

DOI: 10.18721/JEST.25205
УДК 620.178

Т. Нгуен Нгок, В.М. Капралов, Г.С. Коленько

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТ НАГРУЖЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Влияние частоты нагружения на предел выносливости, долговечность и циклическую прочность металлов и сплавов в области высоких значений частот зависит от некоторых факторов: уровня напряжения, изменение напряжения, способа нагружения, структуры материалов. При увеличении скоростей и мощностей двигателей и энергомашин все большее значение имеет усталостная прочность деталей и узлов. При работе детали подвержены воздействию высокочастотного циклического нагружения, а ресурс и надежность их работы в большинстве случаев определяются усталостной прочностью, поэтому возникает необходимость проведения усталостных испытаний в широком интервале частот нагружения. В общем случае частота приложения нагрузки неоднозначно влияет на сопротивление усталости материалов, поэтому разные материалы в различных областях усталостного разрушения имеют различия в своей реакции на изменение частоты нагружения.

Ключевые слова: высокая частота нагружения, сопротивление усталости, прочность, предел выносливости, долговечность.

Ссылка при цитировании:

Т. Нгуен Нгок, В.М. Капралов, Г.С. Коленько. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости материалов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 68–77. DOI: 10.18721/JEST.25205.

T. Nguyen Ngoc, V.M. Kapralov, S.G. Kolenko

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

EFFECT OF LOADING FREQUENCIES ON FATIGUE RESISTANCE OF MATERIALS

The influence of the loading frequency on the endurance limit, durability and cyclic strength of metals and alloys in the high frequency range depends on several factors: stress level, voltage change, loading method, material structure. With increasing speeds and power of engines and power-driven vehicles, the fatigue strength of parts and components is becoming increasingly important. During operation, parts are exposed to high-frequency cyclic loading, and their service life and reliable operation are determined by fatigue strength in most cases, therefore, it is necessary to conduct fatigue tests in a wide range of loading frequencies. In the general case, the frequency of application of the load ambiguously affects the material's resistance to fatigue; therefore, different materials in different areas of fatigue failure have differences in their response to a change in the loading frequency.

Keywords: high loading frequency, fatigue resistance, strength, endurance limit, durability.

Citation:

T. Nguyen Ngoc, V.M. Kapralov, G.S. Kolenko, Effect of loading frequencies on fatigue resistance of materials, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 68–77, DOI: 10.18721/JEST.25205.

Введение. Сопротивление усталости металлов при различных частотах нагружения является предметом исследований уже длительное время. Изучение влияния частоты нагружения имеет большое научное и практическое значение. Высокочастотные испытания являются единственным реальным способом получения характеристик сопротивления усталости материалов на базах напряжения, превышающих $10^9 \dots 10^{10}$ число циклов нагружения [1]. На сегодняшний день большое количество экспериментальных данных по усталостным характеристикам материалов в виде кривых усталости $\sigma_{\max} = f(N)$ [2] в большинстве своем ограничено базовым числом $N = 10^7$ циклов нагрузки, так как считается, что если образец материала не разрушился через 10^7 циклов нагружения при заданной амплитуде напряжений σ_{\max} , то он выдержит и далее неограниченное число циклов нагружения. Однако такое предположение о пределе усталости достаточно удовлетворительно прогнозирует усталостную прочность деталей с ресурсом, сильно не превышающим 10^7 циклов нагружения. А для деталей, имеющих ресурс $N = 10^8 - 10^{10}$ циклов, применимость существующих данных (основанных на базовом числе циклов $N = 10^7$) для надежного прогнозирования работоспособности — вопрос открытый.

Целью данной работы является исследование влияния частот нагружения на характеристики сопротивления усталости некоторых наиболее распространенных материалов, применяемых для изготовления элементов энергетических машин.

Методы и материалы

Как упоминалось выше, традиционное испытание на усталость не обеспечивает надежное прогнозирование усталостных характеристик материала в диапазоне очень высоких чисел циклов ($N = 10^8 - 10^{10}$) [11]. Эту задачу

можно было бы успешно выполнить, используя высокочастотную испытательную машину. Частота испытаний на такой машине находится в диапазоне 15–30 кГц, в основном используется частота 20 кГц. Этот метод позволяет уменьшить время и стоимость испытаний на усталость.

Таблица 1

Высокочастотные и стандартные усталостные испытания [6, 8]

High frequency and standard fatigue testing

Количество циклов	Высокая частота 20 кГц	Стандартная частота 100 Гц
10^7	9 минут	1 день
10^9	14 часов	4 месяца
10^{10}	6 дней	3 года

Метод высокочастотных усталостных испытаний, основанный на использовании пьезоэлектрических преобразователей, которые преобразуют электрические сигналы 20 кГц в механические колебания такой же частоты [3]. Мы использовали высокочастотные волны большой мощности, чтобы вызвать усталостное разрушение материалов.

