

Механика деформируемого тела

УДК 539.376

Ю.А. Еремин, И.Н. Булавинцев

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВИБРОПОЛЗУЧЕСТИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Разработана методика построения модели виброползучести резьбовых соединений по результатам натурального эксперимента. Построены определяющие соотношения, описывающие виброползучесть резьбового соединения М10х1,5 из сплавов ЭП693 и ЭИ698.

Ресурс болтовых соединений в большинстве случаев назначается из условия обеспечения необходимых запасов плотности стыков в течение всего срока службы. В силу этого необходимо правильно назначать монтажную затяжку, для чего, в свою очередь, необходимо знать закон изменения затяжки в процессе наработки, т.е. кривую релаксации. Кроме этого, для более точного назначения ресурса болтовых соединений необходимо учитывать, что в реальном изделии конструкционные элементы нагружены не только статическими, но и вибрационными усилиями. Следовательно, решение вопросов надежности болтовых соединений связано с разработкой методов расчета на ползучесть при совместном действии нестационарной статической нагрузки $Q_m(t)$ и вибрационной нагрузки с амплитудой $Q_a(t)$, где t - время. В дальнейшем явление ползучести элементов конструкций при совместном действии статической $Q_m(t)$ и циклической $Q_a(t)$ составляющих нагрузки при довольно высокой частоте циклирования (более 10 Гц) и коэффициенте амплитуд $Q_a(t)/Q_m(t) \leq 0,2$ будем называть виброползучестью.

Расчет болтового соединения в условиях виброползучести представляет сложную задачу, которая в настоящее время не имеет эффективного решения [1]. При этом основная трудность возникает при построении адекватной реологической модели резьбового соединения, под которой понимаются определяющие соотношения, связывающие нестационарную статическую и вибрационные осевые силы (обобщенные силы) непосредственно с вызванным ползучестью перемещением опорного торца гайки относительно сечения болта, совпадавшего первоначально с этим торцом (обобщенное или характерное перемещение).

При решении поставленной задачи целесообразно воспользоваться феноменологическим методом построения реологических моделей конструкций [2]. В рамках этого метода построены модели резьбовых соединений, работающих в неизотермических условиях под воздействием нестационарной нагрузки [3,4], в которых основной вариант определяющих соотношений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \delta_p &= \delta_u + \delta_v + \delta_w; \quad \dot{\delta}_w = f(Q, T), \quad \delta_w(0) = 0; \\ \delta_u &= \sum_k \delta_{uk}, \quad \dot{\delta}_{uk} = \gamma_k [a_k(Q, T) - \delta_{uk}], \quad \delta_{uk}(0) = 0; \\ \delta_v &= \sum_k \delta_{vk}, \quad \dot{\delta}_{vk} = \begin{cases} \gamma_k [b_k(Q, T) - \delta_{vk}], & b_k > \delta_{vk}; \\ 0, & b_k \leq \delta_{vk}, \end{cases} \quad \delta_{vk}(0) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где δ_p - вызванное ползучестью перемещение опорного торца гайки относительно сечения болта, совпадавшего первоначально с этим торцом; $\delta_u, \delta_v, \delta_w$ - вязкоупругая, вязкопластическая и вязкая составляющие δ_p соответственно; γ_i - постоянные величины; $a_i(Q, T), b_i(Q, T), f(Q, T)$ - функции нагрузки и температуры; Q - статическая нагрузка, растягивающая болт; T - температура; время t для краткости опущено.

Уравнения вида (1) удовлетворительно описывают экспериментальные данные о ползучести резьбовых соединений при двух изменяющихся факторах: нагрузка и температура. В случае виброползучести также два изменяющихся фактора: циклическая составляющая Q_a и статическая составляющая Q_m нагрузки. Логично было бы ожидать, что эти уравнения удовлетворительно опишут и виброползучесть резьбовых соединений. В этом случае рассматриваемые определяющие соотношения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \delta_p &= \delta_u + \delta_v + \delta_w; \quad \dot{\delta}_w = f(Q_m, Q_a), \quad \delta_w(0) = 0; \\ \delta_u &= \sum_k \delta_{uk}, \quad \dot{\delta}_{uk} = \gamma_k [a_k(Q_m, Q_a) - \delta_{uk}], \quad \delta_{uk}(0) = 0; \\ \delta_v &= \sum_k \delta_{vk}, \quad \dot{\delta}_{vk} = \begin{cases} \gamma_k [b_k(Q_m, Q_a) - \delta_{vk}], & b_k > \delta_{vk}; \\ 0, & b_k \leq \delta_{vk}, \end{cases} \quad \delta_{vk}(0) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где Q_m, Q_a - статическая и вибрационная нагрузки, растягивающие болт; остальные параметры аналогичны использованным в (1); время t для краткости опущено.

