

УДК 620.193.12

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

**МАЛОЦИКЛОВАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ В МОРСКОЙ ВОДЕ  
КОРПУСНЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ СТОЙКОСТЬЮ  
К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ**

*Представлены результаты испытания на малоцикловую усталость корпусных сталей с различной стойкостью к коррозионному растрескиванию в природной морской воде в зависимости от частоты и уровня нагружения.*

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, коррозионное растрескивание, частота нагружения, судостроительная корпусная сталь.

*Представлені результати випробування на малоциклову втому корпусних сталей з різною стійкістю до корозійного розтріскування у природній морській воді в залежності від частоти і рівня навантаження.*

**Ключові слова:** малоциклова втома, корозійне розтріскування, частота навантаження, суднобудівна корпусна сталь.

*The results of the test for low-cycle fatigue of body steels with different steadfast to stress-corrosion cracking in natural sea water are presented, depending on the frequency and loading level.*

**Keywords:** low cycle fatigue, stress corrosion cracking, loading frequency, ship-building steel body.

**Введение.** Современное состояние науки и техники уже не удовлетворяется сложившимся ранее представлением о работе материала в составе напряженных конструкций. Изменились направления расчетов прочности проектируемых конструкций. Стремление максимально сократить вес и стоимость изделий привело к использованию в ряде случаев низколегированных свариваемых сталей повышенной прочности; прослеживается тенденция применения облегченных высоконапряженных конструкций предназначенных для работы при ограниченном числе циклов то есть при малоцикловой усталости. В таких конструкциях предполагается возможность работы отдельных узлов при напряжениях, превышающих предел упругости, что позволяет полнее реализовать прочностные свойства материала. В связи с увеличением напряженности материала реальную угрозу представляют повреждения из-за хрупкого разрушения, вызванного коррозионным растрескиванием при статическом нагружении и малоцикловой усталостью под действием циклических нагрузок и агрессивной среды.

---

© Кобзарук А.В., Сабуров А.И., Смажило Б.В., 2017

Малоцикловому нагруженню и коррозионному растрескиванию в морской воде и в атмосфере морского воздуха подвержены отдельные элементы судокорпусных конструкций, корпуса подводных лодок и глубоководных аппаратов, плавучих нефте- и газодобывающих платформ, башни и стрелы морских плавкранов, конструкции причалов и другие объекты. Продолжительность цикла при этом может длиться от нескольких минут до нескольких дней и даже недель. В тоже время за 10 лет службы общее число повторных нагружений не превышает  $10^4$  циклов (обычная база малоцикловых испытаний) [1].

Действие нагрузок на судовую конструкцию переменного по величине и нестационарного по времени и аналитически может быть представлено вероятностным распределением. В эксплуатационных условиях в корпусе судна возникают как высокочастотные, так и низкочастотные переменные напряжения. Высокочастотные переменные напряжения вызваны вибрацией и колебанием корпуса, связанных с гидродинамикой. Удары волн в районе носовой оконечности способствуют свободным колебаниям корпуса крупнотоннажного судна с частотой 670-1000 мГц [2], а для судов небольшого водоизмещения 1200-2000 мГц. Согласно этому распределению, в условиях эксплуатации неизбежны кратковременные перегрузки, которые при умеренной общей напряженности корпуса судна могут вызвать местные пластические циклические деформации, т.е. малоцикловую усталость. Исчерпание пластичности материала при малоцикловой усталости может вызвать хрупкое разрушение.

Прямыми исследованиями, проведенными на судах различного класса [2; 3], установлено, что элементы корпуса судна испытывают в основном изгибающие нагрузки; наиболее характерный цикл нагружения асимметричный. В элементах корпуса всегда имеются остаточные напряжения от гибки, сборки и сварки, переменные напряжения, возникающие при плавании, в сочетании с вышеуказанными остаточными напряжениями создают асимметрию цикла нагружения.

При расчетах прочности судостроительных конструкций необходимо учитывать изменение механических свойств материала (прочность, выносливость и пластичность) под влиянием морской воды. Целью этих расчетов является нахождение коэффициентов влияния среды, найденных экспериментально. Существенное влияние на механические свойства металла в эксплуатационных условиях оказывает коррозионная среда, действующая одновременно с его нагружением. При этом деформация интенсифицирует коррозионный процесс на активированной поверхности металла, а среда, в свою очередь, облегчает деформирование и способствует ускорению разрушения металла [4]. Для проявления влияния коррозионной среды на механические свойства металла требуется, как правило, длительный промежуток времени.

Представляют большой интерес исследования коррозионно-механической прочности судостроительных материалов в условиях, по частоте, уровню деформации и характеру воздействия среды приближенных

к эксплуатационным. Ранее такие испытания проводились в 3,5 %-ом водном растворе NaCl либо в синтетической морской воде, близкой по химическому составу к океанской. Однако известно [5; 6], что естественная морская вода по своей коррозионной активности значительно агрессивней синтетической. Исследованиями [6; 7] показано, что коррозионное поведение материала в открытом море совершенно иное, чем в синтетической морской воде, свободной от микрофлоры. Жизнедеятельность бактерий, водорослей и морских животных значительно изменяют состав морской воды и её коррозионно-агрессивные свойства.

В созданном в Одессе для нужд судостроения Отделе морской коррозии ФМИ НАН Украины был проведен целый комплекс исследований коррозионно-механической прочности судостроительных материалов в природной морской воде акватории Нефтегавани. Выполнены [8; 9] коррозионные и коррозионно-биологические исследования свойств морской воды в акватории испытательных лабораторий за период проведения испытаний, а также коррозионно-механические испытания ряда металлов используемых в судостроении. Часть испытаний проведена на опытных образцах в природных морских условиях на коррозионном пирсе, часть – в лабораторных помещениях.

