

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ АМПЛИТУД ЦИКЛА НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С УСТАНОВИВШИМИСЯ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

В. А. ДЕГТЯРЕВ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. 01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2.

E-mail: ips@ipp.kiev.ua

В работе предложена методика определения диаграмм предельных амплитуд цикла сварных соединений с установившимися остаточными напряжениями растяжения по результатам испытаний малогабаритных образцов, которую можно рассматривать в качестве экспресс-метода расчета характеристик сопротивления усталости сварных соединений при отсутствии возможности проведения полномасштабных исследований и представлены соответствующие расчетные зависимости. Анализ литературных данных для разных типов сварных соединений показал удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных значений пределов выносливости сварных соединений низкоуглеродистой и низколегированной сталей невысокой прочности. Установлено, что все диаграммы предельных амплитуд цикла сварных соединений с установившимися остаточными напряжениями заканчиваются на линии, где каждая точка при разных средних напряжениях цикла соответствует минимальной предельной амплитуде цикла сварного соединения со своим значением предельного установившегося остаточного напряжения, что обеспечивает реализацию предельного цикла напряжений. Показано, если при невысоких значениях установившихся остаточных напряжений относительное снижение пределов выносливости стыковых сварных соединений сталей разной прочности происходит практически на одинаковую величину, то с их повышением снижение предела выносливости стали с более высокими механическими характеристиками более значительно. Библиогр. 23, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: амплитуда напряжений цикла, среднее напряжение цикла, предел текучести, установившееся остаточное напряжение, предел выносливости, диаграмма предельных амплитуд цикла

Многочисленные исследования свидетельствуют, что среди целого ряда факторов, определяющих несущую способность сварных металлоконструкций разного назначения, существенную роль играют сварочные остаточные напряжения (ОН) [1, 2]. В наибольшей мере влияние ОН растяжения на пределы выносливости проявляется при симметричном цикле нагружения и заметно уменьшается вследствие более значительной релаксации с повышением уровня действующих напряжений или коэффициента асимметрии цикла R_c [3–5]. Поскольку снижение ОН происходит, главным образом, в течение нескольких десятков циклов нагружений до определенной величины, то основную роль в понижении предела выносливости сварного соединения играет установившееся значение остаточных напряжений $\sigma_{ост}^y$ [6, 7], методика определения которого изложена в работе [8]. Это должно отражаться на характере диаграмм предельных напряжений цикла (ДПНЦ) [8] или предельных амплитуд цикла (ДПАЦ). Если для сварных соединений без ОН предельная амплитуда σ_a зависит от среднего напряжения цикла σ_m , то для всех типов сварных соединений разной прочности с высокими ОН такая зависимость не наблюдается. Поскольку определение диаграмм базируется, как правило, только на напряжениях

от внешней нагрузки без учета ОН, то определение ДПАЦ сварных соединений, содержащих разный уровень $\sigma_{ост}^y$, может быть важным для искусственного регулирования остаточных напряжений при прогнозировании предельного состояния сварных металлоконструкций. Несомненно наиболее достоверные данные можно получить при испытании натуральных элементов металлоконструкций, содержащих разный уровень $\sigma_{ост}^y$. Однако ввиду существенных материальных затрат количество экспериментальных исследований влияния уровня $\sigma_{ост}^y$ на сопротивление усталости сварных соединений крайне ограничено. Поэтому разработка метода определения ДПНЦ или ДПАЦ сварных соединений с ОН по результатам испытаний малогабаритных образцов представляется актуальной. Ранее в работе [9] предложен метод определения пределов выносливости сварных соединений с высокими ОН по результатам испытаний малогабаритных образцов с учетом установленного факта пересечения диаграмм предельных напряжений цикла. В работах [8, 10] было предложено определение диаграмм предельных напряжений цикла сварных соединений с разной величиной исходных ОН по результатам испытаний малогабаритных образцов и рассчитан уровень предельного исходного остаточного напряжения, обеспечивающего реализацию предельного цикла

