Механика деформируемого твердого тел

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-1>
УДК 620.178.4

Е.А. Гридасова, К.Ю. Дренина, А.С. Дренин, М.А. Середа

ГРИДАСОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА – к.т.н., доцент кафедры,
SPIN: 6372-3652, ResearcherID: P-5761-2014, ScopusID: 56698297600, e-mail: olvin@list.ru
ДРЕНИНА КРИСТИНА ЮРЬЕВНА – аспирант, e-mail: catswild@mail.ru
СЕРЕДА МАРИЯ АНДРЕЕВНА – магистрант, e-mail: sereda-maha@mail.ru
Кафедра сварочного производства Инженерной школы
ДРЕНИН АРТЕМ СЕРГЕЕВИЧ – аспирант, e-mail: art-drenin@yandex.ru
Кафедра технологий промышленного производства Инженерной школы
Дальневосточный федеральный университет
Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Влияние частоты нагрузки при низкочастотном и высокочастотном методах испытаний на усталостные характеристики низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей (обзор)

Аннотация: Во многих отраслях промышленности, таких как космостроение, авиастроение, кораблестроение, автомобилестроение, железные дороги и т.д., срок службы некоторых конструкций и их элементов превышает многоцикловую область и достигает гигацикловой области. Стандартные (низкочастотные) методики усталостных испытаний не могут обеспечить получение требуемых экспериментальных характеристик долговечности в области гигациклов, поэтому метод высокочастотных (ультразвуковых) испытаний в настоящее время стал одним из наиболее применяемых, так как дает возможность сократить временной интервал проведения испытаний в десятки раз. Разработка высокочастотного метода – актуальная задача: в настоящее время не существует общепризнанного стандарта проведения высокочастотных испытаний материалов. В то же время необходимо найти ответ на вопрос о сопоставимости результатов, полученных при высокочастотных и стандартных низкочастотных испытаниях. Представленный нами обзор исследований усталостных характеристик низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей позволит выявить факторы, влияющие на сопоставимость исследуемых методов.

Ключевые слова: высокочастотные испытания, гигацикловая усталость, низкочастотные испытания, высокоуглеродистые стали, низкоуглеродистые стали, чугуны.

Введение

В последние десятилетия элементы конструкций, работа которых связана с большим количеством циклов нагружения (10^9 и выше – гигацикловая область), стали актуальными объектами исследований, а применяемый в них метод ускоренных ультразвуковых испытаний все чаще используется для удобства и экономии времени [3, 4, 10, 20]. Для получения необходимых характеристик долговечности при стандартных экспериментальных методах в гигацикловой области потребуется несколько лет непрерывной работы испытательного обо-

рудования, однако с применением ускоренного ультразвукового метода временной диапазон можно сократить до нескольких месяцев. Гидравлические высокоскоростные машины с рабочей частотой 300 Гц достигают область гигациклов уже за 1 год, нерезонансные испытательные машины с частотой работы до 1 кГц сокращают этот период до полугода, однако все эти способы по-прежнему трудозатратны. Поэтому единственной возможностью получения характеристик долговечности в области 10^9 циклов является использование высокочастотных ультразвуковых машин [12, 18]. Однако для большинства металлических материалов влияние нагружения с высокой частотой не исследовано. Для материалов, таких как сплавы Ti [11, 19] или высокопрочные стали, влияние частоты не проявляется, однако в случае низкоуглеродистых сталей выявлена значительная разница усталостной прочности между ультразвуковыми и обычными методами [5, 9, 15].

В данном обзоре мы полагаем, что, сравнив низкочастотные и высокочастотные методы испытаний, сможем определить влияющие на их сопоставимость факторы. Изложенные результаты позволят выявить предпочтительное использование указанных методов для оценки усталостной прочности конструкций в авиастроении, кораблестроении, автомобилестроении, железнодорожного транспорта и др.