В лабораторных условиях проводились коррозионные, коррозионно-усталостные испытания и исследования склонности к коррозионному растрескиванию опытных образцов на испытательных машинах. Параметры цикла нагружения (частота, форма цикла и уровень циклической деформации) приближались к реальным эксплуатационным условиям деформирования исследуемых материалов в составе конструкции. Исследования малоциклового усталости конструкционных сталей и их сварных соединений позволили установить роль уровня нагружения, его частоты и формы цикла, скорости деформирования, выдержки под нагрузкой и пауз в нагружении в морской воде и на воздухе. Опыты проведены на образцах из сталей стойких и склонных к коррозионному растрескиванию.

Представленные ниже исследования проведены в основном на базе работ [8-10], выполненных в Отделе морской коррозии ФМИ НАН Украины и продолженных на кафедре «Технология материалов» ОНМУ [11-13]. Накопленный в течение многих лет большой объем исследований коррозионно-механической прочности судостроительных материалов в природной морской воде до сих пор требует дополнительного исследования, анализа и обсуждения.

При одновременном действии на металл коррозионно-агрессивных сред и длительного статического нагружения наблюдается явление хрупкого разрушения материала, имеющее название коррозионной статической усталости или, чаще всего, коррозионного растрескивания [14]. Коррозионное растрескивание происходит при действии напряжений, вызванных как внешним нагружением, так и остаточными растягивающими напряжениями, возникновение которых связано с технологией их изго-

товления (штамповка, гибка, протягивание, развальцовка и т.п.). Термообработка и сварка, вызывающие остаточные растягивающие напряжения, также вызывают коррозионное растрескивание стали. Коррозионное растрескивание развивается во времени: чем больше время, тем при меньшем нагружении разрушается сталь.

В зависимости от агрессивности среды и свойств металла могут рассматриваться две принципиально отличные системы «металл-раствор»: со склонностью материала к коррозионному растрескиванию и без неё. Очевидно, если такая система располагает условиями для коррозионного растрескивания при статической нагрузке, то и в процессе малоциклового нагружения при благоприятных обстоятельствах также может происходить коррозионное растрескивание под действием статической составляющей циклически прикладываемой нагрузки.

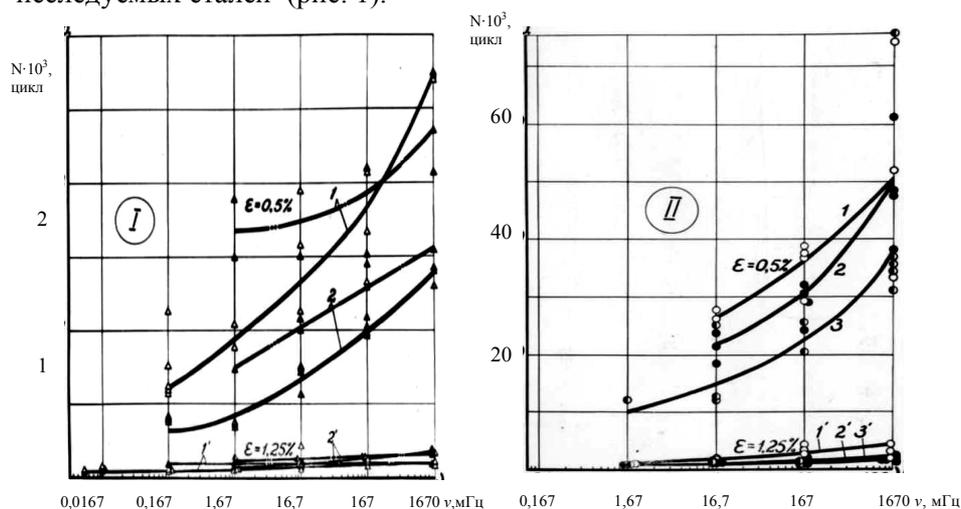
В зависимости от условий протекания коррозионного растрескивания в течение малоциклового коррозионной усталости разрушение металлического образца наступает по одной из следующих трех причин. При совершенно благоприятных для коррозионного растрескивания условиях разрушение может совершиться в течение первого же нагружения, очевидно, вследствие коррозионного растрескивания. При полном отсутствии условий для коррозионного растрескивания причиной разрушения является усталость. И, наконец, могут возникнуть такие обстоятельства, когда разрушение циклически деформируемого образца будет обусловлено обоими процессами – усталостью и коррозионным растрескиванием. Последнее должно быть особенно заметным в течение часто встречающихся при повторно-статическом нагружении, выдержек напряженного образца, а также при малоциклового усталости в области низких частот нагружения. В этой связи при изучении малоциклового коррозионной усталости целесообразно учитывать наличие или отсутствие в системе «металл-раствор» условий для коррозионного растрескивания.

Для исследования вклада коррозионного растрескивания в процесс малоциклового разрушения конструкционных материалов в коррозионной среде проводились испытания [8] ряда сталей на коррозионное растрескивание и малоцикловую усталость как в морской воде, так и в различных жидких средах с разной агрессивностью по отношению к коррозионному растрескиванию. Испытания на малоцикловую усталость отнулевым циклом с жестким нагружением чистым изгибом проводились на машинах типа ИП и ММИ [8] в широком диапазоне частот, в том числе при низких и весьма низких частотах нагружения (1670 – 0,00835 мГц).

