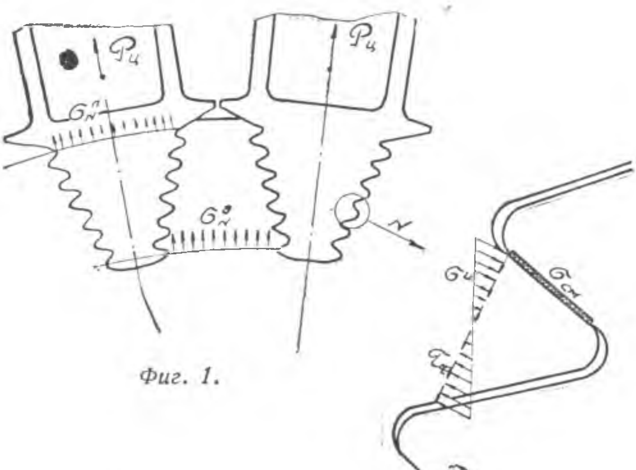
КУЙБЫШЕВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
ТРУДЫ, ВЫПУСК XIX. 1965 г.
Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей

В. И. ЦЕЙТЛИН

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ЗУБЬЕВ ЕЛОЧНЫХ ЗАМКОВ

Основные размеры елочных замков крепления турбинных лопаток при проектировании новых двигателей выбираются в зависимости от напряжений растяжения по перемычкам хвостовиков лопаток ($\sigma_N^л$) и межпазовых выступов дисков ($\sigma_N^д$), напряжений среза ($\tau_{ср}$), изгиба ($\sigma_и$) и смятия ($\sigma_{см}$) отдельных зубьев (фиг. 1).



Фиг. 1.

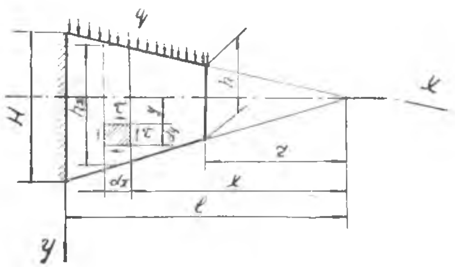
Из сравнения напряженности замков большинства серийных двигателей отечественного производства следует, что эти напряжения лежат в пределах при применении современных лопаточных

$$\sigma_N^л = 13 \div 18 \ кг/мм^2$$
$$\sigma_N^д = 20 \div 25 \ кг/мм^2$$

$$\tau_{ср} = 10 \div 15 \ кг/мм^2$$
$$\sigma_и = 20 \div 25 \ кг/мм^2$$
$$\sigma_{см} = 50 \div 70 \ кг/мм^2$$

(ЖС-6, ЭИ-617, ЭИ-598, ЭИ-437Б) и дисковых (ЭИ-437Б, ЭИ-481) материалов.

Указанные значения касательных напряжений относятся к величине среднего напряжения, полученного как отношение нагрузки, приходящейся на зуб $q(l-r)$ к площади срезаемого сечения — в H (фиг. 2). Однако в зависимости от соотношения размеров зубьев у основания H и вершины h могут иметь место различные пиковые напряжения при том же среднем напряжении среза.



Фиг. 2.

Ниже приводятся некоторые соображения по выбору оптимальных соотношений размеров зубьев для получения минимальных пиковых касательных напряжений при выбранных средних их значениях.

Касательное напряжение τ в произвольном сечении x зуба с учетом изменения момента инерции и статического момента сечения вдоль оси x равно:

$$\tau = \frac{1}{b} \frac{d}{dx} \left(\frac{M_x S_x}{I_x} \right),$$

где

$$M_x = \frac{q(x-r)^2}{2} \text{ — изгибающий момент;}$$

$$S_x = \frac{b}{2} \left(\frac{h_x^2}{4} - y^2 \right) \text{ — статический момент;}$$

$$J_x = \frac{b h_x^3}{12} \text{ — момент инерции;}$$

$$q = \frac{P_i}{l-r} \text{ — нагрузка на единицу длины зуба;}$$

b — ширина замка.

