предела выносливости при одном значении R_σ , наиболее предпочтительно при симметричном цикле осевого нагружения. Затем полученную точку, согласно работе [13], соединяют с пределом прочности материала σ_B прямой, полагая, что при других значениях R_σ пределы выносливости располагаются на ней. Авторы настоящей работы на основании известных данных о выносливости разных типов сварных соединений предприняли попытку проанализировать справедливость такого определения ДПНЦ. В табл. 3 приведены данные испытаний на усталость при двух значениях коэффициента асимметрии цикла напряжений в условиях осевого нагружения сваренных встык пластин [14, 15], арматурных стержней разного диаметра [16], а также нахлесточных соединений с обваркой по контуру [13] малоуглеродистых и низколегированных сталей без ОН. В этом случае расчетное значение предела прочности σ_B^p определяли по формуле

$$\sigma_B^p = \sigma_R \frac{1 - 0,5(1 + R_\sigma)(1 - \Psi_\sigma)}{\Psi_\sigma}, \quad (16)$$

где коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений вычисляли согласно (12).

Из данных табл. 3 следует, что расчетные значения предела прочности при испытаниях каждого типа сварного соединения почти совпадают с экспериментально определенным пределом прочности основного материала. Для всех типов сварных соединений ошибка Δ находится в пределах -2...29 МПа, что соответствует 0,1...3,8%. Таким образом, при проведении усталостных испытаний в условиях осевого нагружения ДПНЦ сварных

соединений без ОН можно определять по данным о механических свойствах материала (предел прочности) и пределе выносливости при одном значении R_σ . В таком случае коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений можно определять как $\Psi_\sigma = \sigma_{-1}/\sigma_B$.

Т а б л и ц а 3

Значения пределов выносливости, полученных экспериментально при осевом нагружении, и пределов прочности основного материала для разных типов сварных соединений, полученных экспериментально и путем расчета

Тип соединения	Марка стали	σ_R , МПа	σ_B , МПа		Δ , МПа	Литературный источник
			Эксперимент	Расчет по (16)		
Нахлесточное с обваркой по контуру	Ст. 3сп	$\sigma_{-0,5} = 69$ $\sigma_{0,147} = 107$	400	402,3	-2,3	[13]
Стыковое	» »	$\sigma_{-1} = 126$ $\sigma_{0,3} = 233$	450	439	-11,0	[14]
Стыковое (многослойный шов)	» »	$\sigma_{-1} = 140$ $\sigma_{0,14} = 235$	452	481	29,0	[14]
Стыковое	Ст. 3	$\sigma_{-1} = 90$ $\sigma_{0,143} = 160$	400	384	-16,0	[15]
	35ГС	$\sigma_0 = 180$ $\sigma_{0,5} = 285$	672	682	10,0	[16]

Несколько иные результаты получены при испытаниях в условиях изгиба. Обработка данных испытаний стыковых соединений низкоуглеродистой стали (рис. 1) показывает, что если ДПНЦ определять по двум значениям предела выносливости, то расчетное значение предела прочности будет превышать фактическое почти на 20%.

О наличии единого предельного цикла напряжений свидетельствуют также обработанные результаты усталостных испытаний сварных стыковых соединений низколегированной стали 09Г2С с высокими ОН в условиях осевого нагружения [1]. На рис. 2 кривой 1 представлена ДПНЦ образцов с высокими ОН, полученная с учетом действия напряжений только от внешней осевой нагрузки при симметричном и отнулевом циклах напряжений. Видно, что она параллельна линии, проведенной под углом 45° , и это не противоречит данным, полученным в [1]. После пересчета предела выносливости по формуле (14) кривая 1 стремится трансформироваться в единый предельный цикл напряжений (на рис. 2 темные точки). Исходные ОН, пределы выносливости от внешней нагрузки и $\sigma_{ост}^y$ приведены в табл. 2. Таким образом, если для определения ДПНЦ использовать только пределы выносливости от внешнего нагружения, то получим линию, если дополнительно к этому учитывать влияние установившегося значения ОН, то линия трансформируется в единый предельный цикл напряжений, максимальное

напряжение которого равно σ_T . Это и объясняет независимость предельной амплитуды цикла сварных образцов с высокими ОН от среднего напряжения.

