

С. А. ЖУКОВ, И. А. ШАДСКИЙ, Н. Д. ЖУКОВ

ВЫНОСЛИВОСТЬ НЕКОТОРЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Создание новых высокопрочных материалов и их широкое применение в конструкциях, испытывающих переменные нагрузки, тесно связано с изучением проблемы усталостной прочности металлов. Особое значение эта проблема имеет для развития современных конструкций двигателей, детали которых работают в очень «жестких» условиях как по нагрузке, так и по температуре.

Наиболее нагруженными являются лопатки турбины и компрессора, находящиеся под воздействием высоких температур в условиях сложнапряженного состояния и под действием вибрационных нагрузок, величина и частота которых могут изменяться в широких пределах во время работы двигателя.

Целью настоящей работы и являлось установление влияния переменных нагрузок высокой частоты на вибрационную прочность лопаточных материалов. Обычные машины, применяемые при испытаниях на круговой изгиб, осевое растяжение — сжатие, работают при сравнительно низких частотах (25—50 гц) и переход на машины с более высокими частотами нагружения (до 5000 гц) позволит сократить время на построение кривой $\sigma-N$, а полученные при этом данные в ряде случаев будут иметь прямое приложение к практике проектирования, например, лопаток турбин и компрессоров, вибрирующих с частотами порядка 1000 гц и выше. В связи с этим является актуальной задачей создание высокочастотных усталостных машин для исследования материалов.

В условиях комнатной температуры изменение частоты не отражается на величине предела выносливости в довольно широких пределах. Исследованиями было установлено, что при изменении частоты приложения нагрузки в пределах от 1000 до 5000 циклов в минуту (15—85 гц) предел выносливости металлов и сплавов практически не изменяется, если нет добавочного влияния других факторов (коррозии и т. л.).

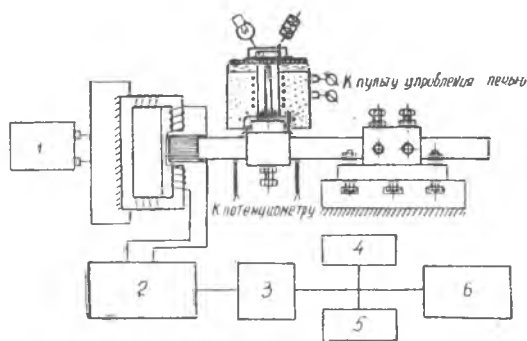
В работе Краузе [1] увеличение частоты с 25 до 500 гц привело к повышению предела выносливости дюралюмина на 8—10%.

Аналогичная картина была получена Б. Н. Васильевым при испытании сплава ЭИ437Б при температуре 700° при частотах 40 и 500 герц. Повышение предела усталости составило около 10%.

Т. Ломас [2] в своих исследованиях повышал частоту испытаний до 2500 гц. Он изучал различные сорта стали, начиная с углеродистой, перлитной, хромомолибденовольфрамовой и кончая аустенитной.

Результаты этих исследований выявили, что для исследованных материалов пределы усталости, установленные на базе 10^8 циклов, с увеличением частоты циклов, повышаются, до некоторого максимума в диапазоне частот от 1000 до 2000 гц, а затем начинают падать; исключением явились результаты испытания аустенитной стали, предел выносливости которой повышался вплоть до 2500 гц.

Наряду с этим, необходимо отметить обратную зависимость между пределом выносливости и частотой при нанесении результатов испытаний в координатах напряжение — время. При одинаковой продолжительности испытания на разных частотах, кривые выносливости ($\sigma - \tau$), полученные при более высоких частотах располагаются ниже кривых, полученных на меньших частотах. Результаты такого исследования алюминиевого сплава RR — 56 приведены для диапазона частот от 24 до 3850 гц (3).



Фиг. 1. Блок — схема испытательной установки с электромагнитным вибратором.

Учитывая все эти соображения, была создана высокочастотная установка и проведены исследования некоторых металлов с целью выявления влияния высокой частоты на величину предела выносливости. Блок-схема этой установки представлена на фиг. 1.

Установка резонансного типа, позволяет доводить до разрушения образцы при изгибе в одной плоскости в условиях их резонансных колебаний. Возбуждение колебаний осуществляется с помощью мощной электромагнитной системы, состоящей из усилителя и преобразователя, возбуждающего резонансные колебания испытываемых образцов. Электромагнитный преобразователь представляет собой консольно закрепленную балку, с зажатым на ней в патроне образцом, конец которой находится в магнитном поле переменного тока звуковой частоты, создаваемом специальными обмотками. Питание обмоток производится от усилителя мощностью 25 квт. Согласование выхода усилителя с нагрузкой осуществляет-

ся изменением числа витков обмоток (обмотки секционированы).