Система испытания на усталость имеет следующие основные компоненты [13]:

- Генератор мощности, который преобразует сигнал напряжения 50 или 60 Гц в высокочастотный 20 кГц электрический синусоидальный сигнал.
- Пьезоэлектрический преобразователь, возбуждаемый силовым генератором, который преобразует электрический сигнал в продольные высокочастотные волны и механическую вибрацию такой же частоты.
- Устройство Хорн (Horn), которое усиливает вибрацию, поступающую от преобразователя, чтобы получить требуемую амплитуду деформации в средней части образца [4].

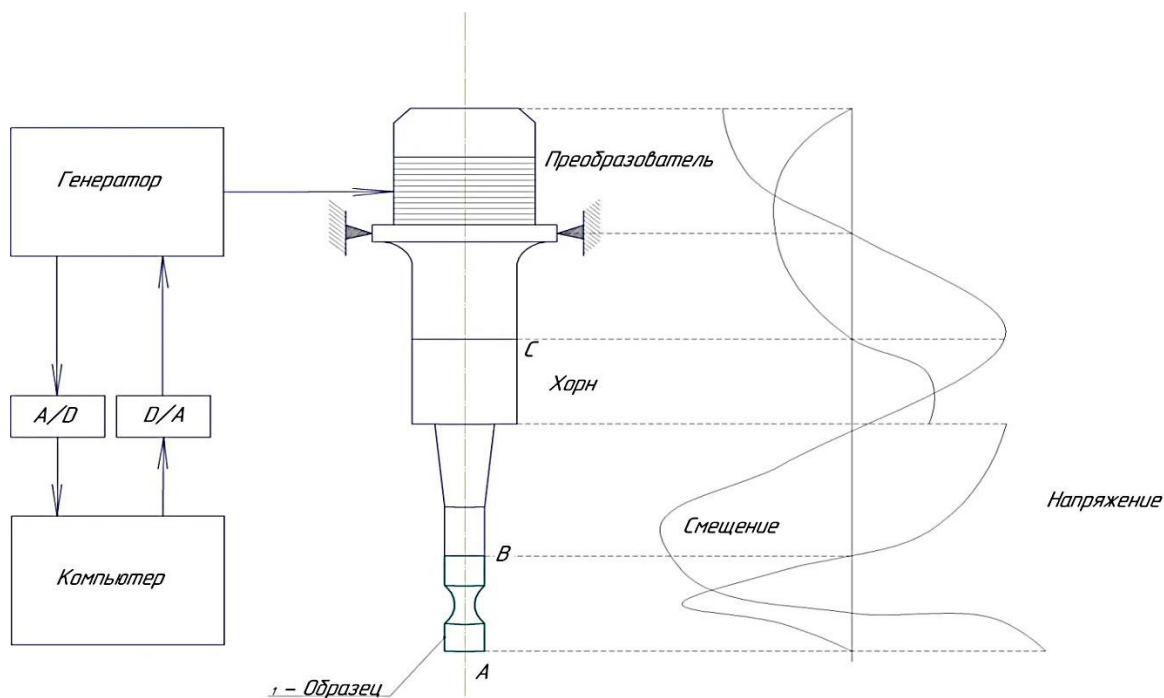


Рис. 1. Система испытания на усталость и поле смещения напряжений
 Fig. 1. Fatigue testing system and stress displacement field

Как видно из рис. 1, преобразователь напрямую связан с источником электрического тока и возбуждает акустический сигнал той же частоты. Однако, поскольку амплитуда этого движения очень мала, Хорн нужен, чтобы увеличить амплитуду [7]. На конце Хорна, названного В на рис. 1, прикреплен образец. График смещения и перераспределения напряжений по всей этой системе представлен для случая, когда второй конец образца А свободен. Чтобы иметь пик напряжения в центре образца, и соответствующую узловую точку, отражаемую на эпюре смещения, образец должен иметь строго определенную длину, которая может быть рассчитана с использованием теории резонанса.

Образец, Хорн и преобразователь образуют механическую резонансную систему с четырьмя узлами напряжения (нулевое напряжение) и три узла смещения (нулевое смещение) при собственной частоте 20 кГц [14]. Как видно из рисунка 1, максимальное напряжение находится в центре образца, которое соответствует одному из узлов смещения, а смещение достигает

максимума на концах образца (точки А и В). Вышеуказанные три части необходимы для воспроизведения высокочастотной усталостной нагрузки. Другие компоненты испытательной машины для высокочастотных усталостных испытаний могут включать в себя [10]:

- системы (амплитуда и блоки управления, счетчик циклов, осциллограф и т. д.)
- измерительные системы (датчик перемещения, видеокамера).

