



УДК 621.791.052:539.431

DOI 10.17073/0368-0797-2024-4-409-416



Оригинальная статья
Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ЗОН СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ X70

А. А. Галкин, Ю. Г. Кабалдин, Ю. С. Мордовина[✉], М. С. Аносов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Россия, 603022, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

✉ ips4@nntu.ru

Аннотация. Широкое применение в области тяжелого машиностроения получили стали класса прочности X70. Одним из наиболее важных вопросов при выборе стали для конструкций является ее поведение при циклических нагрузках. В научной литературе трудно найти описание поведения всех зон сварного соединения при усталости. Поэтому целью данного исследования является определение характеристик усталостной прочности сварных соединений из российского аналога стали S690QL с фиксацией параметров акустической и магнитной дефектоскопии для их применения при диагностике конструкций во время эксплуатации. В качестве объекта исследования были взяты образцы из отечественной стали класса прочности X70. Химический состав определялся с помощью оптико-эмиссионной спектроскопии. Подготовка шлифов для микроструктурного анализа проводилась по стандартной методике с травлением в нитале. Испытание на усталость проводилось на специализированном стенде. Для акустических измерений применяли акустический комплекс АИС НРК-3, в качестве информативного параметра использовался акустический параметр D . Для оценки магнитных характеристик использовался коэрцитиметр МА-412ММ. Оценивались остаточная намагниченность B_r , коэрцитивная сила H_c , отношение H_c/B_r . Наименьшее количество циклов соответствует зоне наплавленного металла. Снижение амплитуды показало значительный разбег в поведении материала в зависимости от зоны соединения. Однако кривые для зоны термического влияния (ЗТВ) и для наплавленного металла практически совпадают. При этом ЗТВ в меньшей степени отличается от основного металла, чем зона наплавленного металла. График акустического параметра по своему виду является обратным по отношению к графику магнитных характеристик. Так, для акустического параметра в зависимости от наработки имеется минимум, а для магнитных характеристик – максимум. Но для обоих графиков экстремумом является точка, соответствующая наработке 0,6.

Ключевые слова: усталость, малоцикловая усталость, сварные соединения, акустический параметр, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, усталость сварных соединений, класс прочности X70

Для цитирования: Галкин А.А., Кабалдин Ю.Г., Мордовина Ю.С., Аносов М.С. Исследование малоцикловой усталости зон сварного соединения стали класса прочности X70. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(4):409–416.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-409-416>

LOW-CYCLE FATIGUE OF WELDED JOINT FROM STEEL OF X70 STRENGTH CLASS

А. А. Galkin, Yu. G. Kabaldin, Yu. S. Mordovina[✉], M. S. Anosov

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (24 Minina Str., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation)

✉ ips4@nntu.ru

Abstract. Steels of X70 strength class are particularly widely used in the field of heavy engineering. One of the most important issues when choosing steel for structures is its behavior under cyclic loads. It is difficult to find a description of the behavior of all zones of the welded joint under fatigue. The purpose of this study was to determine the fatigue characteristics of welded joints made of the Russian analogue of S690QL steel with fixation of acoustic and magnetic parameters for their use in the diagnosis. The objects of the study were the samples from domestic steel of X70 strength class. The chemical composition was determined using optical emission spectrometry. The grinds for microstructural analysis were prepared according to the standard technique with etching in the metal. The fatigue test was carried out on a specialized test bench. The authors used the acoustic system AIS NRK-3 for acoustic measurements and the acoustic parameter D – as an informative parameter. A MA-412MM coercitimeter was applied to evaluate the magnetic characteristics. The following were evaluated: residual magnetization B_r , coercive force H_c , H_c/B_r ratio. The smallest number of cycles corresponds to the deposited metal zone. The decrease in amplitude showed a significant variation in the behavior of the material depending on the junction zone. However, the curves for heat affected zone (HAZ) and the deposited metal are practically the same. HAZ differs to a lesser extent from the base metal than the deposited metal zone. The graph of the acoustic parameter in its form is the reverse of the magnetic characteristics graph.

Thus, there is a minimum for the acoustic parameter, depending on the operating time, and a maximum for the magnetic characteristics. For both graphs, the extremum is the point corresponding to the operating time of 0.6.

