

УДК 620.193

А.В. Кобзарук, А.И. Сабуров, Б.В. Смажило

**ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
КОНСТРУКЦИОННОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ НАГРУЖЕНИЯ**

Разработана методика, изготовлены дополнительные устройства и приспособления, проведены исследования малоциклового выносливости судостроительной корпусной стали типа 15XH5ДМФ на машине УРС 50/50. Испытания проведены в условиях близких к эксплуатационным на призматических образцах трехточечным изгибом с синусоидальной и трапецеидальной формами цикла нагружения. Из результатов испытаний можно заключить, что при синусоидальном цикле трещина зарождается и растет быстрее, чем при трапецеидальном.

Ключевые слова: малоцикловая выносливость, форма цикла, судостроительная корпусная сталь.

Розроблена методика, виготовлені додаткові обладнання і пристрої, виконані дослідження малоциклової витривалості суднобудівної корпусної сталі типу 15XH5ДМФ на машині УРС 50/50. Досліди проведені в умовах близьких до експлуатаційних на призматичних зразках трьохточковим вигином з синусоїдальною, трапецієдальною формами циклу навантаження. По результатам дослідів можливо зробити висновок, що при синусоїдальному циклі тріщина зароджується і зростає швидше, ніж при трапецієдальному.

Ключові слова: малоциклова витривалість, форма циклу, суднобудівна корпусна сталь.

Methodology is worked out, additional devices and adaptations are made, studies of low-cycle endurance of shipbuilding cabinet-type steel of type of 15XH5ДМФ are undertaken on a machine УРС 50/50. Tests are conducted in the conditions of near to an operating on prismatic standards three-point bend with a sinewave and razor the forms of cycle of lading. It is possible to conclude from the results of tests, that at a sinewave cycle a crack is conceived and grows quicker, than at razor.

Keywords: low-cycle endurance, form of cycle, shipbuilding cabinet-type steel.

Количественную оценку сопротивления корпусных сталей малоциклового разрушению весьма удобно проводить на универсальной машине УРС-50/50. Машина позволяет проводить испытания материалов натуральных толщин и элементов конструкций в условиях, приближенных к

эксплуатационным, т.е. в условиях растяжения и изгиба призматических образцов и элементов конструкций с различной формой циклов (синусоидальная, трапецидальная, прямоугольная, треугольная, пилообразная) при нормальной ($20 \pm 15/-10^\circ \text{C}$) температуре и отсутствии агрессивной среды, при знакопеременном и знакопостоянном приложении осевой или изгибающей нагрузки с любой асимметрией; для испытания на малоцикловую усталость, а также для испытания на растяжение. Путем несложных приспособлений на машине можно проводить испытания в различных жидких агрессивных средах, в том числе в морской воде.

Технические данные машины:

Допускаемая предельная нагрузка	$\pm 500 \text{ кН}$
Предельная статическая нагрузка	$\pm 500 \text{ кН}$
Предельная динамическая нагрузка	$\pm 500 \text{ кН}$
Диапазоны измерения нагрузки	$\pm (20-100) \text{ кН}$ $\pm (40-200) \text{ кН}$ $\pm (100-500) \text{ кН}$
Рабочий ход активного захвата	100 мм
Диапазон частоты циклического нагружения	$4 \cdot 10^{-5} - 50 \text{ Гц}$
Наибольшая амплитуда перемещения активного захвата	50 мм
Наибольшая частота, при которой обеспечивается наибольшая амплитуда перемещения активного захвата (без нагрузки)	0,35 Гц
Наибольшая частота, при которой обеспечивается наибольшая амплитуда динамической нагрузки (жесткость образца $1 \cdot 10^7 \text{ н/см}$)	10 Гц
Диапазоны измерения деформации для базы тензометра 25 мм	$\pm (0,1-0,5) \text{ мм}$ $\pm (0,21) \text{ мм}$ $\pm (0,5-2,5) \text{ мм}$
то же для базы тензометра 50 мм	$\pm (0,2-1) \text{ мм}$ $\pm (0,4-2) \text{ мм}$ $\pm (1-5) \text{ мм}$
то же для базы тензометра 100 мм	$\pm (0,4-2) \text{ мм}$ $\pm (1-5) \text{ мм}$ $\pm (2-10) \text{ мм}$
Диапазон измерения перемещения активного захвата для малых перемещений:	$\pm (0,2-1) \text{ мм}$ $\pm (0,4-2) \text{ мм}$ $\pm (10-50) \text{ мм}$
то же для больших перемещений:	$\pm (0,2-10) \text{ мм}$ $\pm (0,4-20) \text{ мм}$ $\pm (10-50) \text{ мм}$