**Объектом исследования** были термически улучшаемые хромоникелемолибденовые стали типа 15ХНЗДМ, 12ХНДМФ и 15ХН5ДМФ с пределом текучести соответственно 900, 1000 и 1400 МПа. Эти стали нашли широкое применение в судостроении и обладают высокой стойкостью против коррозионного растрескивания – кольцевые образцы в морской воде не растрескались в течение 2 лет, при деформации соответствующей пределу текучести при изгибе на стенде КР-1 образцы в мор-

ской воде не разрушились в течение  $2 \cdot 10^4$  час. Для сравнения была также испытана сталь типа 30ХГСНА, закаленная на мартенсит ( $\sigma_{0,2} = 1900$  МПа), склонная в определенных условиях к коррозионному растрескиванию.

Образцы из сталей 15ХН5ДМФ, 15ХНЗДМ, 12ХН4ДМФ гладкие и с концентратором напряжения подвергали малоцикловому нагружению отнулевым чистым изгибом при двух уровнях деформации  $\varepsilon = 0,5\%$  и  $\varepsilon = 1,25\%$  [10]. Установлено, что в природной морской воде снижение частоты малоциклового нагружения во всем диапазоне исследованных частот приводит к уменьшению долговечности (по числу циклов) всех исследуемых сталей (рис. 1).



*Рис. 1. Частотная зависимость малоциклового долговечности (в циклах до разрушения) сталей 15ХН5ДМФ (1, 1'), 15ХНЗДМ (2, 2') и 12ХН4ДМФ (3, 3') при  $\varepsilon = 0,5\%$  (кривые 1, 2, 3) и  $\varepsilon = 1,25\%$  (кривые 1', 2', 3').*

▲ ● – морская вода, воздух, Δ ○ – воздух;

I – образцы с концентрацией напряжений; II – гладкие образцы

Указанная закономерность обнаружилась не только в достаточно хорошо ранее исследованном диапазоне частот (1670 – 16,7 мГц, но и при малоизученных низких (16,7 – 0,167 мГц) и весьма низких (0,167 мГц – 0,00835 мГц) частотах нагружения. Снижение частоты нагружения на воздухе вызывает не столь интенсивное уменьшение долговечности, как в морской воде. Увеличение уровня циклического деформирования приводит к ослаблению влияния частоты на долговечность, концентрация напряжения действует аналогичным способом.

Поскольку речь идет о малоцикловой усталости в коррозионной среде, а влияние последней определяется продолжительностью испытаний, результаты экспериментов представлялись, кроме того, в виде частотной зависимости долговечности во времени до разрушения. Если при

снижении частоты нагружения число циклов уменьшается, то долговечность во времени, наоборот, возрастает, причем в гораздо большей степени, чем в первом случае.

**Цель исследования.** Следует отметить, что продолжительность исследований для получения одной кривой частотной зависимости стали 15ХН5ДМФ (образцы с концентрацией напряжений) в морской воде (рис. 1, кривая 1) потребовалось 645 суток чистого машинного времени. В современных условиях проведение такого рода исследований затруднительно. В настоящей статье сделана попытка сократить объем исследований, которые позволяют получить с достаточной точностью аналогичную информацию частотной зависимости при испытании малого числа образцов за короткий промежуток времени. В качестве примера взяты результаты испытаний вышеупомянутых образцов из стали 15ХН5ДМФ в количестве 23 штук [10].

**Статистическая обработка.** Результаты усталостных испытаний подвергались статистической обработке методом корреляционного анализа. На основании проведенных исследований получено, что кривые частотной зависимости малоциклового долговечности в двойных логарифмических координатах представляют собой отрезки прямых, для которых можно составить линейное корреляционное уравнение. Применяв указанный метод, составляли уравнения, выражающие зависимость между временем и частотой малоциклового нагружения.

$$\lg \tau = A - K \lg \nu . \quad (1)$$

В уравнении (1)  $A$  и  $K$  – постоянные, определяемые свойствами материала и условиями эксперимента, в данном случае средой и уровнем циклической деформации. Постоянная  $K$  равна тангенсу угла наклона описываемой уравнением (1) прямой к оси абсцисс.

$$K = \operatorname{tg} \varphi . \quad (2)$$

В случае отсутствия влияния частоты на долговечность такая прямая представляет собой линию пересчета числа циклов на время испытания, которая наклонена к оси абсцисс под углом  $\beta$ , равным  $45^\circ$ . Очевидно, степень влияния частоты может быть оценена отклонением от линии «пересчета», т.е. углом  $\alpha$ .

$$\alpha = \beta - \varphi . \quad (3)$$

Обозначив  $\lg \tau = x$  и  $\lg \nu = y$ , уравнение частотной зависимости  $\lg \tau = A - K \lg \nu$  запишется в следующем виде:

$$x - \bar{x} = \frac{M_{11}}{\sigma_v^2} (y - \bar{y}) , \quad (4)$$

где  $x - \bar{x}$  и  $y - \bar{y}$  представляют собой отклонения экспериментальных данных от их среднеарифметических;  $M_{11}$  – центральный момент;  $\sigma_v$  – среднеквадратичное отклонение. Зависимость (4) представляет собой уравнение прямой, проходящей через центр распределения, точку  $M(\bar{x}; \bar{y})$ . Обозначив  $u = x - \bar{x}$  и  $V = y - \bar{y}$ , а также введя коэффициент корреляционного уравнения  $\rho = \frac{M_{11}}{\sigma_v^2}$ , соотношение (4) переписывается

$$U = \rho \cdot V. \quad (5)$$

Параметры корреляционного уравнения подсчитывали по экспериментальным данным (табл. 1 для прямой 1 на рис. 2) для стали 15ХН5ДМФ. Во втором столбце таблицы представлены результаты долговечности образцов в минутах, в четвертом столбце – частота нагружения (цикл/мин.).

