

УДК 620.178.3

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-74-82>

Научная статья

Research article



Усталостная прочность и частотная стабильность титанового сплава

Д.И. Шетулов¹, В.В. Мыльников¹, Э.А. Дмитриев²

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет
681013, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр-т Ленина, 27

✉ Владимир Викторович Мыльников (mrmynikov@mail.ru)

Аннотация: Исследованы образцы титанового сплава ВТ3-1 на усталость при нагружении по «мягкой» схеме консольного изгиба плоских образцов. Для таких исследований была разработана оригинальная электромагнитная установка. В ней реализована работа на основе электромеханической системы, в которой возбуждение механических колебаний осуществляется исходя из собственной частоты колебания испытуемого образца, т.е. реализуется режим, когда частота возбуждающей силы (частота циклического нагружения) всегда равна частоте собственных колебаний образца. Изгиб образца производится электромагнитной силой, а разгиб происходит под действием сил упругости материала, тем самым обеспечивается циклическое нагружение, близкое к синусоидальному. Изучено влияние реализуемого в данной установке вида циклического нагружения на циклическую прочность и долговечность. Установлено, что исследуемый титановый сплав имеет высокие характеристики показателей сопротивления усталости и предела выносливости. В ходе проведенных исследований отмечен небольшой разброс экспериментальных значений сопротивления усталости образцов относительно аппроксимирующей линии кривой усталости, что свидетельствует о высокой стабильности структурно-чувствительных свойств титанового сплава ВТ3-1. Также исследованы образцы этого сплава на частотную стабильность. За контрольное число наработки было принято 50 млн циклов нагружения, при которых проводилась сравнительная оценка изменения частотных характеристик. Представлены частотные характеристики и выявлена динамика частотной стабильности испытаний образцов при нагрузках, близких к пределу усталости. Установлено, что исследуемый титановый сплав имеет высокие значения частотной стабильности. При этом перерывы в циклических испытаниях приводят к скачкообразному приросту частоты, а при непрерывных испытаниях такого не наблюдалось, однако общее отклонение частоты от первоначальной к концу испытаний примерно одинаковое.

Ключевые слова: титановый сплав, сопротивление усталости, частотная стабильность, частота циклического нагружения (ЧЦН), собственная частота колебаний (СЧК), предел выносливости, долговечность, циклическая прочность

Для цитирования: Шетулов Д.И., Мыльников В.В., Дмитриев Э.А. Усталостная прочность и частотная стабильность титанового сплава. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2023;29(2):74–82. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-74-82>

Titanium alloy fatigue strength and eigenfrequency stability

D.I. Shetulov¹, V.V. Mylnikov¹, E.A. Dmitriev²

¹ Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65 Ilyinskaya Str., Nizhny Novgorod 603950, Russia

² Komsomolsk-na-Amure State University
27 Lenina Prosp., Komsomolsk-na-Amure 681013, Russia

✉ Vladimir V. Mylnikov (mrmynikov@mail.ru)

Abstract: We conducted a study on fatigue in flat samples of the VT3-1 titanium alloy using “soft” cyclic beam bending tests. For this purpose, we developed an innovative electromagnetic test bench. The test bench’s electromechanical system induces mechanical vibrations

at a frequency that matches the eigenfrequency of the sample, ensuring that the cyclic load frequency remains constant. The electromagnetic force bends the sample while the elastic force unbends it, producing a quasi-sinusoidal cyclic load. Through our investigation, we determined the impact of this cyclic loading on both cyclic strength and durability. Our findings indicate that the VT3-1 titanium alloy possesses high resistance to fatigue and an endurance limit. Furthermore, we observed a low variability of the experimental fatigue resistance in relation to the approximating fatigue curve, suggesting the alloy has high structural stability. This finding indicates that the VT3-1 titanium alloy possesses high structural stability. To assess eigenfrequency stability, we subjected the alloy samples to cyclic tests, interrupting them at a reference number of 50 million cycles to evaluate changes in eigenfrequencies and stability under loads close to the fatigue limit. The results showed that the titanium alloy has a high level of eigenfrequency stability. Interruptions in cyclic tests resulted in jump-like increases in eigenfrequencies, which was not observed in continuous tests. Nevertheless, the total eigenfrequency deviations from the initial value at the end of the tests were similar in both cases.