Низкоуглеродистые стали: влияние частоты нагружения

В [21] проведена серия испытаний механизма влияния частоты нагрузки на усталостную прочность при частотах 10 Гц и 20 кГц с коэффициентом симметричности цикла $R = -1$. Исследования проводились для низкоуглеродистой стали JIS S38C, используемой при изготовлении элементов подвижного состава Shinkansen (высокоскоростных поездов Японии). Химический состав, %: C 0,35; Si 0,15; Mn 0,60; P 0,030; S 0,035; Cr 1,45. Механические свойства: предел текучести $\sigma_T = 374$ МПа; предел прочности $\sigma_B = 603$ МПа. Высокочастотное нагружение (20 кГц) проводилось с прерывистой нагрузкой и дополнительным охлаждением сжатым воздухом. На рис. 1 представлены графики S–N для каждого способа нагружения и пределы усталости σ_w .

Рис. 1. Графики S–N (здесь и далее:

stress amplitude – амплитуда напряжений, number of cycle to failure – количество циклов до разрушения) низкоуглеродистой стали JIS S38C:

- растяжение–сжатие с частотой 20 кГц, $\sigma_w = 370$ МПа;
- растяжение–сжатие с частотой 10 Гц, $\sigma_w = 250$ МПа [21].

Проведенные исследования свидетельствуют, что показатель предела усталости, полученный при ультразвуковых ускоренных испытаниях (20 кГц), на 40% выше, чем при стандартных (10 Гц), что объясняется влиянием частоты нагрузки. Полученные результаты между собой не сопоставимы, метод ультразвуковых ускоренных исследований (20 кГц) не

может быть использован как продолжение стандартного метода испытаний (10 Гц) в гига-цикловой области для рассматриваемой стали.

Материал в [8] представляет собой горячекатаный пруток из низкоуглеродистой стали JIS S15C. Химический состав, %: С 0,15; Si 0,21; Mn 0,40; Cu 0,02; Ni 0,02; Cr 0,15. Механические свойства: предел текучести $\sigma_T = 273$ МПа; предел прочности $\sigma_B = 441$ МПа. Испытания на усталостную прочность проводились при симметричном цикле нагружения ($R = -1$) с пятью разными частотами: 20 кГц (с охлаждением сжатым воздухом и прерывистым циклом нагружения); 140 Гц (с охлаждением сжатым воздухом); 20 Гц, 2 Гц и 0,2 Гц. Графики S–N на соответствующих частотах представлены на рис. 2.

Рис. 2. Диаграммы S–N стали S15C при различных частотах нагружения [8].

Результаты исследований свидетельствуют о значительной разнице усталостной прочности между ультразвуковой и обычной частотами нагрузки менее 140 Гц. Предел усталости в случае ультразвуковых испытаний составляет 250 МПа, тогда как другие частоты показывают значения ниже 200 МПа. Кроме того, некоторые различия обнаружены в диапазоне частот нагружения от 0,2 до 140 Гц: 187 МПа (2 Гц), 192 МПа (20 Гц), 200 МПа (140 Гц). Представленные экспериментальные данные позволяют сделать вывод: усталостные свойства низкоуглеродистой стали S15C зависят от частоты нагружения.

В [1, 2] использовались низкоуглеродистые стали C15E, C45E и среднеуглеродистая C60E с химическим составом, %: C15E (С 0,12–0,18; Si 0,4; Mn 0,3–0,6; P 0,035; S 0,035); C45E (С 0,42–0,5; Si 0,4; Mn 0,5–0,8; P 0,035; S 0,035); C60E (С 0,57–0,65; Si 0,4; Mn 0,6–0,9; P 0,035; S 0,035). C45E и C60E отжигали при 900 °С в атмосфере аргона и охлаждали со скоростью охлаждения 10 °С / мин. C15E отжигали при 950 °С в среде аргона и охлаждали со скоростью охлаждения 10 °С / мин. Эта термическая обработка привела к феррито-перлитной микроструктуре для всех трех сталей: C15E (94,56% феррита и 5,44% перлита); C45E (49,97% феррита и 50,03% перлита); C60E (10,28% феррита и 89,72% перлита). На рисунках 3–5 показаны результаты усталостных испытаний при частотах 20 кГц и 110 Гц.

