

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

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

Анализируются результаты экспериментальных исследований влияния соотношения статических и динамических напряжений на предельные напряжения и вторую критическую температуру хрупкости стыковых сварных соединений с трещиной сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ в условиях комнатной и низких (до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур. Установлено, что при заданной температуре динамическая составляющая критического напряжения линейно уменьшается с увеличением статического напряжения. Показано, что с увеличением коэффициента динамичности происходит уменьшение предельных напряжений и повышение второй критической температуры хрупкости. При этом критические температуры хрупкости сварных соединений стали с более высокими механическими свойствами значительно ниже. Установлено, что учет динамических напряжений приводит к заниженным значениям предельного напряжения и завышенным значениям второй критической температуры хрупкости. Изложенный анализ исследований позволяет более обоснованно подойти к оценке сопротивления элементов конструкций, изготовленных из исследуемых материалов, хрупкому разрушению и определению их запасов прочности. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 7.

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

Повышение надежности и уменьшение числа разрушений элементов металлоконструкций в зимний период их эксплуатации является весьма актуальной задачей [1–3]. Переход квазихрупкого разрушения в хрупкое характеризуется второй критической температурой хрупкости $T_{к2}$. Для конструкций, испытывающих статическое или только динамическое воздействие, ее определяют соответственно при статическом или динамическом нагружении образцов [4]. Однако на практике подавляющее большинство элементов конструкций эксплуатируется в условиях совместного действия статических и динамических нагрузок. Поэтому, если $T_{к2}$ определять при статическом нагружении, можно получить заниженные значения, если при динамическом — завышенные. Только комбинированное нагружение с учетом реального соотношения статического и динамического напряжений дает возможность использовать сварные соединения с максимальной эффективностью. Известна работа [5], где исследовалось изменение статических напряжений и критической температуры хрупкости образцов с трещиной из малоуглеродистой и низколегированной сталей при комбинированном нагружении. Образец статически растягивался ступенчато увеличивающейся нагрузкой с последующим воздействием поперечного ударного импульса, величина которого не определялась.

Отмечалось существенное снижение статических номинальных разрушающих напряжений и повышение критических температур хрупкости. Однако в литературе не найдено работ, где исследуются зависимости разрушающих напряжений и критических температур хрупкости сварных соединений от различного соотношения статической и динамической нагрузок. Известно, что сопротивление элементов металлоконструкций хрупкому разрушению зависит от ряда факторов, в частности, от температуры, скорости деформирования, а также от размеров поперечного сечения и содержащихся в них дефектов.

В связи с этим, в настоящей работе исследовались конструкционная прочность и вторые критические температуры хрупкости сварных соединений, содержащих дефекты типа трещин усталости, в зависимости от температуры и характера действующих сил.

Оборудование, материалы и методика испытаний. В качестве материала для исследований использовались стыковые сварные соединения низколегированных сталей 09Г2 ($\sigma_{\text{в}} = 518\text{ МПа}$, $\sigma_{\text{т}} = 339\text{ МПа}$) и 12ГН2МФАЮ ($\sigma_{\text{в}} = 710\text{ МПа}$, $\sigma_{\text{т}} = 620\text{ МПа}$). Образцы размером $400 \times 48 \times 24\text{ мм}$ вырезались из пластины толщиной 24 мм в состоянии поставки со стыковым сварным швом, имеющим направление, перпендикулярное направлению проката. Выбор толщины обусловлен

Предельные напряжения в стыковых сварных соединениях сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ при различных температурах (20...–80) °С

Температура, °С	σ^c , МПа	σ^d , МПа	σ_k , МПа
(20) 0	(799) 1056	(0) 0	(799) 1056
	(0) 1045	(848) 0	(848) 1045
	(363) 525	(475) 671	(838) 1196
	0	1264	1264
(–20) –40	(749) 1160	(0) 0	(749) 1160
	(525) 517	(75) 618	(600) 1135
	(0) 0	(459) 1144	(459) 1144
	(369) 0	(224) 0	(593) 0
(–60) –80	(752) 942	(0) 0	(752) 942
	(350) 453	(110) 281	(460) 734
	(463) 0	(47) 658	(510) 658
	(0) 0	(295) 0	(295) 0

Примечание. В скобках указаны данные, относящиеся к сварным соединениям стали 09Г2.