Параметры уравнений вида (2) определялись по результатам испытаний на ползучесть при растяжении резьбовых соединений типа болт-гайка М10х1,5 из жаропрочных сплавов ХН73МБТЮ (ЭИ698) и ХН68ВМТЮК (ЭП693). Следует отметить, что исследования проводились в пределах первой и второй стадии ползучести. Время выдержки под нагрузкой определялось выходом кривой ползучести на установившийся участок и возможностью надежного определения минимальной скорости ползучести.

Испытания проведены на серийной установке МП-ЗБ с помощью специально спроектированного приспособления, позволяющего прикладывать статическую Q_m и циклическую Q_a осевые силы к головке болта и опорному торцу гайки и регистрировать осевое перемещение опорного торца гайки относительно сечения болта, совпадающего первоначально с этим торцом. Уровни нагрузки Q_m и Q_a в базовом эксперименте соответствуют реальным условиям нагружения крепежных деталей болтовых соединений газотурбинных двигателей. Температура испытаний составляла 750°C.

На рис. 1,б и рис. 2,б точками показаны исходные кривые ползучести, осредненные по результатам испытаний не менее двух образцов на каждом уровне Q_m и Q_a . Цифры на графиках обозначают режимы нагружения согласно схемам на рис. 1,а и рис. 2,а. Режим 0 соответствует полной разгрузке по Q .

По экспериментальным данным по методике, изложенной в [5], были найдены характеристики ползучести $\gamma_k, a_k(Q_m, Q_a), b_k(Q_m, Q_a), f(Q_m, Q_a)$. Далее параметры $a_k(Q_m, Q_a), b_k(Q_m, Q_a), f(Q_m, Q_a)$ аппроксимировались апробированными зависимостями вида

$$\left. \begin{aligned} a_k(Q_m, Q_a) &= \alpha_k A \exp\left(A_0 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{m \frac{Q_a}{Q^*} + M}; \\ b_k(Q_m, Q_a) &= \alpha_k B \exp\left(B_0 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{m \frac{Q_a}{Q^*} + M}; \\ f(Q_m, Q_a) &= C \exp\left(C_0 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{n \frac{Q_a}{Q^*} + N}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\alpha_k, A, B, C, A_0, B_0, C_0, m, n, M, N$ - константы резьбового соединения определенного типоразмера с конкретным сочетанием материалов болта и гайки при заданной температуре в исследуемом диапазоне нагрузок Q_m и Q_a ; Q^* - фиксированный уровень нагрузки.

Конкретизация аналитических выражений (3) выполнена методом наименьших квадратов с использованием реализаций во всех точках изменения факторов Q_m и Q_a . Сформулированные по результатам испытаний определяющие соотношения (3) после интегрирования при постоянных Q_m и Q_a имеют вид:

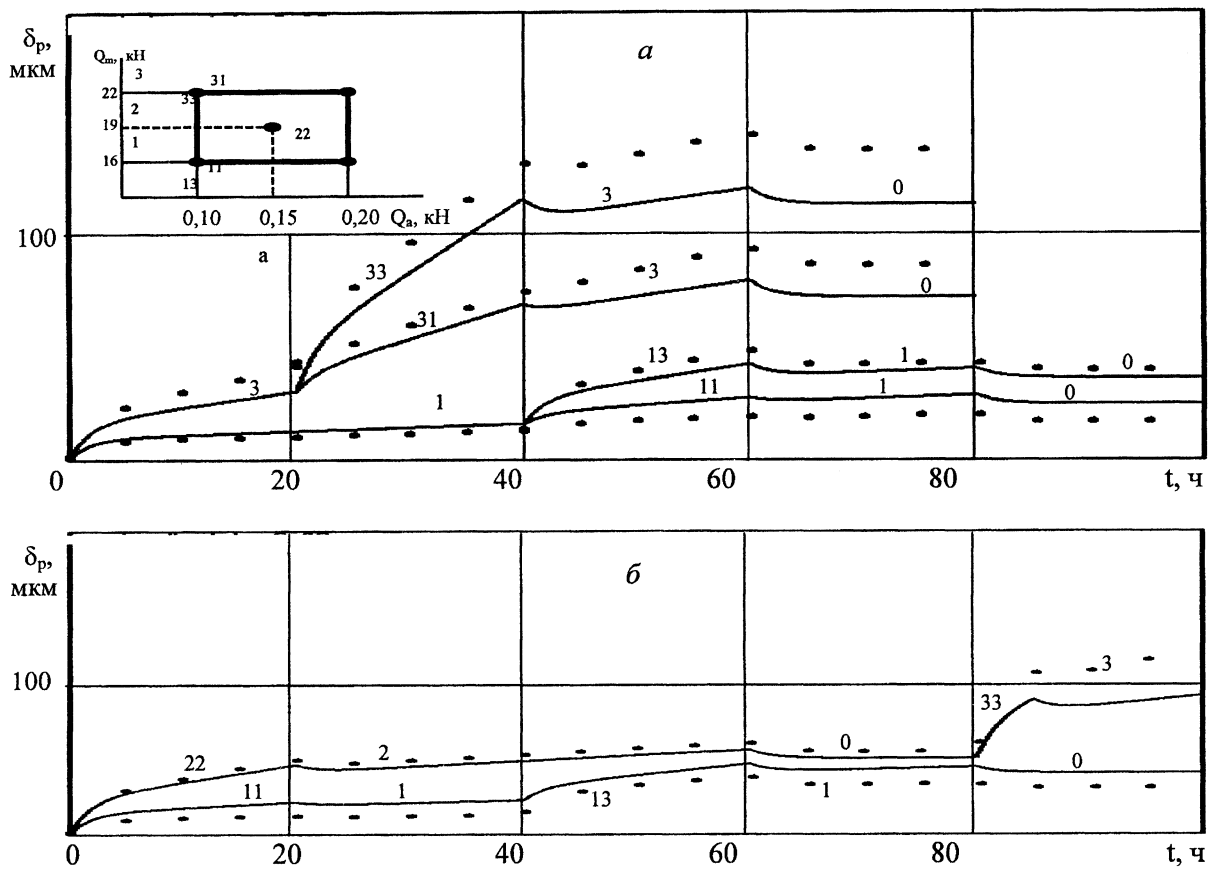
болт и гайка из сплава ЭИ698

$$\left. \begin{aligned} \delta_w &= 1,893 \cdot 10^{-5} \exp\left(76,2 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{4,6} t; \\ \delta_u &= 1,744 \cdot 10^{-3} \exp\left(41,5 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{1,8} [1 - \exp(-0,54t)]; \\ \delta_v &= 1,968 \cdot 10^{-3} \exp\left(41,5 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{1,8} [1 - \exp(-0,54t)]; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

