



НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТАВРОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТАЛИ 09Г2С В ИСХОДНОМ И УПРОЧНЕННОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ СОСТОЯНИЯХ

В. В. КНЫШ, канд. физ.-мат. наук, **С. А. СОЛОВЕЙ**, **А. З. КУЗЬМЕНКО**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

В рамках гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений установлены критерии разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией высокочастотной механической проковки (ВМП) после сварки состояниях при возрастающем, убывающем и квазислучайном блоках нагружения. Отмечено, что при прогнозировании долговечности сварных соединений, упрочненных технологией ВМП, вполне приемлемо использовать линейную гипотезу накопления усталостных повреждений. Для сварных соединений в исходном состоянии, накопление повреждений в которых существенно зависит от истории нагружения, предложено правило суммирования повреждений, уменьшающее рассеяние предельной суммарной поврежденности.

Ключевые слова: сварные конструкции, низколегированные стали, тавровые соединения, накопление усталостных повреждений, высокочастотная механическая проковка, циклическая долговечность

$$\sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \geq 1. \quad (1)$$

В сварных металлоконструкциях, предназначенных для длительной эксплуатации в условиях переменного нагружения, усталостные повреждения накапливаются в околошовных зонах в местах максимальной концентрации рабочих и остаточных напряжений. Решение задач по оценке и прогнозированию долговечности таких конструкций предполагает наряду с расчетным определением напряженно-деформированного состояния их элементов установление закона суммирования усталостных повреждений в зонах концентраторов. Экспериментальному исследованию закономерностей накопления усталостных повреждений в конструкционных сталях посвящено множество работ, в том числе и обзорных [1–3].

При решении задач по оценке долговечности для различного рода нестационарных нагружений наиболее широко используется гипотеза линейного суммирования повреждений, применяемая как для основного материала, так и для сварных соединений, что объясняется ее простотой и отсутствием неизвестных параметров. Впервые она была предложена Пальмгреном в 1924 г. и позднее развита Майнером в 1945 г.

Согласно гипотезе Пальмгрена—Майнера доля поврежденности D_i при любом i -м уровне напряжений цикла прямо пропорциональна отношению количества циклов его действия n_i к количеству циклов до разрушения на этом уровне N_i . Предсказывается, что разрушение произойдет, если

Результаты экспериментальных исследований, полученные при различных видах нагружения для гладких образцов и образцов с концентраторами, не всегда удовлетворительно согласуются с линейной гипотезой Пальмгрена—Майнера. Разброс значений суммы долей поврежденности при разрушении для таких образцов колеблется примерно от 0,1 до 5 [1–3]. При этом отмечается, что порядок приложения нагрузок оказывает существенное влияние на долговечность образца. При режимах нагружения, когда низкие напряжения предшествуют высоким, происходит так называемая тренировка и суммарная поврежденность, как правило, больше единицы. Наиболее существенно тренировка проявляется, когда первоначальный размах напряжений ниже предела выносливости незначительно увеличивают через интервалы в несколько миллионов циклов. При режимах нагружения, когда высокие напряжения предшествуют низким, происходит так называемая перегрузка и суммарная поврежденность, как правило, меньше единицы. Если различные амплитуды циклических напряжений будут чередоваться квазислучайным образом, то экспериментальное значение суммы долей поврежденности в момент разрушения приближается к единице. Поскольку во многих практических приложениях напряжения меняются квазислучайно, использование правила линейного суммирования повреждений Пальмгрена—Майнера для предсказания разрушения часто оказывается приемлемым. Иногда при известных спектрах нагружения, ха-



рактерных для того или иного изделия, улучшение соответствия предсказанной долговечности с экспериментально установленной достигают путем модификации линейной гипотезы Пальмгрена–Майнера, получаемой путем замены в выражении (1) критерия разрушения на величину a , отличающуюся от единицы. В литературе отсутствует единое мнение о методике определения параметра a , чаще всего его значение вычисляется экспериментально при неизменном программном нагружении отдельных образцов с усреднением результатов испытаний.