Используя принцип динамического демпфера, роль которого выполняет образец, на преобразователе получаем значительные амплитуды колебаний образца при весьма малых, по сравнению с ними, амплитудах колебаний балки.

Установка подстраивается в резонанс изменением длины балки и частоты звукового генератора. Состояние резонанса определяется по наибольшей амплитуде колебаний образца при заданном уровне входного сигнала от звукового генератора.

Испытание сплавов САП, ВТЗ-1, ЭИ961 и типа ЭИ617 производилось на гладких цилиндрических образцах консольного типа с диаметром рабочего сечения 7,52 мм и цилиндрическими головками диаметром 15 мм для закрепления их в патроне на балке.

Рабочая длина образцов устанавливалась в зависимости от частоты испытания f и модуля упругости металла E при температуре испытания. Определение рабочей длины образцов (l_p) производилось по формуле 1 на основе расчета собственной частоты консольно закрепленной балки равного сечения, колеблющейся по 1 тону.

$$l_p = \sqrt{\frac{(1,875)^2}{2\pi f}} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \text{ мм}, \quad (1)$$

где: l_p — рабочая длина образца, мм.

f — частота колебаний образца, сек.

E — модуль упругости исследуемого металла, кг/мм,

J — момент инерции рабочего сечения, мм⁴.

m — масса на единицу длины кг.сек²/мм.

Амплитуда колебаний образца рассчитывалась в зависимости от задаваемого напряжения по формуле:

$$A = 0,5682 \frac{l_p^2}{Ed} \cdot \sigma \cdot \text{мм},$$

где A — амплитуда колебаний, мм;

d — диаметр рабочего сечения, мм;

σ — задаваемое напряжение, кг/мм²

и для заданного уровня напряжения поддерживалась постоянной. При высокотемпературных испытаниях изменение температуры по высоте образца не превышало $\pm 5^\circ\text{C}$.

Замер амплитуды колебаний производился оптическим методом с точностью до 0,01 мм с помощью микроскопа МБС-2.

При проведении испытаний фиксировался момент появления трещины в образце по уменьшению его собственной частоты и испытание прекращалось в момент, когда трещина пройдет половину сечения.

Количество циклов, которые выдерживал образец в процессе испытания, фиксировалось пересчетным устройством ПС-10000.

Объектами исследования являлись: материал САП, титановый сплав ВТЗ—1, сталь ЭИ961 и жаропрочный сплав типа ЭИ-617.

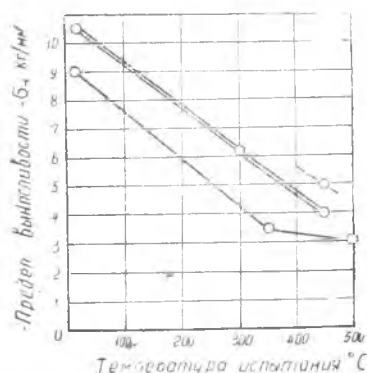
Образцы материала САП (спекаемая алюминиевая пудра) изготавливалась из прутков диаметром 20 мм. Механические свойства этой партии материала, содержащей 8,9% Al_2O_3 и 0,12 Fe, приведены в следующей таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства материала САП

$t, ^\circ C$	$\sigma_{пц}$ кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кг/мм ²	σ_b кг/мм ²	δ %	ψ %	$E_{ст}$ кг/мм ²
20°	10,6	24,8	36,2	6,8	11,1	6,600
300°	8,1	16,12	19,5	5,2	17,9	4,400
500°	4,4	10,0	11,0	1,2	10,5	3,700

Результаты исследования, приведенные на рис. 2, показывают, что пределы выносливости образцов САП-а повышаются с увеличением частоты испытания как при нормальной, так и при повышенных температурах. Повышение частоты приложения нагрузки от 1150 до 2000 гц приводит к повышению σ_{-1} , полученного на базе $2 \cdot 10^8$ циклов при температуре 450°С от 4 до 5 кг/мм² (\approx на 25%), что для данного материала, имеющего предел выносливости при изгибе с вращением при температуре 500° и частоте 50 гц 3 кг/мм² на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, является весьма существенным.



Фиг. 2. Зависимость предела выносливости материала САП от температуры и частоты испытания
 0 — частота 50 гц, база испытаний: $2 \cdot 10^7$; частота 1150 гц | База испытаний $2 \cdot 10^8$
 0 — частота 2000 гц |

Наиболее полные результаты по влиянию частот на пределы выносливости были получены при испытаниях сплава ВТЗ-1. Исследовались образцы трех плавов — 422, 423 и 405. Химический состав и механические свойства плавов соответствовали требованиям технических условий и были близки между собой (см. таблицы 2 и 3). Однако окончательная механическая обработка образцов этих плавов была различной: образцы плавов 422 и 423 полировались до чистоты поверхности $\nabla\nabla\nabla 10$, а образцы плавки 405 до $\nabla\nabla\nabla 11-12$ (без промежуточного процесса шлифования).

