

Влияние динамической нагрузки на предельные напряжения и вторые критические температуры хрупкости стыковых сварных соединений

В. А. Дегтярев

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

Анализируются результаты экспериментальных исследований стыковых сварных соединений с трещиной сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ при различном соотношении статических и динамических напряжений в широком диапазоне изменения климатических температур. Испытания проводились на установке, разработанной на базе копра ударного действия. Раскрытие берегов трещины измерялось посредством изготовленного в виде скобы датчика смещения. Наблюдение за трещиной осуществлялось посредством телевизионной установки и микроскопа. При проведении низкотемпературных испытаний использовалась система охлаждения и автоматического поддержания температуры образца в диапазоне 20...–100°С. Экспериментальные исследования позволили определить диаграммы предельных напряжений, анализ которых показал, что между статической и разрушающей динамической нагрузками отмечается в основном линейная зависимость. Показано, что при заданной температуре динамическая составляющая предельного напряжения уменьшается с увеличением статического напряжения. Установлено, что сварное соединение стали 09Г2 более чувствительно к динамической нагрузке во всем диапазоне исследованных температур. Показано, что при определении предельных напряжений и второй критической температуры хрупкости необходимо учитывать как статические, так и динамические напряжения. Предельное напряжение и вторая критическая температура хрупкости при комбинированном нагружении исследуемых сварных соединений зависят от соотношения статических и динамических напряжений. Неучет динамических напряжений приводит к заниженным значениям предельного напряжения и завышенным значениям второй критической температуры хрупкости. При увеличении коэффициентов динамической перегрузки и динамичности предельное напряжение уменьшается, а вторая критическая температура хрупкости повышается. Установлено, что вторые критические температуры хрупкости сварных соединений стали с более высокими механическими свойствами значительно ниже.

Ключевые слова: сварное соединение, критическая температура хрупкости, диаграмма предельных напряжений, предел текучести.

Введение. Опыт эксплуатации горнодобывающей и транспортной техники показывает, что в зимний период резко возрастает количество хрупких разрушений [1–3]. Переход квазихрупкого разрушения в хрупкое происходит при второй критической температуре хрупкости T_{k2} . Для конструкций, испытывающих статическое или только динамическое воздействие, ее определяют соответственно при статической или динамической нагрузке образцов [4]. Однако на практике большинство элементов конструкций эксплуатируется в условиях совместного действия этих нагрузок. Если T_{k2} материалов, испытывающих в процессе эксплуатации одновременное влияние статических и динамических нагрузок, определять при статическом нагружении, полученные значения будут занижены, если при динамическом – завышены. Только комбинированное нагружение с учетом реального соотношения статической и динамической нагрузок дает возможность использовать сварные соединения с максимальной эффективностью. Известна работа [5], где исследовалось изменение статических разрушающих напряжений и критической температуры хрупкости образцов с трещиной из малоуглеродистой и низколегированной сталей при действии ударного импульса, величина которого не определялась. Однако автором не найдены работы, в которых исследуются зависимости разрушающих напряжений и критических темпе-

ратур хрупкости сварных соединений от различного соотношения статической и динамической нагрузки.

Поэтому цель работы заключается в исследовании влияния соотношения статической и динамической нагрузки на предельные напряжения и вторую критическую температуру хрупкости сварных соединений, содержащих дефекты типа трещин усталости.

Оборудование, материалы и методика испытаний. В качестве материала для исследований использовались стыковые сварные соединения низколегированных сталей 09Г2 ($\sigma_B = 518$ МПа, $\sigma_T = 339$ МПа) и 12ГН2МФАЮ ($\sigma_B = 710$ МПа, $\sigma_T = 620$ МПа). Образцы размером $400 \times 48 \times 24$ мм вырезались из листа толщиной 24 мм в состоянии поставки со стыковым сварным швом в направлении, перпендикулярном направлению проката. Выбор толщины образца обусловлен необходимостью определения исследуемых характеристик для конструкций, изготовленных из проката указанной толщины. Иницирующий в образце надрез выполнялся так, чтобы выращенная впоследствии трещина усталости находилась в плоскости, проходящей через линию сплавления металла шва с основным металлом. Исходные трещины усталости выращивались из надреза до середины высоты образца в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506-85 [6] при отнулевом цикле гармонического нагружения. Для наблюдения за трещиной усиление шва фрезеровалось, а место предполагаемого ее роста полировалось. Схема нагружения образца с трещиной в разработанной для этих исследований установке на базе копра повторного ударного действия ДСО-1 [7] приведена на рис. 1. Образец 4, установленный на двух неподвижных опорах 3 и 5, статически нагружался грузами 7 через рычаг 8 и тягу 9 с опорой 10. Консольное нагружение по сравнению с трехточечным позволяет испытывать образцы значительно больших размеров поперечного сечения. Динамическое нагружение проводилось свободно падающим грузом 1 массой 10 кг, установленном в направляющих шарикоподшипниках 2. При испытаниях образца в условиях только динамического нагружения опора 10 закреплялась неподвижно. Высота подъема падающего груза могла регулироваться.