Максимальное расстояние между штоками цилиндра и преобразователя силы при испытании на растяжение, включая рабочий ход активного захвата	100 мм
Максимальное расстояние между торцами опор при испытании на сжатие, включая рабочий ход активного захвата	800 мм
Расстояние от оси образца до колонны	300 мм
Наибольшее расстояние между опорами при испытании на изгиб	600 мм
Жесткость рамы машины	$2 \cdot 10^7$ н/см
Жесткость преобразователя силы	$5 \cdot 10^7$ н/см
Счетчик циклов должен обеспечивать счет	0,5; 1,0; 10; 100 ед.
Погрешность измерения статической нагрузки, выраженная оценкой среднего квадратичного отклонения в относительной форме (СКО), начиная с 0,04 наибольшего предельного значения	± 1 %.
Погрешность измерения динамической нагрузки (СКО) в пределах от 0,2 до 1,0 каждого диапазона измерения при частоте от $4 \cdot 10^{-5}$ Гц	
до 0,5 Гц	± 2 %
от 0,5 Гц до 50 Гц	± 3 %
Погрешность поддержания динамической нагрузки не менее 20 мин.	± 6 % от измеряемой величины
Наибольшая частота, при которой обеспечивается нагружение при прямоугольном, треугольном и пилообразных циклах,	2 Гц.
Установленная мощность	85 кВт
Индикация нагрузки, деформации и перемещения осуществляется цифровым вольтметром	
Машина обеспечивает воспроизведение режимов нагружения и деформирования с развёрткой по частоте	
Вероятность безотказной работы машины	от 0,9 до 1000 ч.
Максимальное время непрерывной работы машины	8 ч.

Расчет сечения образца

По известной формуле сопромата напряжение в наиболее напряженном сечении по надрезу образца нагружаемого по схеме трехточечного изгиба будет

$$\sigma = M_{max} / W,$$

где M_{max} – максимальный изгибающий момент;
 W – момент сопротивления образца.

Изгибающий момент в наиболее напряженном сечении образца будет

$$M_{max} = P_{max} \cdot l / 2,$$

где P_{max} – максимальное усилие развиваемой машиной;

$l = l_0 / 2$ – половина расстояния между опорами, на которые опирается образец.

Момент сопротивления образца прямоугольного сечения рассчитывается по формуле

$$W = BH^2 / 6,$$

где B – ширина;

H – высота призматического образца.

У машины УРС 50/50 расстояние между опорами, на которые опираются образцы в зависимости от их размера, составляет

$$L_{01} = 165 \text{ мм}$$

$$L_{02} = 310 \text{ мм.}$$

При усилии 500 кН максимальный изгибающий момент в зависимости от расстояния между опорами составляет

$$M_{max1} = 500000 \cdot 165 / 4 = 20625000 \text{ Н/мм},$$

$$M_{max2} = 500000 \cdot 310 / 4 = 38750000 \text{ Н/мм.}$$

Определим максимальное сечение образца из материала с пределом прочности $\sigma_B = 1000 \text{ Н/мм}^2$. При $L_0 = 165 \text{ мм}$.