Данная модификация линейной гипотезы имеет существенный недостаток — она справедлива для строго определенного круга материалов и условий нагружения и не может распространяться на условия, выходящие за рамки первоначального эксперимента.

Что касается сварных соединений, то работ по исследованию закономерностей накопления усталостных повреждений гораздо меньше. В работах [4, 5] отмечается, что в сварных соединениях с высокими остаточными напряжениями растяжения при однократной смене максимальных напряжений цикла переменного нагружения накопление повреждений существенно зависит от порядка нагружения. Кроме того, от порядка нагружения зависит суммарная поврежденность сварных соединений, подвергнутых действию многоступенчатой убывающей или возрастающей последовательности нагружения [6–8]. Разброс приведенных значений суммарной относительной долговечности колеблется примерно от 0,3 до 3. Для других видов нагружения, в частности, при многоблочном и двухступенчатом с многократной сменой напряжений, гипотеза линейного суммирования повреждений получила экспериментальное подтверждение. Так, в работе [4] справедливость линейной гипотезы накопления усталостных повреждений подтвердилась при многоблочном нагружении сварных образцов стали ВСт3 с высокими остаточными напряжениями. Показано, что, начиная с десятиблочного двухступенчатого нагружения, результаты испытаний практически перестают зависеть от порядка первоначального нагружения (перехода с высшего уровня на низший или с низшего на высший).

В последние годы с целью повышения циклической долговечности сварных узлов и элементов металлоконструкций широкое применение находят технологии поверхностного пластического деформирования, в частности, высокочастотная механическая проковка (ВМП). Эффективность применения данной технологии на стадии изготовления изделий при регулярном нагружении хорошо изучена, однако, экспериментальные данные по установлению закона суммирования повреждений в упрочненных ВМП сварных соеди-

нениях практически отсутствуют (следует отметить единственную работу [9]).

Цель настоящей работы — экспериментальная оценка применимости гипотезы линейного суммирования повреждений для тавровых сварных соединений в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях при возрастающем, убывающем и квазислучайном блоках нагружения.

Экспериментальные исследования проводили на образцах тавровых соединений стали 09Г2С ($\sigma_T = 370$ МПа, $\sigma_B = 540$ МПа). Заготовки под образцы из этой стали вырезали из листового проката так, чтобы длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной электродуговой сваркой электродами марки УО-НИ-13/55. Форма и геометрические размеры образца приведены на рис. 1. Толщина образца обусловлена широкой применимостью в сварных конструкциях проката толщиной 12 мм, а ширину рабочей части выбирали исходя из мощности испытательного оборудования. Известно, что при ширине образца 50 мм уровни остаточных напряжений растяжения в околошовной зоне не достигают предельного значения, а равны примерно, $0,5\sigma_T$, однако, как будет показано ниже, этот фактор не оказывает существенного влияния на результаты исследований. При упрочнении соединений технологией ВМП поверхностному пластическому деформированию подвергалась узкая зона перехода металла шва к основному металлу. Усталостные испытания образцов проводили на испытательной машине УРС 20 при одноосном переменном растяжении с асимметрией цикла $R_\sigma = 0$. Все образцы испытывали до полного разрушения. Первоначально были установлены кривые усталости тавровых сварных соединений ста-