Подставив соответствующие значения в формулу для τ и заменив h_x выражением $x \frac{H}{l}$, получим

$$\tau = \frac{3ql^3}{bH^3} \frac{d}{dx} \left[\frac{(x-r)^2}{x^3} \left(\frac{x^2 H^2}{4l^2} - y^2 \right) \right].$$

Произведя дифференцирование и пользуясь подстановками

$$\frac{r}{x} = \frac{h}{h_x} \text{ и } \frac{l}{x} = \frac{H}{h_x},$$

получим выражение для касательного напряжения по длине и высоте зуба

$$\tau = \frac{3}{4}\frac{ql}{bH}\left[\left(1 - \frac{h^2}{h_x^2}\right) + \frac{4y^2}{h_x^2}\left(1 - 4\frac{h}{h_x} + 3\frac{h^2}{h_x^2}\right)\right].$$

В характерных сечениях зуба при $y = 0$ и $y = \frac{h_x}{2}$ касательные напряжения равны

$$\text{при } y = 0 \quad \tau = \frac{3}{4}\frac{ql}{bH}\left(1 - \frac{h^2}{h_x^2}\right),$$

$$\text{при } y = \frac{h_x}{2} \quad \tau = \frac{3}{2}\frac{ql}{bH}\left(1 - \frac{h}{h_x}\right)^2.$$

Из этих выражений следует, что наибольшие касательные напряжения находятся в заделке зуба, где h_x максимально и равно H.

Если обозначить средние касательные напряжения через

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{ql}{bH}\left(1 - \frac{h}{H}\right),$$

то напряжения в заделке будут

$$\text{при } y = 0 \quad \tau = \frac{3}{4}\tau_{\text{ср}}\left(1 + \frac{h}{H}\right),$$

$$\text{при } y = \frac{H}{2} \quad \tau = \frac{3}{2}\tau_{\text{ср}}\left(1 - \frac{h}{H}\right).$$

Отношение $\frac{h}{H}$ может меняться в пределах от 1 до 0. При этом максимальные касательные напряжения меняются

от 1,5 $\tau_{\text{ср}}$ до 0,75 $\tau_{\text{ср}}$ при $y = 0$ и

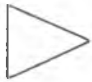
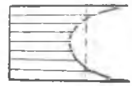
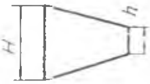
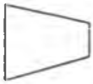
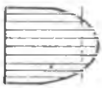
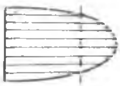
от 0 до 1,5 $\tau_{\text{ср}}$ при $y = \frac{H}{2}$.

Значения касательных напряжений при некоторых отношениях $\frac{h}{H}$ для $y = 0$ и $y = \frac{H}{2}$ даны в таблице 1.

Из таблицы видно, что только при отношении $\frac{h}{H} = \frac{1}{3}$ максимальные касательные напряжения не меняются по высоте зуба и равны $\tau_{\text{ср}}$.

При всех других отношениях $\frac{h}{H}$ максимальные напряжения превышают $\tau_{\text{ср}}$.

Таким образом, оптимальным с точки зрения получения наименьших касательных напряжений является значение $\frac{h}{H} = \frac{1}{3}$.

$\frac{h}{H}$	Форма зуба	Эпюра напряжений	Касательные напряжения	
			$y=0$	$y=\frac{H}{2}$
0			$0,75\,\tau_{cp}$	$1,5\,\tau_{cp}$
$\frac{1}{3}$			τ_{cp}	τ_{cp}
$\frac{1}{2}$			$1,125\,\tau_{cp}$	$0,75\,\tau_{cp}$
$\frac{2}{3}$			$1,25\,\tau_{cp}$	$0,5\,\tau_{cp}$
1			$1,5\,\tau_{cp}$	0

С учетом имеющихся напряжений изгиба и смятия зубьев можно рекомендовать $\frac{1}{3} < \frac{h}{H} < \frac{1}{2}$.