Из рис. 2 также следует, что полученные точки удовлетворительно ложатся на ДПНЦ сварных образцов без ОН (кривая 2) [12]. Ошибка Δ в определении пределов выносливости $\sigma_{R\Sigma}$ по уравнению (14) при одинаковых значениях среднего напряжения цикла и приведенных в табл. 2 равна 10...11 МПа, что соответствует 3...3,2%. Поэтому даже при отсутствии достаточного количества данных при испытаниях образцов из низколегированной стали можно предположить существование единой диаграммы предельных напряжений цикла сварных соединений при проведении испытаний в условиях осевого нагружения. Заметим, что с увеличением R_σ кривые 1 и 2 на рис. 2 сближаются. Это свидетельствует о том, что ОН уменьшаются и их влияние ослабевает.

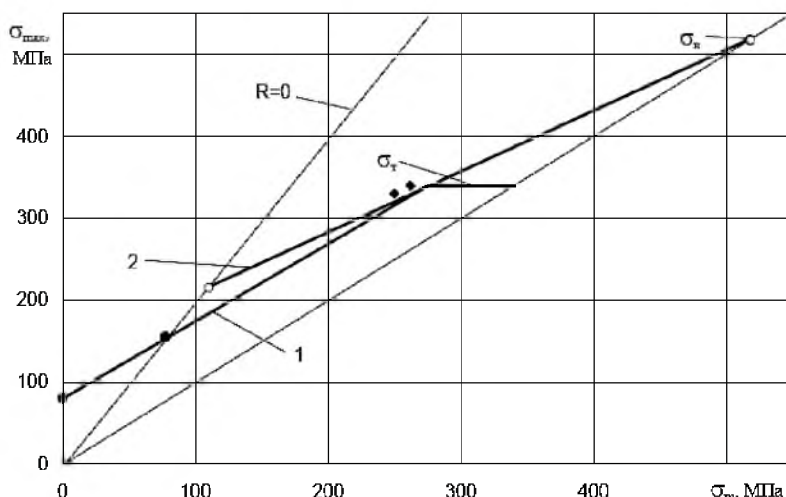


Рис. 2. Диаграммы предельных напряжений цикла сварных стыковых соединений низколегированной стали 09Г2С с высокими остаточными напряжениями (1), без таковых (2) и с учетом совместного влияния установившегося остаточного напряжения и предела выносливости (◆).

Интересно отметить, что кривые 1 и 2 (рис. 2) при их продолжении пересекаются в точке, практически соответствующей пределу текучести материала. Кроме того, установлено, что пересечение ДПНЦ крупногабаритных сварных соединений с пределом текучести соответствует предельному напряжению цикла. Это позволяет определить их предельную амплитуду напряжений, которая в условиях симметричного нагружения соответствует пределу выносливости. Для стыковых соединений пересечение диаграмм происходит примерно при $R_\sigma = 0,5$, как и было ранее установлено [11]. Можно доказать, что $\sigma_{ост}^y = 0$, если напряжение от внешней нагрузки, в данном случае предел выносливости, будет равно пределу текучести. Для этого запишем уравнение (5) в виде

$$\sigma_{ост}^y = \sigma_T - \sigma_{Rp} = \sigma_T - \frac{2\sigma_{ap}}{1 - R_\sigma}. \quad (17)$$

Путем несложных преобразований можно определить, что $\sigma_{ост}^y = 0$ при $\sigma_{Rp} = \sigma_T$. Следовательно, обе диаграммы должны показать одинаковое значение предела выносливости в точке, соответствующей пределу текучести материала, что и подтвердил анализ данных на рис. 2.