Во время высокочастотных испытаний на усталость из-за влияния внутреннего трения образца температура может значительно увеличиться. Это повлияет на усталостное поведение испытательного материала. Поэтому образец следует охлаждать чистым и сухим сжатым воздухом. Для максимального охлаждающего эффекта необходимо установить регулируемое сопло [15].

Установка, представленная на рис. 1, позволяет проводить испытания на усталость с коэффициентом асимметрии цикла $R = -1$. Для того чтобы получить другое отношение



нагрузки дополнительный Хорн, индентичный первому, прикреплен к нижней части образца [2]. Затем к образцу прикладывается растягивающее предварительное напряжение, затем добавляют высокочастотную нагрузку.

Прогресс в области высокочастотных усталостных испытаний, наблюдаемый в течение последних двух десятилетий, позволил проводить испытания на усталость с переменной амплитудой нагрузки при различных температурах и в различных средах. В дополнение к этому, используя высокочастотную технику, теперь можно оценить усталостные свойства материалов с точки зрения кручения и изгиба [9].

В данной работе были испытаны на высокочастотную усталость образцы следующих материалов: титановый сплав Ti6Al4V, алюминиевый сплав Д16, никелевые сплавы Udimet 500, Inconel 718 и отечественный ЭП202 (ХН67МВТЮ).

Сплавы Ti6Al4V и сплав Д16 широко используются для корпусных деталей в аэрокосмической промышленности [5], а никелевые сплавы Udimet 500, Inconel 718 и ЭП202 применяются для лопаток газотурбинных двигателей.

Результаты и обсуждение

Результаты показывают, что некоторые материалы сохраняют предел усталости таким же, как при числе циклов 10^6 – 10^7 , в то время как большинство других не проявляют таких свойств, демонстрируя постепенное снижение усталостной прочности, когда число циклов достигает уровня 10^9 .

Для многих материалов и компонентов, составляющих важные ответственные узлы в авиастроении и железнодорожном транспорте, усталостное разрушение происходит в диапазоне более 10^7 циклов нагрузки, который называется диапазоном усталости с высоким числом циклов.

Результаты испытаний образцов из титановых и алюминиевых сплавов

Титановые сплавы играют очень важную роль в аэрокосмической промышленности,

для которой характерны высокие частоты нагружения деталей. Рассмотрим в качестве примера, испытание титанового сплава Ti6Al4V, которое было выполнено на частоте 20кГц с коэффициентом асимметрии цикла $r = -1$. Результаты представлены на рис. 2 вместе с дополнительными данными, полученными в других лабораториях при испытаниях на уровне 20 и 100 Гц [12]. Можно увидеть, что усталостная характеристика сплава Ti6Al4V в режиме высокочастотных испытаний выше, чем при испытаниях на более низких частотах (20 и 100 Гц). Кроме того, на рис. 2 показано, что усталостная прочность материалов не сильно ухудшается с увеличением количества циклов во время испытаний в диапазоне высоких частот (10^8 – 10^9 циклов).

Из рис. 3 видно, что при частотах ниже 100Гц предел выносливости уменьшается с ростом частоты нагружения, а при частотах более 100Гц, наоборот, возрастает.

Пример еще одного сплава, применяемого для корпусных деталей в авиации, – дюралюминий Д16. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

При переходе от средних к весьма низким частотам нагружения наблюдается существенное снижение долговечности и пределов выносливости, как видно из кривых усталости на рис. 4. Видно, что снижение частоты от 4000 до 7 циклов в минуту приводит к уменьшению долговечности в 4–8 раз (при напряжении $\sigma = 20$ – 24 кгс/мм²) и уменьшению предела выносливости на 10–20 %.

Никелевые сплавы широко используются для изготовления лопаток газовых турбин, поэтому рассмотрение влияния высокочастотного нагружения на характеристики этих сплавов представляет практический интерес. Из рис. 5 видно, что предел выносливости сплава Удимет 500 уменьшается на 50 % при увеличении числа циклов с 10^6 до 10^{10} .

