

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кусков, К.В. Сравнение усталостных характеристик образцов различной геометрии из стали 09Г2С / К.В. Кусков, К.В. Сызранцева // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 24–30. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.03

Please cite this article in English as **(Perm Polytech Style)**:

Kuskov K.V., Syzrantseva K.V. Comparison of fatigue characteristics of samples of different geometry from steel 09Mn2S. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 2, pp. 24-30. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.03

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 26, № 2, 2024
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.03

УДК 620.169.1

К.В. Кусков, К.В. Сызранцева

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

**СРАВНЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ
РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ИЗ СТАЛИ 09Г2С**

Многие детали и конструкции испытывают циклические нагрузки в процессе эксплуатации, что приводит к их поломкам при нагрузках значительно ниже допустимых уровней напряжений. Одним из способов оценки вероятности разрушения является проведение испытаний на усталость. Данное исследование посвящено сравнению влияния конструктивных особенностей образцов, выполненных из стали 09Г2С, на усталостные характеристики. Рассмотрены четыре типа изделий с различными значениями теоретических коэффициентов концентрации напряжений. Коэффициенты рассчитаны методом конечных элементов в программном обеспечении ANSYS Mechanical APDL с приложением растягивающей нагрузки 6375 Н. Результаты математического моделирования представлены в виде эпюр напряжений. Испытания выполнены на сервогидравлической машине ТРМЦ 250С-1 при растяжении/сжатии, асимметрия цикла составила $R=-1$, закон нагружения – синусоидальный. Амплитуда равна 80 % от физического предела текучести стали 09Г2С. Образцы для испытаний выполнены из единого прутка длиной 6000 мм на станке с ЧПУ. Результаты испытаний показывают, что при использовании образцов с меньшими коэффициентами концентрации напряжений происходит прирост количества циклов до разрушения, при этом генеральная дисперсия разброса значений снижается. Анализ мест зарождения трещины и мест наибольших значений эквивалентных напряжений для образцов №1, 3 и 4 позволяет утверждать, что расхождение с математическими вычислениями в программном обеспечении ANSYS Mechanical APDL незначительно. Микроструктурный анализ образцов до и после испытаний выявил незначительный рост ферритного зерна, что в полной мере соответствует закономерностям, установленным другими исследователями.

Ключевые слова: сталь 09Г2С, усталость, теоретический коэффициент концентрации напряжений, математическое моделирование, микроструктура, разрушение, число циклов до разрушения, напряжения, образцы.

K.V. Kuskov, K.V. Syzrantseva

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

COMPARISON OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF SAMPLES OF DIFFERENT GEOMETRY FROM STEEL 09MN2S

Many parts and structures experience cyclic loads during operation, which leads to their failure under loads significantly below the allowable stress levels. One way to assess the probability of failure is to perform fatigue tests. This work is devoted to comparing the effect of design features of specimens made of steel 09Mn2S on fatigue characteristics. The article considers four types of products with different values of theoretical stress concentration factors. The coefficients are calculated by the finite element method in the ANSYS Mechanical APDL software with the application of a tensile load of 6375 N. The results of mathematical modeling are presented in the form of stress diagrams. The tests were carried out on a servo-hydraulic machine TRMC 250C-1 in tension-compression, the cycle asymmetry was $R=-1$, the loading law was sinusoidal. The amplitude is equal to 80 % of the physical yield strength of steel 09Mn2S. Test specimens are made from a single bar 6000 mm long on a CNC machine. The test results show that when using samples with lower stress concentration factors, the number of cycles to failure increases, while the general dispersion of the spread of values decreases. An analysis of the places of crack initiation and the places of the highest values of equivalent stresses for samples No. 1, 3 and 4 allows us to state that the discrepancy with mathematical calculations in the ANSYS Mechanical APDL software is insignificant. Microstructural analysis of the samples before and after testing revealed a slight growth of ferrite grain, which fully corresponds to the patterns established by other researchers.

Keywords: steel 09G2S, fatigue, theoretical stress concentration factor, mathematical modeling, microstructure, failure, number of cycles to failure, stresses, samples.