Анализируя результаты испытаний, приведенные в литературных источниках, можно показать, что и для других марок материала и типов сварных соединений пересечение ДПНЦ образцов с ОН и без таковых происходит в точке, практически соответствующей пределу текучести материала. На рис. 3 и 4 представлены ДПНЦ сварных стыковых соединений сталей Ст. 3сп [14], 35ГС [16], а также нахлесточного соединения с фланговыми швами с обваркой по контуру стали Ст. 3сп [13] и соединения с приваренными поперечными ребрами из стали Ст. 3 [12] без ОН и с высокими ОН [1]. Известно, и это видно из рис. 3, 4, что значение сопротивления усталости стыкового соединения максимальное, нахлесточного – минимальное. Значения сопротивления усталости остальных типов соединений располагаются между ними. Из рис. 3, 4 видно, что пересечение ДПНЦ сварных соединений с высокими ОН и без таковых происходит в точке, ордината которой расположена несколько ниже предела текучести материала. Это позволило предложить методику определения предела выносливости сварного соединения с высокими ОН по результатам испытаний малогабаритных образцов.

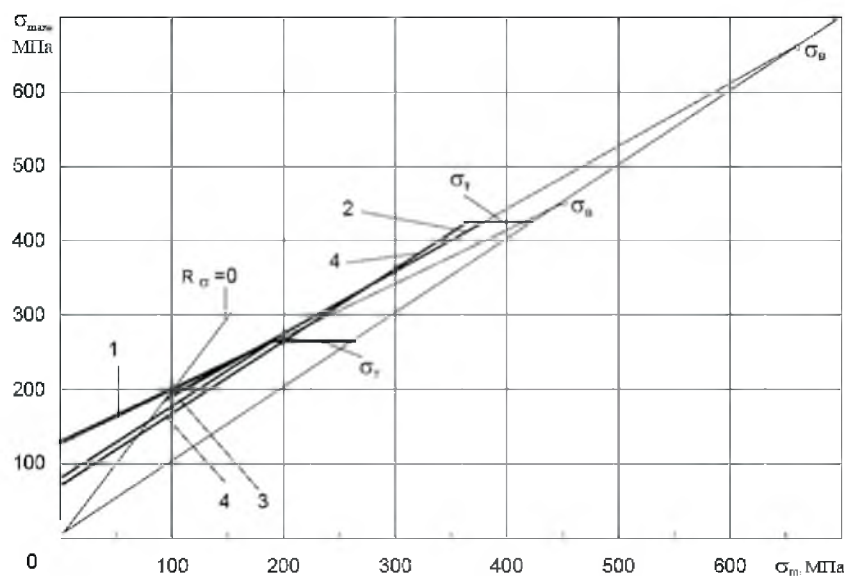


Рис. 3. Диаграммы предельных напряжений цикла сварных стыковых соединений сталей Ст. 3сп (1, 3) и 35ГС (2, 4). (Здесь и на рис. 4: 1, 2 – без остаточных напряжений; 3, 4 – с высокими остаточными напряжениями.)

Схема определения ДПНЦ крупногабаритных образцов представлена на рис. 5. Методика основана на установленном факте пересечения ДПНЦ образцов без ОН (кривая 1) и с ОН (кривая 2) в точке, почти равной пределу текучести (рис. 5). Примем, что это пересечение происходит на уровне предела текучести (на рис. 5 точка А). В этом случае имеем

$$\sigma_{ост}^y = \sigma_T - \sigma_{R_i} = \sigma_T - \sigma_{R_i} - (1 - \Psi_\sigma)(\sigma_{mT} - \sigma_{mR_i}) = 0, \quad (18)$$

где σ_{R_i} – предел выносливости сварного соединения без ОН, определенный при коэффициенте асимметрии цикла R_i ; σ_{mR_i} – соответствующее ему среднее напряжение цикла.