Keywords: fatigue, low-cycle fatigue, welded joint, acoustic parameter, coercive force, residual magnetization, fatigue of welded joints, X70 strength class

For citation: Galkin A.A., Kabalدين Yu.G., Mordovina Yu.S., Anosov M.S. Low-cycle fatigue of welded joint from steel of X70 strength class. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(4):409–416. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-4-409-416>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое применение в области производства землеройной техники, грузоподъемных машин и кранов получила высокопрочная сталь с пределом текучести 690 МПа (класс прочности – X70) [1]. Часто под высокопрочными понимают стали с пределом прочности 1800 – 2000 МПа [2; 3]. В конструкциях используются стали, называемые также высокопрочными (в зарубежной литературе – *High Strength Steel* (HSS)), однако их предел прочности начинается от 490 МПа [4; 5].

Данный класс сталей был получен путем комбинирования легирования с применением технологий контролируемой прокатки. К нему относятся: S700MC (стандарт EN 10149-2); S690Q, S690QL, S690QL1 (стандарт EN 10025-6); QStE 690 TM (Германия); Strenx 700MC (компания SSAB); E 690 D (Франция); A514 (AISI, США). В условиях импортозамещения в России были разработаны их аналоги.

Одним из наиболее важных вопросов при выборе стали для конструкций является ее поведение при циклических нагрузках, под воздействием которых развивается усталостное разрушение. Традиционно различают малоцикловую и многоцикловую усталость [6]. В последнее время вводятся также понятия гигацикловой и даже терацикловой усталости (гиперусталостное разрушение). Их различают по количеству рабочих циклов (N), предшествующих разрушению:

- малоцикловая – $N \leq 5 \cdot 10^4$ циклов;
- многоцикловая – $5 \cdot 10^4 < N \leq 10^8$ циклов;
- гигацикловая – $N > 10^8$ циклов [7; 8];
- терацикловая – $N = 10^{10} \dots 10^{12}$ циклов [9].

В работе рассматривается малоцикловая усталость (МЦУ) – это усталость материала, при которой повреждение происходит при упругопластическом деформировании в микрообъеме. Максимальная долговечность до разрушения составляет примерно $N_k = 5 \cdot 10^4$ циклов [10]. Малоцикловое разрушение в машиностроении связано в большинстве случаев со сравнительно редкими, но повторяющимися перегрузками. Данный тип разрушения может встретиться в любых отраслях машиностроения, но особенно часто фиксируется в авиадвигателях, аэрокосмической промышленности, силовых агрегатах автомобильной промышленности и на электростанциях [11; 12].

В основном характеристики сопротивляемости усталости определяются для металла, не подвергну-

того воздействию сварки, либо описывается поведение только одной зоны соединения [13 – 15]. Поэтому вопрос о поведении материала при усталости более остро встает для зон сварных соединений, так как такие исследования представлены в гораздо меньшей степени. Еще сложнее найти информацию по новым маркам материалов, что связано с трудностями при закупке металла для исследования.

Широко известно, что наименее работоспособной областью сварного соединения является или зона термического влияния (ЗТВ) [16; 17], или зона наплавленного металла, который по своему химическому составу может сильно отличаться от свариваемого. Учитывая, что сварка является источником дефектов, возникающих в результате физических и структурных изменений, усталостная прочность сварных соединений ниже, чем у основного материала [18; 19]. Отмечается, что сварной шов при стандартных методах испытаний является наиболее надежным местом сварной конструкции, но именно при испытании на усталость он становится самым уязвимым: характеристики снижаются до 60 % по сравнению с металлом без сварки [20].

Целью настоящего исследования является определение характеристик усталостной прочности сварных соединений из новой отечественной стали (аналога S690QL) с одновременной фиксацией параметров акустической и магнитной дефектоскопии для применения полученных значений при дальнейшей диагностике конструкций из рассматриваемой стали во время эксплуатации.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве объекта исследования выступали сварные образцы из отечественной стали класса прочности X70. Исследуемая сталь – аналог европейской стали S690QL. Ее химический состав и механические свойства, указанные в СТО, представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Для выполнения сварного соединения встык был выбран присадочный материал – сварочная проволока диаметром 1,2 мм ESAB ArisroRod 69 (химический состав, мас. %: С 0,089; Cr 0,26; Mn 1,54; Mo 0,24; Ni 1,23; Si 0,53).

Фактический химический состав исследуемой стали определялся с помощью оптико-эмиссионной спектроскопии на спектрометре ARL 3460.

Таблица 1. Марочный химический состав исследуемой стали (указано максимальное содержание)

Table 1. Chemical composition of the studied steel (maximum content)

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	V	Al
Содержание, %	0,20	0,86	1,80	0,018	0,01	1,00	0,50	1,10	0,30	0,07	0,14	0,05

Таблица 2. Механические свойства проката исследуемых сталей

Table 2. Mechanical properties of the studied rolled steel

Толщина листа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, KCV_{-40} , Дж/см ²
<40 мм	690	770 – 940	14	80,0
≥40 мм				37,5

Подготовка шлифов для микроструктурного анализа проводилась по стандартной методике (шлифование на наждачной бумаге с последующим полированием на войлоке) с травлением в нитале. Для выявления и фиксации изображений микроструктуры использовался микроскоп Альтами MET 1С.

