

$$a_2 = 2\mu_0 k q_2 \sqrt{\frac{m}{c}}; \quad a_3 = m.$$

При этом предполагалось, что $\omega_r = \omega_\alpha = \alpha_0$.

В соответствии с критерием Гурвица при $t \rightarrow \infty$ δ и ε будут стремиться к нулю, если

$$a_0 > 0, \quad a_1 > 0, \quad a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \quad a_3 > 0.$$

Коэффициенты a_1 и a_3 всегда положительны, поэтому условия устойчивости движения сводятся к двум неравенствам:

$$\mu_0 k q_2 > \eta_0 c + \frac{1}{2} \frac{\nu_0 q_1 N}{\omega R} \sqrt{\frac{c}{m}},$$

$$\mu_0^4 k^3 q_2^3 > c \left(\mu_0 k q_2 - \eta_0 c - \frac{1}{2} \frac{\nu_0 q_1 N}{\omega R} \sqrt{\frac{c}{m}} \right).$$

В. И. Цейтлин

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО НАГРУЖЕНИЯ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- σ_a — амплитудное напряжение переменной составляющей цикла, кгс/мм²;
- σ_{-1} — предел выносливости при симметричном цикле, кгс/мм²;
- σ_c — предел выносливости или предельное напряжение при асимметричном цикле, кгс/мм²;
- σ_c^z — предел выносливости при асимметричном нагружении с учетом повторности нагружения статической составляющей, кгс/мм²;
- σ^t — эквивалентные термические напряжения при теплосменах, кгс/мм²;
- σ_m — среднее напряжение асимметричного цикла, кгс/мм²;
- σ_m^z — среднее повторно-статическое напряжение асимметричного цикла, кгс/мм²;
- σ_m^t — среднее напряжение асимметричного цикла с учетом температурных напряжений, кгс/мм²;
- σ_B — предел прочности материала, кгс/мм²;
- $\sigma_{B\tau}^t$ — предел длительной прочности при температуре $t^\circ\text{C}$ за время τ часов, кгс/см²;
- $\sigma_{B\tau}^z$ — предел длительной прочности с учетом повторности нагружения, кгс/мм²;
- σ_v — действующее переменное напряжение, кгс/мм²;
- k_β — коэффициент запаса прочности при пропорциональном возрастании составляющих нагрузок до предельного состояния;
- k_v — коэффициент запаса прочности при возрастании только переменной составляющей до предельного состояния;
- N — число циклов нагружения переменной составляющей;
- z — число циклов повторного статического нагружения.

Известно, что большинство деталей ГТД работает в условиях многокомпонентного нагружения. Например, рабочие лопатки

турбин подвержены статическим нагрузкам от центробежных сил, возбуждению от переменных сил с различной частотой, термическим напряжениям, подвержены многократному приложению указанных нагрузок, т. е. повторному нагружению.

Несмотря на это, оценка запасов прочности и долговечности деталей в основном ведется раздельно по каждой из составляющих нагрузок. В лучшем случае при оценке коэффициентов запаса по переменным напряжениям учитывается асимметрия цикла за счет статической составляющей. При этом, как правило, не учитывается продолжительность действия этих нагрузок, что, по-видимому, весьма важно в случаях, когда деталь работает в условиях повышенных температур.

В настоящее время в связи с возрастанием требований к параметрам, надежности и ресурсу двигателей стало необходимо более точно учитывать совместное влияние различных видов нагружения на долговечность деталей. Актуальность этой проблемы очевидна. В подтверждение этого можно привести большое число работ, проведенных в последнее время и посвященных многокомпонентному нагружению. Но большинство из них относится к конкретному сочетанию различного вида нагрузок и не дает единой расчетной методики, которая позволила бы определить запасы прочности при других комбинациях многокомпонентного нагружения.

Так как число возможных комбинаций нагрузок не ограничено, то необходимо иметь методику, позволяющую по данным отдельных видов нагружения судить о прочности детали при совместном приложении нагрузок.