напряжений. Вместе с тем предложенные до настоящего времени методики не позволяют однозначно ответить, где заканчиваются диаграммы предельных амплитуд цикла сварных соединений с разной величиной установившихся остаточных напряжений, почему они параллельны диаграмме предельных амплитуд цикла образцов без ОН. Кроме этого, предложенные методики не нашли экспериментального подтверждения для разных типов сварных соединений, и неясно, могут ли быть применимы для сварных соединений с разными механическими свойствами. В связи с этим в настоящей работе обоснован расчетный способ определения предельных амплитуд цикла сварных соединений с разным уровнем установившихся остаточных напряжений растяжения по результатам испытаний малогабаритных образцов без ОН при сопоставлении с экспериментальными данными и установлена причина, по которой диаграммы предельных амплитуд цикла сварных соединений с разной величиной $\sigma_{ост}^y$ заканчиваются на линии, имеющей одинаковое значение минимальной предельной амплитуды цикла, не зависящей от среднего напряжения цикла.

Анализ полученных результатов. При проведении испытаний при одном значении R_σ диаграмма предельных амплитуд цикла сварных образцов без остаточных напряжений (рис. 1, линия 1) обычно представляется в виде

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma'_m, \quad (1)$$

где σ_{-1} — предел выносливости сварного соединения при симметричном цикле напряжений; σ'_m — текущее значение среднего напряжения цикла; ψ_σ — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений, который определяется при известном значении предела прочности материала σ_b отношением σ_{-1}/σ_b .

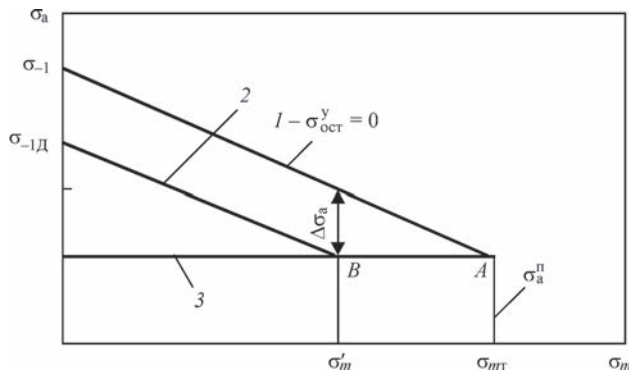


Рис. 1. Схема определения диаграмм предельных амплитуд цикла сварных соединений с установившимися остаточными напряжениями: 1 — диаграмма предельных амплитуд цикла сварных образцов без остаточных напряжений; 2 — расчетная диаграмма предельных амплитуд цикла сварных образцов с установившимся остаточным напряжением; 3 — диаграмма минимальных предельных амплитуд цикла

Согласно этой зависимости предельная амплитуда напряжений σ_a зависит от среднего напряжения σ'_m . Следует отметить, что в настоящей работе влияние теоретического коэффициента концентрации напряжений не учитывалось по причине принятого в работе [11] определения ДПНЦ или ДПАЦ только от действия номинальных напряжений. Анализ экспериментально полученных результатов испытаний разных типов сварных соединений с высокими остаточными напряжениями показывает, что σ_a в этом случае не зависит от σ'_m (линия 3) [4]. С ростом среднего напряжения или коэффициента асимметрии цикла разница между предельными амплитудами сварных образцов с остаточными напряжениями и без них уменьшается и примерно в точке, соответствующей пределу текучести σ_T материала линии 1 и 3 пересекаются [8, 12]. В этом случае предельная амплитуда достигает своего минимального значения $\sigma_a^п$ при среднем напряжении $\sigma_{mт}$ (т. А) и имеет одинаковое значение для сварных соединений без ОН и с таковыми. Величина $\sigma_a^п$, при этом, может быть определена расчетным способом при известном значении предела выносливости сварного соединения без ОН как

$$\sigma_a^п = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_{mт}. \quad (2)$$