Испытание на усталость проводилось на специализированном стенде (рис. 1, а), который состоит из установки для испытаний на усталостную прочность, аппаратуры регистрации и обработки сигнала. На образец устанавливались датчики акустической эмиссии. Схема образцов для испытаний на усталость показана на рис. 1, б.

Нагружение во время испытания проводилось по схеме консольного изгиба (коэффициент асимметрии цикла $R = -1$) при температуре 20 °С с учетом требований ГОСТ 25.502 – 79. Частота упругопластического циклического нагружения была задана 25 Гц. Амплитуда нагружения (σ_{max}) рассчитывалась исходя из схемы нагружения, размеров образца и механических характеристик материала.

Для акустических измерений применяли акустический комплекс АИС НРК-3. В качестве информативного параметра при применении акустической эмиссии использовался безразмерный параметр D , называемый акустическим параметром и определяемый по формуле

$$D = \frac{c_1 + c_2}{c_3},$$

где c_1, c_2 – скорости распространения сдвиговых упругих волн с поляризацией (направлением колебания отдельных частиц) вдоль оси образца и поперек оси соответственно; c_3 – скорость распространения (задержка) продольной упругой волны [21; 22].

Для оценки магнитных характеристик использовался магнитный анализатор металлов – коэрцитиметр МА-412ММ. В качестве магнитных характеристик оценивались остаточная намагниченность B_r , коэрцитивная сила H_c , отношение H_c/B_r .

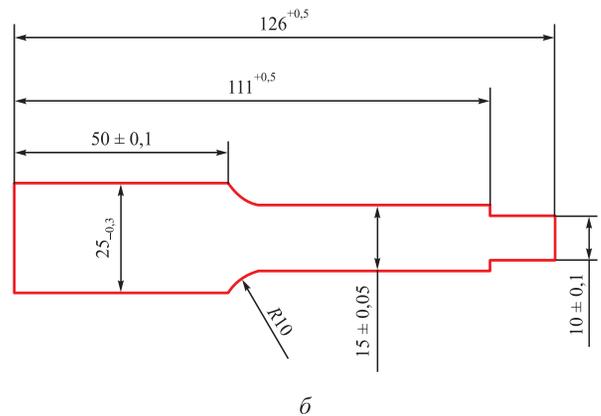
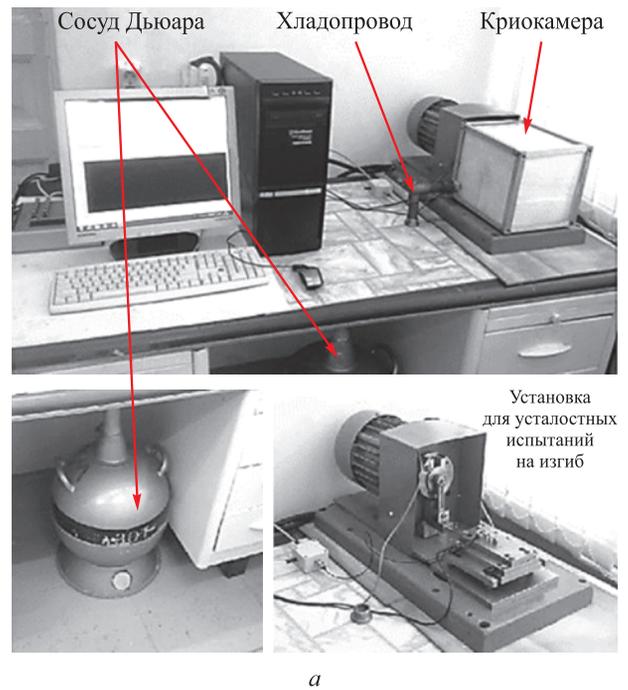


Рис. 1. Испытание на усталость: а – стенд для испытаний образцов; б – схема образца для испытаний

Fig. 1. Fatigue test: а – fatigue test bench; б – diagram of a sample for fatigue test

Таблица 3. Фактический химический состав стали класса прочности X70

Table 3. Actual chemical composition of the steel of X70 strength class

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	V	Al
Содержание, %	0,160	0,340	1,250	0,010	0,0006	0,280	0,220	0,030	0,050	0,020	0,003	0,040

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический анализ показал, что в целом полученный результат соответствует марочному составу стали (табл. 3).