Введение

Многие детали и конструкции испытывают циклические нагрузки в процессе эксплуатации, что приводит к их поломкам при нагрузках значительно ниже допустимых уровней напряжений. Одним из способов оценки вероятности разрушения является проведение испытаний на усталость. Существует огромное количество факторов, влияющих на способность материалов противостоять усталостным повреждениям, такие как шероховатость поверхности [1–3], частота приложения нагрузки [4–6], асимметрия цикла [7–9], и др. Особенно стоит уделить внимание концентраторам напряжений, таким как конструктивные (особенности геометрии) и специальные, которые наносятся на определенные участки для оценки чувствительности материала к концентрации напряжений [10]. Числовым описанием геометрии образцов, а именно мест с повышенной концентрацией напряжений, служит теоретический коэффициент концентрации напряжений (ТККН). Данный коэффициент, как известно, показывает, насколько максимальные напряжения на участках изменения геометрической формы (сужения, переходы, утолщения) изделия выше, чем номинальные напряжения в местах, где такие изменения отсутствуют [11]. В течение последних 5 лет основная часть работ посвящена анализу влияния концентраторов напряжений в виде специально нанесенных надрезов [12; 13]. При этом практически отсутствуют работы, направленные на изучение особенности геометрии образцов, с учетом того фактора, что изготовление образцов может осуществляться с высокой точностью на станках с ЧПУ.

Методика исследований

В качестве исследуемого материала выбрана конструкционная сталь 09Г2С. Образцы представлены на рис. 1. При изготовлении образцов за основу был принят ГОСТ 25.502-79.

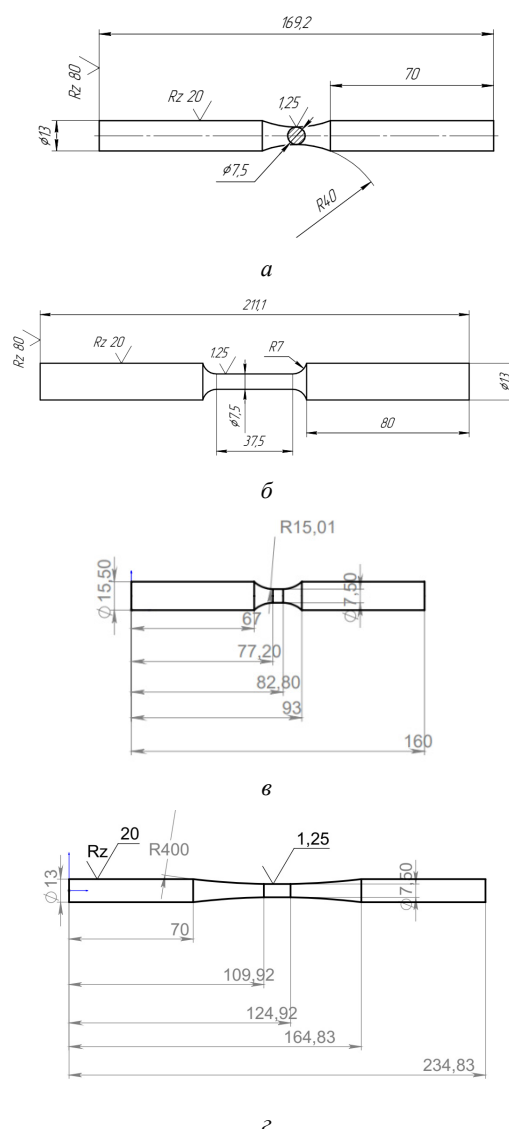


Рис. 1. Образцы с различной геометрией: а – образец № 1 (тип I по ГОСТ 25.502-79); б – образец № 2 (тип II по ГОСТ 25.502-79); в – образец № 3; г – образец № 4

Образцы изготовлены из единого прутка длиной 6000 мм на токарно-обрабатывающем центре САК 50135di с ЧПУ при постоянной подаче смазочно-охлаждающей жидкости. После изготовления все образцы подвергались дополнительной обработке наждачной бумагой до требуемой шероховатости, которая была измерена на приборе Hommel-Etamic W5-Set. Средние значения по всем образцам составили $Ra=0,232$ мкм, что соответствует ГОСТ 25.502-79.