Учитывая, что $\sigma_a^п = \sigma_T - \sigma_{mт}$, подставив в (2), можно записать, что

$$\sigma_{mт} = \frac{\sigma_T - \sigma_{-1}}{1 - \psi_\sigma}. \quad (3)$$

Таким образом, зависимость для определения $\sigma_a^п$ можно представить в виде

$$\sigma_a^п = \frac{\sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_T}{1 - \psi_\sigma}. \quad (4)$$

Проведенный ранее анализ литературных данных [12] показал, если результаты исследований разных типов сварных соединений низкоуглеродистой и низколегированной сталей с установившимися остаточными напряжениями $\sigma_{ост}^y$ представить в виде суммы предельной амплитуды цикла σ_{RD} такого соединения и установившегося остаточного напряжения, которое рассматривается в качестве статической составляющей, т. е. ($\sigma_{R\Sigma} = \sigma_{RD} + \sigma_{ост}^y$), а среднее напряжение соответственно в виде $\sigma_{m\Sigma} = \sigma'_m + \sigma_{ост}^y$, то, независимо от уровня остаточного напряжения все точки удовлетворительно ложатся на ДПНЦ сварных соединений без остаточных напряжений, описываемую зависимостью Гудмана [11]

$$\sigma_{max} = \sigma_{-1} + (1 - \psi_\sigma) \sigma'_m. \quad (5)$$

Причем, когда сумма исходных остаточных напряжений и напряжений от внешней нагрузки,

т. е. предела выносливости, не достигает предела текучести материала, то установившиеся ОН соответствуют исходным и в этом случае суммарные напряжения расположены на наклонном участке диаграммы. По достижении $\sigma_{R\Sigma}$ предела текучести материала происходит релаксация исходных ОН до установившегося уровня (предельного уровня) и, несмотря на полученные разные значения $\sigma_{ост}^y$ в зависимости от напряжения от внешней нагрузки, обеспечивается реализация единого предельного цикла напряжений. В этом случае результаты испытаний образцов с разной величиной установившихся остаточных напряжений можно соответственно описать уравнением в виде

$$\sigma_{R\Sigma} = \sigma_{-1} + (1 - \psi_{\sigma})(\sigma'_m + \sigma_{ост}^y). \quad (6)$$

При отсутствии ОН уравнение (6) приобретает вид (5). Следует отметить, что приведенное выражение справедливо при условии, что влияние установившегося остаточного напряжения и среднего напряжения от внешней нагрузки на сопротивление усталости сварных соединений идентично. Следовательно, чувствительность сварных соединений с разной величиной установившихся остаточных напряжений к асимметрии нагружения также должна быть одинаковой. Кроме этого, надо иметь в виду, что выражение для определения установившегося остаточного напряжения, носит идеализированный характер и дает приближенный расчет [8]. Это связано с тем, что в процессе циклического деформирования, когда суммарные напряжения, как правило, превышают предел упругости материала, в результате накопления неупругих деформаций происходит цикловое снижение исходного ОН. Поэтому для более точного его определения необходимы дополнительно экспериментальные сведения или о неупругом деформировании исследуемого материала [13], или диаграммах пределов циклической ползучести при заранее оговоренном допуске на остаточную деформацию, позволяющих снижать ОН на заданную величину [14]. Однако широкое использование указанной зависимости на практике связано с доступностью быстрого определения входящих в него величин.