На рис. 2 показаны микроструктуры зон сварного соединения из исследуемой стали. Основной металл

представлен мелкими зернами феррита игольчатой ориентации с включениями сорбита отпуска. Зона термического влияния состоит из четко оформленных зерен феррита с включениями троостосорбита. Средний размер зерна составил 35 мкм. Микроструктура наплавленного металла состоит из феррита и перлита сорбитообразного, сфероидизированного, есть следы бейнита, кристаллы направлены параллельно теплоотводу.

Испытания на МЦУ проводились также на сварных образцах во всех трех зонах сварного соединения. Полученные данные представлены в табл. 4 и показаны в виде графиков на рис. 3. Большинство образцов из

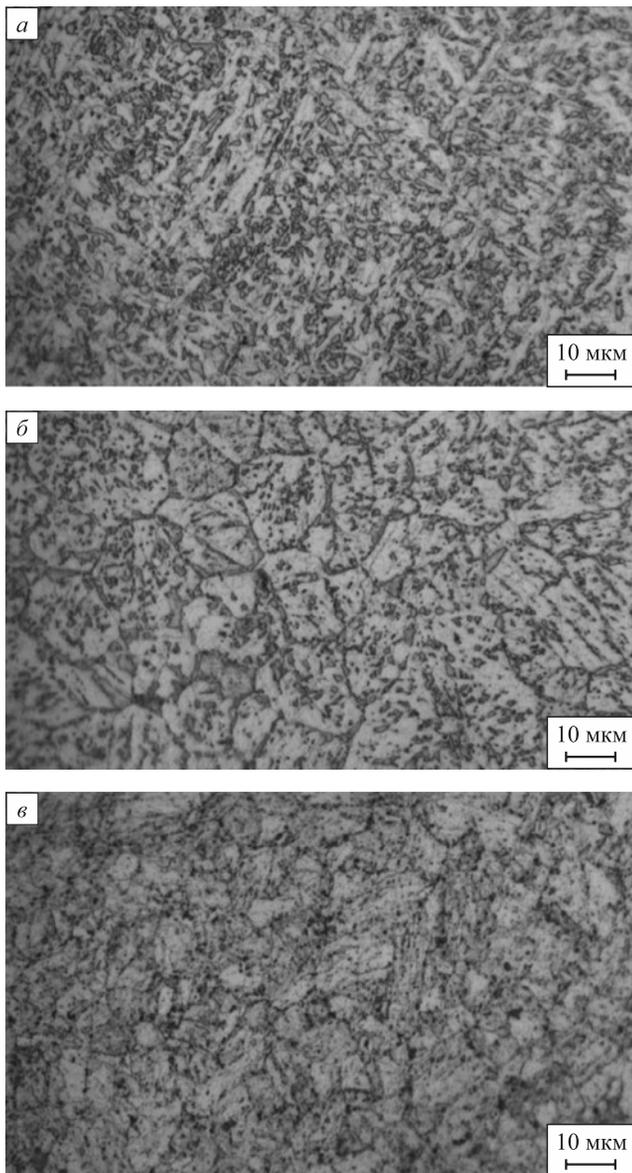


Рис. 2. Микроструктура стыковых сварных соединений: а – наплавленный металл; б – зона термического влияния; в – основной металл

Fig. 2. Microstructure of butt welded joints: а – deposited metal; б – heat affected zone; в – base metal

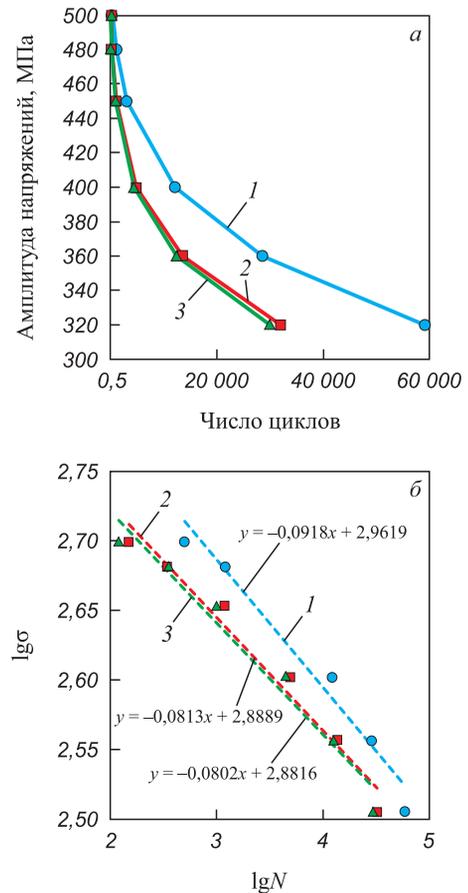


Рис. 3. Кривые Велера для стали S690QL (Россия) в зависимости от испытанной зоны сварного соединения: а – абсолютные координаты; б – логарифмические координаты; 1 – основной металл; 2 – ЗТВ; 3 – наплавленный металл