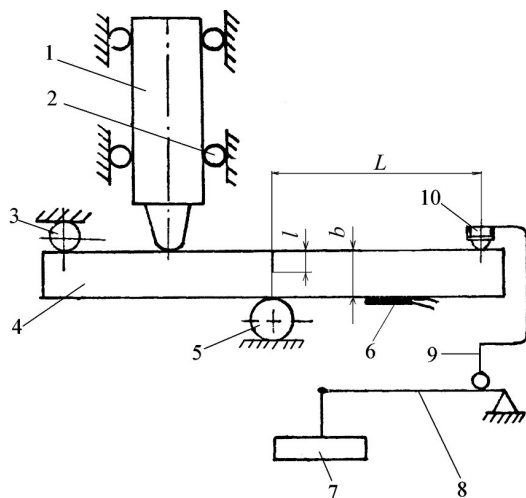


Рис. 1. Схема нагружения сварного образца.

Таким образом, испытания сварных образцов с предварительно выращенными трещинами усталости проводили при статическом, динамическом и комбинированном нагружении в широком диапазоне климатических температур. Комбинированное нагружение осуществлялось путем изгиба образца при постоянной статической нагрузке

ке до заданного номинального напряжения σ^s с последующим приложением динамической нагрузки. Последнюю повышали на заданную ступень, увеличивая высоту падения груза и тем самым динамическое напряжение σ^d без изменения σ^s . По их измерениям и соответствующим значениям смещения берегов надреза V , измеряемого датчиком, изготовленным в виде скобы, строились диаграммы деформирования в координатах $P-V$, на которых отмечалась предельная нагрузка P_c , соответствующая или моменту появления в затупившейся вершине трещины на боковой поверхности образца надрыва, что свидетельствует о начале движения трещины по всей его толщине, или хрупкому разрушению образца. Использование стандартного двухконсольного датчика при динамическом нагружении не представлялось возможным, так как возникшая сила инерции вызывала дополнительный прогиб его упругих элементов, что приводило к существенной ошибке в измерении величины V . Такой датчик применялся при статическом нагружении образцов.

При наблюдении за ростом трещины и формированием пластической зоны в ее вершине использовалась промышленная телевизионная установка ПТУ-61. Для повышения точности измерений телевизионная камера через специальный переходник подсоединялась к микроскопу МБС-1, что позволило наблюдаемый объект увеличить в 109 раз. При проведении низкотемпературных испытаний использовалась система охлаждения и автоматического поддержания температуры образца в диапазоне 20...–100°C [3]. С целью уменьшения тепловых потерь образец помещался в специально изготовленную камеру.

Реакция опоры 10 на действие динамической нагрузки R^d определялась тензорезистором b , наклеенным на нижнюю плоскость образца, а реакция этой опоры на действие статической нагрузки R^s – по весу калиброванных грузов 7 (рис. 1) и известной величине передаточного отношения плеч рычага 2-го рода, равной 1:50.

Критическое напряжение при комбинированном нагружении в нетто-сечении образца определялось как

$$\sigma_{cr} = \sigma^s + \sigma^d = \frac{6(R^s + R^d)L}{t(b-l)^2}, \quad (1)$$

где l – длина усталостной трещины, определяемая после излома образца как среднее арифметическое по трем точкам на контуре трещины [6]; t – ширина образца. Остальные обозначения приведены на рис. 1.

Предельное напряжение при статическом нагружении обозначим σ_0^s , при динамическом – σ_0^d .