Keywords: titanium alloy, fatigue resistance, eigenfrequency stability, cyclic loading frequency, eigenfrequency, endurance limit, durability, cyclic strength

For citation: Shetulov D.I., Mylnikov V.V., Dmitriev E.A. Titanium alloy fatigue strength and eigenfrequency stability. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023;29(2):74–82. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-2-74-82>

Введение

Для изготовления упругих элементов, работающих в сложных условиях циклического нагружения, а также изделий со стабильными размерами требуются материалы с минимальными проявлениями неупругих свойств [1–7]. В литературе такого рода неупругие свойства при циклическом нагружении имеют различные названия: внутреннее трение, несовершенная упругость, демпфирование, механический гистерезис, рассеяние энергии, циклическая вязкость [8]. В основном такие исследования строятся исходя из предположения о локализации микропластических деформаций в процессе циклического нагружения, неравномерно возникающих из-за неоднородности различных свойств материала на микроуровне, либо используется метод динамического механического анализа при варьировании температуры для определения изменений предела упругости и энергии активации микромеханизма деформации [9–12].

В данной работе применена оригинальная экспериментальная методика оценки частотной стабильности материалов для изготовления упругих элементов высокоточных излучателей, преобразующих электрические колебания в механические. При этом незначительные изменения частот собственных колебаний, которые, как известно, связаны с модулем упругости, явлением неупругости и колебаниями атомов и их решеток, приводят к недопустимым погрешностям при преобразовании видов колебаний и преждевременному усталостному разрушению [13–16].

Цель работы — исследование циклической прочности и частотной стабильности образцов из титанового сплава ВТ3-1 при циклических испытаниях по «мягкой» схеме консольного изгиба плоских образцов.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований была разработана оригинальная электромагнитная установка (рис. 1) для испытаний по «мягкой» схеме консольного циклического поперечного изгиба плоского образца, работающая в автоколебательном режиме [17]. В установке реализована работа на основе электромеханической системы, в которой возбуждение механических колебаний происходит исходя из собственной частоты колебания (СЧК) испытуемого образца, т.е. осуществлен режим, когда частота возбуждающей силы (частота циклического нагружения (ЧЦН)) всегда равна СЧК образца. Изгиб образца производится электромагнитной силой, а разгиб происходит под действием сил упругости материала, тем самым обеспечивается циклическое нагружение, близкое к синусоидальному (рис. 2).

Для испытаний изготавливались плоские образцы, показанные на рис. 3. Напряжение в расчетном сечении образца оценивали по амплитуде колебаний. Метод основан на установлении расчетной зависимости между усилием, прикладываемым к образцу, и его перемещением в точке приложения силы с последующим определением напряжения по известной силе. Установление рас-

четной зависимости между усилием и перемещением проводится для статического режима. При этом полагается, что в циклическом режиме силы, действующие на образец (инерции, упругости, внешней), окажут аналогичные максимальные

напряжение и перемещение, как сила при статическом нагружении, которая по величине равна динамической результирующей.

Испытаниям был подвергнут высокопрочный титановый сплав ВТ3-1 следующего химическо-

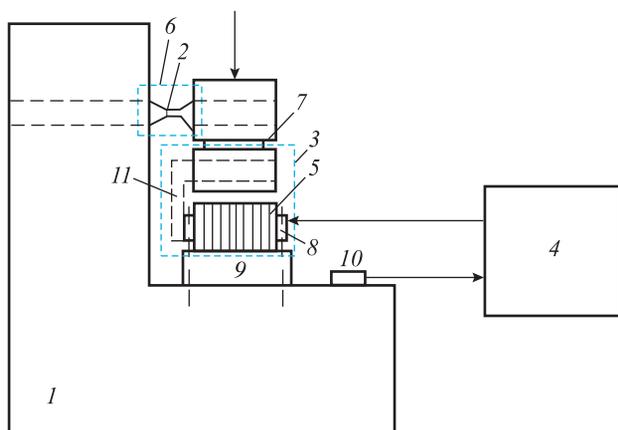


Рис. 1. Схема установки для испытаний на частотную стабильность

1 – станина, 2 – образец, 3 – электромагнитный возбудитель (ЭМ), 4 – блок питания и автоматики, 5 – катушка ЭМ, 6 – измерительная система параметров процесса колебаний, 7 – ферромагнитный ярлык электромагнитного возбудителя, 8 – статор электромагнитного возбудителя, 9 – виброизоляторы, 10 – датчик виброускорения, 11 – П-образный ленточный сердечник

Fig. 1. Vibration stability test bench

1 – bed, 2 – sample, 3 – electromagnetic exciter, 4 – power supply and control components, 5 – solenoid coil, 6 – oscillation measuring system, 7 – ferromagnetic yoke, 8 – stator, 9 – dampers, 10 – accelerometer, 11 – П-shaped tape core