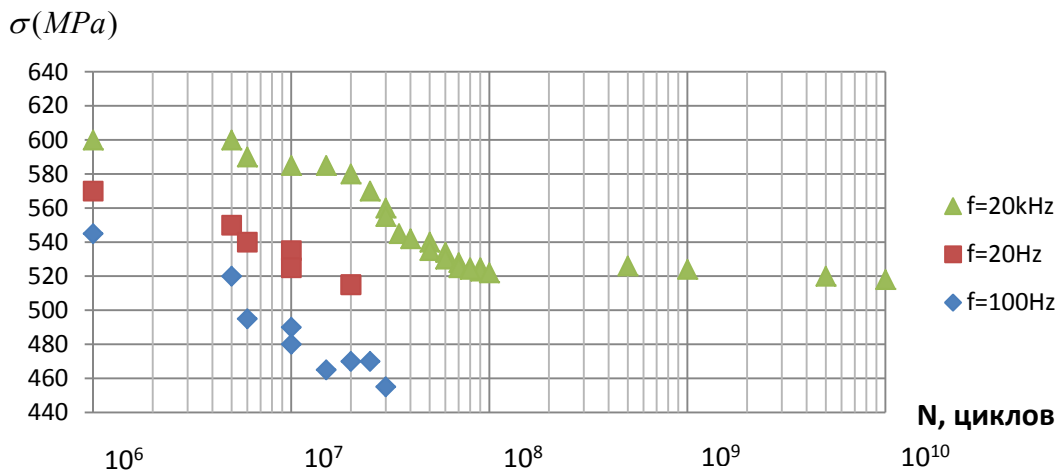


Рис. 2. S-N для сплава Ti6Al4V
Fig. 2. S-N for alloy Ti6Al4V

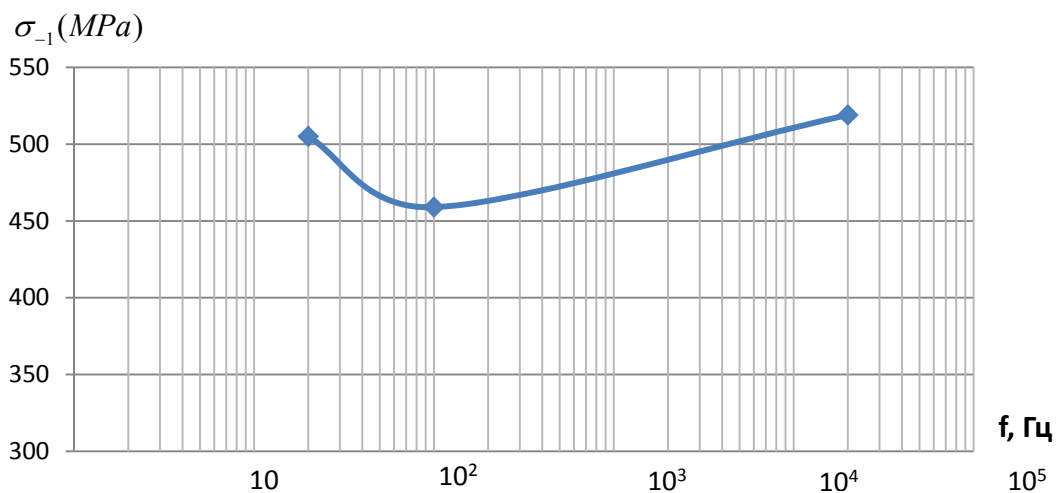


Рис. 3. Зависимость сопротивления усталости сплава Ti6Al4V от частоты нагружения
Fig. 3. The dependence of the fatigue resistance of the alloy Ti6Al4V from the frequency of loading

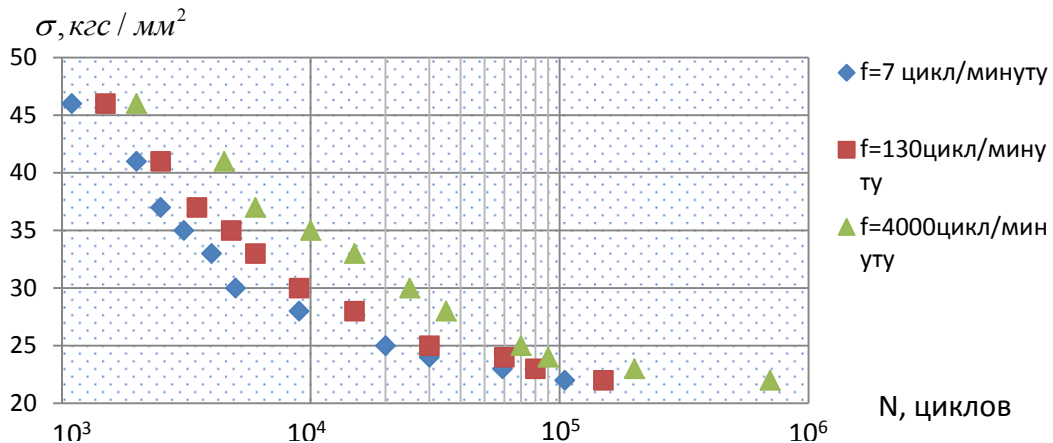


Рис. 4. Кривые усталости для сплавов марки D16
Fig. 4. Fatigue curves for alloys grade D16