Основной причиной выбора стали 09Г2С является ее распространенность при изготовлении различных трубопроводных систем [14–16]. Перед проведением испытаний на усталость были определены основные механические характеристики испытуемой стали (табл. 1) на образцах: тип III по ГОСТ 1497-84 с диаметром рабочей части 8 мм.

Таблица 1

Механические свойства исследуемой стали 09Г2С

Параметр	Предел текучести физический σ_t , МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное сужение ψ , %	Относительное удлинение δ_{10} , %
Полученные данные	361	622	60,9	21,4
ГОСТ 19281-2014	Не менее 295	Не менее 430	Не менее 55	Не менее 21

Как видно из данных табл. 1, материал соответствует основным характеристикам нормативной документации.

На рис. 2 представлена структура материала до усталостных испытаний. Видно, что структура является ферритно-перлитной с баллом зерна 8 по ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна».

Теоретический коэффициент концентрации напряжений был определен методом конечных элементов с использованием ПО ANSYS Mechanical APDL. Вычисления проводились с использованием следующих граничных условий:

1) жесткая заделка по всем степеням свободы для наружных поверхностей левого цилиндрического участка образца – имитация неподвижного захвата испытательной машины;

2) нагружение правого цилиндрического участка моделировалось при помощи средства COUPLING – имитация подвижного захвата испытательной машины;

3) расчет проводили на симметрично разрезанном вдоль образце – экономия вычислительных ресурсов;

4) нагрузка составляла 6375 Н – симметрично разрезанный образец;

5) качество сетки определялось в соответствии с рекомендациями Дж. Кроуфорда, по узловым и элементным результатам эквивалентных по Мизесу напряжений [17].

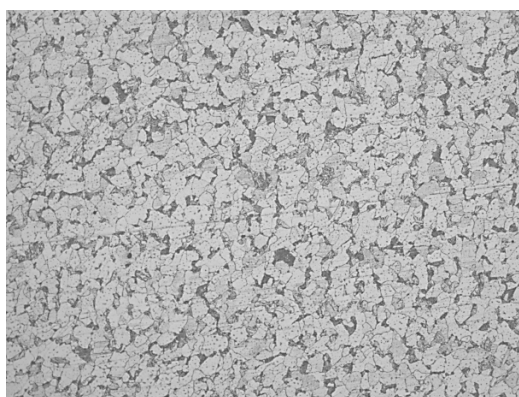


Рис. 2. Микроструктура стали 09Г2С до испытаний (x200)

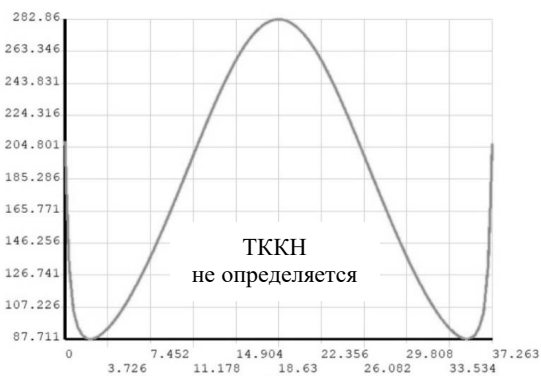
Представленные эпюры напряжений для всех типов образцов (см. рис. 2), получены с использованием команды PATH OPERATIONS. Из данных рис. 2 видно, что для образца №1 ТККН по известной формуле [18] однозначно определить невозможно ввиду того, что отсутствует участок с постоянными напряжениями.

Испытания проводились на сервогидравлической универсальной машине ТРМЦ 250С-1. Коэффициент асимметрии цикла $R=-1$, закон нагружения синусоидальный, вид нагружения – растяжение/сжатие. Амплитуда нагружения для всех образцов составила 80 % от предела текучести физического и была равна 288,8 МПа. Каждая серия испытаний состояла из 3 образцов. Частота нагружения 10 Гц.

Результаты и их обсуждение

Представленные данные (табл. 2) позволяют сделать вывод, что образцы с меньшими значениями значения ТККН выдерживают большее количество циклов до разрушения. Особое внимание стоит обратить на образец №1, у которого определение числового значения для концентратора напряжений является сложной задачей, но полученные данные позволяют сделать предположение, что для образцов корсетного типа ТККН близок к 1.