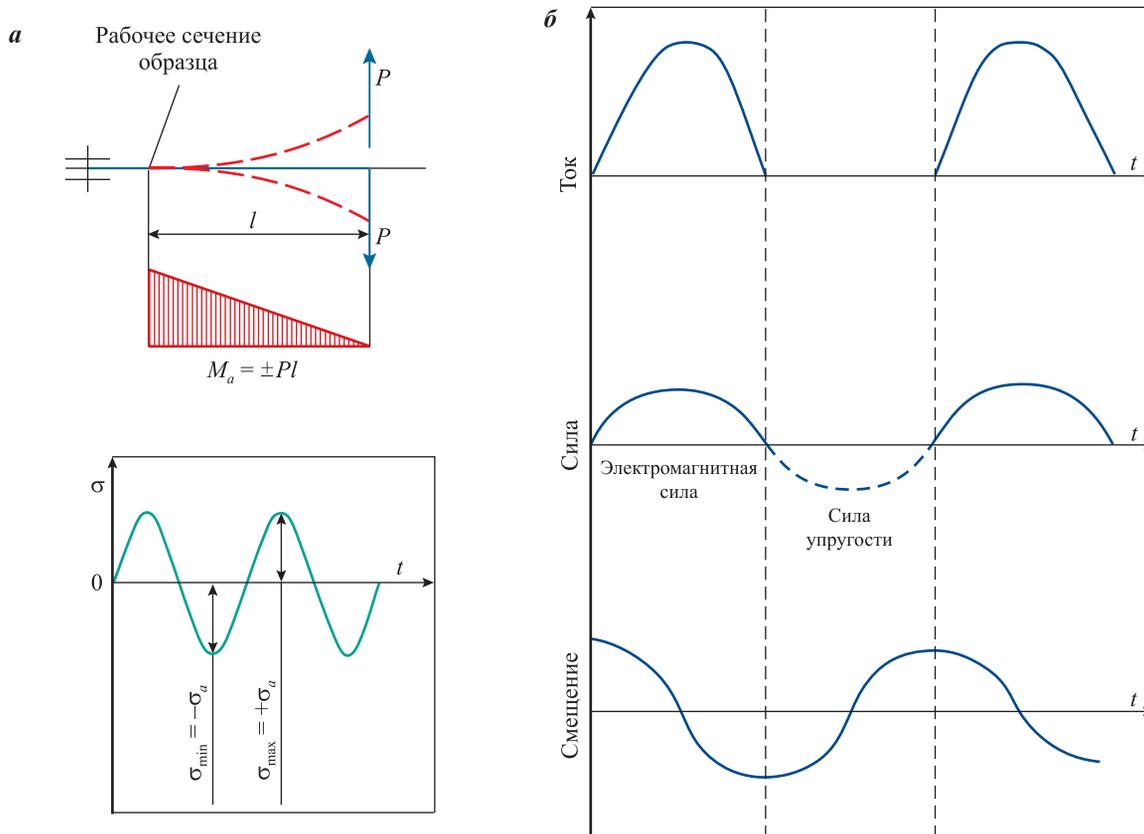


Рис. 2. Нагружение по схеме консольного циклического поперечного изгиба плоского образца (а) и согласование импульсов тока, электромагнитной силы и силы упругости с перемещением консоли исследуемого образца в разработанной установке (б)

Fig. 2. Cyclic beam transverse bending of a flat sample (а). Synchronization of the current pulses, electromagnetic force, and elasticity force with the sample displacement (б)