Факт наличия единой диаграммы позволяет, во-первых, подобрать требуемые режимы нагружения сварной конструкции для достижения в ней заданных $\sigma_{ост}^y$, во-вторых, определить диаграммы предельных напряжений цикла или предельных амплитуд цикла сварных соединений с заданной величиной $\sigma_{ост}^y$, базирующихся только на напряжениях от внешней нагрузки, используя результаты испытаний сварных соединений без ОН. Учитывая, что $\sigma_{ад} = \sigma_{R\Sigma} - \sigma_{m\Sigma}$, зависимость для определения ДПАЦ сварных образцов с заданной

величиной установившихся остаточных напряжений (рис. 1, линия 2) можно представить в виде

$$\sigma_{ад} = \sigma_{-1} - \psi_{\sigma}(\sigma'_m + \sigma_{ост}^y), \text{ или} \quad (7)$$

$$\sigma_{ад} = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma'_m + \sigma_{ост}^y}{\sigma_B}\right). \quad (8)$$

В этом случае наклонный участок диаграммы после совместного решения уравнений (1) и (7) смещается на величину $\Delta\sigma_a = \psi_{\sigma} \sigma_{ост}^y$ параллельно относительно ДПАЦ сварных образцов без ОН.

Среднее напряжение от внешней нагрузки, при действии которого в сварном образце остается заданное значение $\sigma_{ост}^y$, нетрудно определить, решив уравнение (7) относительно σ'_m , учитывая, что $\psi_{\sigma} = (\sigma_{-1} - \sigma_a^p) / \sigma_{mT}$

$$\sigma'_m = \frac{\sigma_{-1} - \sigma_{ад}}{\psi_{\sigma}} - \sigma_{ост}^y. \quad (9)$$

Особый интерес представляет ответ на вопрос, где заканчиваются ДПАЦ сварных соединений с заданной величиной $\sigma_{ост}^y$. После преобразования уравнения (2) относительно σ_{mT} и совместного решения уравнений (2) и (9) в конечном итоге получим, что среднее напряжение для сварных образцов с установившимся остаточным напряжением, которое в этом случае будет предельным, и при этом $\sigma_{ад} = \sigma_a^p$, смещается по линии 3 на величину $\Delta\sigma_m = \sigma_{mT} - \sigma'_m = \sigma_{ост}^y$ (т. В). Таким образом, каждая точка на этой прямой при разных средних напряжениях цикла соответствует минимальной предельной амплитуде цикла сварного соединений со своим значением предельного установившегося остаточного напряжения, что обеспечивает в конечном итоге реализацию предельного цикла напряжений.

В качестве примера в таблице для разных типов сварных соединений, выполненных из сталей разной прочности, приведены литературные данные экспериментально полученных на базе $2 \cdot 10^6$ циклов пределов выносливости при симметричном цикле нагружения при разных значениях $\sigma_{ост}^y$ и их расчетные значения. В таблице также приведены экспериментальные значения пределов выносливости сварных соединений без остаточных напряжений. Сопоставление результатов расчетной оценки влияния установившихся ОН на пределы выносливости сварных соединений по предлагаемой методике и экспериментальных данных показало неплохое соответствие для сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей невысокой прочности. Видно, что разница находится в пределах 3...11 МПа, что соответствует погрешности 6...20 %. Что касается сварного соединения низколегированной стали 10ХСНД, то

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений пределов выносливости разных типов сварных соединений, выполненных из материалов разной прочности (МПа)

Сталь, вид соединения	σ_T	$\sigma_{ост}^y$	σ_a^p	σ_m	σ_{-1}^a	σ_{-1}^p	Δ	Литературный источник
Ст. 3, крестовое	300	0 127	21,5 -	278,5 151,5	40 28,5	31,5	-3,0	[15]
M16С, стыковое	237	0 160	72 -	165 0	116 76	72	4,0	[16]
14ХМДФР, стыковое	600	0 450	20 -	580 0	110 70	40	30,0	[17] [4]
Низкоуглеродистая, стыковое	300	0 230	56 -	244 15	108 69	59	10,0	[8]
09Г2С, с наплавками	317	0 150	60 -	257 107	120 95	85	10,0	[18]
Низкоуглеродистая с поперечными угловыми швами	240	0 175	68 -	172 0	80 60	68	-8,0	[19]
Ст.3, приварка поперечных ребер	260	0 220	40 -	220 0	80 40	38	2,0	[20] [4]
10ХСНД, приварка поперечных ребер	442	0 410	30 -	412 0	99 20	30	-10	[21] [4]
09Г2С, стыковое	339	0 270	64 -	276 0	136 75	64	11,0	[22] [4]
09Г2, стыковое	343	0 160	67 -	276 -	155 99	105	-6,0	[9]
Ст. 3сп, нахлесточное с фланговым швом с обваркой по контуру	230	0 195	27 -	203 0	54 35	28	7,0	[1] [4]