$$W_{max} = M_{max1} / \sigma_B = 20625000 / 1000 = 20625 \text{ мм}^3$$

$$B_{max1} = \sqrt[3]{20625 \cdot 6 / 4} = \sqrt[3]{30935} = 31,5 \text{ мм}$$

при $L_0 = 310 \text{ мм}$.

$$W_{max2} = M_{max2} / \sigma_{ПУ} = 38750000 / 1000 = 38750 \text{ мм}^3$$

$$B_{max2} = \sqrt[3]{38750 \cdot 6 / 4} = \sqrt[3]{58200} = 38,8 \text{ мм}$$

Для образцов с надрезом глубиной $l_0 = 0,2 H$ можно назначить в первом случае максимальное сечение образца с вышеуказанными пределом прочности 35x70, а во втором случае – 45x90.

Исходя из этого, можно рекомендовать следующие размеры образца:

Таблиця

Рекомендуемые размеры образца

B, мм	H, мм	$l = 0,2 H$, мм	L, мм
15	30	6	260
20	40	8	260
25	50	10	260
30	60	12	260
35	70	14	260
40	80	16	360
45	90	18	360

В продолжение ранее проведенных исследований [1-3] на машине УРС 50/50 нами проведены испытания на малоцикловую усталость на воздухе стальных призматических образцов при двух формах цикла: синусоидальной и трапецеидальной.

Испытания вели таким образом, чтобы используя один и тот же образец, получить информацию о зарождении трещины и кинетике ее роста на начальном этапе развития. Призматические образцы размером 22x44x260 мм с V-образным надрезом из стали 15ХН5ДМФ по схеме трёхточечного изгиба при частоте 1 Гц деформировали в режиме мягкого нагружения ассиметричным циклом со следующими параметрами: $R = 0,5$ ($\sigma_{max} = 0,5 \sigma_{0,2 \text{ изг.}}$; $\sigma_{min} = 0,22 \sigma_{0,2 \text{ изг.}}$). Период выдержки в нагруженном и разгруженном состоянии при трапецеидальном цикле составлял 0,2 с. Испытания прекращали при достижении длины трещины около 4 мм.

Из результатов испытаний, представленных на рис. 1 можно заключить, что при синусоидальном цикле трещина зарождается и растет быстрее, чем при трапецеидальном. При испытаниях с синусоидальным циклом трещина зарождается примерно в 2 раза быстрее, чем при трапецеидальном. Для сравнения в нашем опыте было зафиксировано число циклов при появлении (при обеих формах цикла) трещины длиной 0,7 мм. Для синусоидального цикла это произошло на 807-м цикле, для трапецеидального – на 1850-м. Скорость распространения трещины на начальном этапе ее роста на участке длиной 0,7-1,5 мм составила для синусоидального цикла $0,7-0,83 \cdot 10^{-3}$ мм/цикл, для трапецеидального – $0,4-0,5 \cdot 10^{-3}$ мм/цикл на участке длиной 1,5 до 4 мм соответственно $1,03-1,11 \cdot 10^{-3}$ и $0,65-0,71 \cdot 10^{-3}$ мм/цикл.

Для испытаний в морской воде (рис. 2) и в других жидких агрессивных средах изготовлена фторопластовая ячейка (3), закрепленная на испытуемом образце (4) с помощью струбцин. Наблюдение за ростом усталостной трещины производится с помощью микроскопа МБС-1 через плексигласовое окошко в центре ячейки. Конструкция опоры (5) предусматривает возможность испытаний на машине УРС-50/50 образцов длиной 260-360 мм.

Аналогичные испытания в агрессивных средах планируется провести впоследствии.