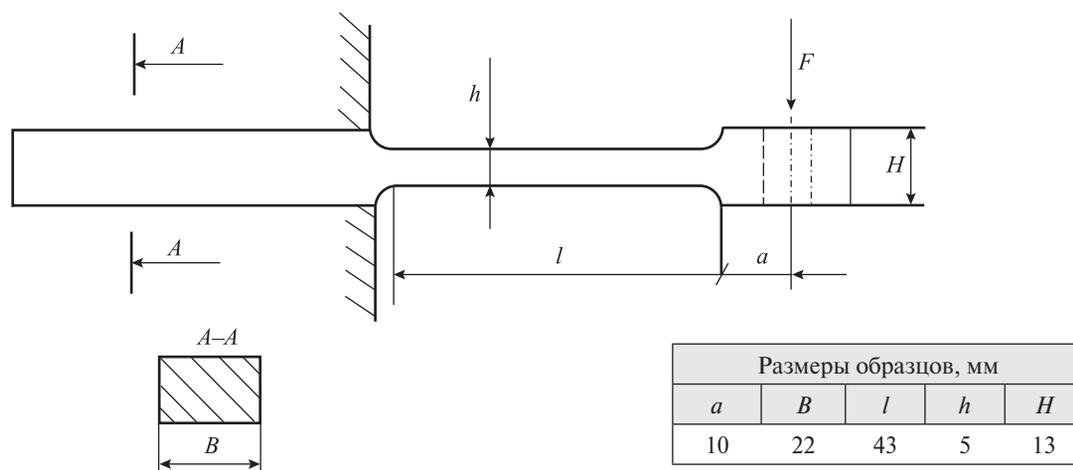


Рис. 3. Эскиз и размеры образцов для испытания

Fig. 3. Dimensional drawing of the test samples

го состава, мас.‰: 0,2–0,7 Fe; до 0,1 C; 0,15–0,4 Si; 0,8–2,0 Cr; 2–3 Mo; до 0,05 N; 85,95–91,05 Ti; 5,5–7,0 Al; до 0,5 Zr; до 0,15 O; до 0,015 H; прочие примеси – 0,3 % (ГОСТ 19807-91).

За контрольное число наработки приняли 50 млн циклов нагружения, при которых проводили сравнительную оценку изменения частотных характеристик. Усталостные испытания осуществляли с перерывами на ночь в нормальных условиях нагружения.

При напряжениях, приближающихся к пределу усталости, испытания по времени были длительными, и установка отключалась на ночь. Обнаружено, что частота собственных колебаний образца изменяется при остановке на ночь и утром, после 10-часовой паузы, она больше, чем накануне вечером при остановке испытаний.

Результаты усталостных испытаний и их обсуждение

На рис. 4 показана кривая усталости исследованного сплава, испытанного по «мягкой» схеме нагружения консольного изгиба плоских образцов в режиме автоколебаний. При этом обнаружено небольшое значение показателя сопротивления усталости в виде угла наклона кривой усталости $\text{tg}\alpha_w = 0,0394$ (которое в сопоставлении с данными, например работы [18], очень низкое) и высокий предел выносливости $\sigma_{-1} = 600$ МПа. Результаты испытаний на усталость, приведенные на рис. 4, показывают небольшой разброс экспериментальных данных относительно аппроксимирующей линии кривой усталости, что

свидетельствует о высокой стабильности структурно-чувствительных свойств данного титанового сплава.

В работах [19, 20] было показано, что чем больше повреждаемость материала в условиях циклического нагружения, тем круче график зависимости количества циклов (N) от прикладываемого напряжения ($\text{tg}\alpha_w$). Геометрический смысл $\text{tg}\alpha_w$ раскрывается в том, что величина противолежащего катета в нашем случае представляет собой напряжение, при котором работал материал, а прилежащего – количество циклов, которое выдержали образцы под нагрузкой до разрушения:

$$\text{tg}\alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N}.$$

Физический смысл $\text{tg}\alpha_w$ заключается в оценке интенсивности прохождения локальной пластической деформации в поверхностном слое материала: при консольном плоском изгибе пластически

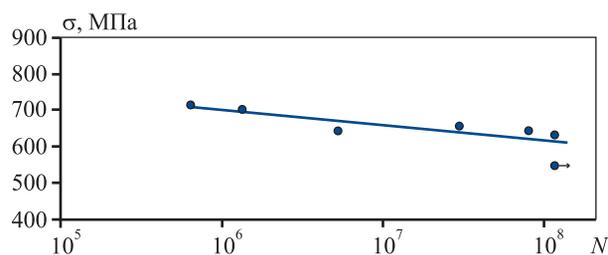


Рис. 4. Кривая усталости титанового сплава ВТ3-1 после отжига при $t = 870$ °C

Fig. 4. VT3-1 titanium alloy fatigue curve after annealing at $t = 870$ °C

деформируется только поверхностный слой образца, а внутренние объемы материала подвержены упругому деформированию, которые оказывают влияние на прохождение пластической деформации в поверхностном слое. Появлению трещин на поверхности в зоне ее зарождения в процессе циклического нагружения предшествует локализованная пластическая деформация, сопровождаемая множественным скольжением.

Наклон $\text{tg}\alpha_w$ выражает динамику прироста числа циклов в зависимости от уровня напряжения, т.е. чем меньше $\text{tg}\alpha_w$, тем дольше работает материал при несущественном уменьшении нагрузки и, наоборот, чем круче наклон кривой усталости, тем больше значение $\text{tg}\alpha_w$ и меньше долговечность образца. Из вышесказанного следует, что титановый сплав ВТ3-1 при циклическом нагружении обладает небольшой повреждаемостью.