При делении алгебраических сумм результатов эксперимента на число испытаний получаем средние значения

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{68,5654}{23} = 2,9811 \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{-25,9030}{23} = -1,1262. \quad (7)$$

В столбцах 7 и 9 представлены отклонения экспериментальных данных от их средних значений, подсчитанных по формулам (6), (7), в столбцах 6 и 10 – квадраты этих отклонений, а в столбце 8 – их произведения.

На основании итоговых данных таблицы 1 вычисляются:

1) дисперсии (среднеквадратичные отклонения)

$$\sigma_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{63,7391}{23} = 2,7712; \quad \sigma_u = \sqrt{2,7712} = 1,664;$$

$$\sigma_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \frac{67,5175}{23} = 2,9355; \quad \sigma_v = \sqrt{2,9355} = 1,714;$$

Таблиця 1

Данные для подсчета параметров корреляционного уравнения прямой 1

Сталь марки 15ХН5ДМФ, образцы с надрезом, $\epsilon = 1,25\%$ морская вода									
Номер	$\tau$ , мин.	$x = \lg \tau$	$v$ , цикл./ мин.	$y = \lg v$	$U^2$	$U =$ $= x - \bar{x}$	$U - V$	$V =$ $= y - \bar{y}$	$V^2$
1	1,15	0,0607	100,0	2,0000	8,5287	-2,9204	-9,1298	3,1262	9,7731
2	1,09	0,0374	100,0	2,0000	8,6653	-2,9437	-9,2026	3,1262	9,7731
3	6,50	0,8129	10,0	1,0000	4,7010	-2,1682	-4,6100	2,1262	4,5207
4	10,00	1,0000	10,0	1,0000	3,9247	-1,9811	-4,2122	2,1262	4,5207
5	12,00	1,0792	10,0	1,0000	3,6172	-1,9019	-4,0438	2,1262	4,5207
6	68,00	1,8325	1,0	0,0000	1,3192	-1,1486	-1,2935	1,1262	1,2683
7	79,00	1,8976	1,0	0,0000	1,1739	-1,0835	-1,2202	1,1262	1,2683
8	90,00	1,9542	1,0	0,0000	1,0545	-1,0269	-1,1565	1,1262	1,2683
9	490,00	2,6902	0,1	-1,0000	0,0846	-0,2909	-0,0367	0,1262	0,0159
10	575,00	2,7597	0,1	-1,0000	0,0490	-0,2214	-0,0279	0,1262	0,0159
11	600,00	2,7782	0,1	-1,0000	0,0411	-0,2029	-0,0256	0,1262	0,0159
12	615,00	2,7889	0,1	-1,0000	0,0369	-0,1922	-0,0242	0,1262	0,0159
13	770,00	2,8865	0,1	-1,0000	0,0089	-0,0946	-0,0119	0,1262	0,0159
14	4565,00	3,6595	0,01	-2,0000	0,4602	0,6784	-0,5928	-0,8738	0,7635
15	4620,00	3,6646	0,01	-2,0000	0,4671	0,6835	-0,5972	-0,8738	0,7635
16	5760,00	3,7604	0,01	-2,0000	0,6073	0,7793	-0,6809	-0,8738	0,7635
17	32340,00	4,5137	0,001	-3,0000	2,3488	1,5326	-2,8718	1,8738	3,5111
18	51085,00	4,7083	0,001	3,0000	2,9832	1,7272	3,2364	1,8738	2,5111
19	55680,00	4,7457	0,001	-3,0000	3,1138	1,7646	-3,3065	-1,8738	3,5111
20	70080,00	4,8656	0,001	-3,0000	3,4763	1,8645	-3,4937	-1,8738	3,5111
21	187080,00	5,2720	0,0005	-3,3010	5,2482	2,2909	-4,9822	-2,1748	4,7298
22	238940,00	5,3783	0,0005	-3,3010	5,7465	2,3972	-5,2134	-2,1748	4,7298
23	275040,00	5,4393	0,0005	-3,3010	6,0427	2,4582	-5,3461	-2,1748	4,7298
$\sum_{i=1}^n =$	928807,74	68,5654		-25,9030	63,7391		-65,3159		67,5170

2) центральный момент

$$M_{11} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i V_i}{n} = \frac{-65,3159}{23} = -2,8398;$$

3) коэффициент корреляции

$$r = \frac{M_{11}}{\sigma_u \sigma_v} = \frac{-2,8398}{1,664 \cdot 1,714} = -0,9957;$$

4) средняя ошибка коэффициента корреляции

$$\sigma = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} = \frac{1-0,9914}{23} = 0,0018;$$