Анализ результатов исследований. Согласно экспериментальным данным (таблица), на рис. 2 в относительных координатах представлены диаграммы предельных напряжений (ДПН) стыковых сварных соединений сталей 09Г2 (а), определенные при температурах 20, –20, –60 °С и 12ГН2МФАЮ (б) — при 0, –40 и –80 °С, соответственно. При каждой температуре испытывали несколько образцов, задавая разные σ^c , и определяли соответственно предельные разрушающие σ^d и критические напряжения σ_k . При этих же температурах находили предельные напряжения только при статическом σ_0^c и динамическом σ_0^d нагружении. Учитывая опыт проведенных ранее полномасштабных исследований образцов из стали 09Г2, свидетельствующих о линейной зависимости между σ^d и σ^c при разных температурах, в настоящей работе потребовалось меньшее количество образцов сварных соединений этих сталей, подтверждающих наличие указанной зависимости. При температуре 20 °С для соединений из стали 09Г2 и при 0 °С — стали 12ГН2МФАЮ σ_0^d оказалось выше σ_0^c , поэтому на оси ординат экспериментальные точки не приведены. При определении отношений σ^d/σ_0^c и σ^c/σ_0^c использовали полученные напряжения при заданной температуре. Поэтому для любой температуры относительное значение критического напряжения при статическом нагружении равно единице. Анализ приведенных на рисунке результатов показал, что между статической σ^c и разрушающей динамической σ^d составляющими критического напряжения σ_k наблюдается, в основном, линейная зависимость за исключением результатов испытаний сварных соединений стали 09Г2 при –60 °С. С увеличением статических напряжений предельные динамические напряжения уменьшаются, а критические увеличиваются. Только в условиях комнатной температуры для сварных соединений стали 09Г2 и 0 °С стали 12ГН2МФАЮ наблюда-

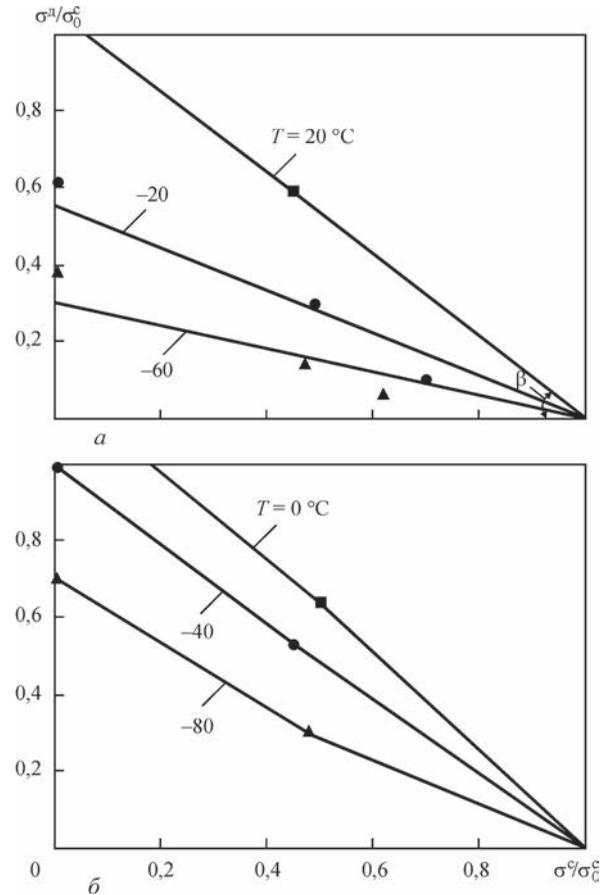


Рис. 2. Диаграммы предельных напряжений сварных соединений сталей 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б) в условиях комбинированного нагружения при комнатной и низких температурах

ется некоторое понижение σ_k . Можно отметить, если под статическими напряжениями понимать остаточные напряжения, то по полученным диаграммам предельных напряжений можно оценить допустимый уровень динамических нагрузок. Кроме этого, при отсутствии копров с большой энергией удара представляется возможность определить разрушающее напряжение при динамическом нагружении по результатам испытаний в условиях статического и комбинированного нагружений.