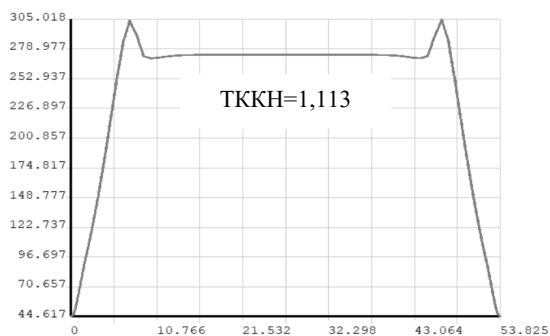
Эквивалентные
напряжения, МПа



Расстояние от захвата образца, мм

a

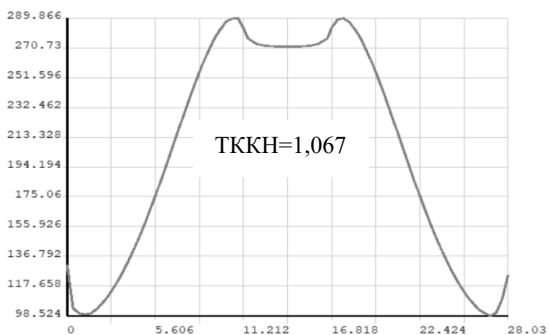
Эквивалентные
напряжения, МПа



Расстояние от захвата образца, мм

б

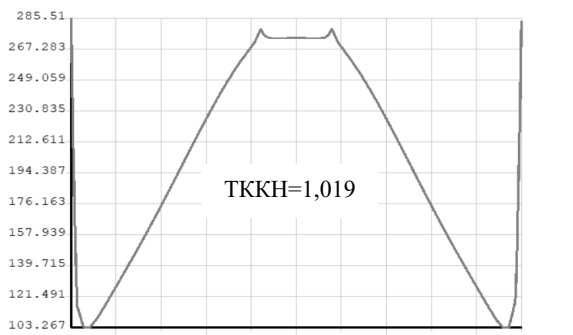
Эквивалентные
напряжения, МПа



Расстояние от захвата образца, мм

в

Эквивалентные
напряжения, МПа



Расстояние от захвата образца, мм

г

Рис. 2. Эпюры напряжений: *a* – образец №1; *б* – образец №2; *в* – образец №3; *г* – образец №4

Средние значения циклов до разрушения и дисперсия

Тип образца	ТККН, ед.	Среднее значение циклов до разрушения, ед.	Генеральная дисперсия, ед.
Образец №1	Не определяется	2 942 098,5	17 816,5
Образец №2	1,113	1 695 666	268 682
Образец №3	1,067	2 219 281,5	118 747,5
Образец №4	1,019	2 357 579,5	78 989,5

Образцы цилиндрической формы без прямолинейного участка имеют существенный недостаток, а именно сложность установки различных датчиков для проведения неразрушающего контроля [19–23]. Ранее в статье [24] было указано, что различие составило 37,2 % между количеством циклов до разрушения для стали 20 при разности ТККН в 0,06 ед. Для стали 09Г2С при разнице ТККН в 0,046 различие составляет 23,6 %. Дальнейшее уменьшение концентратора напряжений с 1,067 до 1,019 дает изменение в количестве циклов до разрушения на 5,87 %.

Дополнительно были изучены места образования первой визуально различимой трещины на образцах и сделаны следующие наблюдения:

1) для образцов №1 разрушение происходило на расстоянии $\pm 0,1$ мм от центра образца;

2) для образцов №2 разрушение происходило на криволинейном участке на расстоянии 19–20 мм от центра образца;

3) для образцов №3 разрушение происходило по цилиндрической части на расстоянии 2,2–2,5 мм от центра образца;

4) для образцов №4 разрушение происходило по цилиндрической части на расстоянии 4,1–4,3 мм от центра образца.

Таким образом, анализ мест зарождения трещины и мест наибольших значений эквивалентных напряжений (см. рис. 2) для образцов №1, 3 и 4 позволяет утверждать, что расхождение с математическими вычислениями в ПО ANSYS незначительно и составляет не более 0,3 мм.