Как свидетельствуют результаты (рисунки 3–5), усталостные характеристики исследуемых сталей зависят от частоты нагружения (20 кГц и 110 Гц). Предел усталости составляет:

сталь C15E (20 кГц) – 280 МПа; (110 Гц) – 175 МПа;
сталь C45E: 320 МПа (20 кГц); (110 Гц) – 220 МПа;
сталь C60E 375 МПа (20 кГц); (110 Гц) – 325 МПа.

Рис. 3. Диаграмма S–N (для рисунков 3–5 источник [2]:
 $\Delta\sigma/2$ – амплитуда напряжений, N_f – количество циклов до разрушения) стали C15E:
 * – частота нагружения 20кГц; $\square$ – частота нагружения 110 Гц.

Рис. 4. Диаграмма S–N стали C45E:
 $\blacktriangledown$ – частота нагружения 20кГц; $\square$ – частота нагружения 110 Гц.

Рис. 5. Диаграмма S–N стали C60E:
 $\blacksquare$ – частота нагружения 20кГц; $\square$ – частота нагружения 110 Гц.

Кроме того, заметна тенденция к уменьшению разницы между двумя исследуемыми методами нагружения с повышением содержания углерода, поэтому в случае низкоуглеродистых сталей метод высокочастотных испытаний не согласуется со стандартным методом, однако с повышением содержания углерода сопоставимость методов возможна.

Материал, исследованный в [6, 7], – низкоуглеродистая аустенитная нержавеющая сталь марки 316L. Химический состав, %: С 0,04; Cr 17,5; Mo 2,45; Ni 12,99; Mn 1,62. Испытания на усталость проводились при частоте 140 и 20 кГц с предварительным отжигом в растворе при 1070 °С и последующей закалкой водой, что привело к гомогенной микроструктуре с дислокациями, случайно распределенными в зернах со средним диаметром 30 мкм. Результаты усталостных испытаний, проведенных со сталью 316L, показаны на рис. 6. Так же как и в предыдущих исследованиях, очевидна значительная разница между усталостными характеристиками: предел усталости, полученный ультразвуковым методом (20 кГц), на 30% выше, чем при стандартном методе испытаний (140 Гц), что обусловлено влиянием частоты нагрузки и делает невозможным сопоставление двух данных методов.

Рис. 6. Диаграмма S–N стали AISI316L:

Δ – частота нагружения 20кГц; ▲ – частота нагружения 140 Гц [7].

Высокоуглеродистые стали: влияние частоты нагружения

В работе [13] исследовались усталостные характеристики высокоуглеродистой стали при низкочастотных (95 Гц) и высокочастотных (20 кГц) испытаниях с коэффициентом напряжений $R = -1$. Образцы изготавливались из отожжённого материала высокопрочной подшипниковой стали GCr15 с химическим составом, %: C 0,99; Si 0,25; Mn 0,30; P 0,013; S 0,005; Cr 1,45; Cu 0,10; Ni 0,06; Mo 0,02. Все испытания на усталость проводились в открытой среде при комнатной температуре в режиме растяжение–сжатие. Диаграмма S–N стали GCr15 показана на рис. 7. Полученные данные по двум режимам нагружения (низкочастотном и высокочастотном) лежат в одном числовом диапазоне, т.е. имеют одинаковые значения усталостных напряжений, это означает, что влияние частоты на усталостную прочность исследуемой стали очень мало, причиной может являться повышенное по сравнению с низкоуглеродистыми сталями содержание углерода. Однако кривые усталости демонстрируют непрерывную тенденцию к снижению и отсутствие общепринятого предела долговечности.

Рис. 7. Диаграмма S–N стали GCr15:

Δ, ▲ – частота нагружения 20кГц; □, ■ – частота нагружения 95 Гц [13].