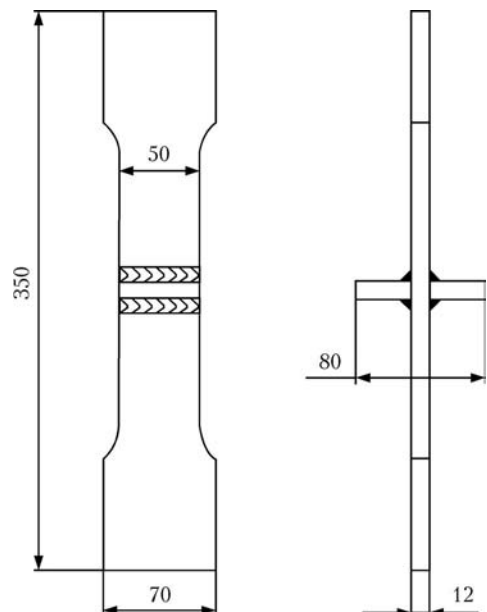


Рис. 1. Схема образца таврового соединения стали 09Г2С

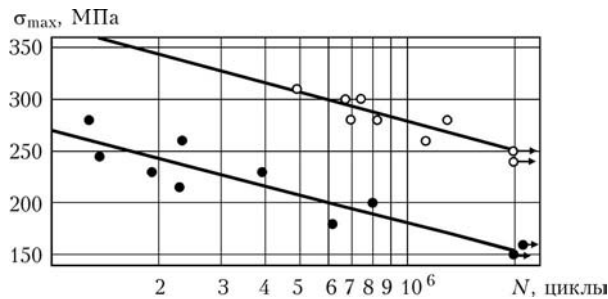


Рис. 2. Кривые усталости тавровых сварных соединений низколегированной стали 09Г2С: ●, ○ — соответственно в исходном и упрочненном после сварки состояниях

ли 09Г2С в исходном и в упрочненном технологией ВМП сразу после сварки состояниях (рис. 2). Для установления критерия разрушения (величина a) в соответствии с линейной гипотезой накопления усталостных повреждений испытывали шесть серий образцов: по три серии для упрочненных и неупрочненных сварных соединений соответственно. При этом каждая серия состояла из трех образцов.

При усталостных испытаниях сварных соединений в исходном состоянии блок включал пять ступеней нагружения с наработкой 20 % долговечности на каждой. Первую серию образцов испытывали при заданном начальном уровне напряжений 180 МПа с последующим увеличением до 260 МПа с шагом 20 МПа (возрастающий вид нагружения). Образцы второй серии испытывали при начальном уровне напряжений 260 МПа с последующим уменьшением до 180 МПа также с шагом 20 МПа (убывающий вид нагружения). Образцы третьей серии испытывали при следующих пяти последовательных уровнях максимальных напряжений цикла: 220, 200, 240, 180, 260 МПа (квазислучайный вид нагружения).

Для сварных соединений, упрочненных технологией ВМП, сразу после сварки блок включал четыре ступени нагружения с наработкой 25 % долговечности на каждой. Четвертую серию об-

разцов испытывали при заданном начальном уровне напряжений 260 МПа с последующим увеличением до 305 МПа с шагом 15 МПа. Образцы пятой серии испытывали при начальном уровне напряжений 305 МПа с последующим уменьшением до 260 МПа также с шагом 15 МПа. Образцы шестой серии испытывали при следующих четырех последовательных уровнях максимальных напряжений цикла: 290, 275, 305, 260 МПа.

Результаты испытаний сварных соединений в исходном состоянии и упрочненных сразу после сварки представлены соответственно в табл. 1 и табл. 2. Установленные предельные значения суммы относительных долговечностей при испытаниях на усталость сварных соединений в исходном состоянии изменяются в пределах от 0,32 до 1,97. При этом порядок приложения нагрузок оказывает существенное влияние на циклическую долговечность сварных соединений. Так, значения суммарной поврежденности, полученные при испытании трех образцов до разрушения, при возрастающей последовательности приложения нагрузок находятся в пределах от 0,32 до 0,56, при убывающей — от 1,48 до 1,97 и при квазислучайном виде нагружения — от 0,84 до 1,25. Эти значения предельных сумм долей поврежденности подтверждают, что порядок приложения нагрузки в сварных соединениях вызывает обратный эффект в закономерностях накопления усталостных повреждений при использовании линейной гипотезы по сравнению с конструкционными сталями [4].