Стоит отметить, что образцы №3 и 4 имеют меньший разброс мест начала разрушения. Использование таких образцов может повысить точность усталостных испытаний, по сравнению со стандартными образцами типа II по ГОСТ 25.502-79.

После испытаний был проведен микроструктурный анализ материала, взятого на расстоянии 0,25 мм от места разрушения. На рис. 3 представлена микроструктура стали 09Г2С после разрушения на примере образца №4. Видно, что происходит незначительный рост ферритного зерна относительно структуры, изображенной на рис. 2, что полностью коррелирует с ранее проведенными исследованиями [25].

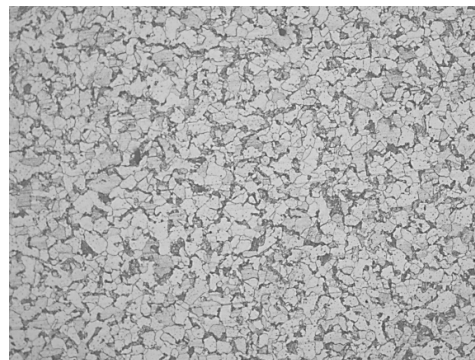


Рис. 3. Микроструктура стали 09Г2С после испытаний (x200)

Заключение

1. Использование образцов с меньшими значениями ТККН, чем для стандартных образцов, приводит к уменьшению генеральной дисперсии циклов до разрушения образца вплоть до 70 %, что повышает точность определения предела выносливости.

2. При уменьшении числового значения теоретического концентратора напряжений с 1,113 до 1,067 разница в количестве циклов до достижения 23,6 %, но при дальнейшем уменьшении ТККН с 1,067 до 1,019 количество циклов до разрушения изменяется на 5,87 %.

Библиографический список

1. Копылов, Ю.Р. Анализ работ по влиянию параметров качества упрочненного поверхностного слоя изделий с ограниченным запасом прочности на его сопротивление усталости / Ю.Р. Копылов, А.Н. Скляренко, А.В. Глазков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15, № 3. – С 117–121.
2. Кургузова О.А. Поверхностная обработка как способ повышения усталостной прочности / О.А. Кургузова, Е.С. Чернова, Д.И. Козинкин // Наука и военная безопасность. – 2023. – № 2 (33). – С 42–46.
3. Бычков, Н.В. Выбор метода финишной обработки для повышения усталостной прочности шатунов двигателя внутреннего сгорания / Бычков Н.В. // Механика XXI века. – 2016. – № 15. – С. 155–158.
4. Мильников, В.В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография / В.В. Мильников, О.Б. Кондрашкин, Д.И. Шегулов. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2018. – 178 с.

5. Влияние частоты нагрузки при низкочастотном и высокочастотном методах испытаний на усталостные характеристики низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей (обзор) / Е.А. Гридасова, К.Ю. Дренина, А.С. Дренин, М.А. Серeda // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2020. – № 1(42). – С. 3–12.

6. Нгуен Нгок, Т. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости материалов / Т. Нгуен Нгок, В.М. Капралов, Г.С. Коленко // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 68–77.

7. Савкин А.Н. Анализ продолжительности роста усталостных трещин низколегированной стали при различном характере внешнего блочного и случайного нагружения / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – № 23 (150). – С. 67–72.

8. Габов, И.Г. Сопротивление многоциклового усталости титановых и никелевых сплавов с учетом асимметрии цикла нагружения / И.Г. Габов, А.Н. Котельников // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 9-3. – С. 423–429.

9. Фигура, К.Н. Влияние асимметрии цикла нагружения на усталостную прочность трубопроводов в условиях коррозионного повреждения / К.Н. Фигура // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2020. – № 2 (43). – С. 13–22.

10. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. Strength calculating and testing. Methods of fatigue strength behavior calculation: межгосударственный стандарт. – Дата введения 1983-07-01 / Международный совет по стандартизации, метрологии, сертификации. – Изд. официальное. – М.: Стандартинформ, 2005. – 55 с.

11. Терентьев, В.Ф. Усталость металлов / В.Ф. Терентьев, С.А. Кораблева. – М.: Наука. – 2015. – 484 с.