Примечание. Верхнее значение для образцов без остаточных напряжений, нижнее для образцов с установившимися остаточными напряжениями.

ввиду низкого предела выносливости небольшая разница в расчетном и экспериментальном значениях приводит к заметной погрешности. Кроме этого, анализ табличных данных показал, что для сталей высокой прочности (14ХМДФР) предлагаемая методика расчета приводит к существенной погрешности. Это, по всей видимости, связано с тем, что имея удлиненный характер диаграмм предельных амплитуд в сварных соединениях таких сталей при увеличении среднего напряжения вероятно развиваются с накоплением числа циклов такие процессы, которые не только могут повысить прочность металла, но и увеличивать при этом предельное значение амплитуды напряжений. В связи с этим диаграммы предельных напряжений или амплитуд могут иметь гиперболический характер [23]. Это еще раз свидетельствует о том, что часто используемые в литературе предположительные зависимости типа Смита или Хейя, описывающие поведение диаграмм исследуемых материалов, следует считать приближенными, не отражающими всей сложности и многофакторности природы усталости сварных соединений. Тем не менее, анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что при определенных затруднениях в проведении усталостных испытаний или отсутствии экспериментальных данных представленную методику можно использовать в качестве экспресс-метода расчетного определения усталостных характеристик сварных соединений ма-

лоуглеродистых и низколегированных сталей с разной величиной $\sigma_{ост}^y$.

Чтобы определить коэффициент асимметрии цикла, при котором остаточные напряжения полностью релаксируют, достаточно записать, что

$$\sigma_{RD} = \frac{2\sigma_a^p}{1 - R_\sigma} = \sigma_T \tag{10}$$

Подставив в (10) выражение (2), после некоторых преобразований можно установить, что пересечение диаграмм предельных амплитуд цикла сварных соединений без остаточных напряжений и с установившимся уровнем остаточных напряжений (рис. 1, линии 1 и 3) будет происходить при

$$R_\sigma = 1 - \frac{2(\sigma_{-1} - \psi_\sigma \cdot \sigma_{mT})}{\sigma_T} \tag{11}$$

Коэффициент асимметрии цикла, при котором происходит пересечение диаграмм предельных амплитуд цикла сварных соединений с установившимся значением остаточного напряжения с линией 3, нетрудно определить, зная что $\sigma_{aD} = \sigma_a^p$, а $\sigma_{RD} = \sigma_{aD} + \sigma_m' = \sigma_T - \sigma_{mT} + \sigma_m'$. Подставив в (10) выражение (7), можно записать, что

$$\sigma_T - \sigma_{mT} + \sigma_m' = \frac{2(\sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_{ост}^y - \psi_\sigma \sigma_m')}{1 - R_\sigma} \tag{12}$$

После некоторых преобразований получим, что

$$R_{\sigma} = 1 - \frac{2(\sigma_{-1} - \psi_{\sigma} \cdot \sigma_{mT})}{\sigma_T - \sigma_{ост}^y} \quad (13)$$

Таким образом, чем больше значение $\sigma_{ост}^y$, тем при меньшем значении R_{σ} происходит пересечение диаграмм предельных амплитуд цикла сварных соединений с линией 3. Следует отметить, что степень влияния ОН на сопротивление усталости сварных соединений зависит не только от их уровня, но и от параметров внешней нагрузки, а также механических характеристик используемых материалов. Приведенные расчетные соотношения позволяют оценивать не только влияние ОН на пределы выносливости, но и рассчитывать усталостную прочность сварных элементов металлоконструкций при искусственном регулировании в них остаточных напряжений.