5) коэффициент корреляционного уравнения

$$\rho = \frac{M_{11}}{\sigma_v^2} = \frac{-2,8398}{2,9355} = -0,9674;$$

6) средняя ошибка корреляционного уравнения

$$S_u = \sigma_u \sqrt{1-r^2} = 1,664 \cdot \sqrt{1-0,9914} = 0,1542.$$

Координаты центра распределения

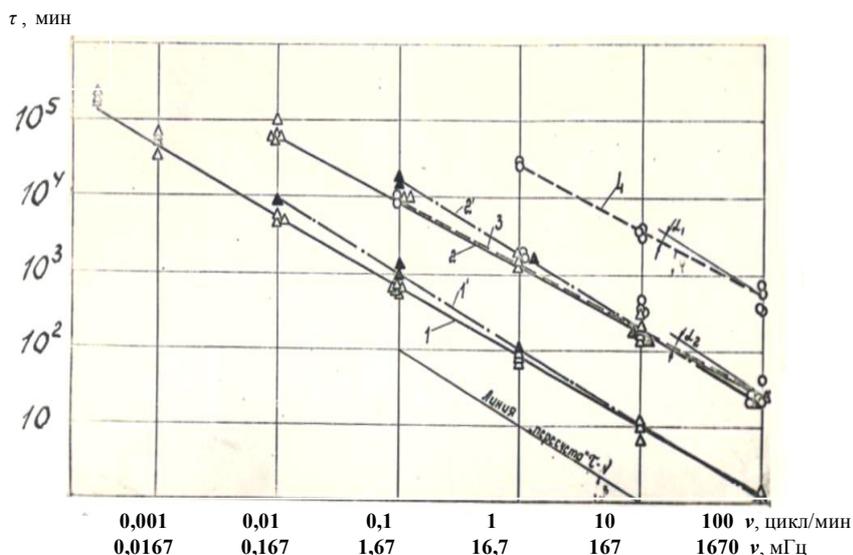
$$M(\bar{x}; \bar{y}) = M_1(2,9811-1,1262).$$

Теперь, используя вышеприведенное корреляционное уравнение (5), построим теоретическую линию регрессии  $\tau = f(v)$ . Для этого найдем координаты двух любых точек этой прямой:

а) при  $v = 0,001$  цикл/мин,  $y = -3,00$ ,  $V = -1,8738$ ,  $U = \rho V = -0,9674 \cdot (-1,8783) = 1,8127$ ; ордината  $x = U + \bar{x} = 1,8127 + 2,9811 = 4,7938$ ;

б) при  $v = 10$  цикл/мин,  $y = 1,00$ ,  $V = 2,1262$ ,  $U = \rho V = -0,9674 \cdot (2,1262) = -2,0569$ ; ордината  $x = U + \bar{x} = -2,0569 + 2,9811 = 0,9242$ .

Таким образом, при частоте 0,001 цикл/мин. прямая частотной зависимости проходит через точку  $A(4,7938; -3,00)$  соответствующую долговечности  $\tau = 62210$  мин., а при частоте 10 цикл/мин. – через точку  $B(0,9242; 1,00)$ , соответствующую долговечности  $\tau = 1,033$  мин. Проведя через точки  $A, B$  линию, получим прямую 1 частотной зависимости (см. рис. 2).



*Рис. 2. Зависимость долговечности во времени до разрушения от частоты малоциклового нагружения стали типа: 15ХН5ДМФ на воздухе (▲) и в морской воде (Δ, ●) при  $\varepsilon = 1,25\%$  (кривые 1, 1', 3) и  $\varepsilon = 0,5\%$  (кривые 2, 2', 4), ● – образцы гладкие; Δ, ▲ – образцы с концентратором напряжения*

Если она построена правильно, линия пройдет через центр распределения  $M_1(2,9811; -1,1262)$ .

Так как зависимость между  $\nu$  и  $\tau$  подчиняется нормальному закону распределения, согласно с оценкой плотности попадания случайных величин в данный интервал, можно сделать следующие выводы. Долговечность не менее 68,3 % образцов имеют отклонения от прямой частной зависимости  $S_u = 0,1542$ . Отклонения от построенной на основании принятого метода закономерности  $\lg \tau = f(\lg \nu)$  на величину  $2S_u = 0,3084$  имеют 95,4 % испытанных образцов и, наконец, в интервал со средним отклонением  $3S_u = 0,4626$  попадают результаты испытаний практически всех образцов (99,73 %). Аналогичным образом строились теоретические линии регрессии  $\tau = f(\nu)$  остальных кривых (1', 2, 2', 3 и 4) частотной зависимости долговечности стали 15ХН5ДМФ (см. рис. 2) и сталей 15ХН3ДМ и 12ХН4ДМФ [10]. Рассчитанные по формуле (3) углы  $\alpha$  приведены в табл. 2.

Таблиця 2

*Степень влияния частоты нагружения  
в зависимости от амплитуды деформации и среды*

Вид образца	Среда	Относительная деформация $\varepsilon$ , %	Угол $\alpha$		
			сталь типа 15ХНЗДМ	сталь типа 12ХН4ДМФ	сталь типа 15ХН5ДМФ
гладкий	морская вода	0,50	4°04'	5°53'	3°41'
		1,25	4°00'	3°10'	3°17'
с надрезом	морская вода	0,50	5°27'	–	3°47'
		1,25	4°17'	–	2°30'
с надрезом	воздух	0,50	1°19'	–	1°17'
		1,25	0°43'	–	0°10'

**Анализ результатов эксперимента**, представленных на рис. 1, 2 и в табл. 2, показывает, что уменьшение частоты деформирования при малоциклового усталости хромоникелемолибденовых сталей на воздухе и в морской воде приводит к снижению долговечности по числу циклов в несколько раз, время до разрушения при этом возрастает на несколько порядков. Из исследованных [10] трех марок каждый тип стали обладает различной чувствительностью к частоте нагружения, как правило, уменьшающейся при переходе от менее прочной стали к более прочной. Увеличение угла  $\alpha$  при переходе от испытаний на воздухе к экспериментам в морской воде и при снижении амплитуды циклической деформации свидетельствует об усилении влияния частоты нагружения на долговечность.

Поскольку исследуемые хромоникелемолибденовые стали в морской воде обладают большой стойкостью к коррозионному растрескиванию (КР), для сравнения была выбрана закаленная на мартенсит с последующим высоким отпуском сталь 30ХГСНА, склонная к коррозионному растрескиванию.

Испытания [8] на малоцикловую усталость и коррозионное растрескивание вели в средах с различной агрессивностью по отношению к коррозионному растрескиванию – в естественной морской воде, в 3,5 % водном растворе хлористого натрия, а также в растворе, ускоряющем коррозионное растрескивание (10 % водный раствор  $\text{NaCl} + \text{AlCl}_3 + \text{HCl}$  до pH 3).  $\text{AlCl}_3$  в ускоряющей среде служил буфером, поддерживающим pH среды на уровне 3, что соответствует кислотности в вершине развивающейся трещины [15].