Экспериментально установленные предельные значения суммы относительных долговечностей при испытаниях на усталость всех образцов сварных соединений, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки, находятся в более узких границах от 0,65 до 1,08. При этом разброс значений суммарной поврежденности для возрастающей последовательности приложенных нагрузок нахо-

Т а б л и ц а 1. Результаты испытаний на усталость тавровых сварных соединений стали 09Г2С при различных видах блока нагружения

№ образца	Вид блока нагружения	1-е нагружение*		2-е нагружение			3-е нагружение		
		σ_{1max} , МПа	n_1 , тыс. циклы	σ_{2max} , МПа	n_2 , тыс. циклы	n_2/N_2 , %	σ_{3max} , МПа	n_3 , тыс. циклы	n_3/N_3 , %
1	Возрастающий	180	208,8	200	119,9	20,0	220	55,9	15,6**
2		180	208,8	200	72,9	12,2**	—	—	—
3		180	208,8	200	119,9	20,0	220	13,4	3,7**
4	Убывающий	260	25,6	240	42,8	20,0	220	71,6	20,0
5		260	25,6	240	42,8	20,0	220	71,6	20,0
6		260	25,6	240	42,8	20,0	220	71,6	20,0
7	Квазислучайный	220	71,6	200	119,9	20,0	240	42,8	20,0
8		220	71,6	200	119,9	20,0	240	42,8	20,0
9		220	71,6	200	119,9	20,0	240	42,8	20,0



№ образца	Вид блока нагружения	4-е нагружение			5-е нагружение			$\sum \frac{n_i}{N_i}, \%$
		$\sigma_{4max}, \text{ МПа}$	$n_4, \text{ тыс. циклы}$	$n_4/N_4, \%$	$\sigma_{5max}, \text{ МПа}$	$n_5, \text{ тыс. циклы}$	$n_5/N_5, \%$	
1	Возрастающий	—	—	—	—	—	—	55,6
2		—	—	—	—	—	—	32,2
3		—	—	—	—	—	—	43,7
4	Убывающий	200	119,9	20,0	180	1221,8	117,0**	197,0
5		200	119,9	20,0	180	710,7	68,1**	148,1
6		200	119,9	20,0	180	998,2	99,4**	179,4
7	Квазислучайный	180	208,8	20,0	260	5,3	4,1**	84,1
8		180	208,8	20,0	260	57,2	44,7**	124,7
9		180	208,8	20,0	260	23,6	18,4**	98,4

* Для 1-го нагружения $n_1/N_1 = 20,0 \%$. ** Образец разрушился.

дится в пределах от 0,91 до 0,98, для убывающей — от 0,65 до 0,74, а для квазислучайного вида нагружения — от 0,73 до 1,08. Следовательно, для упрочненных ВМП тавровых сварных соединений порядок приложения нагрузок не оказывает существенного влияния на циклическую долговечность соединений.

Установленные закономерности накопления усталостных повреждений в исследуемых сварных соединениях отражают их специфические особенности в сравнении с основным металлом, такие как наличие сварочных остаточных напряжений и геометрического концентратора напряжений α_σ , обусловленного формой соединения. Известно, что в результате взаимодействия остаточных напряжений с напряжением цикла переменного нагружения в зоне концентратора сварного соединения формируется новый цикл напряжений того же размаха, что и исходный, но другой асимметрии. При неизменных параметрах прикладываемого циклического нагружения к сварным соединениям в исходном состоянии ($R_\sigma =$

$= 0$) с высокими остаточными напряжениями растяжения в зонах концентраторов максимальные σ_{max}^k и минимальные σ_{min}^k напряжения цикла определяются соотношениями [10]:

$$\sigma_{max}^k = \sigma_T, \tag{2}$$

$$\sigma_{min}^k = \sigma_{ост}^y = \sigma_T - \alpha_\sigma 2\sigma_a, \tag{3}$$

где σ_T — предел текучести материала; $\sigma_{ост}^y$ — установившиеся остаточные напряжения; σ_a — амплитуда напряжений цикла переменного нагружения.

Соотношения (2) и (3) записаны для идеально упругопластического материала.