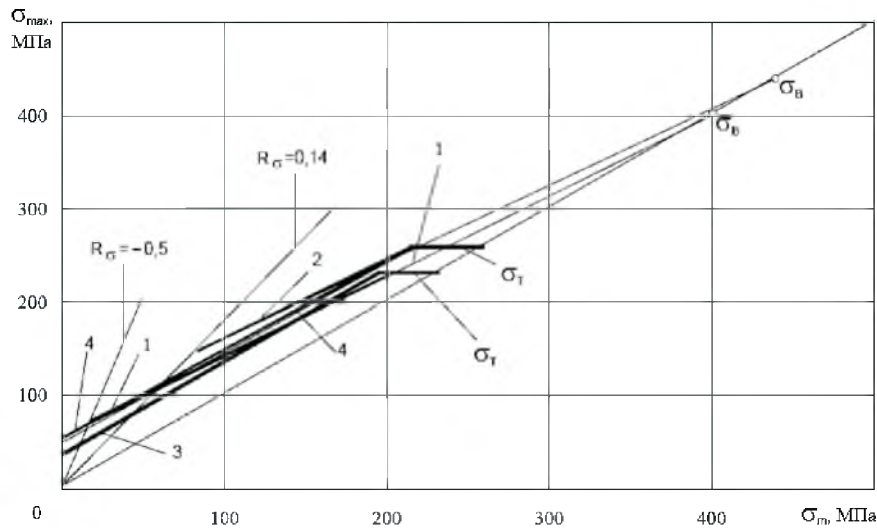


Рис. 4. Диаграммы предельных напряжений цикла нахлесточного соединения с фланговыми швами стали Ст. 3сп (1, 3) и соединения с приваренными поперечными ребрами из стали Ст. 3 (2, 4).

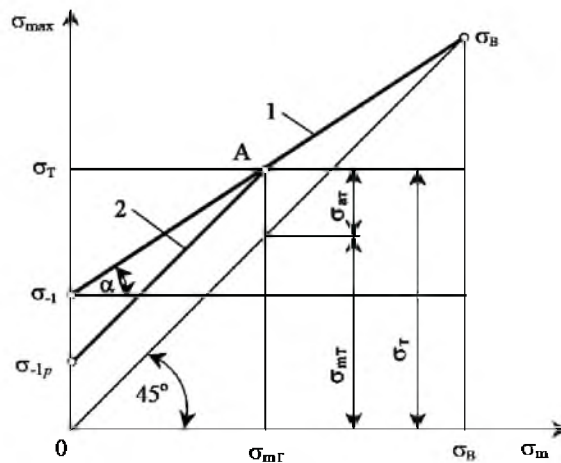


Рис. 5. Схема определения диаграммы предельных напряжений цикла крупногабаритных сварных соединений с высокими остаточными напряжениями по результатам испытаний малогабаритных образцов.

При известном значении предела выносливости σ_{-1} выражение (18) преобразуется к виду

$$\sigma_{ост}^y = \sigma_T - \sigma_{-1} - (1 - \Psi_\sigma)\sigma_{mT} = 0. \quad (19)$$

Путем некоторых преобразований можно найти предельное среднее напряжение цикла $\sigma_{m\Gamma}$:

$$\sigma_{m\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma} - \sigma_{R_i}}{1 - \Psi_{\sigma}} + \sigma_{mR_i} \quad (20)$$

или

$$\sigma_{m\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma} - \sigma_{-1}}{1 - \Psi_{\sigma}} \quad (21)$$

В зависимости от того, в каком виде представить Ψ_{σ} , выражение (21) будет иметь вид

$$\sigma_{m\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma} - \sigma_{-1}}{1 - \sigma_{-1}/\sigma_{\text{в}}} \quad (22)$$

или

$$\sigma_{m\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma} - \sigma_{-1}}{2(1 - \sigma_{-1}/\sigma_0)} \quad (23)$$

Предельную амплитуду напряжений $\sigma_{a\Gamma}$ для крупногабаритных сварных образцов (рис. 5), которая, как отмечалось выше, не зависит от среднего напряжения цикла, можно определить по уравнению

$$\sigma_{a\Gamma} = \sigma_R - \sigma_{m\Gamma} = \sigma_{Rp} - \sigma_{m\Gamma} = \sigma_{\Gamma} - \sigma_{m\Gamma} = \frac{\sigma_{R_i} - \Psi_{\sigma}\sigma_{\Gamma}}{1 - \Psi_{\sigma}} - \sigma_{mR_i}, \quad (24)$$

или, как частный случай, из выражений

$$\sigma_{a\Gamma} = \frac{\sigma_{-1}(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\Gamma})}{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{-1}} \quad (25)$$

или

$$\sigma_{a\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma}(\sigma_0 - 2\sigma_{-1}) + \sigma_0\sigma_{-1}}{2(\sigma_0 - \sigma_{-1})} \quad (26)$$