В работах [14, 23] были проведены испытания на усталость для двух групп образцов (с разной температурой термической обработки – tempering temperature T.T.) из высокоуглеродистой хромсодержащей стали (GCr15), %: C 1,01; Cr 1,45; Mn 0,35; Si 0,28; P 0,015; S 0,01; основа Fe. Образцы изготавливались из отожженного прутка, далее нагревались при 845 °C в течение 2 ч в вакууме, затем закаливались в масле и выдерживались в течение 2,5 ч в вакууме при 150 и 300 °C. Испытания проводились при частотах 52,5 Гц (методом кручения – rotating bending R.B.) и 20 кГц (ультразвуковой метод – UL) с $R = -1$. На рисунках 8, 9 представлены кривые S–N: как показывают эти графики, усталостная прочность при частоте 52,5 Гц находится в одном диапазоне с усталостными характеристиками, полученными при ультразвуковом нагружении (20 кГц), что позволяет сделать вывод о том, что влияние частоты на уста-

лостную прочность исследуемой стали очень мало, и что причиной может являться повышенное содержание углерода. Метод ультразвукового исследования (20 кГц) может быть использован как продолжение стандартного метода испытаний (52,5 Гц) в гигацикловой области.

Рис. 8. Диаграмма S–N стали GCr15 при температуре термической обработки tempering temperature (T.T.) 150 °C:
maximum stress – максимальные напряжения; number of cycle to failure – количество циклов до разрушения; σ_b – предел прочности при растяжении; Δ , $\blacktriangle$ rotating bending (R.B.) – частота нагружения 52,5 Гц; $\circ$, $\bullet$ ultrasonic (UL) – частота нагружения 20 кГц [23].

Рис. 9. Диаграмма S–N стали GCr15 при температуре термической обработки tempering temperature (T.T.) 300 °C:
maximum stress – максимальные напряжения; number of cycle to failure – количество циклов до разрушения; σ_b – предел прочности при растяжении; Δ , $\blacktriangle$ rotating bending (R.B.) – частота нагружения 52,5 Гц; $\circ$, $\bullet$ ultrasonic (UL) – частота нагружения 20 кГц [23].

Исследование [17] направлено на получение усталостных свойств высокоуглеродистых подшипниковых сталей JIS SUJ2, %: (C 1,01; Si 0,23; Mn 0,36; P 0,012; S 0,007; Cr 1,45; Cu 0,06; Ni 0,04; и Mo 0,02;), NF 100C6 (C 1,03; Si 0,242; Mn 0,339; S 0,008; Cr 1,46; Ni 0,147; Mo 0,032) при симметричном циклическом напряжении $R = -1$ с разными частотами: 20 кГц, 30 кГц и 35 Гц. На рис. 10 представлен график зависимости S–N исследуемых сталей, согласно которому можно сделать вывод: при схожем химическом составе, термической обработке и обработке поверхности исследуемых образцов значения усталостной долговечности при 10^6 циклов (35 Гц), в интервале 10^6 – 10^9 циклов (20 кГц) и области гигациклов (10^{10} и выше) хорошо согласовываются, что обуславливает сопоставимость методов низкочастотных и высокочастотных испытаний. Сложно сказать, полностью ли отсутствует частотный эффект, но если он и есть, то очень мал. Поэтому ультразвуковой метод испытаний является наиболее эффективным способом получения предела усталости в гигацикловой области.

Рис. 10. Результаты испытаний на усталостную долговечность подшипниковой стали AISI-SAE 52100 и NF 100C6 ($\sigma_{\max}$ – амплитуда напряжений, N Cycles – количество циклов до разрушения):
 □ – JIS SUJ2 smooth specimen, 20 kHz, R = -1 (шлифованные образцы стали JIS SUJ2 при частоте 20 кГц и симметричном цикле нагружения); ■ – NF100C6* smooth specimen, 20 kHz, R = -1 (шлифованные образцы стали 100C6 при частоте 20 кГц и симметричном цикле нагружения); ○ – NF100C6* smooth specimen, 30 kHz, R = -1 (шлифованные образцы стали 100C6 при частоте 30 кГц и симметричном цикле нагружения); ● – NF100C6*, 35 Hz, R = -1 (образцы стали 100C6 при частоте 35 Гц и симметричном цикле нагружения); △ – NF100C6** smooth specimen, 20 kHz, R = -1 (шлифованные образцы стали 100C6 при частоте 20 кГц и симметричном цикле нагружения). Стрелками обозначены образцы, которые не разрушились при заданном напряжении и отработанном количестве циклов [17].