Fig. 3. Wehler curves for S690QL steel (Russia) depending on the tested welded joint zone: а – absolute coordinates; б – logarithmic coordinates; 1 – base metal; 2 – HAZ; 3 – deposited metal

Таблица 4. Результаты испытаний на МЦУ стали S690QL (Россия)

Table 4. Results of low-cycle fatigue tests of S690QL steel (Russia)

Зона сварного соединения	Напряжение, МПа					
	320	360	400	450	480	500
Основной металл	59 000	28 560	12 200	3150	1200	500
ЗТВ	32 000	13 600	4900	1200	340	150
Наплав- ленный металл	30 000	12 500	4500	1000	350	120

стали S690QL (Россия) при испытании на МЦУ разрушилось в зоне наплавленного металла. Это могло быть вызвано тем, что наплавленный металл отличается от исследуемой стали по химическому составу, в результате чего не обладает теми же механическими свойствами, что и основной металл. Микроструктурная неоднородность также вносит свой вклад: в наплавленном металле есть признаки закалочной структуры, есть ориентированность структурных составляющих, что провоцирует снижение пластичности, а, следовательно, снижает энергетический порог для распространения усталостной трещины.

Тангенс угла наклона прямых на рис. 3, б (–0,0918; –0,0813; –0,0802) соответствует низкоуглеродистым малолегированным сталям ферритно-перлитного класса (например, 09Г2С).

Сравнение стойкости к усталости зон сварных соединений из стали S690QL (Россия) показало следующие результаты.

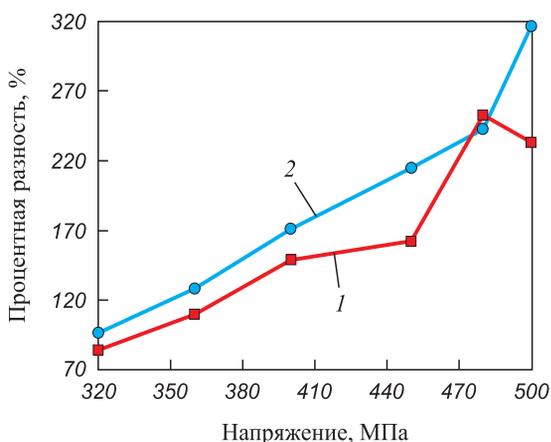


Рис. 4. Процентная разность для зон сварного соединения в сравнении с основным металлом: 1 – ЗТВ; 2 – наплавленный металл

Fig. 4. Percentage difference for welded joint zones in comparison with the base metal: 1 – HAZ; 2 – deposited metal

• Графики усталости для всех зон сварного соединения пересекаются только в области высоких напряжений (порядка 500 МПа). Однако так кажется только из-за масштаба. В действительности при 500 МПа число циклов для основного металла на 230 % больше, чем в ЗТВ, и на 320 % больше, чем в зоне наплавленного металла.

• Дальнейшее снижение амплитуды показывает значительный разбег в поведении материала в зависимости от зоны соединения. Однако кривые для ЗТВ и наплавленного металла практически совпадают (как в абсолютных, так и в логарифмических координатах). Если построить зависимость процентной разности между характеристиками усталости для пар «основной металл – наплавленный металл» и «основной металл – ЗТВ», то получится график, представленный на рис. 4. По нему видно, что ЗТВ в меньшей степени отличается от основного металла, чем зона наплавленного металла. При этом характер изменения процентной разности для зоны наплавленного металла имеет практически линейный вид по сравнению с ЗТВ. Очевидно, что чем больше амплитуда напряжений, тем больше процентная разность для обеих зон.

Для исследования характера изменений параметров ультразвука были дополнительно проведены усталостные испытания с амплитудами напряжений 300, 350 и 450 МПа. Установлено, что наиболее информативной является закономерность изменения акустического параметра *D*. Исследование данного параметра проводили до момента появления магистральной трещины. Полученные зависимости акустического параметра *D* от наработки образца *N/N** (отношение количества циклов, соответствующего данной точке, к количеству циклов, зарегистрированных при растяжении) при исследуемых амплитудах напряжений показаны на рис. 5.