12. Сазанов, В.П. Исследование закономерностей остановки усталостной трещины в цилиндрическом образце с надрезом / В.П. Сазанов // Вестник Самарского государственного университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 160–169.

13. Гиндуллина, К.Д. Исследование малоциклового коррозионной усталости стали / К.Д. Гиндуллина, О.А. Насибуллина // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 118–122.

14. Шляпников П.А. Определение предельной амплитуды цикла упроченных деталей с концентраторами напряжений с сжимающими средними напряжениями / П.А. Шляпников // Труды МАИ. – 2020. – № 114. – С. 7.

15. Павлов, С.Б. Оценка влияния растворенного водорода на пределы применения стали 09Г2С в водородсодержащих средах / С.Б. Павлов, В.А. Маликов // Проблемы современной науки и образования. – 2014. – № 6 (24). – С. 22–24.

16. Гордиенко, В.Е. Мониторинг технического состояния сварных несущих металлических конструкций дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин / В.Е. Гордиенко // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 206–209.

17. Crawford, J. Evaluating Mesh Density / J. Crawford // Ansys Solutions. – 1999. – Vol. 1, no. 2. – P. 12–16.

18. Петерсон, Р.Е. (Peterson R.E.) Коэффициенты концентрации напряжений = Stress concentration factors: пер. с англ. / Р.Е. Петерсон; пер. И.А. Нечая, И.П. Сухарева, Б.Н. Ушакова. – М.: Мир, 1977. – 302 с.

19. Иляхинский, А.В. Влияние малоциклового усталости металла на результаты ультразвуковой диагностики / А.В. Иляхинский, В.М. Родошкин, А.А. Хлыбов // Транспортные системы. – 2016. – № 2. – С. 46–50.

20. Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения / К.Р. Муратов, В.Ф. Новиков, Д.Ф. Нерадовский, Р.Х. Казаков // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 1. – С. 19–25.

21. Оценка возможностей использования фрактальной размерности и информационной энтропии упругих волн для оценки поврежденности стали 20 при малоциклового усталости / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, М.С. Аносов, Д.А. Рябов, Д.А. Шатагин, А.В. Киселев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 17–25.

22. Хлыбов, А.А. Исследование особенностей накопления повреждений в стали 12Х18Н10Т при пониженных температурах с использованием неразрушающих методов контроля / А.А. Хлыбов, М.С. Аносов, Д.А. Рябов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 15–20.

23. Изменение коэрцитивной силы при усталостных испытаниях образцов из стали 40Х / К.В. Вакуленко, И.Б. Казак, Г.Я. Безлюдько, В.Г. Ярещенко, Е.И. Елкина // Проблемы машиностроения. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 66–71.

24. Кусков, К.В. Определение влияния геометрии образцов для испытаний на сопротивление усталости / К.В. Кусков, К.В. Сызранцева // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 6 (277). – С. 65–72.

25. Vakulenko, I.A. The influence mechanism of ferrite grain size on strength stress at the fatigue of low-carbon steel / I.A. Vakulenko, S.V. Proydak // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 1 (49). – С. 97–104.

References

1. Kopylov Iu.R., Skliarenko A.N., Glazkov A.V. Analiz rabot po vliianiiu parametrov kachestva uprochnennogo poverkhnostnogo sloia izdelii s ogranichenym zapasom prochnosti na ego soprotivlenie ustalosti [Analysis of works on the influence of quality parameters of hardened surface layer of products with limited safety margin on its fatigue resistance]. *Uprochniashchie tekhnologii i pokrytiia*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 117-121.

2. Kurguzova O.A., Chernova E.S., Kozinkin D.I. Poverkhnostnaia obrabotka kak sposob povysheniia ustalostnoi prochnosti [Surface treatment as a way to improve fatigue resistance]. *Nauka i voennaiia bezopasnost'*, 2023, no. 2 (33), pp. 42-46.

3. Bychkov N.V. Vybora metoda finishnoi obrabotki dlia povysheniia ustalostnoi prochnosti shatunov dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia [Selection of finishing method to improve fatigue resistance of internal combustion engine connecting rods]. *Mekhaniki XXI veku*, 2016, no. 15, pp. 155-158.