Наиболее близко к решению задачи в такой постановке подошел Л. П. Лозицкий [1], предложивший схему построения предельной поверхности по отдельным видам нагружения: динамическому, статическому и термоциклическому. Построенная по составляющим этих нагрузок поверхность представляет собой эллиптический параболоид, определяющий возможности материала в условиях трехкомпонентного нагружения. Однако предложенная схема не учитывает частоту нагружения и повторность приложения статических нагрузок, что может существенно сказаться на результатах.

Предлагаемый метод позволяет по данным отдельных видов нагружения судить о запасах прочности при многокомпонентном нагружении, включая влияние повторности и частоты нагружения переменной составляющей.

Вначале рассмотрим влияние частоты нагружения при усталостных испытаниях жаропрочных сплавов [2].

Сравнивая кривые усталости жаропрочных сплавов при различных частотах (при повышенных температурах) можно заметить, что при одинаковом времени нагружения пределы выносливости почти совпадают независимо от числа циклов нагружения (рис. 1). Так, для сплава ХН62ВМКЮ за время 55 часов предел

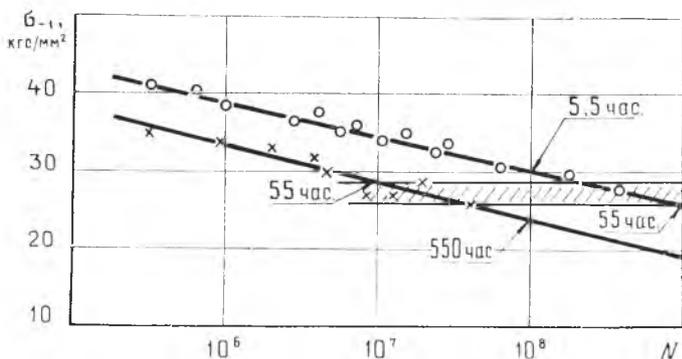


Рис. 1. Выносливость сплава ХН62ВМКЮ при различных частотах ($t=900^{\circ}\text{C}$): \circ — при 5000 гц ; \times — при 50 гц

выносливости равен 26—28 $\text{кгс}/\text{мм}^2$ и для 50, и для 5000 гц , хотя в первом случае число циклов составляет 10^7 , а во втором — 10^9 . Аналогично для сплава ЖС-6К предел выносливости равен 30 — 32 $\text{кгс}/\text{мм}^2$ для частот 50, 880 и 1550 гц , хотя число циклов составляет соответственно 10^7 ; $1,7 \cdot 10^8$ и $3 \cdot 10^8$.

Можно предположить, что в некотором диапазоне частот и главным образом при температурах, при которых проявляется ползучесть, предел выносливости зависит от того, сколько времени материал находится под максимальным напряжением. Это предположение согласуется с гипотезой суммирования повреждений при оценке запаса прочности для материала, находящегося под различной нагрузкой.

Воспользовавшись этим предположением, можно по кривым выносливости при одной частоте получить соответствующие кривые при других частотах. Например, по кривым выносливости при 50 гц и зависимости продолжительности нагружения от частоты для сплава ХН62ВМКЮ можно построить кривые выносливости при 5000 гц (рис. 2). Аналогично для сплава ЖС-6К по кривым при 50 гц можно построить кривые при частотах 880 и 1550 гц . Нанесенные на график экспериментальные точки для тех же частот удовлетворительно совпадают со значениями, полученными построением.

Далее рассмотрим поведение материала в условиях длительного статического нагружения и повышенных температур при непрерывном и повторном нагружении [3].