В 3,5 % водном растворе  $\text{NaCl}$  гладкие образцы из стали 30ХГСНА в условиях статического изгиба с деформацией  $\varepsilon = 4,2$  % на стенде КР-1 разрушались от коррозионного растрескивания в течение 7 суток, в морской воде – за 30 суток, в спецрастворе с pH 3 – в течение 10 мин.

Испытания на малоцикловую коррозионную усталость проводились аналогично вышеприведенным испытаниям хромоникелемолибденовых сталей. В 3,5 % растворе хлористого натрия и в морской воде нагружение проводили с амплитудой деформации  $\varepsilon = 4,2\%$ . Для достижения коррозионного растрескивания в ускоряющей среде в течение такого же периода как у образцов, испытанных в 3,5 % растворе NaCl, принята амплитуда деформации  $\varepsilon = 0,5\%$ . Как и для стойких к КР сталей диапазон частот испытания стали 30ХГСНА принимался 1670-0,000835 мГц.

Коррозионное растрескивание определяется временем до разрушения и нагрузкой, поэтому для установления влияния на малоцикловую усталость коррозионного растрескивания результаты экспериментов также представлялись в двойных логарифмических координатах время-частота (рис. 3).

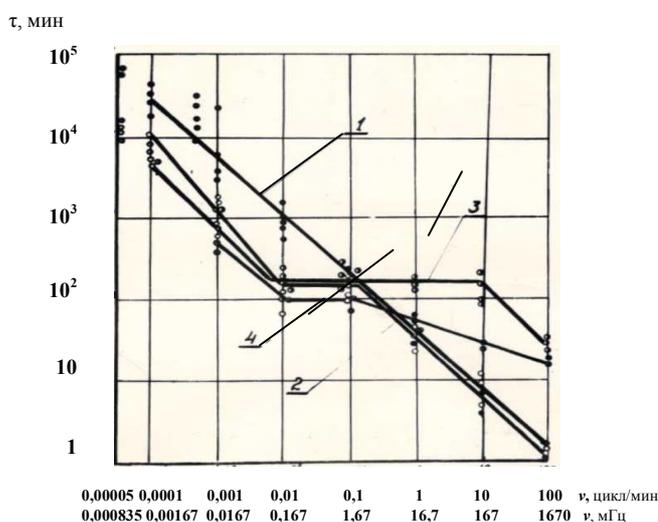


Рис. 3. [8] Зависимость долговечности (во времени до разрушения) стали 30ХГСНА от частоты малоциклового нагружения в морской воде (1), в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание (3, 4) и в 3,5 % водном растворе NaCl (2).  
Образцы гладкие:  $\varepsilon = 4,2\%$  (1, 2, 4),  $\varepsilon = 0,5\%$  (3)

Судя по ходу кривой 1, в природной морской воде в логарифмических координатах долговечность связана с частотой линейной зависимостью, аналогичной полученной при испытании хромоникелемолибденовой стали в морской воде. Последнее позволяет предположить, что в морской воде во всем исследованном диапазоне частот разрушение стали 30ХГСНА наступает от коррозионной усталости. Склонность материала к

коррозионному растрескиванию в морской воде в диапазоне частот 1670 мГц-0,00167 мГц не успела проявиться и лишь при снижении частоты ниже 0,00167 мГц выявлена значительная нестабильность результатов эксперимента; при этом разрушение часто происходило от коррозионного растрескивания при первом же нагружении. Это свидетельствует о преимущественном вкладе коррозионного растрескивания в общий процесс разрушения при весьма низких частотах нагружения.

При испытании в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание, в диапазоне частот от 0,167 мГц-167 мГц ( $\varepsilon = 0,5\%$ ) на кривой 3 отчетливо проступает участок, на котором, независимо от частоты нагружения, время до разрушения остается практически постоянным и определяется склонностью стали к коррозионному растрескиванию (горизонтальный участок кривой 3). В интервале высоких частот (167 мГц-1670 мГц) из-за небольшой продолжительности воздействия среды отмеченное влияние коррозионного растрескивания на усталостный процесс не обнаружено, разрушение в этих случаях происходит только вследствие коррозионной усталости. Повышение уровня циклического деформирования до  $\varepsilon = 4,2\%$  в этой же (ускоряющей) среде, уменьшая долговечность образца, приводит, кроме того, к сокращению пологого участка, связанного с влиянием на усталостный процесс коррозионного растрескивания, и к увеличению диапазона частот (1670 мГц-1,67 мГц), при которых разрушение наступает от усталости (кривая 4). Очевидно, в последнем случае из-за недостатка времени при частотах 1670 мГц-167 мГц склонность стали к коррозионному растрескиванию не успела проявиться и обнаруживается лишь при частотах ниже 1,67 мГц.

В 3,5 % растворе NaCl в диапазоне частот 1670 мГц-1,67 мГц, как и в естественной морской воде, долговечность образцов находится во временной зависимости от частоты нагружения (кривая 2). Так как в 3,5 % растворе хлористого натрия склонность стали к коррозионному растрескиванию незначительна, действие последней на усталостный процесс не столь заметно, как в ускоряющей среде. Тот факт, что в диапазоне частот 1670 мГц-1,67 мГц долговечность в синтетической и природной морской воде практически совпадает, несмотря на различную коррозионную агрессивность сред, указывает на преимущественно усталостный характер процесса в этих условиях малоциклового нагружения. При более низких (менее 1,67 мГц) частотах нагружения в синтетическом аналоге морской воды коррозионное растрескивание сокращает долговечность образцов.