4. Myl'nikov V.V., Kondrashkin O.B., Shetulov D.I. Tsiklicheskaia prochnost' i dolgovechnost' konstruktivnykh materialov: monografiia [Cyclic Strength and Durability of Structural Materials: Monograph]. *Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, EBS ASV*, 2018, 178 p. ISBN 978-5-528-00289-7.

5. Gridasova E.A., Drenina K.Iu., Drenin A.S., Sereda Vliianie M.A. Vliianie chastoty nagruzki pri nizkochastotnom i vysokochastotnom metodakh ispytaniia na ustalostnye kharakteristiki izkouglerodistykh i vysokouglerodistykh staley (obzor) [Effect of loading frequency in low-frequency and high-frequency test methods on fatigue performance of co-carbon and high-carbon steels (review)]. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU*, 2020, no. 1(42), pp. 3-12.

6. Nguen Ngok T., Kapralov V.M., Kolen'ko G.S. Vliianie chastot nagruzheniia na soprotivlenie ustalosti materialov [Influence of loading frequencies on fatigue resistance of materials]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 68-77.

7. Savkin A.N., Andronik A.V., Badikov K.A. Analiz prodolzhitel'nosti rosta ustalostnykh treshchin nizkolegirovannoi stali pri razlichnom kharaktere vneshnego blochnogo i sluchainogo nagruzheniia [Analysis of fatigue crack growth duration of low-alloy steel under different nature of external block and random loading]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 23 (150), pp. 67-72.

8. Gabov I.G., Kotel'nikov A.N. Soprotivlenie mnogotsiklovoi ustalosti titanovykh i nikelovykh splavov s uchedom asimmetrii tsikla nagruzheniia [Multicycle fatigue resistance of titanium and nickel alloys taking into account asymmetry of the loading cycle]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2015, no. 9-3, pp. 423-429.

9. Figura K.N. Vliianie asimmetrii tsikla nagruzheniia na ustalostnuu prochnost' truboprovodov v usloviakh korrozionnogo povrezhdeniia [Influence of loading cycle asymmetry on fatigue resistance of pipelines under corrosion damage conditions]. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU*, 2020, no. 2 (43), pp. 13-22.

10. GOST 25.504-82. Raschety i ispytaniia na prochnost'. Metody rascheta kharakteristik soprotivleniia ustalosti. Strength calculating and testing. Methods of fatigue strength behavior calculation.: Mezhdunarodnyi sovet po standartizatsii, metrologii, sertifikatsii. Moskva: Standartinform, 2005, 55 p.

11. Terent'ev V.F., Korableva S.A. Ustalost' metallov [Metal fatigue]. Moscow: Nauka, 2015, 484 p.

12. Sazanov V.P. Issledovanie zakonomernosti ostanovki ustalostnoi treshchiny v tsilindricheskom obratse s nadrezom [Study of fatigue crack stopping patterns in a notched cylindrical specimen]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 160-169.

13. Gindullina K.D., Nasibullina O.A. Issledovanie malotsiklovoi korrozionnoi ustalosti stali [Investigation of low-cycle corrosion fatigue of steel]. *Neftegazovoe delo*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 118-122.

14. Shliapnikov P.A. Opredelenie predel'noi amplitudy tsikla uprochnennykh detalei s kontsentratorami napriazhenii s szhimaiushchimi srednimi napriazheniiami [Determination of the limiting amplitude of the cycle of hardened parts with stress concentrators with compressive mean stresses]. *Trudy MAI*, 2020, no. 114, p. 7.

15. Pavlov S.B., Malikov V.A. Otsenka vliianiia rastvorennoogo vodoroda na predely primeneniia stali 09G2S v vodorodsoderzhashchikh sredakh [Evaluation of the effect of dissolved hydrogen on the limits of 09G2S steel in hydrogen-containing environments]. *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniia*, 2014, no. 6 (24), pp. 22-24.

16. Gordienko V.E. Monitoring tekhnicheskogo sostoiianiia svarnykh nesushchikh metallicheskiikh konstrukttsii dorozhnykh, stroitel'nykh i pod'emno-transportnykh mashin [Monitoring of technical condition of welded load-bearing metal structures of road, construction and lifting and transportation machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2012, no. 2 (31), pp. 206-209.