Задаваясь любым значением R_{σ} , предел выносливости сварного соединения с высокими ОН можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{Rp} = \frac{2\sigma_{a\Gamma}}{1 - R_{\sigma}} = \frac{2}{(1 - R_{\sigma})} \left(\frac{\sigma_{R_i} - \Psi_{\sigma}\sigma_{\Gamma}}{1 - \Psi_{\sigma}} - \sigma_{mR_i} \right) \quad (27)$$

или

$$\sigma_{Rp} = \frac{2\sigma_{-1}(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\Gamma})}{(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{-1})(1 - R_{\sigma})} \quad (28)$$

$$\sigma_{Rp} = \frac{\sigma_T(\sigma_0 - 2\sigma_{-1}) + \sigma_0\sigma_{-1}}{(\sigma_0 - \sigma_{-1})(1 - R_\sigma)}. \quad (29)$$

Ошибка в определении путем расчета по формулам (27) и (28) и экспериментально значений предела выносливости крупногабаритных образцов при симметричном цикле напряжений в условиях осевого нагружения для разных типов сварных соединений и марок материала приведена в табл. 4. Анализ полученных данных показал, что практически во всех случаях расчетное значение предела выносливости меньше экспериментального. Поскольку ошибка достаточно мала, для инженерной практики расчета сварных конструкций на прочность ею можно пренебречь.

Т а б л и ц а 4

Экспериментальные и расчетные значения пределов выносливости разных типов сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей с высокими остаточными напряжениями

Тип соединения	N_b , цикл	Марка стали	σ_B , МПа	σ_T , МПа	σ_R , МПа	Предел выносливости σ_{-1p} , МПа		Δ , МПа	Литературный источник
						Эксперимент	Расчет		
Стыковое	$2 \cdot 10^6$	Ст. 3сп	450	260	$\sigma_{-1} = 126$	80	74	-6	[2, 14]
Стыковое, шов многослойный	10^7		452	260	$\sigma_{-1} = 140$	80	86	6	[1, 14]
Стыковое	10^7	35ГС	672	425	$\sigma_0 = 180$ $\sigma_{0,5} = 285$	70	50	-20	[1, 16]
Стыковое	$2 \cdot 10^6$	09Г2С	517	340	$\sigma_0 = 215$	80	67	-13	[1, 12]
Нахлесточное с фланговым швом	$2 \cdot 10^6$	Ст. 3сп	400	230	$\sigma_{-0,5} = 69$	35	28	-7	[1, 13]
С поперечными ребрами	10^7	Ст. 3	440	260	$\sigma_{0,14} = 150$	50	42	-8	[2, 12]

В отдельных случаях, и это подлежит дополнительному изучению, ДПНЦ сварных конструкций можно определять по результатам испытаний сварных малогабаритных образцов в условиях изгиба, когда присутствует градиент напряжений. Однако результат во многом зависит от методики определения ДПНЦ сварного соединения без ОН. ДПНЦ стыкового соединения низкоуглеродистой стали с ОН определяли по формулам (28) и (29) с использованием результатов экспериментальных исследований [1] (табл. 5). Анализ табл. 5 показал, чтобы получить удовлетворительное соответствие между расчетными и экспериментальными данными, ДПНЦ сварных стыковых соединений без ОН необходимо определять не менее чем по двум значениям R_σ .

Т а б л и ц а 5

Экспериментальные и расчетные значения пределов выносливости сварного стыкового соединения низкоуглеродистой стали с высокими остаточными напряжениями, полученные по формулам (28) и (29)

R_σ	σ_{Rp}^s , МПа	σ_{Rp}^p , МПа	Δ , МПа
-1	69	$\frac{56}{40}$	$\frac{-13}{-29}$
0	130	$\frac{112}{79}$	$\frac{-18}{-51}$
0,3	186	$\frac{160}{113}$	$\frac{-26}{-73}$

Примечание. Под чертой приведены данные, полученные по формуле (28), над чертой – по (29).

Выводы

1. Экспериментально показано, что независимо от величины исходных остаточных напряжений диаграммы предельных напряжений цикла сварных соединений, полученные с учетом действия установившихся остаточных напряжений и напряжений от внешней нагрузки, совпадают с диаграммой предельных напряжений таких же сварных соединений без остаточных напряжений.