Принимается, что свойства стали 09Г2С близки к идеально упругопластическим. Следовательно, при построении кривой усталости (рис. 2) тавровых сварных соединений в исходном состоянии с остаточными напряжениями растяжения $\sigma_{ост} \approx \approx 0,5\sigma_T$ во всем диапазоне приложенных внешних

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость тавровых сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных технологией ВМП, при различных видах блока нагружения

№ образца	Вид блока нагружения	1-е нагружение*		2-е нагружение*		3-е нагружение			4-е нагружение			$\sum \frac{n_i}{N_i}, \%$
		$\sigma_{1max}, \text{ МПа}$	$n_1, \text{ тыс. циклы}$	$\sigma_{2max}, \text{ МПа}$	$n_2, \text{ тыс. циклы}$	$\sigma_{3max}, \text{ МПа}$	$n_3, \text{ тыс. циклы}$	$n_3/N_3, \%$	$\sigma_{4max}, \text{ МПа}$	$n_4, \text{ тыс. циклы}$	$n_4/N_4, \%$	
1	Возрастающий	260	387,2	275	261,8	290	185,7	25,0	305	82,4	16,0**	91,0
2		260	387,2	275	261,8	290	185,7	25,0	305	120,3	23,4**	98,4
3		260	387,2	275	261,8	290	185,7	25,0	305	109,7	21,3**	96,3
4	Убывающий	305	128,6	290	185,7	275	248,9	23,8**				73,8
5		305	128,6	290	185,7	275	155,8	14,9**				64,9
6		305	128,6	290	185,7	275	205,3	19,6**				69,6
7	Квазислучайный	290	185,7	275	261,8	305	128,6	25,0	260	503,7	32,5**	107,5
8		290	185,7	275	261,8	305	118,3	23,0**				73,0
9		290	185,7	275	261,8	305	128,6	25,0	260	287,2	18,5	93,5

* Для 1-го и 2-го нагружения n_1/N_1 и $n_2/N_2 = 25,0 \%$. ** Образец разрушился.

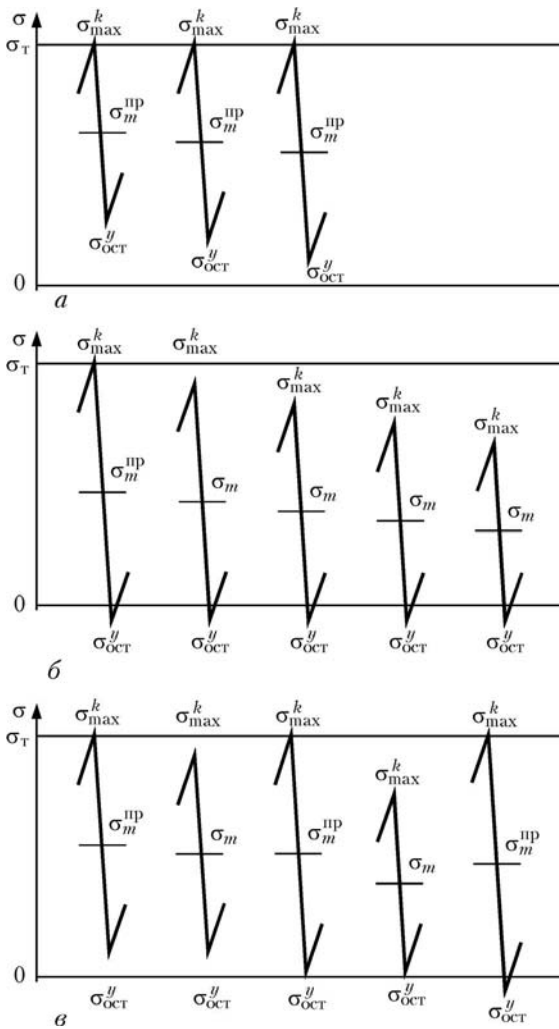


Рис. 3. Схематическое изображение размахов напряжений в зоне концентратора сварного соединения в состоянии после сварки при возрастающем (а), убывающем (б) и квазислучайном (в) блоках нагружения

нагрузок в зоне концентратора ($\alpha_\sigma = 1,5$) реализуется предельный цикл напряжений соответствующего размаха, при котором σ_{\max}^k достигают предела текучести материала. Учитывая отмеченное выше, увеличение ширины образца (увеличение уровня остаточных напряжений) не приведет к изменению реализуемого в зоне концентратора цикла напряжений, а следовательно, и не окажет влияния на результаты испытаний.