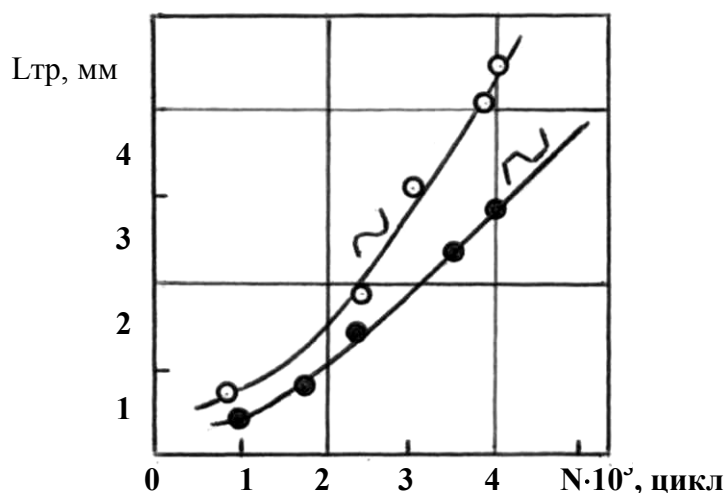


Рис. 1. Кинетика роста трещин МЦУ при испытаниях с синусоидальной и трапецеидальной формами цикла

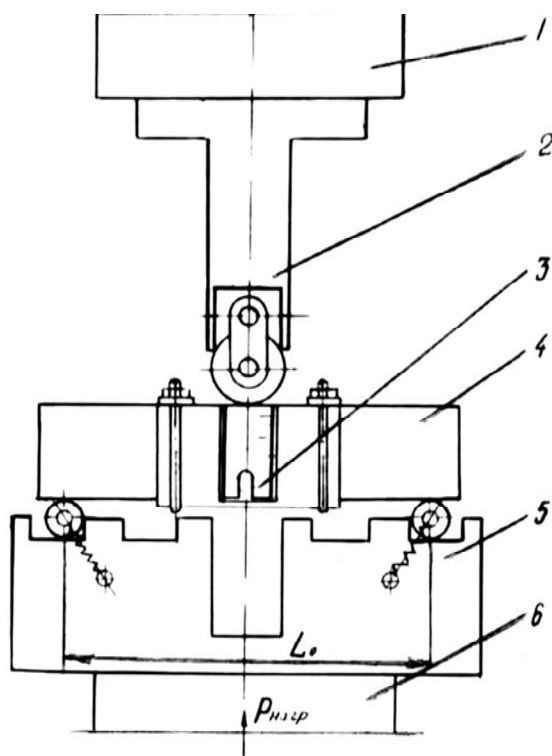


Рис. 2. Схема испытаний призматических образцов в жидкой коррозионной среде:
1 – преобразователь силы; 2 – нож с роликом; 3 – коррозионная ячейка;
4 – образец; 5 – опора; 6 – плунжер нагружающего устройства

Выводы. Испытательная машина УРС-50/50 позволяет с достаточной точностью проводить испытания на малоцикловую усталость образцов и элементов конструкций натуральных толщин в условиях, приближенных к эксплуатационным, что дает значительный выигрыш во времени и экономии денежных средств. При испытании стальных образцов натуральных толщин усталостная трещина при синусоидальном цикле зарождается и растет быстрее, чем при трапецеидальном.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобзарук А.В., Сабуров А.И., Петров Л.Н. О применимости результатов коррозионно-механических испытаний материалов к реальной оценке прочности суднокорпусных конструкций // Проблемы техники. – 2004. – № 3. – С. 19-28.
2. Кобзарук А.В. Эффект масштаба при малоциклового усталости в морской воде // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2003. – Вип. 11. – С. 221-226.
3. Кобзарук А.В., Сабуров А.И., Смажило Б.В. Стационарный электродный потенциал стали в морской воде в зависимости от частоты и формы цикла малоциклового нагружения // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2010. – Вип. 30. – С. 177-187.

Стаття надійшла до редакції 20.08.2013

Рецензент – кандидат технічних наук, завідувач кафедри «Технологія матеріалів» Одеського національного морського університету **О.І. Стальніченко**