Результаты исследований и их анализ. Согласно экспериментальным данным (таблица) на рис. 2 в относительных координатах представлены диаграммы предельных напряжений (ДПН) стыковых сварных соединений сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ, определенные при разных температурах. При каждой температуре испытывали несколько образцов, задавая разные σ^s и определяя соответственно предельные разрушающие σ^d и критические σ_{cr} напряжения. При этих же температурах находили предельные напряжения только при статическом σ_0^s и динамическом σ_0^d нагружении. Для соединений сталей 09Г2 при температуре 20°C и 12ГН2МФАЮ при нулевой значении σ_0^d оказались выше σ_0^s , поэтому на оси ординат экспериментальные точки не приведены. Поскольку при определении отношений σ^d/σ_0^s и σ^s/σ_0^s использовались полученные напряжения при заданной температуре, относительное значение критического напряжения при статическом и динамическом нагружении равно единице.

**Предельные напряжения в стыковых сварных соединениях сталей 09Г2 (над чертой)
и 12ГН2МФАЮ (под чертой) при различной температуре**

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma^s, \text{МПа}$	$\sigma^d, \text{МПа}$	$\sigma_{cr}, \text{МПа}$
<u>20</u>	<u>799</u>	<u>0</u>	<u>799</u>
<u>0</u>	<u>1056</u>	<u>0</u>	<u>1056</u>
	<u>0</u>	<u>848</u>	<u>848</u>
	<u>1045</u>	<u>0</u>	<u>1045</u>
	<u>363</u>	<u>475</u>	<u>838</u>
	<u>525</u>	<u>671</u>	<u>1196</u>
	<u>—</u>	<u>—</u>	<u>—</u>
	<u>0</u>	<u>1264</u>	<u>1264</u>
<u>-20</u>	<u>749</u>	<u>0</u>	<u>749</u>
<u>-40</u>	<u>1160</u>	<u>0</u>	<u>1160</u>
	<u>525</u>	<u>75</u>	<u>600</u>
	<u>517</u>	<u>618</u>	<u>1135</u>
	<u>0</u>	<u>459</u>	<u>459</u>
	<u>0</u>	<u>1144</u>	<u>1144</u>
	<u>369</u>	<u>224</u>	<u>593</u>
	<u>—</u>	<u>—</u>	<u>—</u>
<u>-60</u>	<u>752</u>	<u>0</u>	<u>752</u>
<u>-80</u>	<u>942</u>	<u>0</u>	<u>942</u>
	<u>350</u>	<u>110</u>	<u>460</u>
	<u>453</u>	<u>281</u>	<u>734</u>
	<u>463</u>	<u>47</u>	<u>510</u>
	<u>0</u>	<u>658</u>	<u>658</u>
	<u>0</u>	<u>295</u>	<u>295</u>
	<u>—</u>	<u>—</u>	<u>—</u>

Анализ приведенных на рис. 2 данных показывает, что между статической σ^s и разрушающей динамической σ^d составляющими критического напряжения σ_{cr} наблюдается в основном линейная зависимость, за исключением результатов испытаний сварных соединений стали 09Г2 при -60°C . С увеличением статических напряжений предельные динамические напряжения уменьшаются, а критические увеличиваются. Для сварных соединений сталей 09Г2 только в условиях комнатной температуры и 12ГН2МФАЮ при нулевой отмечается некоторое понижение σ_{cr} . Если под статическими напряжениями понимать остаточные напряжения, то по полученным для сварных соединений каждой стали диаграммам можно оценить допустимый уровень динамических нагрузок.

Точки пересечения ДПН с осями ординат и абсцисс соответствуют относительным значениям σ_0^d и σ_0^s соответственно. В этом случае тангенс угла наклона ДПН к оси абсцисс при заданной температуре определяется как

$$\operatorname{tg} \beta = \xi = \frac{\sigma_0^d}{\sigma_0^s} = \frac{\sigma^d}{\sigma_0^s - \sigma^s}, \quad (2)$$