2. Анализ литературных данных свидетельствует, что диаграммы предельных напряжений разных типов сварных соединений с высокими остаточными напряжениями и без них для разных классов сталей пересекаются в точке, ордината которой практически равна пределу текучести материала.

3. Предложена методика определения диаграммы предельных напряжений цикла сварных соединений с высокими остаточными напряжениями по результатам испытаний малогабаритных образцов без остаточных напряжений.

4. Экспериментально получено, что диаграмма предельных напряжений цикла сварных соединений, если учесть, что сумма одновременно действующих установившихся остаточных напряжений и напряжений от внешней нагрузки в условиях осевого нагружения достигает предела текучести, независимо от коэффициента асимметрии цикла трансформируется в единый предельный цикл напряжений, максимальное напряжение которого не превышает предела текучести материала.

Резюме

Запропоновано рівняння, яке дозволяє визначати межу витривалості зварних з'єднань низьковуглецевих та низьколегованих сталей з високими залишковими напруженнями за результатами випробувань малогабаритних зразків без залишкових напружень. Установлено причину незалежності амплітуди напруження від середнього напруження циклу для зварних з'єднань із високими залишковими напруженнями.

1. Труфьяков В. И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 216 с.
2. РД 50-694-90. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. – Введ. 01.07.91.
3. Труфьяков В. И., Кудрявцев Ю. Ф., Михеев П. П. О влиянии остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений // Автомат. сварка. – 1988. – № 2. – С. 1 – 4.
4. Труфьяков В. И., Кудрявцев Ю. Ф. К расчетной оценке влияния внешнего нагружения на релаксацию остаточных сварочных напряжений // Там же. – 1988. – № 1. – С. 7 – 9.
5. Ряхин В. А., Мошкарёв Г. Н. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 230 с.
6. Труфьяков В. И., Гуца О. И., Кудрявцев Ю. Ф. Влияние остроты концентратора на сварочные остаточные напряжения при многоцикловом нагружении // Автомат. сварка. – 1981. – № 7. – С. 13 – 16.
7. Кудрявцев Ю. Ф., Гуца О. И. Некоторые закономерности изменения остаточных напряжений при циклическом нагружении в зависимости от их начального уровня и концентрации напряжений // Пробл. прочности. – 1986. – № 11. – С. 32 – 38.
8. Труфьяков В. И., Гуца О. И., Троценко В. П. Изменение остаточных напряжений в зонах концентрации при циклическом нагружении // Там же. – 1976. – № 12. – С. 14 – 17.
9. Труфьяков В. И., Михеев П. П., Кудрявцев Ю. Ф. Изменение сопротивления усталости сварных соединений под воздействием остаточных напряжений: Тр. III Всесоюз. симп. “Остаточные технологические напряжения” (Кутаиси, окт. 1988 г.). – М.: Ин-т проблем механики АН СССР, 1988. – С. 358 – 364.
10. Навроцкий Д. И. Прочность сварных соединений. – М.: Машгиз, 1961. – 177 с.
11. Шульгинов Б. С., Дегтярев В. А., Матвеев В. В. О предельных напряжениях цикла сварных соединений с высокими остаточными напряжениями // Пробл. прочности. – 1984. – № 3. – С. 58 – 61.
12. Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е. Усталость сварных конструкций. – М.: Машгиз, 1976. – 271 с.
13. Дучинский Б. Н. Выносливость элементов сварных мостовых конструкций при переменных и знакопеременных напряжениях // Исследование прочности сварных мостовых конструкций. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – Вып. 20. – С. 86 – 163.
14. Гохберг М. М. Металлические конструкции кранов. – М.; Л.: Машгиз, 1959. – 182 с.

15. *Дучинский Б. Н.* Прочность и основания расчета сварных соединений, работающих на переменное и знакопеременное напряжение // *Вибрационная прочность сварных мостов.* – М.: Трансжелдориздат, 1952. – С. 137 – 198.
16. *Бродский А. Я., Лоцилов В. И.* Выносливость сварных стыковых соединений арматурных стержней крупного диаметра из стали 35ГС // *Автомат. сварка.* – 1963. – № 3. – С. 28 – 33.

Поступила 07. 11. 2006