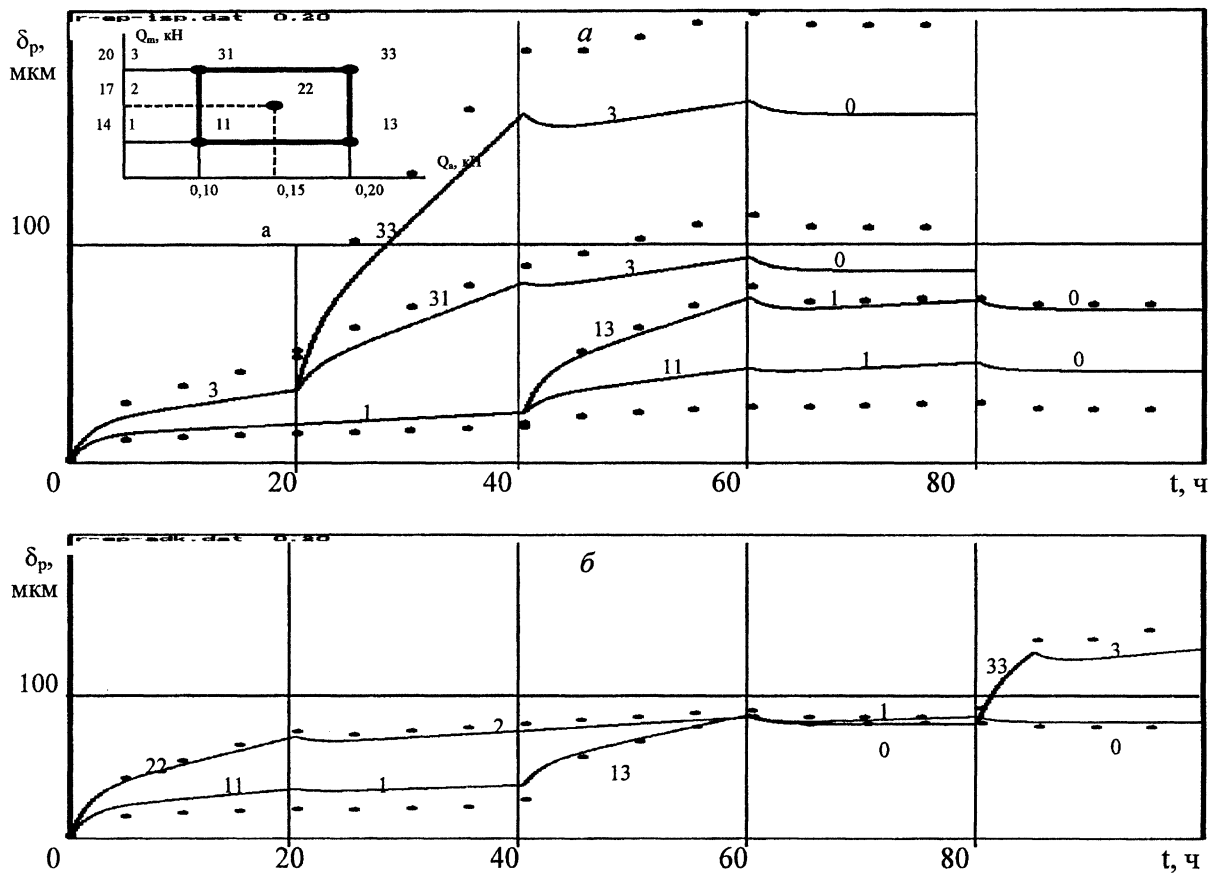
болт и гайка из сплава ЭП693

$$\left. \begin{aligned} \delta_w &= 9,193 \cdot 10^{-5} \exp\left(93,6 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^3 t; \\ \delta_u &= 2,679 \cdot 10^{-3} \exp\left(47,9 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{1,1} [1 - \exp(-0,59t)]; \\ \delta_v &= 5,193 \cdot 10^{-3} \exp\left(47,9 \frac{Q_a}{Q^*}\right) \left(\frac{Q_m}{Q^*}\right)^{1,1} [1 - \exp(-0,59t)]; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где время t - в ч; перемещения $\delta_u, \delta_v, \delta_w$ - в мм; $Q^* = 10$ кН.



Р и с. 1. Кривые виброползучести резьбового соединения М10х1,5 из сплава ЭИ698



Р и с. 2. Кривые виброползучести резьбового соединения М10х1,5 из сплава ЭП693

На рис.1,*a* и рис.2,*a* сплошными линиями показаны результаты аппроксимации по полученным зависимостям (5)-(6), которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Процедура построения уравнений состояния должна сопровождаться обязательной экспериментальной проверкой адекватности при нестационарном нагружении. Ступенчатый режим изменения Q_m и Q_a является наиболее подходящим для выявления возможных несовершенств полученных зависимостей. Результаты экспериментов показаны на рис.1,*б* и рис.2,*б* точками. Линиями показан расчет по уравнениям (4) и (5). Из рисунков видно хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласование расчета с экспериментом.

Полученные результаты показывают обоснованность предложенного метода построения моделей виброползучести резьбовых соединений по результатам натурального эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов И.С., Григорьев В.Р., Ледеев В.О. и др. О вибростойкости резьбовых соединений деталей из сплава АМГ-6 // Исследование, конструирование и расчет резьбовых соединений: Межвуз. сб. науч. тр. Саратов. ун-т, 1979. Вып.5. С.152-159.
2. Машиностроение: Энциклопедия / К.В.Фролов и др. М.: Машиностроение, 1994. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. 1-3. В 2 кн. Кн.1 / К.С. Колесников, Д.А. Александров, В.К. Асташев и др.; Под общ. ред. К.С.Колесникова. 534 с.
3. Еремин Ю.А. Ползучесть растягиваемых образцов и резьбовых соединений из стали 45 при ступенчатом изменении нагрузки и температуры // Машиноведение. 1986, № 1. С. 71-77.
4. Томэ В.Ф. Об одном подходе к исследованию ползучести и релаксации усилий в затянутых резьбовых соединениях // Надежность и неупругое деформирование конструкций. Сб. науч. тр. Куйбышев: КПТИ, 1990. С. 68-77.
5. Самарин Ю.П. Построение экспоненциальных аппроксимаций для кривых ползучести методом последовательного выделения экспоненциальных слагаемых // Проблемы прочности. 1974. №9. С.24-27.