Результаты частотных испытаний и их обсуждение

Наибольший интерес представляет стабильность частоты при нагрузках, близких к пределу усталости. Поэтому проанализируем экспериментальные результаты частотных характеристик для отдельных образцов, которые работали с указанной нагрузкой. Образцы, выбранные для оценки частотных свойств, в процессе испытаний нарабатывали различное число циклов. Для сравнительной оценки за максимальное отклонение частоты ($\Delta\omega$) принято ее изменение в периоде от начальной за $50 \cdot 10^6$ циклов. Отклонение $\Delta\omega$ от начальной в сторону увеличения принято за положительный уход частоты, а в сторону уменьшения — за отрицательный.

На рис. 5 и 6 представлены частотные характеристики двух образцов из титанового сплава ВТ3-1 при нагрузках, близких к пределу усталости.

На рис. 5, а изображены две огибающие кривые, одна из которых (верхняя) соответствует частоте в момент включения установки, а другая (нижняя) — частоте в момент отключения после дневной работы. Следовательно, верхняя кривая показывает изменение начальной частоты (частоты включения установки), а нижняя — конечной (частоты отключения установки). Суточные изменения частоты при наработке циклов лежат в области, ограниченной этими двумя кривыми.

На рис. 5, б показаны частотные характеристики в виде одной ломаной линии. Вертикальные

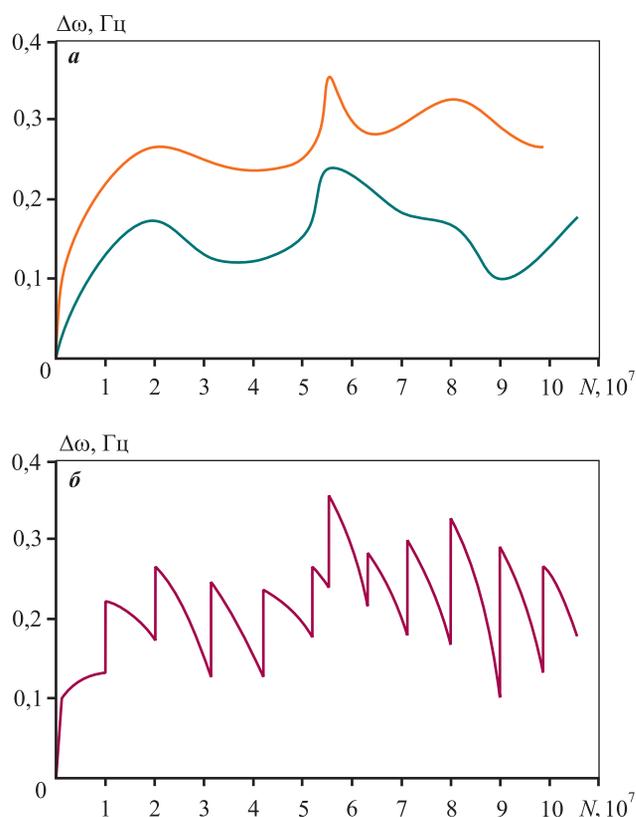


Рис. 5. Графические изображения изменения (а) и отклонения (б) частоты колебаний образца в зависимости от количества циклов нагружения. Начальная частота $\omega_0 = 231,28$ Гц, нагрузка $\sigma = 550$ МПа

Fig. 5. Sample eigenfrequency variations (а) and deviations (б) vs. the number of load cycles. Initial eigenfrequency $\omega_0 = 231.28$ Hz, load $\sigma = 550$ MPa

скачки соответствуют изменению частоты после ночного перерыва испытаний. Наклонные линии показывают ход суточного изменения частоты по мере увеличения числа циклов работы.

Для образца (рис. 5), работавшего при напряжении 550 МПа, общее отклонение частоты составило 0,27 Гц. Это же значение соответствует отклонению частоты за контрольное число циклов 50 млн. Но наибольшее отклонение частоты (0,36 Гц) наблюдалось примерно в середине общего времени работы. Наиболее интенсивно она изменялась за первые 10 млн циклов.

Для образца (рис. 6), работавшего при напряжении 630 МПа, общее отклонение частоты составило 0,34 Гц, за контрольное число циклов (50 млн) — 0,32 Гц. Более значительных изменений частоты в промежуточных точках не выявлено. Как и в предыдущем случае, наиболее интенсивно частота изменялась за первые 10 млн циклов.