17. John Crawford. Evaluating Mesh Density. *Ansyz Solutions*, 1999, vol. 1, no. 2, pp. 12 – 16.

18. Peterson P.E. (Peterson R.E.) Koeffitsienty kontsentratsii napriazhenii [Stress concentration factors]. Ed. I. A. Nechaia, I. P. Sukhareva, B. N. Ushakova. Moskva: Mir, 1977, 302 p.

19. Iliakhinskii A.V., Rodiushkin V.M., Khlybov A.A. Vliianie malotsiklovoi ustalosti metalla na rezul'taty ul'trazvukovoi diagnostiki [Influence of low-cycle metal fatigue on the results of ultrasonic diagnostics]. *Transportnye sistemy*, 2016, no. 2, pp. 46-50.

20. Muratov K.R., Novikov V.F., Neradovskii D.F., Kazakov R.Kh. Magnitoprugoe razmagnichivanie stali pod estviiem tsiklicheskogo nagruzheniia [Magnetoelastic demagnetization of steel under the action of cyclic loading]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2018, vol. 119, no. 1, pp. 19–25.

21. Khlybov A.A., Kabaldin Iu.G., Anosov M.S., Riabov D.A., Shatagin D.A., Kiselev A.V. Otsenka vozmozh-

nostei ispol'zovaniia fraktal'noi razmernosti i informatsionnoi entropii uprugikh voln dlia otsenki povrezhdennosti stali 20 pri malotsiklovoi ustalosti [Assessment of possibilities of using fractal dimensionality and information entropy of elastic waves for damage assessment of steel 20 during low-cycle fatigue]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 17-25.

22. Khlybov A.A., Anosov M.S., Riabov D.A. Issledovanie osobennosti nakopleniia povrezhdenii v stali 12Kh18N10T pri ponizhennykh temperaturakh s ispol'zovaniem nerazrushaiushchikh metodov kontroliia [Study of peculiarities of damage accumulation in 12X18H10T steel at reduced temperatures with the use of nondestructive testing methods]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2020. – T, vol. 8, no. 2, pp. 15-20.

23. Vakulenko K.V., Kazak I.B., Bezliud'ko G.Ia., Iareshchenko V.G., Elkina E.I. Izmenenie koertsitivnoi sily pri ustalostnykh ispytaniakh obratsov iz stali 40Kh. [Change of coercive force during fatigue testing of 40Cr steel specimens]. *Problemy mashinostroeniia*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 66-71.

24. Kuskov K.V., Syzrantseva K.V. Opredelenie vliianiia geometrii obratsov dlia ispytaniia na soprotivlenie ustalosti [Determination of the influence of test specimen geometry on fatigue resistance]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2023, no. 6 (277), pp. 65-72.

25. Vakulenko I.A., Proydak S.V. The influence mechanism of ferrite grain size on strength stress at the fatigue of low-carbon steel. *Nauka ta progres transport*, 2014, no. 1 (49), pp. 97-104.

Поступила: 29.09.2023

Одобрена: 20.12.2023

Принята к публикации: 13.05.2024

Об авторах

Кусков Константин Викторович (Тюмень, Российская Федерация) – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вибрационного и гидродинамического моделирования, ФГБОУ ВО Тюменский индустриальный университет (Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского 38, e-mail: kuskovkv@tyuiu.ru).

Сызранцева Ксения Владимировна (Тюмень, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры кибернетических систем, ФГБОУ ВО Тюменский индустриальный университет (Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского 38, e-mail: syzrantsevkv@tyuiu.ru).

About the authors

Kuskov Konstantin Viktorovich (Tyumen, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Vibration and Hydrodynamic Modeling, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation; e-mail: kuskovkv@tyuiu.ru).

Syzrantseva Ksenia Vladimirovna (Tyumen, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cybernetic Systems, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen» (38, Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation; e-mail: syzrantsevkv@tyuiu.ru).

Финансирование. Авторы благодарят за поддержку данного исследования национальный проект «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FEWN-2021-0012).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.