Анализ правых участков кривых 1-4 позволяет прийти к выводам, аналогичным тем, которые были сделаны в ходе испытаний хромоникелемолибденовых сталей (в условиях отсутствия коррозионного растрескивания). Как и в первом случае, долговечность стали 30ХГСНА связана с частотой нагружения линейной зависимостью. Увеличение угла  $\alpha$ , образованного правыми ветвями кривых и линией «пересчета» при переходе от менее агрессивной среды к более агрессивной, свидетельствует об уси-

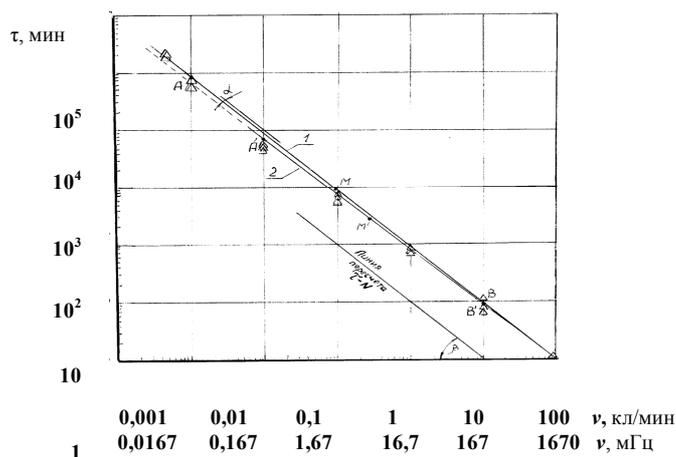
лении «эффекта частоты». В диапазоне частот 16,7 мГц-1670 мГц долговечность стали в среде с рН 3 оказалась выше, чем в морской воде и в 3,5 % растворе NaCl. И хотя такая среда более агрессивна в отношении коррозионного растрескивания, тем не менее, в условиях высокочастотного деформирования агрессивность среды не успела проявиться, а адсорбционное и коррозионное влияние ее на усталость, по-видимому, слабее, чем охлаждающее, действующее в обратном направлении [4].

При частоте 16,7 мГц (близкой к обычно применяемой при малоцикловых испытаниях) и уровне циклической деформации  $\varepsilon = 4,2\%$  долговечность образцов в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание, приближается к долговечности в морской воде и в 3,5 % растворе NaCl. В средах с различной агрессивностью по отношению к коррозионному растрескиванию разрушение совершается приблизительно за одинаковый промежуток времени, очевидно, металл не успел проявить склонности к КР и разрушился от усталости.

Наоборот, при частотах менее 0,167 мГц долговечность образцов в среде, ускоряющей коррозионное растрескивание, на порядок ниже долговечности в морской воде, что свидетельствует о решающем влиянии на усталостный процесс коррозионного растрескивания под действием среды и статической составляющей циклически прикладываемой нагрузки. В 3,5 % растворе NaCl, в среде относительно слабой по отношению к коррозионному растрескиванию, левая ветвь кривой 2 занимает промежуточное положение между кривыми, построенными в морской воде и в среде с рН 3.

**Результаты исследований.** На основании проведенных исследований установлено, что при малоцикловом нагружении в коррозионной среде в отсутствие коррозионного растрескивания происходит усталостное разрушение образцов. В этом случае долговечность во времени до разрушения связана с частотой временной зависимостью и в логарифмических координатах представляет собой наклонную прямую, характеризующую увеличение долговечности во времени пропорционально уменьшению частоты. Если же в системе «металл-раствор» имеет место коррозионное растрескивание, то в определенном диапазоне частот на указанной прямой  $lgt = f(lgv)$  появляется пологий участок, смещающий кривую частотной зависимости в область меньшей долговечности.

С целью поиска возможности сокращения времени исследований для получения частотной зависимости малоцикловой долговечности с достаточным уровнем достоверности для сталей, стойких к коррозионному растрескиванию, мы построили теоретическую линию регрессии  $\tau = f(\nu)$  при испытании 6 образцов из стали 15ХН5ДМФ (см. рис. 4) и сравнили ее с кривой 1 (рис. 2), полученной на основании испытания 23 образцов.



*Рис. 4. Частотная зависимость малоциклового долговечности образцов из стали 15ХН5ДМФ: на основании испытаний 23 образцов – кривая 1 и 6 образцов – кривая 2;  $\epsilon = 1,25\%$ , морская вода*

Отметим, что испытания 23 образцов длились 645 суток, а 6 образцов – менее 11 суток (см. табл. 3). После статистической обработки методом корреляционного анализа, аналогично описанному выше, были получены данные для подсчета параметров корреляционного уравнения кривой при испытании 6 образцов (табл. 3) и построена прямая 2 частотной зависимости в сравнении с прямой 1, полученной при испытании 23 образцов (см. рис. 4). Координаты точек прямой 2: при частоте 0,01 цикл/мин. точка  $A(3,6947; -2,0000)$ , а при частоте 10 цикл/мин. – точка, центр распределения  $M'(2,3294; -0,5000)$ .

Как видно из рис. 4, расположение кривой 2 лежит в пределах разброса экспериментальных точек кривой 1, т.е. с достаточным уровнем достоверности полученные данные для кривой 2 можно применить и для более низких частот, продлив кривую 2 в область весьма низких частот.

**Выводы.** Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Полученные данные позволяют прогнозировать долговечность исследуемого материала при весьма низких частотах нагружения, не проводя такие дорогостоящие и длительные испытания при этих частотах. Для этого достаточно провести испытания при нескольких (двух-трех) достаточно высоких частотах малоциклового нагружения. Проведя статистическую обработку результатов эксперимента и построив прямую частотной зависимости малоциклового долговечности, можно определить параметры  $A$  и  $K$  уравнения (1). Это позволяет рассчитать малоциклового долговечность исследуемого материала при частотах более низких, чем применяемые при испытаниях.