В качестве примера расчета по предлагаемой методике на рис. 2 представлен ряд диаграмм предельных амплитуд цикла стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали Ст.3сп ($\sigma_T = 300$ МПа) и низколегированной 09Г2С ($\sigma_T = 340$ МПа) с разным уровнем установившихся остаточных напряжений. Видно, что диаграммы параллельны не только между собой, но и ДПАЦ сварных соединений без ОН. При этом их смещение друг относительно друга происходит на величину, равную $\Delta\sigma_a = \psi_{\sigma} \sigma_{ост}^y$. Заканчиваются все диаграммы в точках, расположенных на прямой б, параллельной среднему напряжению цикла. Это означает, что независимо от уровня установившихся остаточных напряжений, все диаграммы предельных амплитуд цикла имеют одинаковое значение минимальной предельной амплитуды $\sigma_a^{пл}$, равной 56 МПа для низкоуглеродистой и 64 МПа для низколегированной сталей при разном значении среднего напряжения цикла, и это не противоречит литературным данным [10]. В связи с этим можно отметить, что в действительности указанная прямая б является не диаграммой предельных амплитуд цикла сварных соединений с высокими ОН, как принято ее называть в настоящее время в литературе [4], а скорее всего диаграммой минимальных предельных амплитуд цикла (ДМПАЦ), где каждая точка на указанной прямой не что иное, как совокупность пределов выносливости сварного соединения со своим значением предельного установившегося остаточного напряжения, обеспечивающего реализацию предельного цикла напряжений. Что касается диаграмм предельных напряжений цикла, то такую прямую лучше назвать диаграммой минимальных предельных напряжений цикла со своим значением предельного $\sigma_{ост}^y$.

Чувствительность стыковых сварных соединений сталей разной прочности к величине $\sigma_{ост}^y$

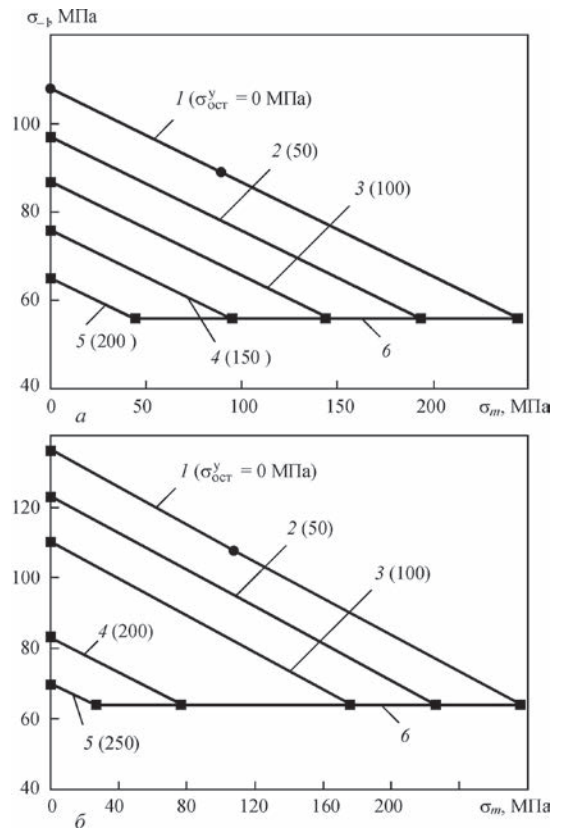


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд цикла стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали Ст. 3сп (а) и низколегированной стали 09Г2С (б): 1 — без остаточных напряжений; 2–5 — с заданным уровнем остаточных напряжений; 6 — диаграмма минимальных предельных амплитуд цикла (●, ■ — экспериментальные и расчетные значения пределов выносливости соответственно)