Результаты непрерывных испытаний образцов* из титанового сплава ВТ3-1

Continuous tests of the VT3-1 titanium alloy samples*

| Образец 1 | | Образец 2 | |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| Число циклов, млн | Изменение частоты, Гц | Число циклов, млн | Изменение частоты, Гц |
| 1,9 | 0,13 | 2 | 0,01 |
| 5,4 | 0,15 | 4,5 | −0,03 |
| 9,5 | 0,12 | 5,4 | −0,07 |
| 12,8 | 0,22 | 10,5 | −0,06 |
| 14,5 | 0,27 | 14,8 | −0,04 |
| 20,3 | 0,31 | 19 | −0,04 |
| 23,1 | 0,38 | 23,3 | −0,05 |
| 24,7 | 0,37 | 24,2 | −0,07 |
| 26,3 | 0,37 | 25,9 | −0,08 |
| 27,2 | 0,43 | 26,1 | −0,11 |
| 29,8 | 0,42 | 27,6 | −0,1 |
| 32,3 | 0,45 | 28,6 | −0,09 |
| 33,5 | Разрушение образца | 29,4 | Разрушение образца |

* Образец 1 – напряжение $\sigma = 550$ МПа, начальная частота $\omega_0 = 231,28$ Гц; образец 2 – $\sigma = 580$ МПа, $\omega_0 = 238,8$ Гц.

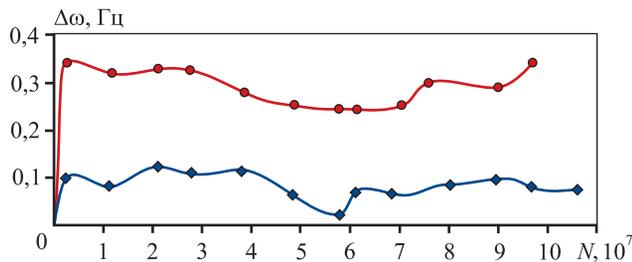


Рис. 6. Графическое изображение отклонений частоты колебаний образца в зависимости от количества циклов нагружения

Начальная частота $\omega_0 = 236,9$ Гц, нагрузка $\sigma = 630$ МПа

Fig. 6. Sample eigenfrequency deviations vs. the number of load cycles

Initial eigenfrequency $\omega_0 = 236.9$ Hz, load $\sigma = 630$ MPa

Можно отметить следующую особенность поведения титанового сплава: отклонение частоты небольшое — 0,36 Гц, а ее изменение при остановке на ночь — 0,1 Гц.

В литературе имеются указания на то, что при усталостных испытаниях перерывы приводят к росту числа циклов до разрушения, практически не влияя на величину предела усталости матери-

алов [21–25]. Что касается частотных испытаний, то, как видно из результатов данной работы, в ходе их проведения перерывы влияли на частоту собственных колебаний образцов: при включении утром она увеличивалась на 0,1 Гц по сравнению с той частотой, которая была зафиксирована при отключении накануне вечером.

Для сравнения были проведены непрерывные испытания двух образцов из титанового сплава ВТ3-1, результаты которых показаны в таблице. Видно, что максимальное изменение частоты для образца 1 составило +0,45 Гц, а для образца 2 — −0,09 Гц, т.е. у первого частота непрерывно увеличивалась, а у второго — незначительно уменьшалась.

Сравнение частотных характеристик, полученных при непрерывных испытаниях, с теми, что зафиксированы при испытаниях с перерывами, показало, что в первом случае не зафиксировано скачков частоты, характерных для остановки на ночь, однако общее отклонение частоты от первоначальной к концу испытаний примерно одинаковое. Данные результаты еще раз подтвердили высокую частотную стабильность титанового сплава ВТ3-1.

Заключение

Титановый сплав ВТЗ-1, испытанный по «мягкой» схеме нагружения консольного изгиба плоских образцов в режиме автоколебаний, имеет высокие показатели сопротивления усталости ($\text{tg}\alpha_w = 0,0394$) и предела выносливости ($\sigma_{-1} = 600$ МПа). Результаты испытаний на усталость показали небольшой разброс значений относительно аппроксимирующей линии кривой усталости, что свидетельствует о высокой стабильности структурно-чувствительных свойств исследуемого сплава.