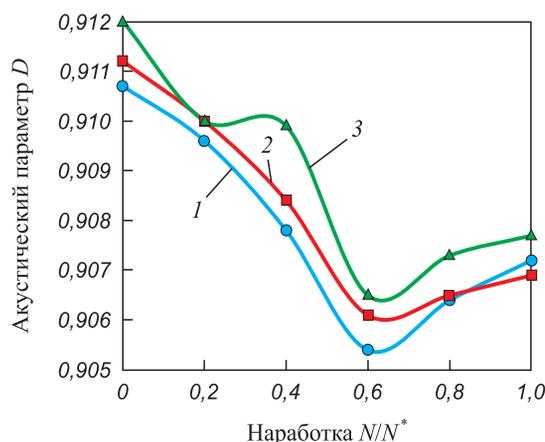


Рис. 5. Зависимость акустического параметра *D* от наработки (*N/N**) для стали S690QL (Россия), МПа: 1 – 300; 2 – 350; 3 – 450

Fig. 5. Dependence of acoustic parameter *D* on operating time (*N/N**) for steel S690QL (Russia) at MPa: 1 – 300; 2 – 350; 3 – 450

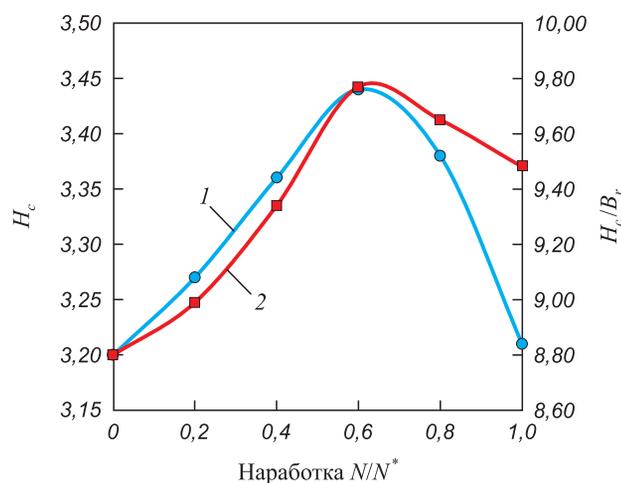


Рис. 6. Зависимость магнитных характеристик от наработки (N/N^*) для стали S690QL (Россия): 1 – H_c ; 2 – H_c/B_r

Fig. 6. Dependence of magnetic characteristics on operating time (N/N^*) for steel S690QL (Russia): 1 – H_c ; 2 – H_c/B_r

Для определения изменений поведения магнитных характеристик стали в зависимости от наработки была выбрана одна амплитуда – 350 МПа. Соответствующие зависимости показаны на рис. 6.

Анализ изменения акустического параметра (рис. 5) показывает, что при наработке стали S690QL (Россия) до 0,6 наблюдается монотонное снижение параметра D (кроме кривой для амплитуды 450 МПа) с последующим незначительным увеличением перед образованием магистральной трещины.

На рис. 6 показаны зависимости изменения магнитных характеристик в процессе усталостного нагружения. В целом зависимости коэрцитивной силы H_c и ее отношения к остаточной намагниченности (H_c/B_r) коррелируют между собой и с изменением акустического параметра. Данная зависимость практически не меняется при изменении амплитуды напряжений. Так, при наработке стали до 0,6 наблюдается монотонное увеличение магнитных характеристик с последующим уменьшением до исходных значений на стадии перед образованием магистральной трещины.

Такой же характер изменения акустического и магнитных параметров со схожими значениями был получен для стали 09Г2С [21], что объясняется химическим составом сталей (обе стали низкоуглеродистые малолегированные) и структурным классом (ферритно-перлитные при охлаждении на воздухе).

Выводы

Проведенные исследования показали, что наиболее слабым местом при усталости для стали класса прочности Х70 является наплавленный металл из-за разницы химического состава сварочной проволоки

и свариваемого металла (особенно по углероду: по марочному составу для стали – не более 0,2 %, для проволоки – не более 0,089 %).

Поведение зон сварных соединений из исследуемой стали имеет одинаковый характер, однако стойкость к усталости наплавленного металла и зоны термического влияния гораздо ниже, чем у основного металла. При этом в большей степени количество циклов при испытании на усталость снижается для наплавленного металла. Отмечается, что чем больше амплитудные напряжения, тем выше процентная разность между рассматриваемой зоной сварного соединения и основным металлом.