Результаты испытаний, приведенные на рис. 3, указывают на повышение предела выносливости с увеличением частоты приложения нагрузки. В частности, повышение частоты от 600 до

Таблица 2

Химический состав сплава ВТЗ-1.

№ плавки	Ti	Al	Cr	Mo	Примесей не более					
					Fe	Si	C	O ₂	H ₂	N ₂
405	осн.	5,5	2,2	2,1	0,53	0,11	0,08	—	0,024	0,024
423	осн.	4,57	1,89	2,14	0,38	0,23	—	—	—	—

Таблица 3

Механические свойства сплава ВТЗ-1

T-ра °C	№ плавки	σ_b	δ	ψ	A_k	H_B	$d_{огн. мм}$
20 C	405	109,1	10,4	30,5	4,78	321	3,4
20°C	422—423	110,0	11,0	33,8	—	—	—
450°C	—	58	14,0	35,2	—	—	—

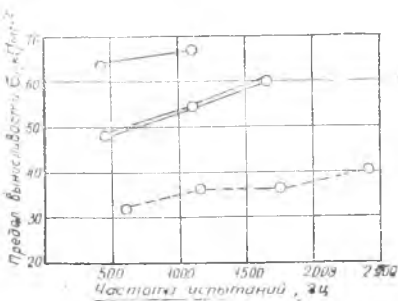
2400 гц приводит к увеличению предела выносливости сплава ВТЗ-1 при температуре 450°C от 32 до 40 кг/мм² ($\approx 25\%$).

Сравнение результатов испытания при температуре 20°C образцов плавки 422, 423 с образцами плавки 405 показывает, что значительное влияние на увеличение δ оказывает исключение

Таблица 4

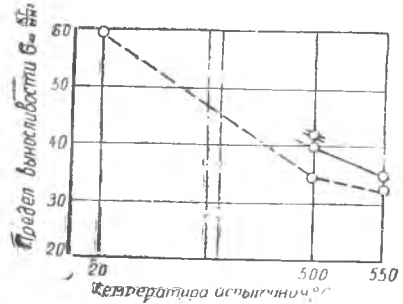
Механические свойства стали ЭИ961.

T-ра t°C	σ_b кг/мм ²	$\sigma_{0.2}$ кг/мм ²	$\sigma_{пц}$ кг/мм ²	δ %	ψ %	a_k	E кг/мм ²
20	130,3	117,2	111,0	15,3	67,3	9,7	20.000
500	105,3	97,0	92,0	13,9	66,2	13,0	14.500
550	92,8	87,8	81,3	11,2	64,0	14,7	12.500



Фиг. 3. Зависимость предела выносливости сплава ВТЗ-1 от частоты и температуры испытаний.

Плавки 422, 423. База испытания — 10⁷.
Температура испытаний — 20°C. Плавка 405.
База — 10⁸, температура — 20°C. 0 — плавка 405. База — 10⁸, температура — 450°C.



Фиг. 4. Зависимость предела выносливости от температуры и частоты испытания стали ЭИ961.

0 — частота 200 гц } Газа испытаний
0 — частота 1000 гц } — 10⁷
0 — частота 1400 гц }

режима шлифования и повышение чистоты поверхности при механической обработке образцов этого сплава.

Результаты испытания стали ЭИ961 получены на образцах, изготовленных из прутков $\varnothing 40$ мм плавки П-528—58 с отпуском 580°C . Механические свойства этой стали представлены в таблице 4.

На рис. 4 представлены результаты испытания этой стали, которые свидетельствуют о повышении предела выносливости с увеличением частоты приложения нагрузки.

Аналогичная картина получена и при испытании жаропрочного сплава типа ЭИ617.

Таким образом, все результаты исследования, проведенные по различным сплавам, показывают увеличение предела выносливости с повышением частоты приложения нагрузки. На величину предела выносливости одних сплавов частота воздействует более резко (например, на сплав ВТЗ-1), на другие менее заметно (сталь ЭИ961). Причина повышения предела выносливости с увеличением частоты приложения нагрузки, пока не ясна и в настоящее время нельзя сделать каких-либо определенных выводов, объясняющих это явление.

Для окончательного суждения о различной скорости возрастания предела выносливости различных сплавов с увеличением частоты испытания, необходимо провести дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krouse G, Proc., ASTM, 34, 1934, II, 1956.
2. Lomas T., Ward D., Raft D., Golbeck E., International Conference on Fatigue of Metals, London, Sept, 1956.
3. Wade A. and Grootenhuis P., International Conference on Fatigue of Metals, London, Sept., 1956.