иллюстрирует рис. 3. Учитывая экспериментальные и расчетные данные, на рисунке в относительных координатах представлены зависимости изменения их пределов выносливости при симметричном цикле нагружения от величины установившихся остаточных напряжений. Из анализа рисунка следует, что при небольших значениях $\sigma_{ост}^y$

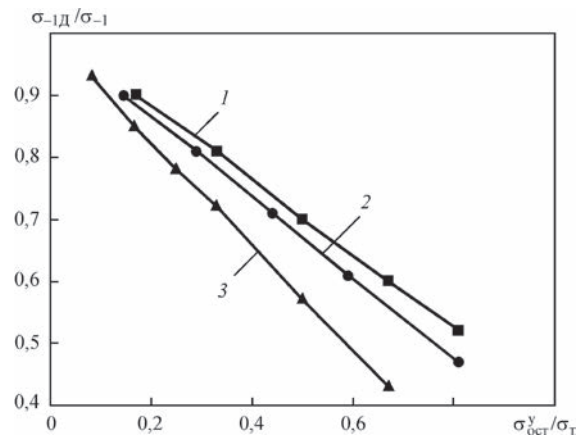


Рис. 3. Влияние установившихся остаточных напряжений на пределы выносливости стыковых сварных соединений: 1 — низкоуглеродистая сталь Ст. 3сп ($\sigma_T = 300$ МПа); 2 — низколегированная сталь 09Г2С ($\sigma_T = 340$ МПа); 3 — низколегированная высокопрочная сталь 14ХМДФР ($\sigma_T = 600$ МПа)

относительное снижение пределов выносливости сварных соединений $\sigma_{-1Д}$ происходит практически на одинаковую величину. Однако с повышением $\sigma_{ост}^y$ снижение предела выносливости сварных соединений стали с более высокими механическими характеристиками более значительно, вследствие чего кривые расходятся. Например, при значении $\sigma_{ост}^y$, равном $0,5\sigma_T$, снижение предела выносливости сварного соединения малоуглеродистой и высокопрочной стали происходит на 30 и 43 % соответственно. Если снижение предела выносливости сварного соединения стали 14ХМДФР в два раза достигается при величине $\sigma_{ост}^y$, равной $0,6\sigma_T$, то для сварного соединения стали Ст. 3сп почти при $0,85\sigma_T$. Можно отметить, что практическая ценность рисунка заключается в представленной возможности определиться в выборе стали при наличии в элементах металлоконструкций известной величины установившихся остаточных напряжений без проведения дополнительных трудоемких исследований крупногабаритных образцов.

Таким образом, представленную методику можно рассматривать в качестве экспресс-метода расчета характеристик сопротивления усталости сварных соединений, содержащих разный уровень установившихся остаточных напряжений, при отсутствии возможности проведения полномасштабных экспериментальных исследований.

Выводы

1. Предложен и экспериментально подтвержден метод определения диаграмм предельных амплитуд цикла сварных соединений низкоуглеродистой и низколегированной сталей невысокой прочности с установившимися остаточными напряжениями.
2. Установлена закономерность изменения пределов выносливости стыковых сварных соединений сталей разной прочности в зависимости от их механических характеристик и установившегося остаточного напряжения.

1. Дучинский Б. Н. Выносливость элементов сварных мостовых конструкций при переменных и знакопеременных напряжениях / Б. Н. Дучинский // Исследование прочности сварных мостовых конструкций, вып. 20. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – С. 86–163.
2. Окерблом Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях / Н. О. Окерблом. – М.–Л.: Машгиз, 1950. – 144 с.
3. Hobbacher A. Recommendations on fatigue of welded components / A. Hobbacher // IIV document X-1539-94-XV-845–94. – 112 p.
4. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений / В. И. Труфяков. – К: Наукова думка, 1973. – 216 с.
5. Байкова И. П. Влияние внешней растягивающей нагрузки на сварочные деформации и напряжения / И. П. Байкова // Сварочное производство. – 1969. – № 6. – С. 3–5.