Были проведены испытания на длительную прочность стали 4Х15Н7Г7Ф2МС при непрерывном нагружении и при повторном нагружении этапами разной продолжительности — 1 и 5 часов (рис. 3). При этом в первом случае производились повторные нагружения и нагревы, во втором — только повторные нагружения. Было установлено, что повторность нагружения снижает длительную прочность, причем это снижение зависит от количества цик-

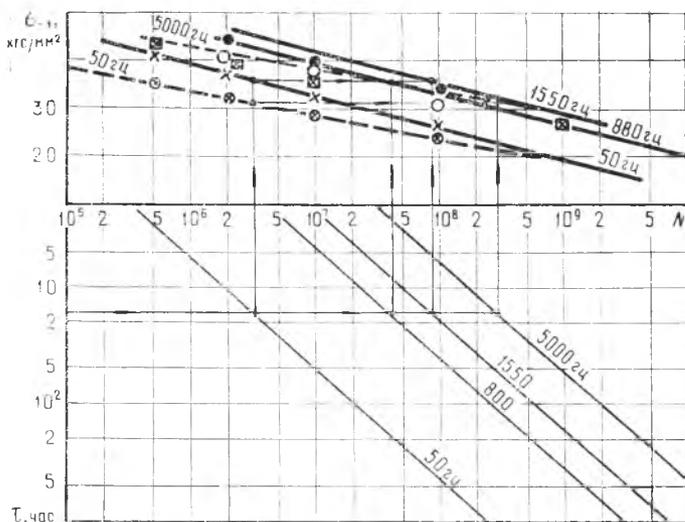


Рис. 2. Определение выносливости сплавов при различных частотах по продолжительности нагружения ($t=900^{\circ}\text{C}$):

--- сплав ХН62ВМКЮ \odot -50гч, \square -5000гч,
 — сплав ЖС-6К Х-50гч, \square -880гч, \triangle -1550гч.

лов нагружения и не зависит от продолжительности этапа. А повторные нагружения при постоянной температуре и повторные нагружения с охлаждением и последующим нагревом образцов одинаково снижают длительную прочность (имеется в виду медленное охлаждение и нагрев).

Отношение предела длительной прочности при повторном нагружении к соответствующему значению длительной прочности при непрерывном нагружении было названо коэффициентом чувствительности к повторному нагружению и обозначено через k_z . Построив зависимость k_z от числа циклов для разных материалов и различных условий испытаний, можно проследить влияние некоторых факторов на чувствительность к повторному нагружению (рис. 4). Проведенные эксперименты показывают, что чем более жаропрочный материал, тем менее он чувствителен к повторному нагружению. С по-

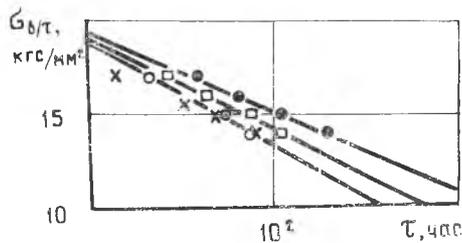


Рис. 3. Длительная прочность сплава 4X15N7Г7Ф2МС при повторном нагружении:

\circ — этап 1 час; \times — этап 1 час с нагревом;
 \triangle — непрерывные нагружения; \square —
 этап 5 час. с нагревом

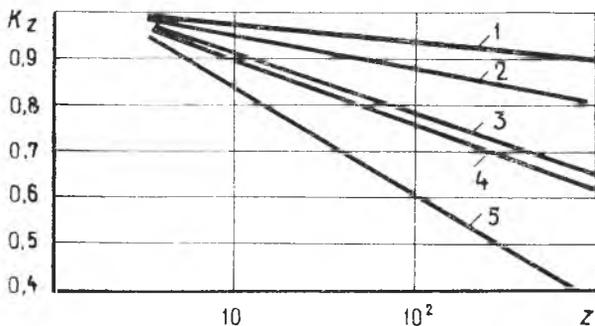


Рис. 4. Коэффициент чувствительности сплавов к повторности нагружения при длительных испытаниях:

1 — 4X12Н8Г8МФБ-600°C, ЖС-6К-800°C; 2 — 4X15Н7Г7Ф2МС-800°C; 3 — 4X12Н8Г8МФБ-700°C, ЖС-6КП-950°C; 4 — ЖС-6К-1000°C; 5 — 20X3МВФ-55°C с надрезом

вышением температуры и концентрации напряжений чувствительность к повторному нагружению повышается. Во всех случаях с увеличением числа циклов чувствительность непрерывно повышается, т. е. коэффициент k_z падает.