При блоках нагружения определяющую роль в закономерности накопления усталостных повреждений сварным соединением играет максимальное напряжение первого уровня приложенного нагружения. Известно, что уже после первых циклов начальной ступени нагружения в зоне концентратора формируется установившийся уровень остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^y$, которые могут быть как растягивающими, так и сжимающими. Они и будут определять максимальные σ_{\max}^k и мини-

мальные σ_{\min}^k напряжения цикла в зоне концентратора на последующей ступени нагружения:

$$\sigma_{\max}^k = \sigma_{\text{ост}}^y + \alpha_\sigma 2\sigma_a \quad (4)$$

$$\sigma_{\min}^k = \sigma_{\text{ост}}^y \quad (5)$$

Аналогичным образом уровень напряжений предыдущей ступени нагружения будет оказывать влияние на формирование в зоне концентратора цикла переменного нагружения последующей ступени. Следует отметить, что σ_{\max}^k , определяемое соотношением (4), не может превышать значение, равное пределу текучести материала, поскольку исходя из модели идеально упругопластического материала вызовет лишь развитие пластических деформаций в зоне концентратора.

Используя соотношения (2)–(5), рассмотрим более детально циклы переменных напряжений, которые формируются в зоне концентратора напряжений таврового соединения с учетом влияния остаточных напряжений и коэффициента концентрации напряжений при воздействии приведенных выше последовательностей нагружения. Для сварных соединений в исходном состоянии при возрастающем блоке нагружения (рис. 3, а) на каждой его ступени в зоне концентратора реализуются предельные циклы напряжений ($\sigma_{\max}^k = \sigma_T$), идентичные тем, которые имеют место при построении кривой усталости. При этом влияние остаточных напряжений в процессе нагружения приводит к развитию пластических деформаций в зоне концентратора на каждой его ступени. При убывающем блоке нагружения в зоне концентратора (рис. 3, б) реализуются циклы напряжений, отличные от предельных, начиная со второй ступени нагружения. Их повреждающая способность ниже повреждающей способности предельных циклов напряжений, которые реализуются при тех же уровнях внешнего переменного нагружения при построении кривой усталости сварных соединений в исходном состоянии. При квазислучайном блоке нагружения в зоне концентратора реализуются как предельные, так и отличные от них циклы напряжений (рис. 3, в). Таким образом, при одинаковом уровне внешнего нагружения в зоне концентратора формируется цикл напряжений одинакового размаха, но с зависящей от последовательности приложения нагрузки асимметрией цикла напряжений, которые и определяют его повреждающую способность. Поэтому рассчитывать долю поврежденности сварного соединения по кривой усталости, при построении которой в зоне концентратора реализуются только предельные циклы напряжений, для убывающего и квазислучайного блоков нагружений некоррект-



но. Для этих случаев предлагается суммарную поврежденность определять по формуле:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \sum_{i=2}^k \frac{n_i}{N_i} \left(\frac{\sigma_{mi}}{\sigma_{mi}^{np}} \right), \quad (6)$$

где σ_{mi} — среднее напряжение цикла в зоне концентратора, отвечающее i -му уровню внешнего переменного нагружения; σ_{mi}^{np} — среднее напряжение предельного цикла в зоне концентратора, отвечающее i -му уровню внешнего переменного нагружения.