6. Ряхин В. А. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин / В. А. Ряхин, Г. Н. Мошкарёв. – М.: Машиностроение, 1984. – 230 с.
7. Даусон Р. Вибрационное снятие напряжения и исследование его эффективности / Р. Даусон // Теоретические основы. – 1980. – 102, № 2. – С. 1–9.
8. Труфяков В. И. О влиянии остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений / В. И. Труфяков, Ю. Ф. Кудрявцев, П. П. Михеев // Автоматическая сварка. – 1988. – № 2. – С. 1–4.
9. Шульгинов Б. С. О предельных напряжениях цикла сварных соединений с высокими остаточными напряжениями / Б. С. Шульгинов, В. А. Дегтярев, В. В. Матвеев // Проблемы прочности. – 1984. – № 3. – С. – 58–61.
10. Труфяков В. И. Изменение сопротивления усталости сварных соединений под воздействием остаточных напряжений / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, Ю. Ф. Кудрявцев: труды III Всесоюзного симпозиума [Остаточные технологические напряжения], (Кутаиси, октябрь, 1988). – М.: Институт проблем механики АН СССР, 1988. – С. 358–364.
11. Серенсен С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
12. Дегтярев В. А. Оценка предельных напряжений цикла сварных конструкций с высокими остаточными напряжениями по результатам испытаний малогабаритных образцов без остаточных напряжений / В. А. Дегтярев, Б. С. Шульгинов // Проблемы прочности. – 2008. – № 2. – С. 66–81.
13. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия / В. Т. Трошенко, Г. В. Цыбанев, Б. А. Грязнов [и др.]. – К.: Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. – 2009. – 664 с. – (Прочность материалов и конструкций; т. 2).
14. Дегтярев В. А. Применение комплексной диаграммы предельных напряжений цикла для целей виброобработки / В. А. Дегтярев, В. И. Власенко // Тяжелое машиностроение. – 1992. – № 8. – С. 27–30.
15. Навроцкий Д. И. Прочность сварных соединений / Д. И. Навроцкий. – М.: Машгиз, 1961. – 177 с.
16. Труфяков В. И. О роли остаточных напряжений в понижении выносливости сварных соединений / В. И. Труфяков // Автоматическая сварка. – 1956. – № 5. – С. 90–103.
17. Мюнзе В. Х. Усталостная прочность сварных стальных конструкций / В. Х. Мюнзе. – М.: Машиностроение, 1968. – 311 с.
18. Труфяков В. И. Изменение остаточных напряжений в зонах концентрации напряжений при циклическом нагружении сварных соединений / В. И. Труфяков, О. И. Гуша, В. П. Трошенко // Проблемы прочности. – 1976. – № 12. – С. 14–17.
19. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций: РД 50-694-90. – [действительный от 01.07.91]. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 84 с.
20. Кудрявцев И. В. Усталость сварных конструкций / И. В. Кудрявцев, Н. Е. Наумченков. – М.: Машгиз, 1976. – 271 с.
21. Попова М. М. Сопротивление усталости сварных соединений стали 14Х2ГМР / М. М. Попова // Металлические конструкции кранов и исследование конвейеров. Тр. ЛПИ. – 1978. – № 362. – С. 70–74.
22. Ерегин Л. П. Статическая и усталостная прочность сварных стыковых соединений стали 09Г2С, выполненных по грунту и прокатной окалине / Л. П. Ерегин, Н. Е. Наумченков // Сварочное производство. – 1971. – № 11. – С. 36–39.
23. Одинг И. Л. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И. Л. Одинг. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.

Поступила в редакцию 10.05.2016