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

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

а критическое напряжение при комбинированном нагружении

$$\sigma_k = \sigma_0^d + (1 - \xi)\sigma^c, \quad (3)$$

где ξ — коэффициент пропорциональности, зависящий от соотношения напряжений, вызванных

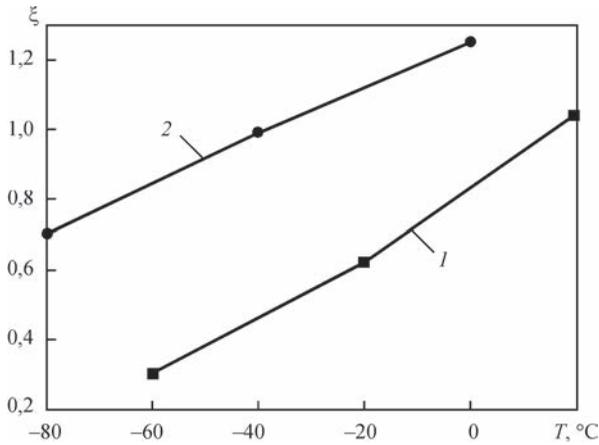


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропорциональности сварных соединений сталей 09Г2 (1) и 12ГН2МФАЮ (2) от температуры

статической и динамической нагрузки при комбинированном нагружении сварных соединений.

Анализ рисунка показал, что угол наклона ДПН в значительной мере зависит от температуры. Относительное значение $\sigma^л / \sigma_0^c$ с понижением температуры заметно уменьшается, но критическое напряжение изменяется при этом незначительно. Зависимость ξ от температуры для ис-

следуемых сварных соединений представлены на рис. 3. Видно, что с понижением температуры испытаний он уменьшается. Причем, значение коэффициента пропорциональности для стыкового соединения стали 09Г2 (кривая 1) существенно ниже, что свидетельствует о более высокой трещиностойкости сварного соединения стали 12ГН2МФАЮ, что подтверждается эксплуатационной практикой применения этих сталей.

В тех случаях, когда динамические нагрузки являются случайными и не учитываются в прочностных расчетах по аналогии с методом оценки несущей способности образца, принятым в работе [5], в качестве предельного напряжения при комбинированном нагружении используем статическую составляющую σ^c критического напряжения σ_k . В этом случае соотношение динамического и статического напряжений при комбинированном нагружении, численно характеризующее степень динамической перегрузки, обозначим коэффициентом динамической перегрузки $K_n = \sigma^л / \sigma^c$. Тогда предельное статическое и разрушающее динамическое напряжения при заданных температуре и коэффициенте динамической перегрузки с учетом зависимости (2) можно найти соответственно как

$$\sigma^c = \frac{\xi}{K_n + \xi} \sigma_0^c \quad (4)$$

или

$$\sigma^л = \frac{\xi K_n}{K_n + \xi} \sigma_0^c \quad (5)$$

Полученные уравнения и представленные на рис. 3 зависимости позволяют, при отсутствии прямых экспериментальных исследований, определить ДПН исследуемых сварных соединений при любой температуре из диапазона исследованных. Для этого достаточно задаться значением K_n и определить σ_0^c при статическом нагружении.

Температурные зависимости предельного статического напряжения σ^c для сварных соединений стали 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б) при некоторых значениях коэффициента динамической перегрузки приведены на рис. 4. Кривая $K_n = 0$ характеризует зависимость предельного напряжения σ_0^c от температуры при статическом нагружении. Все остальные кривые характеризуют результаты исследований при комбинированном нагружении. При $K_n = 1$ напряжения, вызванные статической и динамической нагрузками, одинаковы. На этом же рисунке приведены температурные зависимости предела текучести исследуемых материалов при растяжении σ_T и изгибе $\sigma_T^л$. Предел текучести $\sigma_T^л$ определялся при трехточечном изгибе гладких (без трещины) образцов, толщина которых (см. рис. 1) равна толщине нетто-сечения образца с трещиной. Это значит, что градиент номинальных