2.2. Результаты испытаний образцов из никелевых сплавов

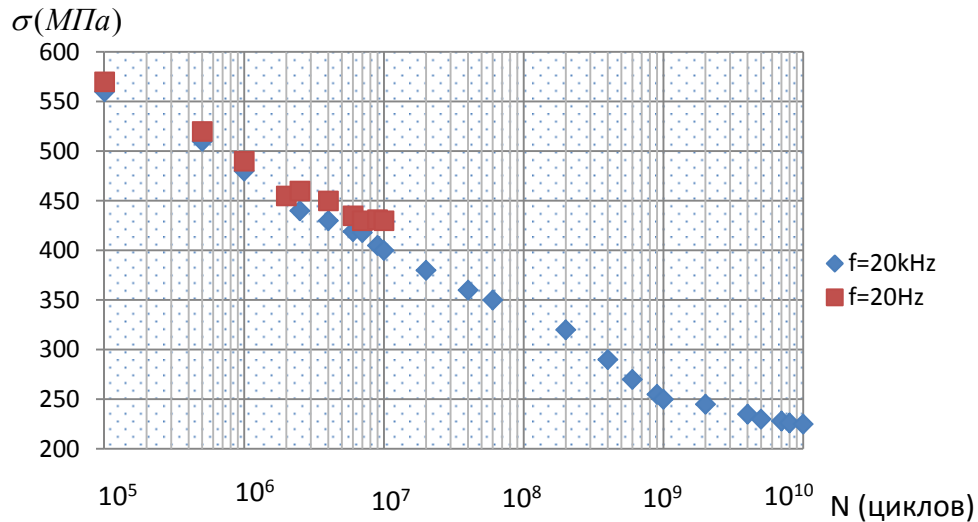


Рис. 5. Кривые усталости для сплавов марки Удимет 500
Fig. 5. S-N fatigue curves for alloys of the brand Udimet 500 alloy

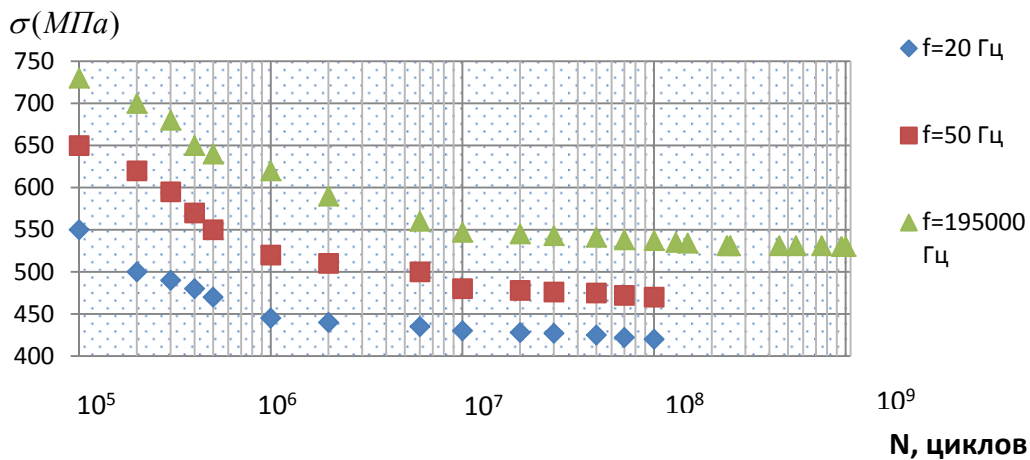


Рис. 6. Кривые усталости никелевого сплава Inconel 718
Fig. 6. Fatigue Curves Inconel 718 Nickel Alloy

Кроме того, в отличие от образцов из других сплавов, испытанных в данном исследовании, предел выносливости которых повышается с ростом частоты, сплав Удимет 500 показал некоторое уменьшение (на 6 %) предела выносливости в диапазоне 10^6 – 10^7 циклов при увеличении частоты нагружения 20 Гц до 20 кГц. Однако это уменьшение сопоставимо со статистической неопределенностью-погрешностью при испытаниях, и влияние частоты испытания на

предел выносливости было признано несущественным для этого материала.