Чугуны: влияние частоты нагружения

Помимо высокоуглеродистых сталей интерес также представляют чугуны. Чугуны в основном используются в компонентах автомобильных двигателей благодаря сочетанию высокой прочности и пластичности для изготовления коленчатых валов, шатунов, рычагов подвески, зубчатых колес и т.д. Поэтому исследование их усталостных свойств и механизма поведения в гигацикловой области необходимо для существенного повышения надежности и безопасности конструкций. В работе [22] были проведены испытания на усталость чугуна марки GS51, %: C 3,65; Si 2,49; Mn 0,5; Cu 0,7; Mg 0,04 при высокочастотном (20 кГц) и низкочастотном (35 Гц и 25 Гц) нагружениях с коэффициентом симметрии R = -1.

По результатам экспериментальных исследований (рис. 11) можно сделать вывод о том, что при значениях 35 Гц и 20 кГц влияние частоты не установлено: данные хорошо согласованы, что обуславливает сопоставимость методов низкочастотных и высокочастотных испытаний, следовательно, метод ультразвукового исследования (20 кГц) может быть использован как продолжение стандартного метода испытаний (35 Гц) в гигацикловой области.

Рис. 11. Результаты испытаний на усталостную долговечность чугуна GS51 (S_{mx} – амплитуда напряжений, Life/cycle – количество циклов до разрушения):
 ○ – частота нагружения 35 Гц; ● – частота нагружения 20 кГц; ● – частота нагружения 20 кГц без охлаждения. Стрелками обозначены образцы, которые не разрушились при заданном напряжении и отработанном количестве циклов [22].

На рис. 12 отражена усталостная долговечность чугуна с химическим составом, %: С 3,45; Si 3,21; Mn 0,13; Cu 0,024; Mg 0,031; Ti 0,043; Cr 0,02; S 0,13; Ni 0,59; P 0,019; Mo 0,013 при высокочастотном (20 кГц) и низкочастотном (25 Гц) методах нагружения с коэффициентом симметрии $R = -1$ [16]. Как свидетельствуют приведенные на рисунке результаты, данные при исследуемых частотах нагружения совпадают, что обуславливает сопоставимость этих методов.

Рис. 12. Результаты испытаний на усталостную долговечность чугуна ($\sigma_{\max}$ – амплитуда напряжений, N_f – количество циклов до разрушения):

■ – частота нагружения 20 кГц; □ – частота нагружения 25 Гц. Стрелками обозначены образцы, которые не разрушились при заданном напряжении и отработанном количестве циклов [16].

В данной работе изучалось влияние частоты нагрузки при стандартном низкочастотном (до 150 Гц) и высокочастотном (20 кГц, 35 кГц) методах испытаний на усталостные характеристики низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей. Очевидна (и это подтверждают представленные экспериментальные данные) сильная зависимость механических свойств низкоуглеродистых сталей от частоты нагружения: с ее увеличением исследуемые характеристики повышаются, и при высокочастотном методе разница достигает 30–40%. Для среднеуглеродистых сталей заметна тенденция к уменьшению выявленной разницы, а для высокоуглеродистых сталей данные полностью согласуются, что дает возможность использования ультразвукового ускоренного метода в области гигациклов. Изложенные результаты позволяют выявить предпочтительное использование указанных методов для оценки усталостной прочности конструкций в авиастроении, кораблестроении, автомобилестроении, железнодорожного транспорта и др.