критическое напряжение при комбинированном нагружении –

$$\sigma_{cr} = \sigma_0^d + (1 - \xi)\sigma^s, \quad (3)$$

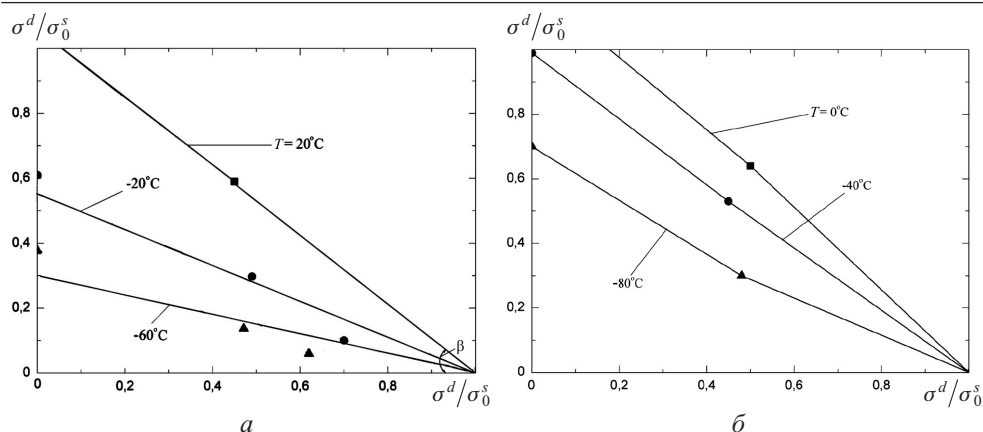


Рис. 2. Диаграммы предельных напряжений сварных соединений сталей 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б) при комбинированном нагружении в условиях разных климатических температур.

где ξ – коэффициент пропорциональности между напряжениями, вызванными статической и динамической нагрузками при комбинированном нагружении сварных соединений.

Анализ данных на рис. 2 показывает, что угол наклона ДПН значительно зависит от температуры. С ее понижением относительное значение σ^d/σ_0^s заметно уменьшается, однако критическое напряжение при этом изменяется несущественно. Зависимость ξ от T для исследуемых сварных соединений представлена на рис. 3. Видно, что с понижением температуры испытаний коэффициент ξ уменьшается. Так, для стыкового соединения стали 09Г2 он намного ниже во всем исследованном диапазоне температур, что свидетельствует о более высокой трещиностойкости сварного соединения стали 12ГН2МФАЮ, что подтверждается в процессе эксплуатации этих сталей.

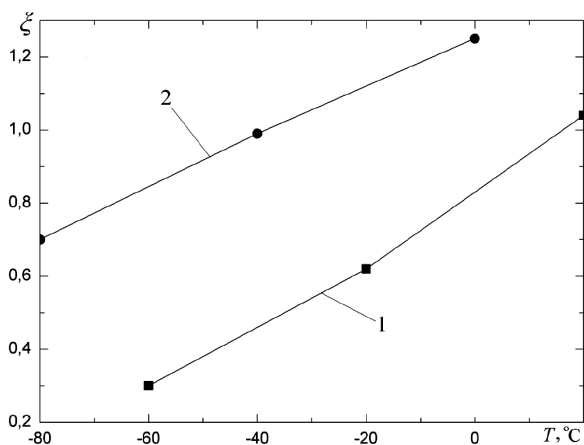


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропорциональности сварных соединений сталей 09Г2 (1) и 12ГН2МФАЮ (2) от температуры.

Чувствительность сварных соединений к динамической нагрузке при заданной температуре можно оценить по относительному снижению статического напряжения $\Delta\sigma = 1 - \sigma^s/\sigma_0^s$ при заданном значении σ^d/σ_0^s (рис. 4).

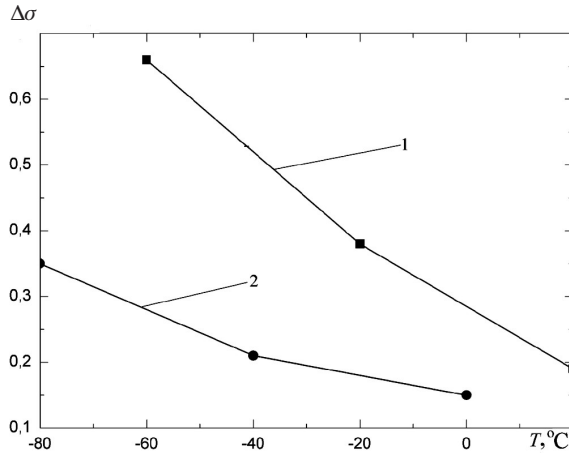


Рис. 4. Зависимость чувствительности сварных соединений сталей 09Г2 (1) и 12ГН2МФАЮ (2) от температуры при заданном значении $\sigma^d/\sigma_0^s = 0,2$.

Видно, что при $\sigma^d/\sigma_0^s = 0,2$ (рис. 2) сварное соединение стали 09Г2 более чувствительно к динамической нагрузке во всем диапазоне исследованных температур. При этом с понижением температуры эта разница возрастает и при -60°C увеличивается больше чем в два раза.