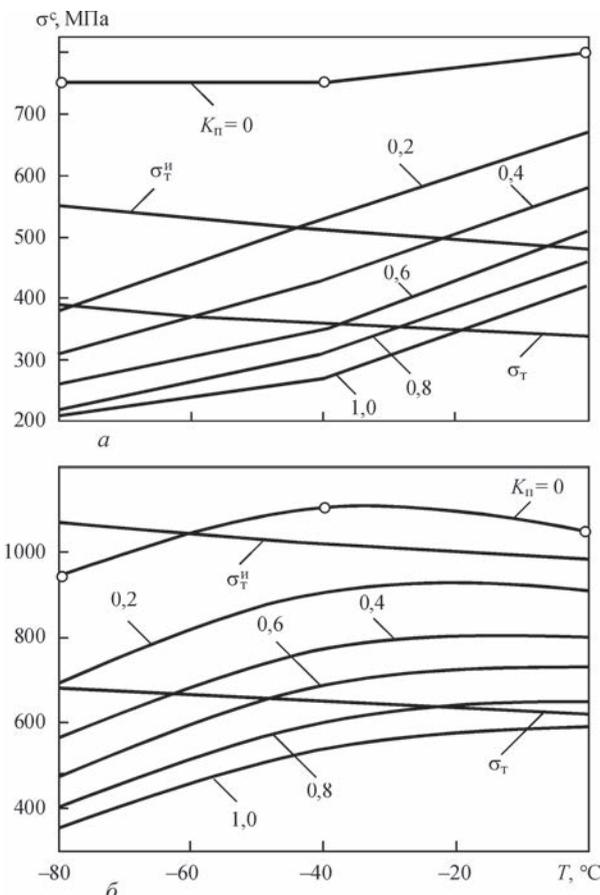


Рис. 4. Влияние температуры и коэффициента динамической перегрузки на предельные статические напряжения в сварных образцах из сталей 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б): σ_T , $\sigma_T^л$ — предел текучести, соответственно, при растяжении и изгибе

напряжений гладких образцов и образцов с трещиной был одинаков. При комнатной температуре для сталей 09Г2 и 12ГН2МФАЮ он составил 480 и 970 МПа соответственно. Температурные зависимости σ_T и σ_T^H исследуемых материалов устанавливались путем расчета [4]. Точки пересечения графиков $\sigma^c = f(T)$ при заданном коэффициенте динамической перегрузки и $\sigma_T = f(T)$ или $\sigma_T^H = f(T)$ и определяют значения $T_{к2}$. Из данных, приведенных на рисунке, видно, что напряжения от динамической нагрузки существенно влияют как на σ^c , так и на $T_{к2}$. С повышением K_{II} предельные напряжения в исследуемых сварных соединениях при статическом нагружении уменьшаются, а вторая критическая температура хрупкости увеличивается.

Чувствительность сварных соединений к динамической нагрузке можно оценить по отношению величины уменьшения разрушающего статического напряжения $\Delta\sigma = \sigma_0^c - \sigma^c$ при заданном динамическом к разрушающему статическому σ_0^c . В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости чувствительности исследуемых сварных соединений от температуры при $\sigma^d = 200$ МПа. Анализ рисунка показал, что сварное соединение стали 09Г2 (кривая 1) в исследованном диапазоне температур более чувствительно к динамической нагрузке. Причем, с понижением температуры эта разница возрастает и при -60 °С увеличивается примерно в три раза. Из этого следует, что в прочностных расчетах при испытаниях образцов при комбинированном нагружении необходимо измерять и учитывать не только статические, но и динамические напряжения. В этом случае $T_{к2}$ более обоснованно следует определять по пересечению температурных зависимостей критических максимальных напряжений σ_k и предела текучести рассматриваемого материала. В качестве характеристики режима нагружения использовался коэффициент динамичности $K_d = \sigma^d / \sigma_k$, который с коэффициентом динамической перегрузки связан соотношением $K_d = K_{II} / 1 + K_{II}$. Используя экспериментальные данные (см. таблицу), на рис. 6 приведены температурные зависимости для сварных соединений сталей 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б) при некоторых значениях коэффициента динамичности. Кривая $\sigma_k = f(T)$, определенная при $K_d = 0$, характеризует температурную зависимость критического напряжения, равного предельному напряжению σ_0^c , полученную в условиях только статического, а $K_d = 1$ — динамического нагружения σ_0^d . При известных величинах σ_0^c , ξ и K_d определить критическое напряжение σ_k для заданной температуры можно по формуле