Зависимости акустического параметра и магнитных характеристик (коэрцитивной силы, ее отношения к остаточной намагниченности) показали экстремумы на соответствующих графиках в точке, соответствующей наработке 0,6, что говорит об образовании магистральной трещины. Таким образом, основной этап разрушения для стали класса прочности Х70 наступает при выработке ресурса на 60 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Nikolić R., Arsic D., Lazić V. Application of the S690QL class steel in responsible welded structures. *Materials Engineering-Materialove Inzinerstvo*. 2013;20(4):174–183.
- Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники. *Авиационные материалы и технологии*. 2020;(2(59)):3–9. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9>
Yakusheva N.A. High-strength constructional steels for landing gears of perspective products of aircraft equipment. *Aviation Materials and Technologies*. 2020;(2(59)):3–9. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9>
- Каблов Е.Н., Баκραдзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор). *Авиационные материалы и технологии*. 2020;(1(58)):3–11. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11>
Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE “VIAM” (review). *Aviation Materials and Technologies*. 2020;(1(58)):3–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11>
- Ivković D., Adamovic D., Arsic D., Ratkovic N., Mitrović A., Nikolić R. Review of the advanced high-strength steels used in the automotive industry review of advanced high-strength steels and their manufacturing procedures. *Mobility and Vehicle Mechanics*. 2023;49(3):47–64.
- Cadoni E. High and very-high strength steels under harsh conditions of temperature and loading. *Procedia Structural Integrity*. 2023;47:348–353. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.090>
- Murakami Y., Nomoto T., Ueda T. Factors influencing the mechanism of superlong fatigue failure in steels. *Fatigue*

- & *Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1999;22(7):581–590.
<https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.1999.00187.x>
7. Тотай А.В., Федонин О.Н., Хандожко А.В., Петрешин Д.И. Технологическое обеспечение гигацикловой усталости деталей класса валов. *Транспортное машиностроение*. 2023;2023(11):15–24.
<https://doi.org/10.30987/2782-5957-2023-11-15-24>
Totay A.V., Fedonin O.N., Khandozhko A.V., Petreshin D.I. Technological support of gigacycle fatigue of shaft parts. *Transport Engineering*. 2023;(11(23)):15–24. (In Russ.).
<https://doi.org/10.30987/2782-5957-2023-11-15-24>
 8. Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения. *Заводская лаборатория*. 2004;70(4):41–51.
Botvina L.R. Gigacycle fatigue - a new problem of physics and mechanics of destruction. *Zavodskaya laboratoriya*. 2004;70(4):41–51. (In Russ.).
 9. Селезнев М.Н., Мерсон Е.Д. Выявление зон усталостной трещины при гигацикловой усталости стали 42CrMo4 с применением количественной фрактографии. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2019;(3):33–39.
<https://doi.org/10.18323/2073-5073-2019-3-33-39>
Seleznev M.N., Merson E.D. Identification of fatigue crack zones in very high cycle fatigued 42CrMo4 steel with the use of quantitative fractography. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019;(3):33–39. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18323/2073-5073-2019-3-33-39>
 10. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний. *Авиационные материалы и технологии*. 2020;(4(61)):59–70.
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70>
Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviation Materials and Technologies*. 2020;(4(61)):59–70. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70>
 11. Rémy L. Low cycle fatigue of alloys in hot section components: progress in life assessment. *Procedia Structural Integrity*. 2023;14:3–10.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.002>
 12. Salehnasab B., Hashem-Sharifi S. Low cycle fatigue behavior and life prediction of a directionally solidified alloy. *Journal of Design Against Fatigue*. 2024;2(1):1–10.
<https://doi.org/10.62676/ygye8n63>
 13. Zhu Z., Qianshuo F., Wang B., Zheng W., Yu Y. High-cycle fatigue performance of the heat-affected zone of Q370qENH weathering bridge steel. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2024;36(4):17056.
<https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17056>
 14. Grönlund K., Ahola A., Riski J., Pesonen T., Lipiäinen K., Björk T. Overload and variable amplitude load effects on the fatigue strength of welded joints. *Welding in the World*. 2023;68:411–425.
<https://doi.org/10.1007/s40194-023-01642-z>
 15. Tang Z., Cai Z., Wu J. Influence of element segregation at grain boundary of heat affected zone on low-cycle fatigue property of weldment. *Journal of Mechanical Engineering*. 2015;51(14):78–85.
<https://doi.org/10.3901/JME.2015.14.078>
 16. Васечкин М.А., Егоров С.В., Коломенский А.Б., Чертов Е.Д. Временное сопротивление разрыву сварных конструкций, изготовленных из отечественных и импортных материалов. *Вестник ВГУИТ*. 2015;(4(66)):61–65.
Vasechkin M.A., Egorov S.V., Kolomenskii A.B., Chertov E.D. Temporary tensile strength of welded structures made from domestic and foreign materials. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015;(4(66)):61–65. (In Russ.).
 17. Лещик С.Д., Жуковский В.Е., Ношчик Р.А. Влияние принудительного охлаждения сварного шва и зоны термического влияния в процессе сварки на характеристики сварного соединения. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя б. Тэхніка*. 2023;13(1):45–55.
Leshchik S.D., Zhukovski V.E., Noshchik R.A. Influence of forced cooling of the weld and heat-affected zone during welding on the welded joint characteristics. *Vesnik Hrodzenskaha Dziarzhavnaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seriya b. Tekhnika*. 2023;13(1):45–55. (In Russ.).
 18. Song W., Liu X., Razavi N. Fatigue assessment of steel load-carrying cruciform welded joints by means of local approaches. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2018;41(12):2598–2613.
<https://doi.org/10.1111/ffe.12870>
 19. Placzek D., Maćkowiak P., Boroński D. fatigue analysis of welded joints using a thin-walled Al/Fe explosive welded transition joints. *Materials*. 2023;16(18):6259.
<https://doi.org/10.3390/ma16186259>
 20. Гридасова Е.А., Веретковский А.В., Сафарьянц А.А., Леонтьев Л.Б. Исследования усталостных свойств сварных соединений в условиях высокочастотного нагружения. *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2019;(2(39)):3–11.
<https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-1>
Gridasova E., Veretkovskiy A., Safariants A. Review of research of fatigue properties of welded joints under high-frequency loading. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2019;(2(39)):3–11. (In Russ.).
<https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-2-1>
 21. Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А. Неразрушающий контроль накопления усталостных повреждений в стали Св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023;21(2):47–53.
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53>
Anosov M.S., Ryabov D.A., Chernigin M.A., Solovyov A.A. Non-destructive testing of the accumulation of fatigue damage in steel Sv-09G2S produced by wire arc additive manufacturing. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2023;21(2):47–53. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-47-53>
 22. Хлыбов А.А., Рябов Д.А., Соловьев А.А., Аносов М.С., Матвеев Ю.И. Влияние пластической деформации на структуру и свойства стали 20ХГСА, полученной методом аддитивного электродугового выращивания. *Науч-*