Вклад авторов в статью: Е.А. Гридасова – оформление статьи, обработка результатов найденных источников, перевод найденных источников; К.Ю. Дренина – перевод источников, оформление; А.С. Дренин и М.А. Середа – поиск зарубежных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bach J., Möller J., Göken M., Bitzek E., Höppel H. On the Transition from Plastic Deformation to Crack Initiation in the High- and Very High-Cycle Fatigue Regimes in Plain Carbon Steels. *International J. of Fatigue*. 2016(93);2:281–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.003>
2. Bach J., Göken M., Höppel H. Fatigue of low alloyed carbon steels in the HCF/VHCF regimes. *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles. Experimental Techniques – Mechanisms – Modeling and Fatigue Life Assessment*. 2018, p. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24531-3>
3. Balle F., Backe D. Very high cycle fatigue of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide at ultrasonic frequencies. *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles. Experimental Techniques – Mechanisms – Modeling and Fatigue Life Assessment*. 2018, p. 441–461. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-658-24531-3_20 – 15.01.2020

4. Bathias C., Paul C. Paris. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. Marcel Dekker, 270 Madison Avenue, NY 10016, USA. 2005. URL: <http://en.bookfi.net/book/610955> –15.01.2020.
5. Furuya Y., Matsuoka S., Abe T., Yamaguchi K. Gigacycle fatigue properties for high-strength low-alloy steel at 100 Hz, 600 Hz, and 20 kHz. *Scripta Materialia*. 2002(46);2:157–162. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01213-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01213-1)
6. Grigorescu A., Hilgendorff P., Zimmermann M., Fritzen C., Christ H. Cyclic deformation behavior of austenitic Cr-Ni-steels in the VHCF regime: Part I – Experimental study. *International J. of Fatigue*. 2016(93);2:250–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.005>
7. Grigorescu A., Hilgendorff P.M., Zimmermann M., Fritzen C.P., Christ H.J. Fatigue behaviour of austenitic stainless steels in the VHCF regime. *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles: Experimental Techniques – Mechanisms – Modeling and Fatigue Life Assessment*, Springer Spektrum. 2018, p. 49–71. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-24531-3_3
8. Guennec B., Akira Ueno, Tatsuo Sakai, Masahiro Takanashi, Yu Itabashi. Effect of the loading frequency on fatigue properties of JIS S15C low carbon steel and some discussions based on micro-plasticity behavior. *International J. of Fatigue*. 2014(66):29–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.03.005>
9. Hu Y., Sun C., Xie J., Hong Y. Effects of Loading Frequency and Loading Type on High-Cycle and Very-High-Cycle Fatigue of a High-Strength Steel. *Materials*. 2018(11);8:1456. DOI: 10.3390/ma11081456
10. Illgen A., Baaske M., Ballani F., Weidner A., Biermann H. Influence of ceramic particles and fibre reinforcement in metal-matrix-composites on the VHCF behaviour. Part I: Experimental investigations of fatigue and damage behavior. *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles. Experimental Techniques – Mechanisms – Modeling and Fatigue Life Assessment*. 2018, p. 295–316. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24531-3>
11. Janecek M., Novy F., Harcuba P., Strasky J., Trsko L., Mhaede M., Wagner L. The Very High Cycle Fatigue Behaviour of Ti6Al4V Alloy. *Proceedings of the International Symposium on Physics of Materials*. 2015(128);4:497–502. DOI: 10.12693/APhysPolA.128.497
12. Jeddi D., Palin-Luc T. A review about the effects of structural and operational factors on the gigacycle fatigue of steels. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2018(41):969–990. DOI: doi:10.1111/ffe.12779
13. Li W., Sakai T., Li Q., Lu L., Wang P. Effect of loading type on fatigue properties of high strength bearing steel in very high cycle regime. *Materials Science and Engineering A* 528. 2011, p. 5044–5052. DOI: doi:10.1016/j.msea.2011.03.020
14. Liu X., Sun C., Hong Y. Crack initiation characteristics and fatigue property of a high-strength steel in VHCF regime under different stress ratios. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016(35);10:88–97. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.35.11
15. Luo Zefua, Cui Shimingb, Wu Yanzengc, Wang Qingyuand. Super Long Life Fatigue Properties of Rail Steel U71Mn and U75V. *Advanced Materials Research*. 2013(690):1753–1756. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.1753>
16. Marines I., Bin X., Bathias C. An understanding of very high cycle fatigue of metals. I. Marines et al. *International J. of Fatigue*. 2003(25):1101–1107. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123-\(03\)00147-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123-(03)00147-6)
17. Marines I., Dominguez G., Baudry G., Vittori J., Rathery S., Doucet J., Bathias C. Ultrasonic fatigue tests on bearing steel AISI-SAE 52100 at frequency of 20 and 30 kHz. *International J. of Fatigue*. 2003(25):1037–1046. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00161-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00161-0)
18. Mayer H. Recent developments in ultrasonic fatigue. *Fatigue Fracture Engineering Materials and Structure*. 2016(39):3–29. URL: <https://usslide.net/document/mayer-2016-fatigue-fracture-of-engineering-materials-structures-1-fatigue-material-fracture> –15.01.2020
19. Nu Yan, Xin Zhu, Donggui Han, Fang Liu., Yonghua Yu. Very High Cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Alloy. *Advances in Engineering Research. Conference: 4th Annual International Conference on Material Engineering and Application (ICMEA 2017)*. 2018(146):129–132. DOI: <https://doi.org/10.2991/icmea-17.2018.30>
20. Ritz F., Beck T., Kovacs S. Fatigue behavior of X10CrNiMoV12-2-2 under the influence of mean loads and stress concentration factors in the very high cycle fatigue regime. *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles: Experimental Techniques – Mechanisms – Modeling and Fatigue Life Assessment*, Springer Spektrum. 2018, p. 253–272. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-24531-3_12