Таблиця 3

Данные для подсчета параметров корреляционного уравнения прямой 2 (ускоренные испытания)

Сталь марки 15ХН5ДМФ, образцы с надрезом, $\varepsilon = 1,25\%$ морская вода										
№	$\tau$ , мин	$x = Ig \tau$	$v$ , цикл/мин	$y = Ig v$	$\bar{U}^2$	$U = x - \bar{x}$	$U - V$	$V = y - \bar{y}$	$V^2$	$V^2$
1	6,50	0,8129	10,0	1,0000	2,2997	-1,5165	-2,2747	1,5000	2,25	2,25
2	10,00	1,0000	10,0	1,0000	1,7673	-1,3294	-1,9941	1,5000	2,25	2,25
3	12,00	1,0792	10,0	1,0000	1,5630	-1,2502	-1,8753	1,5000	2,25	2,25
4	4565,00	3,6595	0,01	-2,0000	1,7691	1,3301	-1,9951	-1,5000	2,25	2,25
5	4620,00	3,6646	0,01	-2,0000	1,7827	1,3352	-2,0028	-1,5000	2,25	2,25
6	5760,00	3,7604	0,01	-2,0000	2,0477	1,4310	-2,1465	-1,5000	2,25	2,25
$\sum_{i=1}^n =$	14973,50	13,9766		-3,0000	11,2295		-12,2885			13,50

2. Однако следует учитывать, что уравнение (1) справедливо только при усталостном разрушении материала, стойкого против коррозионного растрескивания, в условиях же вызывающих склонность материала к коррозионному растрескиванию при малоцикловом нагружении, применение уравнения (1) возможно только в ограниченном диапазоне частот.

3. Для прогнозирования малоцикловой долговечности материала при весьма низких частотах помимо малоцикловых испытаний с высокой частотой необходимо предварительно дополнительно исследовать склонность материала к коррозионному растрескиванию в рабочей (агрессивной) среде.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чудновский А.Д. Влияние частоты повторных нагружений на сопротивление разрушению конструкционных сталей / А.Д. Чудновский // Сб. «Исследование прочности сталей при циклических нагружениях в упруго-пластической области»: Труды ЦНИИТМАШ. – 1967. – № 109. – С. 109-116.
2. Бродский А.Д. Краткий справочник по математической обработке результатов измерений / А.Д. Бродский, В.Л. Кан. – М.: Гос. изд. Стандартов, 1960. – 168 с.
3. Быков В.А. Пластичность, прочность и разрушение металлических судостроительных материалов / В.А. Быков // Л.: Судостроение, 1974. – 216 с.
4. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде / Г.В. Карпенко: Монография. – М.-К.: Машигиз, 1963. – 187 с.
5. Callame B. Interferese des facteurs phusice-chemigues et biologiques de la corrosion on milien marin / B. Callame // Peintures, pigments, vernis. – 1968. – 44, 10. – P. 602-604.
6. Todd B. Factors in the choice of Materials for Marine Engineering / B. Todd // Transactions of the Marine Engineering. – 1968. – V. 80. – № 6. – P. 161-179.
7. Лагутина А.Г. Изучение коррозии судостроительных материалов в морской воде / А.Г. Лагутина, К.П. Данильченко, О.Ф. Шевченко, В.П. Баранник // Защита металлов. – 1970. – № 1. – Т. 6. – С. 48-51.
8. Кобзарук А.В. Морская коррозия металлов в напряженном состоянии / А.В. Кобзарук: Монография. – Одесса, 2014. – 256 с.
9. Исследование коррозионной и корозионно-механической стойкости судостроительных материалов: Отчет по теме «Резерв 4.4» Физико-механического института АН УССР. – Одесса-Львов. – 1980. – 130 с.

10. Кобзарук А.В. Влияние частоты нагружения на долговечность стали в морской воде при малоцикловой усталости / А.В. Кобзарук // Физико-химическая механика материалов. – № 2. – 1975. – С. 98-100.
11. Кобзарук А.В. Эффект масштаба при малоцикловой усталости в морской воде / А.В. Кобзарук // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Вип. № 11. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 2003. – С. 221-226.
12. Кобзарук А.В. Стационарный электродный потенциал стали в морской воде в зависимости от частоты и формы цикла малоциклового нагружения / А.В. Кобзарук, А.И. Сабуров, Б.В. Смажило // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Вип. № 30. – Одеса: Вид-во ОДМУ, 2010. – С. 177-187.
13. Кобзарук А.В. Исследования сопротивления малоцикловой усталости конструкционной судостроительной стали в зависимости от частоты и формы цикла нагружения / А.В. Кобзарук, А.И. Сабуров, Б.В. Смажило // Вісник ОДМУ: Зб. наук. праць. – Вип. № 47. – Одеса: Вид-во ОДМУ, 2014. – С. 177-187.
14. Карпенко Г.В. Коррозионное растрескивание сталей / Г.В. Карпенко, В.И. Василенко: Монография. – К.: Техника, 1971. – 192 с.
15. Baker H.R. The Effect of some Electrelutes on the stess corrosion cracking of AISI 4340 Steel / H.R. Baker, C.R. Singletery // Corrosion (USA). – 1972. – V. 28. – № 9. – P. 340-344.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2017

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машинознавство» Одеського національного морського університету  
**А.В. Конопльов**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Судноремонт» Одеського національного морського університету  
**В.П. Сторожев**