Значения суммарной поврежденности сварных соединений в исходном состоянии, полученные по формуле (6), находятся в следующих пределах: при возрастающей последовательности приложения нагрузок — от 0,32 до 0,56, при убывающей последовательности — от 0,96 до 1,20 и при квазислучайном виде нагружения — от 0,80 до 1,15. Как видно, использование соотношения (6) уменьшает разброс значений предельных сумм долей долговечностей с интервала 0,33...1,97 до 0,33...1,2, а средние значения суммарной поврежденности при убывающем и квазислучайном блоках нагружения близки к единице (1,10 и 0,95 соответственно), что подтверждает целесообразность использования данной формулы в расчете долговечности сварных соединений при различных видах нагружения. Достаточно широкий диапазон разброса суммарной поврежденности после применения соотношения (6) свидетельствует о том, что процессы, происходящие в зоне перехода шва на основной металл, весьма сложные и не сводятся только к учету остаточных напряжений. Поэтому экспериментально установленные по выражению (6) средние значения предельной суммы долей накопленной поврежденности для исследуемых видов нагружения следует принимать как критерии усталостного разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С, поскольку даже для основного материала установить общую закономерность накопления усталостных повреждений в зависимости от режимов изменения нагрузки не удастся [1–3].

В сварных соединениях, упрочненных технологией ВМП сразу после сварки, в зоне концентратора наводятся остаточные напряжения сжатия, которые могут достигать значений, близких к пределу текучести основного материала. Следовательно, при построении кривой усталости тавровых сварных соединений в упрочненном состоянии во всем диапазоне приложенных внешних нагрузок в зоне концентратора реализуется цикл переменных напряжений, максимальные σ_{\max}^k и минимальные σ_{\min}^k напряжения которого определяются соотношениями (4) и (5). При блоках на-

ружения циклы напряжений, реализуемые в зоне концентратора, идентичны тем, которые имеют место при построении кривой усталости сварных соединений в упрочненном состоянии и не зависят от уровня и порядка приложения напряжений (схематично это показано на рис. 4). При этом средние значения предельной суммарной поврежденности, полученные по линейной гипотезе накопления усталостных повреждений (для возрастающей последовательности приложенных нагрузок 0,95, убывающей 0,69 и для квазислучайного нагружения 0,91), указывают на слабую чувствительность упрочненных соединений к последовательности нагружения. Для исследуемых

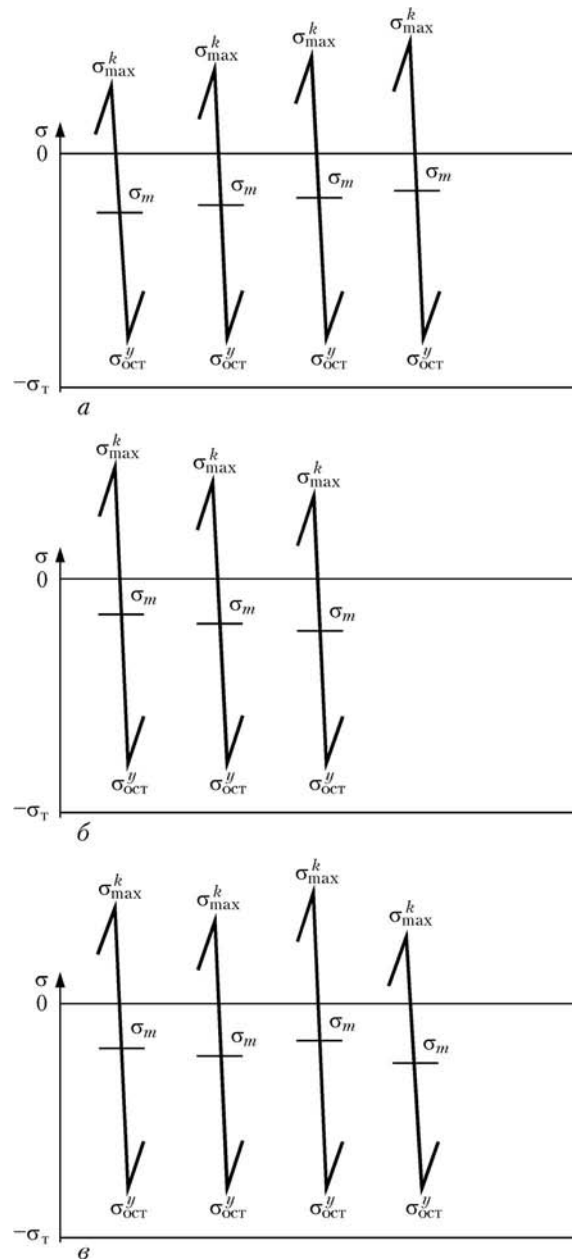


Рис. 4. Схематическое изображение размахов напряжений в зоне концентратора сварного соединения, упрочненного технологией ВМП, при возрастающем (а), убывающем (б) и квазислучайном (в) блоках нагружения