21. Setowaki S., Ichikawa Y., Nonaka I. Effect of frequency on high cycle fatigue strength of railway axle steel. Proceedings of the fifth international conference on very high cycle fatigue VHCF-5. 2011, p. 153–158. URL: <https://www.researchgate.net/publication/261471487> –15.01.2020.
22. Xue H., Bayraktar E., Bathias C. Damage initiation mechanism of a nodular cast iron under the very high cycle fatigue regime. International J. of Computational Materials Science and Surface Engineering. 2007(1);6:635–649. DOI: 10.1504/IJCMSSE.2007.017920
23. Zhao A., Xie J., Sun C., Lei Z., Hong Y. Effects of strength level and loading frequency on very-high-cycle fatigue behavior for a bearing steel. International Journal of Fatigue. 2012(38):46–56. DOI: doi:10.1016/j.ijfatigue.2011.11.014

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 1/42
Mechanics of Deformable Solids

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-1>

Gridasova E., Drenina K., Drenin A., Sereda M.

EKATERINA GRIDASOVA, Candidat of Engineering Sciences, Associate Professor,
 SPIN: 6372-3652, ResearcherID: P-5761-2014, ScopusID: 56698297600,
 e-mail: olvin@list.ru

KRISTINA DRENINA, Postgraduate, e-mail: catswild@mail.ru

MARIYA SEREDA, MS Student, e-mail: sereda-maha@mail.ru

Department of Welding Engineering, School of Engineering

ARTEM DRENIN, Postgraduate, e-mail: art-drenin@yandex.ru

Department of Industrial Production Technologies, School of Engineering

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Influence of load frequency in low-frequency and high-frequency test methods on fatigue characteristics of low-carbon and high-carbon steels (review)

Abstract: In many industries, such as space engineering, aircraft construction, shipbuilding, automotive, railways, etc. the service life of particular structures and their elements exceeds high-cycle range and reaches the giga-cycle range. Standard (low-frequency) methods of fatigue tests cannot provide the required experimental characteristics of durability in giga-cycle range; therefore, the method of high-frequency (ultrasound) tests has now become one of the most applied since it provides the possibility for reduction of testing time intervals by tens of times. The development of high-frequency method is an urgent task, since at the time being there is no universally recognized standard for conducting high-frequency testing of materials. At the same time, it is necessary to find solution for the problem of comparability of the results obtained in high-frequency and standard low-frequency tests. This review of studies of fatigue characteristics of low-carbon and high-carbon steels reveals factors that affect the comparability of the studied methods.

Keywords: high-frequency tests, very high cycle fatigue (VHCF), low-frequency tests, high-carbon, low-carbon steels, cast irons.

REFERENCES

For the list of references, see the previous page.