Из рис. 7 можно видеть, что с увеличением частоты нагружения предел выносливости сплава Inconel 718 монотонно возрастает. Испытание Inconel 718 на усталость проводилось с коэффициентом асимметрии цикла $R = -1$. Результаты, представленные на рис. 6, показывают, что при высокочастотном нагружении усталостное разрушение образца не происходило

даже при 10^9 циклах, если максимальная амплитуда напряжения была меньше 530 МПа. Однако следует отметить, что при более низких частотах нагружения усталостное разрушение произошло за пределами 10^7 циклов нагрузки. Это указывает на то, что традиционное определение предела усталости (под которым понимается максимальный уровень амплитуды напряжения, при котором материал выдерживает 10^7 циклов) неприменимо для данного сплава, если ресурс детали превышает 10^7 циклов. При высокочастотных испытаниях усталостные трещины создаются из полос скольжения независимо от уровня напряжения. В месте концентрации напряжения возникают пучки линий

скольжения в виде усов, по одному из которых образуется начальная трещина [15]. В конце ее возникают новые пучки скольжения. Развиваясь по одному из них, трещина делает первый зигзаг. Анализ изломов натуральных изделий показывает, что расстояние между линиями фронта усталостной трещины в одних случаях увеличивается с ростом длины трещины, в других случаях остаётся постоянным, а иногда это расстояние даже уменьшается. На рис. 6 результаты даны в сравнении с традиционным низкочастотным испытанием того же материала, которое дает более низкие значения предела усталости по сравнению с высокочастотными испытаниями.

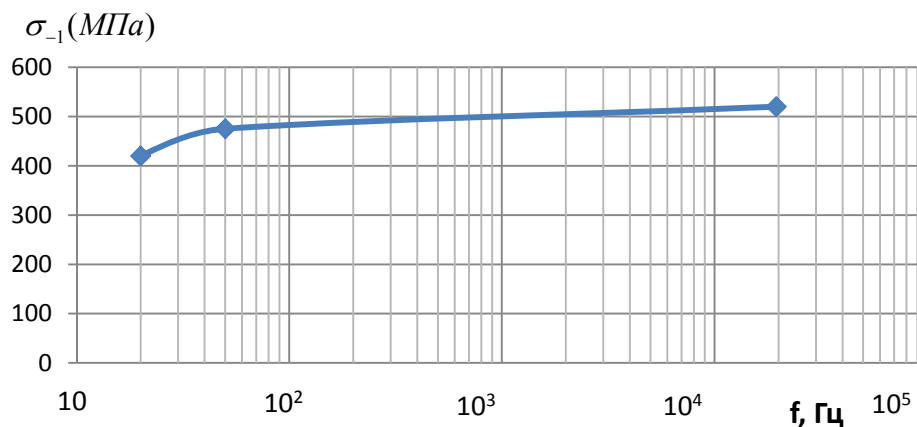


Рис. 7. Зависимость предела выносливости сплава Inconel 718 от частоты нагружения
 Fig. 7. The dependence of the fatigue resistance of the alloy Inconel 718 from the frequency of loading