Рассмотрим совместное действие статических и переменных нагрузок.

Имеется большое количество экспериментальных данных [4], свидетельствующих о том, что кривые зависимости взаимного влияния статических и переменных составляющих нагрузок на предельное состояние материала (рис. 5) укладываются между линейной зависимостью (по Гудману)

$$\sigma_p = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)$$

и квадратичной зависимостью (по Герберу)

$$\sigma_p = \sigma_{-1} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 \right].$$

Следует иметь в виду, что это влияние меняется с изменением числа циклов нагружения. Хэйвуд [5] предложил схему построения диаграммы асимметричных циклов, учитывающую влияние числа циклов. По мере увеличения числа циклов кривая зависимости между предельными значениями переменной и статической составляющей меняется от линейной к параболической.

Совместим в одной обобщенной диаграмме отдельные составляющие нагрузок (статическую, переменную, повторно-статическую), учитывая продолжительность их действия (рис. 6). Термические напряжения при этом прибавим к статическим, а количество теплосмен — к числу повторных нагружений.

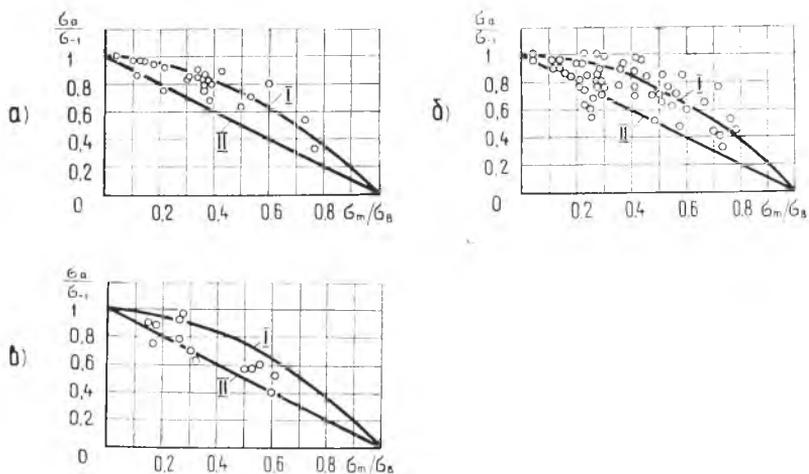


Рис. 5. Диаграмма предельных напряжений:
 I — по Герберу; II — по Гудману; а — стали; б — сплавы алюминия; в — сплавы магния, титана, жаропрочные

В правом нижнем углу диаграммы построим кривую длительной прочности по времени при заданной температуре.

Для выбранного ресурса и заданного числа циклов нагружения (например, $Z=3700$ и $\tau=55$ час) по известной чувствительности сплава к повторности нагружения ($k_z=0,875$) подсчитаем значение длительной прочности с учетом повторности, определяющее предельную точку ($\sigma=55$ кгс/мм²) диаграммы асимметричных циклов. Последняя располагается в правом верхнем углу.

В левом верхнем углу построим кривую усталости, полученную при любой частоте нагружения; в нижнем углу — график, связывающий продолжительность испытания с числом циклов в зависимости от частоты нагружения.

Используя предположение о независимости предела выносливости от числа циклов нагружения для заданной продолжительности испытания, перестроим имеющуюся кривую выносливости на требуемую частоту (например, 50 гц) и найдем вторую предельную точку диаграммы асимметричных циклов по оси переменной составляющей для выбранного ресурса. При наличии экспериментальных данных по усталости для рассматриваемой частоты нагружения предельную точку диаграммы можно снять непосредственно с экспериментальной кривой. Если переменные напряжения действуют в течение части ресурса, то предел выносливости можно выбрать для заданного числа циклов нагружения при известной частоте.