Если динамические нагрузки являются случайными и не учитываются в прочностных расчетах, по аналогии с методом оценки несущей способности образца [5] в качестве предельного напряжения при комбинированном нагружении используется статическая составляющая σ^s критического напряжения σ_{cr} . При этом отношение динамического σ^d напряжения к статическому σ^s при комбинированном нагружении, численно характеризующее степень динамической перегрузки, обозначим $K_{\Pi} = \sigma^d/\sigma^s$, где K_{Π} – коэффициент динамической перегрузки. Тогда предельные статическое и динамическое напряжения при заданных температуре и коэффициенте динамической перегрузки с учетом зависимости (2) определим соответственно как

$$\sigma^s = \frac{\xi}{K_{\Pi} + \xi} \sigma_0^s, \tag{4}$$

$$\sigma^d = \frac{\xi K_{\Pi}}{K_{\Pi} + \xi} \sigma_0^s. \tag{5}$$

Полученные уравнения и представленные на рис. 3 зависимости позволяют при отсутствии экспериментальных исследований определить ДПН рассматриваемых сварных соединений при любой температуре из диапазона исследованных. Для этого достаточно задаться значением K_{Π} и определить σ_0^s при статическом нагружении.

Температурные зависимости предельного статического напряжения σ^s для сварных соединений сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ при разных значениях коэффициента K_{Π} приведены на рис. 5. Кривые $K_{\Pi} = 0$ описывают зависимость предельного напряжения σ_0^s от температуры T при статическом нагружении. Все остальные кривые построены по результатам исследования при комбинированном нагружении. При $K_{\Pi} = 1$ напряжения, вызванные статической и динамической нагрузками, будут оди-

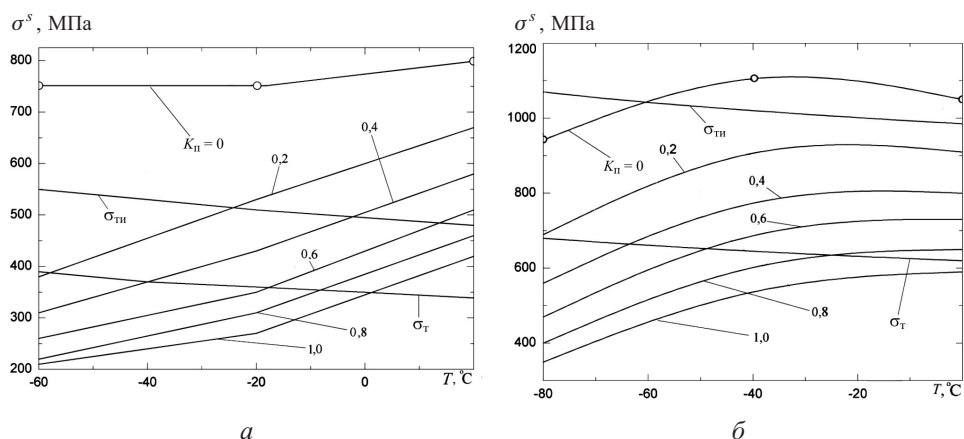


Рис. 5. Влияние температуры и коэффициента динамической перегрузки на предельные статические напряжения в сварных соединениях сталей 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б).

наковыми. На рис. 5 также показаны температурные зависимости предела текучести исследуемых материалов при растяжении σ_T и изгибе σ_{TII} . Значение σ_{TII} определялось при трехточечном изгибе гладких (без трещины) образцов, высота которых равна высоте нетто-сечения образца с трещиной (рис. 1). Это значит, что градиент номинальных напряжений гладких образцов и образцов с трещиной был одинаковым. Для сварных соединений сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ при комнатной температуре он составляет 480 и 970 МПа соответственно. Температурные зависимости σ_T и σ_{TII} устанавливались путем расчета [4]. Точки пересечения кривых $\sigma^s = f(T)$ при заданном коэффициенте K_{II} , а также $\sigma_T = f(T)$ или $\sigma_{TII} = f(T)$ и определяют значения T_{k2} .