Оценка частотных характеристик выявила высокую частотную стабильность сплава ВТЗ-1: максимальное отклонение частоты составило 0,36 Гц. Установлено что перерывы в циклических испытаниях приводят к скачкообразному приросту частоты на 0,1 Гц. При этом сравнительный анализ с результатами непрерывных испытаний показал, что общее отклонение частоты примерно одинаковое за весь цикл наработки в обоих случаях.

Таким образом, сплав ВТЗ-1 можно рекомендовать для изготовления изделий со стабильными размерами, где требуются материалы с минимальными проявлениями неупругих свойств.

Список литературы/References

1. Terent'ev V.F., Korableva S.A. Fatigue of metals. Moscow: Nauka, 2015. 479 p. (In Russ).
2. Mughrabi H., Christ H.-J. Cyclic deformation and fatigue of selected ferritic and austenitic steels; specific aspects. *ISIJ International*. 1997;37(12):1154–1169.
3. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Kononov S.V. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams. Cambridge, 2015. 272 p.
4. Shkol'nik L.M. Fatigue testing methodology: Guide. Moscow: Metallurgiya, 1978. 304 p. (In Russ).
5. Gadolina I.V., Makhutov N.A., Ergalov A.V. Varied approaches to loading assessment in fatigue studies. *International Journal of Fatigue*. 2021;144:106035. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106035>
6. Suresh S. Fatigue of metals. Cambridge University Press, 2006. 701 p.
7. Мильников В.В., Шетулов Д.И., Кондрашкин О.Б., Чернышов Е.А., Пронин А.И. Изменение показателей сопротивления усталости конструкционных сталей при различных спектрах нагружения. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019; 62(10): 796–802. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-796-802>
8. Myl'nikov V.V., Kondrashkin O.B., Shetulov D.I., Chernyshov E.A., Pronin A.I. Fatigue resistance changes of structural steels at different load spectra. *Steel in Translation*. 2019;49(10):678–682. <https://doi.org/10.3103/S0967091219100097>
9. Troshchenko V.T., Khamaza L.A., Pokrovsky V.V. Cyclic deformation and fatigue of metals (Ed. M. Bily). Amsterdam: Elsevier, 1993. 500 p.
10. Головин С.А., Тихонова И.В. Температурная зависимость внутреннего трения и свойства деформированных малоуглеродистых сплавов железа. *Деформация и разрушение материалов*. 2013;(7):16–21. Golovin S.A., Tikhonova I.V. Temperature dependence of internal friction and properties of deformed low-carbon iron alloys. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2013;(7):16–21. (In Russ.).
11. Головин С.А., Петрушина А.Г. Температурный спектр внутреннего трения чугунов. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2009;(9):51–54. Golovin S.A., Petrushina A.G. Temperature spectrum of internal friction of cast iron. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. 2009; (9):51–54. (In Russ.).
12. McClafflin D., Fatemi A. Torsional deformation and fatigue of hardened steel including mean stress and stress gradient effects. *International Journal of Fatigue*. 2004;26(7):773–784. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.10.019>
13. Головин И.С., Бычков А.С., Михайловская А.В., Добаткин С.В. Вклад фазовых и структурных превращений в многокомпонентных Al–Mg сплавах в линейные и нелинейные механизмы неупругости. *Физика металлов и металловедение*. 2014;115(2):204. <https://doi.org/10.7868/S0015323014020089>
14. Головин И.С., Бычков А.С., Михайловская А.В., Добаткин С.В. Contributions of phase and structural transformations in multicomponent Al–Mg alloys to the linear and nonlinear mechanisms of anelasticity. *The Physics of Metals and Metallography*. 2014;115(2):192–201. <https://doi.org/10.1134/S0031918X14020082>
15. Кардашев Б.К., Сапожников К.В., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. Внутреннее трение, модуль Юнга и электросопротивление субмикроструктурного титана. *Физика твердого тела*. 2017;59(12):2358–2362. <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.12.45231.131>
16. Kardashev B.K., Sapozhnikov K.V., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Narykova M.V. Internal friction, young's modulus, and electrical resistivity of submicrocrystalline titanium. *Physics of the Solid State*. 2017;59(12):2381–2386. <https://doi.org/10.1134/S1063783417120204>
17. Blanter M.S., Golovin I.S., Neuhäuser H., Sinning H.R.