ные проблемы водного транспорта. 2023;(75):95–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.37890/jwt.vi75.382>

Khlybov A.A., Ryabov D.A., Solovyov A.A., Anosov M.S., Matveev Yu.I. The effect of plastic deformation on the struc-

ture and properties of 20CrMnSi steel obtained by additive electric arc cultivation. *Russian Journal of Water Transport*. 2023;(75):95–107. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37890/jwt.vi75.382>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Андрей Александрович Галкин, аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

E-mail: galkinnnov@mail.ru

Юрий Георгиевич Кабалдин, д.т.н., профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

ORCID: 0000-0003-4300-6659

E-mail: uru.40@mail.ru

Юлия Сергеевна Мордовина, инженер кафедры «Технология и оборудование машиностроения», аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

E-mail: ips4@nntu.ru

Максим Сергеевич Аносов, к.т.н., доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

E-mail: anosov-maksim@list.ru

Andrei A. Galkin, Postgraduate of the Chair “Technology and Equipment Engineering”, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

E-mail: galkinnnov@mail.ru

Yurii G. Kabaldin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Technology and Equipment Engineering”, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

ORCID: 0000-0003-4300-6659

E-mail: uru.40@mail.ru

Yuliya S. Mordovina, Engineer of the Chair “Technology and Equipment Engineering”, Postgraduate, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

E-mail: ips4@nntu.ru

Maksim S. Anosov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Technology and Equipment Engineering”, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University

E-mail: anosov-maksim@list.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. А. Галкин – подготовка всех образцов, проведение испытаний на усталость, обобщение данных.

Ю. Г. Кабалдин – составление плана экспериментального исследования, научное руководство.

Ю. С. Мордовина – металлографический анализ, оформление и редактирование статьи.

М. С. Аносов – постановка задач исследования, проведение дефектоскопии.

A. A. Galkin – preparation of all samples, conducting fatigue tests, summarizing data.

Yu. G. Kabaldin – drawing up an experimental research plan, scientific guidance.

Yu. S. Mordovina – metallographic analysis, design and editing of the article.

M. S. Anosov – setting research goals, conducting flaw detection.

Поступила в редакцию 27.02.2024

После доработки 11.03.2024

Принята к публикации 19.06.2024

Received 27.02.2024

Revised 11.03.2024

Accepted 19.06.2024