$$\sigma_k = \frac{\xi}{K_d + \xi(1 - K_d)} \sigma_0^c \quad (6)$$

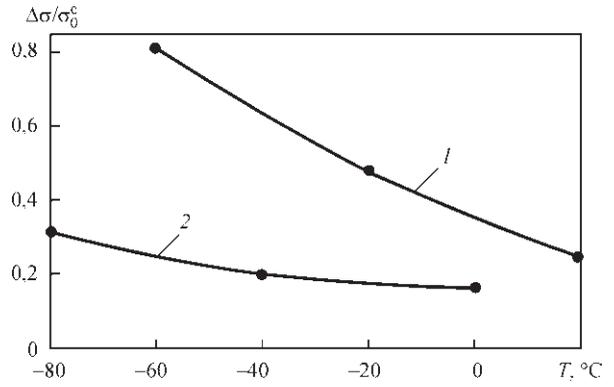


Рис. 5. Зависимость чувствительности сварных соединений сталей 09Г2 (1) и 12ГН2МФАЮ (2) от температуры при заданном значении динамического напряжения $\sigma^d = 200$ МПа

Из приведенных на рисунке зависимостей видно, что с повышением K_d критические напряжения в исследуемых сварных соединениях уменьшаются, а вторая критическая температура хрупкости увеличивается, т. е. характер изменения максимальных напряжений и критической температуры хрупкости аналогичен приведенным на рис. 4, за исключением их абсолютных значений.

Влияние коэффициентов динамической перегрузки (кривые 1, 3) и динамичности (кривые

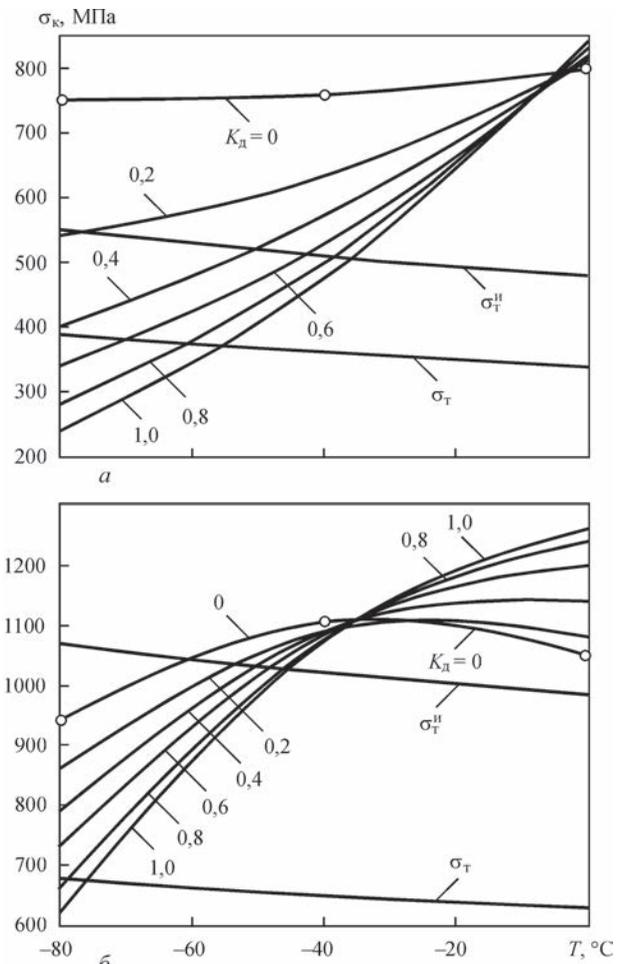


Рис. 6. Влияние температуры и коэффициента динамичности на критические напряжения в сварных образцах из сталей 09Г2 (а) и 12ГН2МФАЮ (б)

