

## Оценка предельной несущей способности подвижных узлов при нестационарном нагружении

*Государственное предприятие "Антонов"*

Предложена модель оценки предельного состояния поверхностей трения подвижных косо-симметрично нагруженных самолетных узлов с учетом неравномерности погонных усилий в зонах контактов. Под предельным состоянием понимается предельно допустимая величина локальных удельных давлений, обеспечивающих устойчивую работоспособность подвижного узла без локальных схватываний и задиров. Установлено, что на величину предельных локальных давлений существенное влияние оказывают сама косо-симметричность нагружения, зазоры, обусловленные его сборкой, и предельно допускаемые зазоры, образующиеся в процессе эксплуатации. Даны рекомендации по обеспечению заданной предельной несущей способности подвижных узлов с учетом этих факторов.

**Ключевые слова:** подвижные самолетные узлы, предельная несущая способность, модели изнашивания.

### Введение

Решение проблемы повышения ресурса и надежности самолета в целом невозможно без обстоятельного и детального изучения факторов, влияющих на долговечность и надежность каждого узла, каждой детали.

В первую очередь это относится к так называемым особо ответственным шарнирным узлам, стыкующим двигатель с пилонами или с фюзеляжем, горизонтальное оперение – с вертикальным, крыло или шасси – с фюзеляжем, тележку – со стойкой шасси и т.п. От их несущей способности и долговечности зависит ресурс не только состыковываемых агрегатов, но и самолета в целом. Повышение работоспособности на износ и усталость таких узлов является актуальным как для зарубежных фирм, так и для отечественного самолетостроения.

Решение проблемы узлов рассматриваемого типа осложняется тем, что они не только состыковывают разные конструктивы, состоящие из различных материалов, но и имеют существенные различия в их деформировании [1, 2].

При этом можно отметить, что напряженно-деформированное состояние деталей, образующих узел, как правило, хорошо изучено [3, 4]. А в сборном узле присутствуют ещё невыясненные условия их работы, что и приводит к нерасчетным случаям их разрушения [5].

Одной из таких особенностей является косо-симметричное нагружение подвижного узла и различие в направлениях вектора нагрузки в подвижном сочленении (рис. 1).

В модели изнашивания типа "а" (рис. 1) вектор нагрузки не меняет своего направления по отношению к зоне трения. Поэтому по мере угловых смещений износ в узле происходит по фиксированному направлению, зона контакта увеличивается, давление в зоне контакта постепенно снижается, прирост линейного износа  $h$  замедляется.

В модели изнашивания типа "б" (см. рис. 1) в связи с изменением вектора нагрузки, действующей на узел, износу подвержена значительно большая поверхность трения, что на начальном этапе снижает линейный износ  $h$ , зато в последующем из-за уменьшения угла соприкосновения и роста контактных давлений в зоне трения прирост  $h$  заметно увеличивается.