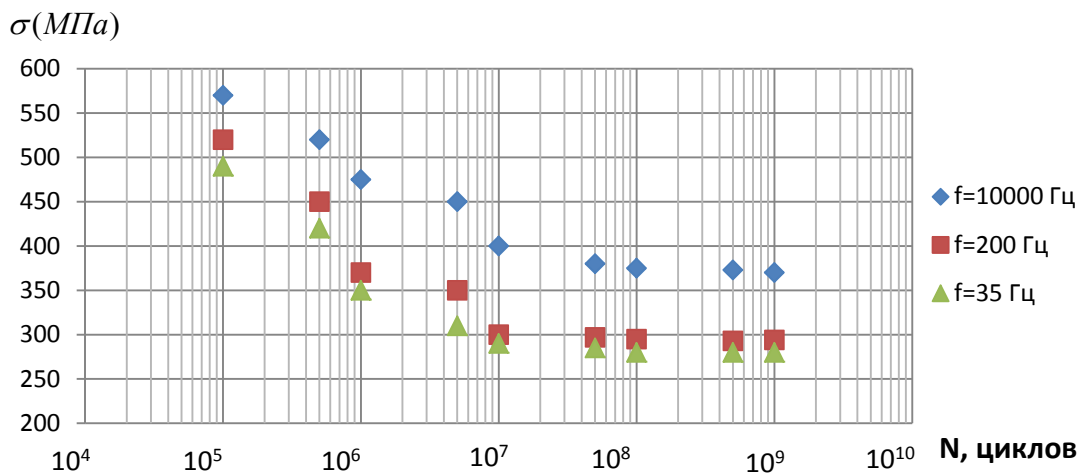


Рис. 8. Кривые усталости сплава ЭП202
 Fig. 8. S-N EP202 alloy fatigue curves

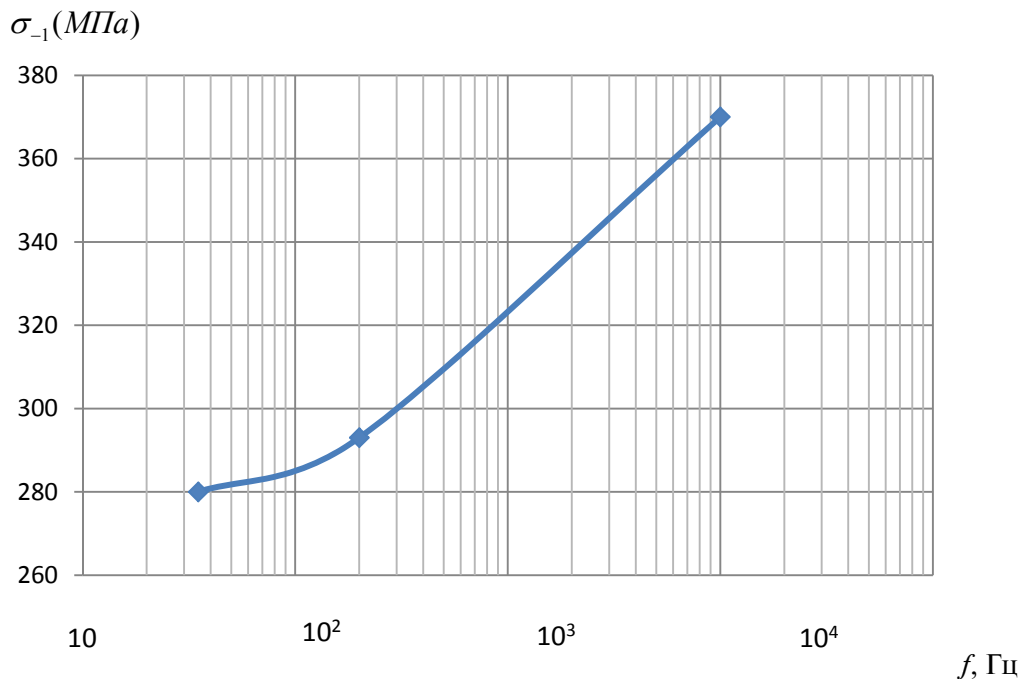


Рис. 9. Зависимость сопротивления усталости сплава ЭП202 от частоты нагружения
 Fig. 9. The dependence of the fatigue resistance of the alloy of the alloy EP202 on the frequency of loading

Испытания сплава ЭП202 проводились при симметричных ($R = -1$) и асимметричных циклах ($R = 0$ и $0,5$) осевого нагружения на гладких образцах и образцах с концентратором напряжений. При симметричных циклах частоты нагружения составляли 35, 200, и 10000 Гц, при асимметричных циклах 35, 200 и 10000 Гц.

Результаты усталостных испытаний сплава ЭП202 приведены на рис. 8 и 9. С увеличением частоты нагружения во всем исследованном диапазоне частот и коэффициентов асимметрии циклов отмечается монотонное повышение пределов выносливости на одинаковой базе испытаний – в данном случае $N_6 = 2 \cdot 10^7$ цикл. При асимметричных циклах такое повышение менее существенно как в абсолютном, так в относительном выражении.

Выводы

1. Использование высокочастотного испытательного оборудования в настоящее время является наиболее эффективным способом

получения усталостных характеристик материалов при базовых числах циклов $N_6 = 10^8 - 10^{10}$ с точки зрения временных (и материальных) затрат (табл. 1).

2. Испытаны на высокочастотную усталость образцы сплавов Ti6Al4V, Д16, Udimet 500, Inconel 718 и ЭП202. Построены кривые Велера $\sigma_{\max} = f(N)$ и зависимости предела выносливости от частоты нагружения $\sigma_{-1}(f)$ для испытанных материалов.

3. В результате испытания образцов из титанового сплава Ti6Al4V, предел выносливости этого материала оказывается выше на режиме высокочастотных испытаний, чем полученный традиционными испытаниями на более низких частотах.