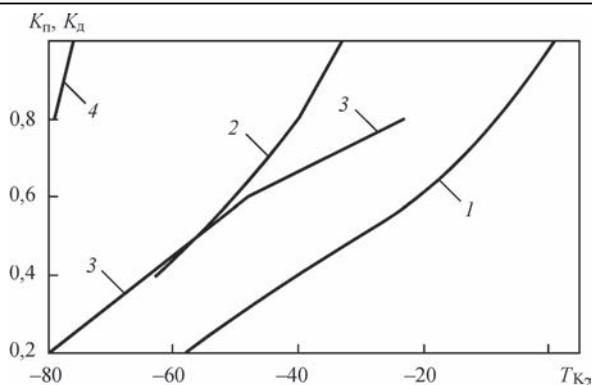


Рис. 7. Влияние коэффициентов динамической перегрузки (1, 3) и динамичности (2, 4) в условиях комбинированного нагружения на вторые критические температуры хрупкости сварных соединений сталей 09Г2 (1, 2) и 12ГН2МФАЮ (3, 4)

2, 4) на вторые критические температуры хрупкости сварных соединений сталей 09Г2 (1, 2) и 12ГН2МФАЮ (3, 4) приведены на рис. 7. Для построения кривых 1, 3 использовали точки пересечения температурных зависимостей σ^c с $\sigma_T = f(T)$ (рис. 4), а кривых 2, 4 — температурных зависимостей σ_K с $\sigma_T = f(T)$ (рис. 6). Сопоставление полученных результатов показывает, что T_{K2} значительно ниже при оценке нагруженности сварного соединения по коэффициенту динамичности, чем по коэффициенту динамической перегрузки. Причем, с ростом коэффициентов разность между вторыми критическими температурами хрупкости, определенными по σ^c и σ_K , имеет тенденцию к увеличению. Можно утверждать, что оценка вторых критических температур хрупкости исследуемых сварных соединений по максимальным напряжениям при комбинированном нагружении (кривые 2, 4) является более достоверной, чем с учетом действия только статических напряжений. Кроме этого видно, что при одинаковых значениях K_n или K_d вторые критические температуры хрупкости сварных соединений стали 12ГН2МФАЮ существенно ниже. Например, при $K_n = 0,4$ разность критических температур хрупкости между исследуемыми сварными соединениями составляет 23 °С, а при $K_d = 0,8$ — 39 °С.

Таким образом, проведенные исследования сварных соединений сталей разной прочности с имеющимся дефектом в виде трещины усталости при различном соотношении динамического и статического напряжений в широком диапазоне изменения климатических температур и представленный анализ данных позволяют более обоснованно подойти к определению запасов прочности элементов металлоконструкций, изготовленных из исследуемых материалов.

Выводы

1. 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. Показано, что неучет динамических напряжений приводит к заниженным значениям предельного напряжения и завышенным значениям второй критической температуры хрупкости.

3. Установлено, что вторые критические температуры хрупкости сварных соединений стали 12ГН2МФАЮ и их чувствительность к динамической нагрузке ниже во всем диапазоне исследуемых температур.

4. Предельные напряжения и вторую критическую температуру хрупкости следует определять в условиях комбинированного нагружения при том коэффициенте динамичности, при котором происходит эксплуатация элемента металлоконструкции.

Список литературы

1. Григорьев Р. С., Ларионов В. П., Уржумцев Ю. С. (1987) *Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении*. Новосибирск, Наука, Сибирское отделение.
2. Телушкин В. Д., Винокуров В. А., Ряхин В. А. и др. (1978) *Строительные и дорожные машины для районов с холодным климатом*. Москва, Машиностроение.
3. Слепцов О. И., Шульгинов Б. С., Михайлов В. Е. и др. (2012) *Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера*. Новосибирск, Наука.
4. Махутов Н. А. (1973) *Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению*. Москва, Машиностроение.
5. Труфяков В. И. (1973) *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
6. (1985) ГОСТ 25.506–85. *Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении*. Москва, Изд-во стандартов.
7. Дегтярев В. А. (1982) Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном нагружении с различной асимметрией цикла. *Проблемы прочности*, 10, 110–113.