Между двумя предельными точками диаграммы асимметричных циклов строим квадратичную зависимость, которая определя-

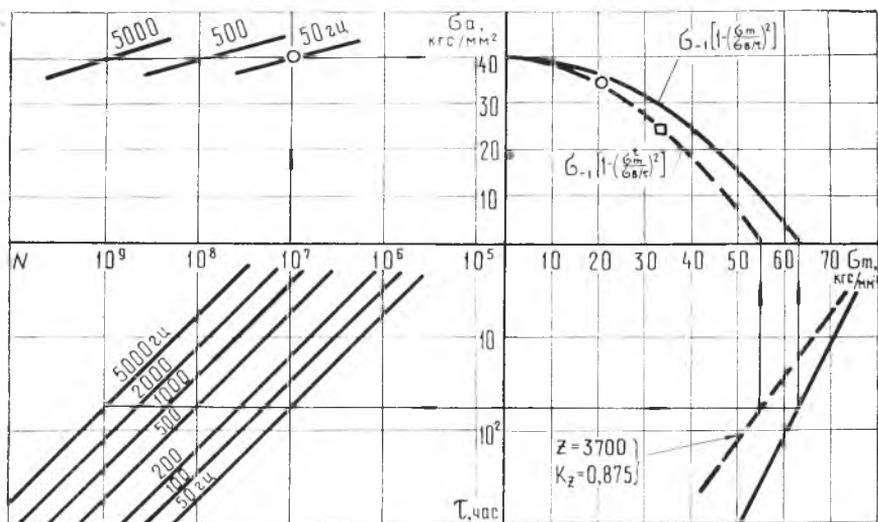


Рис. 6. Обобщенная диаграмма предельных напряжений материала ЖС-6КП ($t = 750^\circ\text{C}$)

ет несущую способность материала на заданный ресурс при любой комбинации составляющих нагрузок.

Имеющиеся экспериментальные данные в условиях комбинированного нагружения для сплава ЖС-6КП удовлетворительно совпадают с данными, полученными по обобщенной диаграмме, построенной по предлагаемой методике. Так, при испытаниях этого сплава* при температуре 750° и частоте 50 гц при симметричном нагружении предел выносливости $\sigma_{-1} = 40 \text{ кгс/мм}^2$ на базе 10^7 циклов, при статической асимметрии $\sigma_m = 20 \text{ кгс/мм}^2$ получен предел выносливости $\sigma_{\sigma} = 34 \text{ кгс/мм}^2$ (см. рис. 6, значок о); при теплосменах с эквивалентными напряжениями $\sigma' = 12 \text{ кгс/мм}^2$ и $z = 3700$ циклов получен предел выносливости $\sigma_{\sigma}^z = 25 \text{ кгс/мм}^2$ на той же базе 10^7 циклов (значок □).

В то же время по обобщенной диаграмме при $\sigma_{-1} = 40 \text{ кгс/мм}^2$ и $\sigma_{-1}^{750} = 62 \text{ кгс/мм}^2$ (за 56 часов, что соответствует при 50 гц числу циклов 10^7) получено значение $\sigma_{\sigma} = 36 \text{ кгс/мм}^2$; при асимметрии с учетом термических напряжений при $\sigma_m^t = 32 \text{ кгс/мм}^2$ и повторности $z = 3700$ циклов, что соответствует $(\sigma_{\sigma}^z)^{750} \rightarrow = 55 \text{ кгс/мм}^2$,

* Испытания проводились в ИПП АН УССР В. Т. Трощенко и Ю. М. Шемеганом.

получено значение $\sigma_p^z = 26 \text{ кгс/мм}^2$. Сравнение пределов выносливости показывает, что полученные по обобщенной диаграмме величины близки к экспериментальным (36 кгс/мм^2 и 34 кгс/мм^2 ; 26 кгс/мм^2 и 25 кгс/мм^2).