- Internal friction in metallic materials. *Springer Series in Materials Science*. 2007;90:1–535.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-68758-0>
15. Столяров В.В. Неупругость ультрамелкозернистых металлов. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2010;(11):51–54.
 Stolyarov V.V. Inelasticity of ultrafine-grained metals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*. 2010;(11):51–54. (In Russ.).
 16. Романив О.Н., Лазько Л.П., Крыськив А.С. Зависимость внутреннего трения от усталостной долговечности запатентованной стальной проволоки. *Физико-химическая механика материалов*. 1984;19(6):44–50.
 Romaniv O.N., Laz'ko L.P., Krysy'kiv A.S. Relationship of internal friction to the fatigue life of patented steel wire. *Materials Science*. 1984;19:522–527.
<https://doi.org/10.1007/BF00722120>
 17. Myl'nikov V.V., Shetulov D.I. Fatigue testing facility. Patent 2781466 (RF). 2022. (In Russ.).
 18. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Изменение показателей сопротивления усталости некоторых чистых металлов в зависимости от влияния частоты циклов нагружения. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2010;(3):40–45.
 Myl'nikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Variation in factors of fatigue resistance for some pure metals as a function of the frequency of loading cycles. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2010;51(3):237–242.
<https://doi.org/10.3103/S1067821210030089>
 19. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Чернышов Е.А. Исследование повреждаемости поверхности чистых металлов с учетом частоты циклического нагружения. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2013;(2):55–60.
 Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Investigation into the surface damage of pure metals allowing for the cyclic loading frequency. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013;54(3):229–233.
<https://doi.org/10.3103/S1067821213030103>
 20. Шетулов Д.И. К оценке сопротивления усталости материалов по повреждению поверхностных аномальных слоев. *Физико-химическая механика материалов*. 1984. No. 6. С. 117–120.
 Shetulov D.I. On the estimation of the metals endurance fatigue by the damage of the surface anomalous layers. *Soviet Materials Science*. 1984;(6):117–120.
 21. Stephens R.I., Fatemi A., Stephens R., Fuchs H.O. Metal fatigue in engineering. New York: John Wiley & Sons, 2000. 472 p.
 22. ASM Metals: HandBook. Vol. 19. Fatigue and fracture. ASM International, 2002. 2592 p.
 23. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Springer Science & Business Media, 2001.
 24. Campbell F.C. Fatigue and fracture: Understanding the basics. ASM International, 2012. 525 p.
 25. Lee Y-L., Barkey M.E., Kang H-T. Metal fatigue analysis handbook: Practical problem-solving techniques for computer-aided engineering. Butterworth-Heinemann: Elsevier Inc., 2011. 632 p.

Информация об авторах

Дмитрий Иванович Шетулов – д.т.н., профессор, вед. науч. сотрудник Управления науки Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ).

<https://orcid.org/0009-0009-2826-5477>

E-mail: schetulov@mail.ru

Владимир Викторович Мыльников – к.т.н., доцент кафедры технологии строительства; вед. науч. сотрудник Управления научных исследований, инноваций и проектных работ; зав. лабораторией «Прочность и пластичность функциональных материалов», ННГАСУ.

<https://orcid.org/0000-0001-5545-4163>

E-mail: mrmylnikov@mail.ru

Эдуард Анатольевич Дмитриев – д.т.н., ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета.

<https://orcid.org/0000-0001-8023-316X>

E-mail: rector@knastu.ru

Information about the authors

Dmitry I. Shetulov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department of Science, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NGASU).

<https://orcid.org/0009-0009-2826-5477>

E-mail: schetulov@mail.ru

Vladimir V. Mylnikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction Technologies; Leading Researcher of the Department of Scientific Research, Innovation and Project Work; Head of the Laboratory of Strength and Plasticity of Functional Materials, NNGASU.

<https://orcid.org/0000-0001-5545-4163>

E-mail: mrmylnikov@mail.ru

Eduard A. Dmitriev – Dr. Sci. (Eng.), Rector of Komsomolsk-na-Amure State University.

<https://orcid.org/0000-0001-8023-316X>

E-mail: rector@knastu.ru

Вклад авторов

Д.И. Шетулов – научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

В.В. Мыльников – обеспечение ресурсами, подготовка эксперимента, проведение экспериментов, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

Э.А. Дмитриев – анализ результатов исследований, корректировка текста.

Contribution of the authors

D.I. Shetulov – scientific guidance, correction of the text and conclusions.

V.V. Mylnikov – provision of the resources, preparation and management of the experiments, conducting the experiments, formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, formulation of the conclusions.

E.A. Dmitriev – analysis of the research results, correction of the text.

Статья поступила в редакцию 14.02.2023, доработана 19.03.2023, подписана в печать 20.03.2023

The article was submitted 14.02.2023, revised 19.03.2023, accepted for publication 20.03.2023