References

1. Grigoriev R.S., Larionov V.P., Urzhumtsev Yu.S. (1987) *Methods of increase in serviceability of equipment in North version*. Novosibirsk, Nauka. Siberian section [in Russian].
2. Telushkin V.D., Vinokurov V.A., Ryakhin V.A. et al. (1978) *Road-building machines for regions with cold climate*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Sleptsov O.I., Shulginov B.S., Mikhajlov V.E. et al. (2012) *Improvement of strength of welded metal structures of minerals and transport engineering under conditions of North*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
4. Makhutov N.A. (1973) *Resistance of structure elements to brittle fracture*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

5. Trufiyakov V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. (1985) GOST 25.506-85. *Methods of mechanical tests of metals. Determination of characteristics of crack resistance (fracture toughness) under static loading*. Moscow, Standart [in Russian].
7. Degtyaryov V.A. (1982) Units of DSO type for fatigue testing under repeated impact loading with different cycle asymmetry. *Problemy Prochnosti*, **10**, 110-113 [in Russian].

В. О. Дегтярев

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України.
01014, м. Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2.
E-mail: ips@ipp.kiev.ua

ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ
І СТАТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ОПІР
ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ
КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ

Аналізуються результати експериментальних досліджень впливу співвідношення статичних та динамічних напружень на граничні напруження та другу критичну температуру крихкості стикових зварних з'єднань з тріщиною сталей 09Г2 та 12ГН2МФАЮ в умовах кімнатної та низьких (до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур. Встановлено, що при заданій температурі динамічна складова критичного напруження лінійно зменшується із зростанням статичного напруження. Показано, що при зростанні коефіцієнта динамічності відбувається зменшення граничних напружень та підвищення другої критичної температури крихкості. При цьому критичні температури крихкості зварних з'єднань сталі з більш високими механічними властивостями значно нижчі. Встановлено, що відсутність обліку динамічних напружень призводить до зменшення значенням граничного напруження та збільшення значенням другої критичної температури крихкості. Наведений аналіз досліджень дозволяє більш обґрунтовано підступити до оцін-

ки опору елементів конструкцій, виготовлених з досліджених матеріалів, крихкому руйнуванню та визначенню їх запасів міцності. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: зварне з'єднання, критична температура крихкості, діаграма граничних напружень, межа плинності

V.A. Degtyarev

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength
of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevskaya Str.
01014, Kiev, Ukraine. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

INFLUENCE OF THE RATIO OF DYNAMIC
AND STATIC STRESSES ON BRITTLE FRACTURE
RESISTANCE OF LOW-ALLOYED
STEEL WELDED JOINTS

Results of experimental studies of the influence of the ratio of static and dynamic stresses on limit stresses and second critical brittleness temperature of butt welded joints with a crack on 09G2 and 12GN2MFAYu steels under the conditions of room and low (to $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) temperatures are analyzed. It is found that at the specified temperature the dynamic component of critical stress decreases linearly with increase of static stress. It is shown that decrease of limit stresses and increase of the second critical brittleness temperature take place at increase of the dynamic factor. Critical brittleness temperatures of welded joints of steel with higher mechanical properties are significantly lower. It is found that ignoring the dynamic stresses leads to underestimated values of limit stress and overestimated values of second critical brittleness temperature. Presented analysis of research allows a more substantiated approach to assessment of brittle fracture resistance of structural elements made from the studied materials, and determination of their safety margins. 7 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: welded joint, critical brittleness temperature, limit stress diagram, yield point

Поступила в редакцію 23.05.2017

НОВАЯ КНИГА

Скальський В. Р., Божидарнік В. В., Долінська І. Я. Основи механіки руйнування для зварювальників: навч. посіб. – Луцьк, 2014. – 356 с.

У навчальному посібнику викладено основи міцності та лінійної механіки руйнування. Розглянуто деякі теоретико-методологічні аспекти оцінки характеристик міцності і пластичності, а також тріщностійкості конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань. В доступній формі подано поняття про руйнування елементів конструкцій за статичного, циклічного, динамічного навантажень і за повзучості. Наведено новітні методи визначення важливих стадій розвитку тріщин методами неруйнівного контролю.

Для студентів вищих навчальних закладів, наукових працівників та інженерів-дослідників, аспірантів і викладачів.