видов нагружения эти значения следует принимать как критерии усталостного разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С, упрочненных технологией ВМП. Однако в силу их незначительного отличия для упрочненных сварных соединений вполне оправданно применение гипотезы Пальмгрена—Майнера (1). Различия в закономерностях накопления усталостных повреждений и соответственно в разбросе значений предельных сумм долей долговечностей сварных соединений в исходном (0,33...1,2) и упрочненном технологией ВМП (0,65...1,07) состояниях обусловлены их специфическими особенностями: различными коэффициентами концентрации напряжений и уровнями остаточных напряжений; отличием пластических деформаций в зоне перехода шва на основной металл; различным состоянием поверхности и др.

Выводы

1. Установлены кривые усталости тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией ВМП состояниях после сварки.

2. В рамках гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений установлены критерии разрушения тавровых сварных соединений стали 09Г2С в исходном и упрочненном технологией ВМП после сварки состояниях при возрастающем, убывающем и квазислучайном блоках нагружения. Подтверждено, что порядок приложения нагрузки оказывает существенное влияние на накопление усталостных повреждений в сварных соединениях в исходном состоянии.

3. Экспериментально установлено, что закономерности накопления усталостных повреждений при возрастающем, убывающем и квазислучайном

блоках нагружения тавровых сварных соединений упрочненных ВМП в состоянии после сварки, удовлетворительно согласуются с линейной гипотезой Пальмгрена—Майнера.

4. Предложено соотношение для накопления усталостных повреждений в неупрочненных сварных соединениях, учитывающее влияние остаточных сварочных напряжений и коэффициент концентрации напряжений соединений, которое существенно уменьшает рассеяние предельных сумм повреждений независимо от порядка приложения нагрузок.

1. Manson S. S., Halford G. R. Re-examination of cumulative fatigue damage analysis — an engineering perspective // Eng. Frac. Mech. — 1986. — 25. — P. 539–571.
2. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — Ч. 1. — 521 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 624 с.
4. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
5. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 216 с.
6. Gurney T. R. Fatigue of welded structures. — Second ed. — Cambridge: Cambridge Univ. press, 1979. — 298 p.
7. Blom A. F. Spectrum fatigue behaviour of welded joints // Intern. J. Fatigue. — 1998. — 17. — P. 485–491.
8. Sonsino C. M., Lagoda T., Demofonti G. Damage accumulation under variable amplitude loading of welded medium- and high-strength steels // Ibid. — 2004. — 26. — P. 487–495.
9. Huo L., Wang D., Zhang Y. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable amplitude load // Ibid. — 2005. — 27. — P. 95–101.
10. Труфяков В. И., Кудрявцев Ю. Ф., Михеев П. П. О влиянии остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений // Автомат. сварка. — 1988. — № 2. — С. 1–4.

Criteria of fracture of welded T-joints on steel 09G2S in the as-welded state and after strengthening by the technology of high-frequency mechanical peening (HMP), loaded in the decreasing, increasing and quasi-random modes, are considered in the context of the hypothesis of linear summation of fatigue damages. It is noted that this hypothesis is well suitable for prediction of fatigue life of the welded joints strengthened by the HMP technology. For the as-welded joints, where accumulation of damages strongly depends upon the loading history, the rule of summation of damages is suggested that decreases scattering of the ultimate total degree of damages.

Поступила в редакцию 15.04.2008

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Решением Президиума ВАК Российской Федерации от 4 июля 2008 г. журнал «Автоматическая сварка» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.