4. Предел выносливости сплава никелевого сплава Udimet 500 уменьшается на 50 % (с 425 МПа до 225 МПа) при увеличении числа циклов с 10^6 до 10^{10} . Кроме того, влияние частоты испытания на предел усталости было признано несущественным для этого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Tofique M.W., Bergström J., Burman C.** Very high cycle fatigue crack initiation mechanisms in different engineering alloys, *Procedia Structural Integrity*. 2 (2016) 1181–1190
- [2] **Kazymyrovych V., Bergström J., Thuvander F.** Local stresses and material damping in very high cycle fatigue, *Int. J. Fatigue*. 32 (2016) 1669–1674.
- [3] **Bathias C., Paris P.C.** Gigacycle fatigue in mechanical practice. NY 10016, USA: Marcel Dekker; 2005.
- [4] **Pyttel B., Schwerdt D., Berger C.** Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit? // *Int. J. Fatigue*. 2017. No. 33. P. 49–58.
- [5] **Илларионов А.Г., Попов А.А.** Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 137 с.
- [6] **Stanzl-Tschegg S., Mughrabi H., Schuller R.** Does Copper Undergo Surface Roughening during Fatigue in the VHC Regime? // 16th European Conference of Fracture 2016.
- [7] **Kazymyrovych V.** Very high cycle fatigue of tool steels // *Karlstad University Studies*. 2015. No. 20.
- [8] **Wang Q.Y., Bathias C.** Fatigue characterization of a spheroidal graphite cast iron under ultrasonic loading // *J. Mater. Sci*. 2014. No. 39 (2). P. 687–689.
- [9] *Internat. Conf. on fatigue of Met.Inst. Mech. Eng.* 2015.
- [10] **Petrucci G.** A critical assessment of methods for the determination of the shear stress amplitude in multiaxial fatigue criteria belonging to critical plane class // *International Journal of Fatigue*. 2015. No. 74. P. 119–131.
- [11] **Chai G., Zhou N., Ciurea S., Andersson M., Lin Peng R.** Local plasticity exhaustion in a very high cycle fatigue regime // *Scr. Mater*. 2012. No. 66. P. 769–772.
- [12] *ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation*. Vol. 8. P. 717–730.
- [13] **Kazymyrovych V.** Very high cycle fatigue of engineering materials // *Karlstad University Studies*. 2015. No. 22.
- [14] **Mughrabi H.** On 'multi-stage' fatigue life diagrams and the relevant life-controlling mechanisms in ultrahigh-cycle fatigue // *Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures*. 2014. No. 25 (8). P. 755–764.
- [15] **Sohar C. [et al.]**. Gigacycle fatigue behaviour of a high chromium alloyed cold work tool steel // *International Journal of Fatigue*. 2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НГУЕН НГОК Тхуан – кандидат технических наук Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: nnthuan.sant@yahoo.com

КАПРАЛОВ Владимир Михайлович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: kapralov.vladimir@gmail.com

КОЛЕНЬКО Григорий Сергеевич – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: gidrat@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 25.03.2019

REFERENCES

- [1] **M.W. Tofique, J. Bergström, C. Burman**, Very high cycle fatigue crack initiation mechanisms in different engineering alloys, *Procedia Structural Integrity*. 2 (2016) 1181–1190
- [2] **V. Kazymyrovych, J. Bergström, F. Thuvander**, Local stresses and material damping in very high cycle fatigue, *Int. J. Fatigue*. 32 (2016) 1669–1674.
- [3] **C. Bathias, P.C. Paris**, Gigacycle fatigue in mechanical practice. NY 10016, USA: Marcel Dekker; 2005.
- [4] **B. Pyttel, D. Schwerdt, C. Berger**, Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit?, *Int. J. Fatigue*, 33 (2017) 49–58.
- [5] **A.G. Illarionov, A.A. Popov**, Tekhnologicheskiye i ekspluatatsionnyye svoystva titanovykh splavov. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2014.
- [6] **S. Stanzl-Tschegg, H. Mughrabi, R. Schuller**, Does Copper Undergo Surface Roughening during Fatigue in the VHC Regime? 16th European Conference of Fracture 2016.
- [7] **V. Kazymyrovych**, Very high cycle fatigue of tool steels, *Karlstad University Studies*. 20 (2015).
- [8] **Q.Y. Wang, C. Bathias**, Fatigue characterization of a spheroidal graphite cast iron under ultrasonic loading, *J. Mater. Sci.*, 39 (2) (2014) 687–689.



- [9] Internat. Conf, on fatigue of Met.Inst. Mech. Eng. 2015.
- [10] **G. Petrucci**, A critical assessment of methods for the determination of the shear stress amplitude in multiaxial fatigue criteria belonging to critical plane class, International Journal of Fatigue, 74 (2015) 119–131.
- [11] **G. Chai, N. Zhou, S. Ciurea, M. Andersson, R. Lin Peng**, Local plasticity exhaustion in a very high cycle fatigue regime, Scr. Mater., 66 (2012) 769–772.
- [12] ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation, 8 717–730.
- [13] **V. Kazymyrovych**, Very high cycle fatigue of engineering materials, Karlstad University Studies, 22 (2015).
- [14] **H. Mughrabi**, On 'multi-stage' fatigue life diagrams and the relevant life-controlling mechanisms in ultrahigh-cycle fatigue, Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures, 25 (8) (2014) 755–64.
- [15] **C. Sohar [et al.]**. Gigacycle fatigue behaviour of a high chromium alloyed cold work tool steel, International Journal of Fatigue (2017).

THE AUTHORS

NGUYEN NGOC Thuan – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: nnthuan.sant@yahoo.com

KAPRALOV Vladimir M. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: kapralov.vladimir@gmail.com

KOLENKO Grigorii S. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: gidrat@mail.ru

Received: 25.03.2019