Из данных, приведенных на рис. 5, видно, что напряжения от динамической нагрузки существенно влияют как на σ^s , так и на T_{k2} . С повышением K_{II} предельные напряжения в исследуемых сварных соединениях уменьшаются, а T_{k2} увеличивается. Из этого следует, что в прочностных расчетах при испытании образцов в случае комбинированного нагружения необходимо измерять и учитывать не только статические, но и динамические напряжения. В этом случае T_{k2} более обосновано необходимо определять по пересечению температурных зависимостей максимальных критических напряжений σ_{cr} и предела текучести рассматриваемого материала. В качестве характеристики режима нагружения использовался коэффициент динамичности $K_d = \sigma^d / \sigma_{cr}$, который с коэффициентом динамической перегрузки K_{II} связан соотношением $K_d = K_{II} / (1 + K_{II})$.

На рис. 6 с использованием экспериментальных данных (таблица) приведены температурные зависимости для сварных соединений сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ при некоторых значениях K_d . Кривая $\sigma_{cr} = f(T)$ при $K_d = 0$ описывает температурную зависимость критического напряжения, равного предельному напряжению, в условиях только статического нагружения σ_0^s , а $K_d = 1$ только динамического σ_0^d . При известных величинах σ_0^s , ξ и K_d определить критическое напряжение σ_{cr} для заданной температуры можно по формуле

$$\sigma_{cr} = \frac{\xi}{K_d + \xi(1 - K_d)} \sigma_0^s. \quad (6)$$

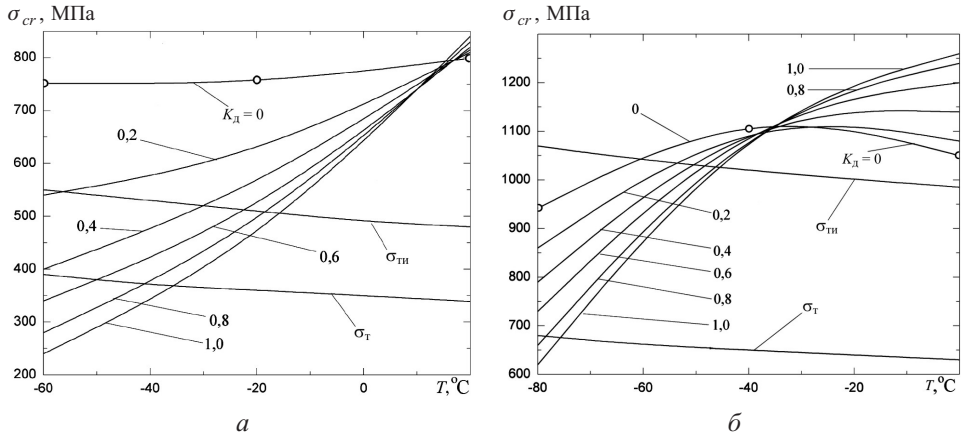


Рис. 6. Влияние температуры и коэффициента динамичности на критические напряжения в сварных соединениях сталей 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б).

Из приведенных на рис. 6 зависимостей видно, что с повышением K_d критические напряжения в исследуемых сварных соединениях уменьшаются, а T_{k2} повышается, т.е. характер изменения максимальных напряжений и критической температуры хрупкости аналогичен таковым, приведенным на рис. 5, за исключением их абсолютных значений.

Влияние коэффициентов динамической перегрузки и динамичности на T_{k2} сварных соединений сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ приведено на рис. 7. Для построения кривых 1, 3 использовали точки пересечения температурных зависимостей σ^S и σ_T (рис. 5), кривых 2, 4 – температурных зависимостей σ_{cr} и σ_T (рис. 6). Сравнение полученных результатов показывает, что при оценке нагруженности сварного соединения по коэффициенту динамичности величина T_{k2} значительно ниже таковой, определенной по коэффициенту динамической перегрузки. Причем с ростом коэффициентов разность между значениями T_{k2} , определенными по σ^S и σ_{cr} , увеличивается. Можно утверждать, что оценка T_{k2} по максимальным напряжениям при комбинированном нагружении (на рис. 7 кривые 2, 4) более достоверная, чем при учете только статических напряжений. Кроме того, при одинаковых значениях K_{II} или K_d вторая критическая температура хрупкости сварных соединений стали 12ГН2МФАЮ значительно ниже, чем стали 09Г2. Например, при $K_{II} = 0,4$ расхождение между критическими температурами исследуемых сварных соединений составляет 23°С, при $K_d = 0,8$ – 39°С.