Коэффициенты запасов прочности можно найти из условия пропорционального изменения составляющих нагрузок при достижении предельного состояния или при изменении только переменной составляющей. Значения коэффициентов запаса при изменении предельной кривой по квадратичной зависимости соответственно будут равны:

при пропорциональном изменении нагрузок

$$k_\beta = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m^t k_\beta}{\sigma_{B/\tau}^z} \right)^2 \right],$$

откуда

$$k_\beta = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_m^t} + \sqrt{\left[\frac{1}{2} \frac{\sigma_v}{\sigma_{-1}} \left(\frac{\sigma_{B/\tau}^z}{\sigma_m^t} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\sigma_{B/\tau}^z}{\sigma_m^t} \right)^2};$$

при изменении только переменной составляющей

$$k_v = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m^t}{\sigma_{B/\tau}^z} \right)^2 \right].$$

Интересно сравнить полученные значения коэффициентов запаса с соответствующими значениями при линейном изменении предельной кривой асимметричного нагружения. В этом случае коэффициенты запасов k_β и k_v рассчитываются по формулам:

$$k_\beta = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v + \sigma_{-1} \frac{\sigma_m^t}{\sigma_{B/\tau}^z}};$$

$$k_v = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_v} \left(1 - \frac{\sigma_m^t}{\sigma_{B/\tau}^z} \right).$$

Для оценки полного запаса прочности целесообразно использовать коэффициент k_β , предположив, что все составляющие нагрузок изменяются пропорционально при достижении предельного состояния. Кривую предельного состояния при этом рекомендуется аппроксимировать квадратичной параболой.

Методика является довольно приближенной. Она основана на принципе простого суммирования при оценке влияния различных факторов, и для ее подтверждения требуется продолжение экспериментов при многокомпонентном нагружении с изучением происходящих при этом физических процессов. Тем не менее, оценка запасов прочности по предложенной методике дает более полное представление о несущей способности узлов и деталей в реальных условиях нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лозицкий Л. П. Расчет долговечности в условиях трехкомпонентного нагружения. В сб. «Надежность и долговечность авиационных ГТД». Вып. 1. Киев, КИИГА, 1971.
2. Сулима А. М. и др. Некоторые данные о влиянии повышенных частот на выносливость жаропрочных сплавов. В сб. «Труды научно-технической сессии по жаропрочности материалов и сплавов института металлургии им. А. А. Байкова АН СССР». М., «Металлургия», 1964.
3. Сейтлин В. П. Некоторые вопросы конструкционной прочности материалов. В сб. «Некоторые вопросы проектирования и доводки авиационных газотурбинных двигателей». Вып. 45. Куйбышев, КУАН, 1970.
4. Форрест П. Г. Усталость металлов. Перевод с англ. М., «Машиностроение», 1968.
5. Хэйвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости. Перевод с англ. М., «Машиностроение», 1969.

Н. С. Кондрашов

КОЛЕБАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК С СОСРЕДОТОЧЕННОЙ МАССОЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

В газотурбинных двигателях корпуса основных и форсажных камер сгорания, сопла, трубопроводы большого диаметра и некоторые другие конструкции представляют собой оболочки. В большинстве случаев оболочечные конструкции несут на своих поверхностях сосредоточенные включения масс в виде бобышек, штуцеров, мелких агрегатов. Основной динамической нагрузкой для таких деталей является пульсирующее давление в омывающем конструкции потоке, которое в общем случае наиболее полно можно описать случайными процессами.

Вынужденные колебания механических систем с распределенными параметрами, подверженных случайным воздействиям, в том числе и тонкостенных оболочек, достаточно полно рассмотрены в работах [1, 3, 7, 10, 11]. В указанных работах решение представлено в виде разложения по собственным функциям. Применительно к системам с дополнительной сосредоточенной массой такой метод требует предварительного решения громоздкой детерминистической задачи. Для тонкостенных оболочек примеры решения таких задач приведены в работах [2, 5, 6, 12]. Каждую собственную форму колебаний в этом случае представляют в виде разложения по собственным функциям системы без дополнительной массы, а собственные частоты определяют из решения громоздких трансцендентных уравнений.

Изложенный в данной статье метод основан на использовании функции Грина [9]. Этот метод, с одной стороны, позволяет избежать решения трансцендентного уравнения, с другой, — получить решение в более компактном виде. Предлагаемый метод ока-