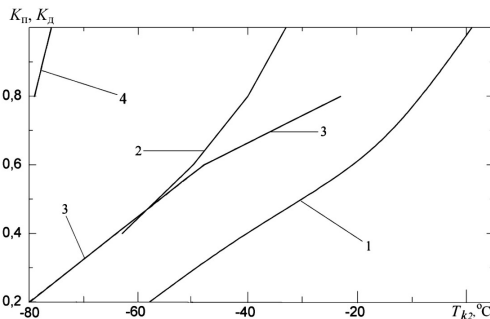


Рис. 7. Влияние коэффициентов динамической перегрузки K_{II} (1, 3) и динамичности K_d (2, 4) в условиях комбинированного нагружения на T_{k2} сварных соединений сталей 09Г2 (1, 2) и 12ГН2МФАЮ (3, 4).

Таким образом, исследования сварных соединений сталей разной прочности с дефектами в виде трещины усталости с учетом реальных условий эксплуатации (температура, характер действующих нагрузок) и анализ полученных данных позволяют более обосновано определять запас прочности элементов металлоконструкций, изготовленных из исследуемых материалов.

Выводы

1. Установлено, что предельное напряжение и вторая критическая температура хрупкости при комбинированном нагружении исследуемых сварных соединений зависят от соотношения статических и динамических напряжений. При увеличении коэффициентов динамической перегрузки и динамичности предельное напряжение уменьшается, а вторая критическая температура хрупкости повышается.

2. При определении предельных напряжений и второй критической температуры хрупкости необходимо учитывать как статические, так и динамические напряжения. Неучет динамических напряжений приводит к заниженным значениям предельного напряжения и завышенным значениям вторых критических температур хрупкости.

3. Показано, что вторая критическая температура хрупкости и чувствительность к динамической нагрузке сварных соединений стали с более высокими механическими свойствами значительно ниже.

Резюме

Аналізуються результати експериментальних досліджень стикових зварних з'єднань із тріщиною зі сталей 09Г2 та 12ГН2МФАЮ при різному співвідношенні статичних та динамічних напружень у широкому діапазоні зміни кліматичних температур. Дослідження проводились на установці, розробленій на базі копра ударної дії. Розкриття берегів тріщини вимірювалось за допомогою виготовленого у вигляді скоби датчика зсуву. Спостереження за тріщиною здійснювалось за допомогою телевізійної установки та мікроскопа. При проведенні низькотемпературних випробувань запроваджувалась система охолодження та автоматичної підтримки температури зразка в діапазоні 20...–100°C. Експериментальні дослідження дозволили визначити діаграми граничних напружень, аналіз яких показав, що між статичним та руйнівним динамічним навантаженням спостерігається в основному лінійна залежність. Показано, що при заданій температурі динамічна складова граничного напруження зменшується зі зростанням статичного напруження. Установлено, що зварне з'єднання сталі 09Г2 більш чутливе до динамічного навантаження у всьому діапазоні досліджуваних температур. Показано, що при визначенні граничних напружень та другої критичної температури крихкості необхідно враховувати як статичні, так і динамічні напруження. Граничне напруження і друга критична температура крихкості при комбінованому навантаженні досліджуваних зварних з'єднань залежать від співвідношення статичних та динамічних напружень. Неврахування динамічних напружень призводить до заниженого граничного напруження та підвищених значень другої критичної температури крихкості. При збільшенні коефіцієнтів динамічного перевантаження та динамічності граничне напруження зменшується, а друга критична температура крихкості збільшується. Установлено, що другі критичні температури крихкості зварних з'єднань сталі з більш високими механічними властивостями значно нижчі.

1. Григорьев Р. С., Ларионов В. П., Уржумцев Ю. С. Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении. Новосибирск: Наука, 1987. 252 с.
2. Телушкин В. Д., Винокуров В. А., Ряхин В. А. и др. Строительные и дорожные машины для районов с холодным климатом. М.: Машиностроение, 1978. 197 с.

3. Слепцов О. И., Шульгинов Б. С., Михайлов В. Е. и др. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях севера. Новосибирск: Наука, 2012. 182 с.
4. Махутов Н. А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. М.: Машиностроение, 1973. 200 с.
5. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. Киев: Наук. думка, 1973. 215 с.
6. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Введ. 01.01.86.
7. Дегтярев В. А. Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном и гармоническом нагружении с различной асимметрией цикла. *Пробл. прочности*. 1982. № 10. С. 110–113.

Поступила 18. 05. 2017