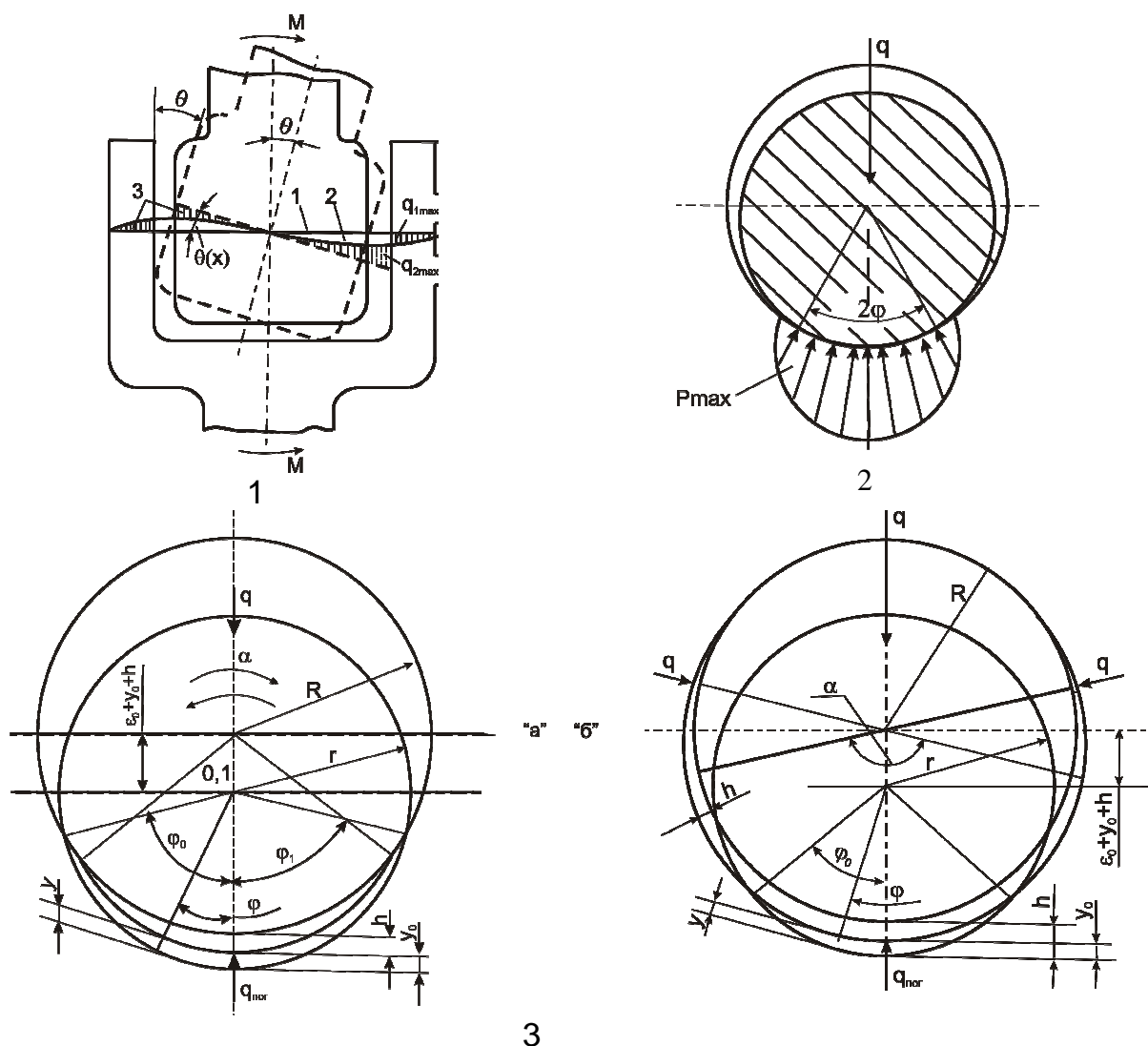


Рис. 1. Модели нагружения и изнашивания поверхностей трения в подвижных самолетных узлах:

$\bar{q}$  – вектор удельных давлений в узле;  $R$  и  $r$  – внутренний и внешний радиусы сопрягаемых поверхностей;  $\alpha$  – угловое смещение поверхностей трения;  $\epsilon_0$  – начальный зазор, обусловленный сборкой узла

В работе [3] рассмотрены задачи обеспечения работоспособности таких моделей трения при стационарном нагружении усилием, действующим на узел, и при равномерном распределении  $q_1$  и  $q_2$  в зонах трения.

Однако кососимметричность нагружения  $M$  (см. рис. 1) приводит к необходимости увеличения толщин соединяемых деталей и длины стыкующей подсорки. Изначальная кососимметричность приводит к существенному изменению погонных усилий в зонах контакта  $q_{1\max}$  и  $q_{2\max}$ , что является первоначальной причиной недостаточной работоспособности подвижного узла [4].

С учетом вышеизложенного представляется возможным сформировать цель данной работы:

– разработать модели оценки предельной несущей способности подвижных кососимметрично нагруженных узлов самолетных агрегатов в условиях их неста-

ционарного нагружения с учетом неравномерности погонных усилий в зонах трения, различных схем изнашивания и различных зазоров, образовавшихся при сборке и в процессе изнашивания.

### Модели оценки несущей способности подвижных узлов при нестационарном нагружении по предельным условиям трения

Большинство подвижных самолетных узлов в процессе эксплуатации испытывают либо переменную, либо случайным образом меняющуюся нагрузку.

Условие работоспособности на трение и износ в этом случае будет обеспечиваться, если интенсивность изнашивания  $J_{hvar}$  не превысит интенсивность изнашивания при удельной нагрузке,  $p < p_{пр}$ . т.е. при  $J_h(p_{пр})$ .

Здесь  $J_{hvar}$  – интенсивность изнашивания в подвижном сочленении в условиях нестационарного нагружения,  $p_{пр}$  – предельные удельные давления, при которых реализуется работоспособность узла без схватываний и заеданий.

Для определения  $J_{hvar}$  воспользуемся данными, полученными в работе [5]. Полагаем, что математическое ожидание удельных давлений в узле можно принять равным ее статической составляющей  $p_{cm}$ .

$$\phi(p) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(p_{cm} - p_a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где  $p_a$  – амплитудная составляющая удельных давлений в узле.

Если положить, что процесс износа трущихся деталей носит усталостный характер, то согласно работе [6] интенсивность износа в условиях вариации нагрузки

$$J_{hvar} = \int_{p_{min}}^{p_{max}} J_h p dp. \quad (2)$$

Так как  $J_h = cp^n$ , то выражение (2) примет вид

$$J_{hvar} = \int_{p_{min}}^{p_{max}} cp^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(p_{cm} - p_a)^2}{2\sigma^2}\right] dp = J_h \lambda, \quad (3)$$

где

$$\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(1 - \theta\nu)^n}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2}\right) d\theta; \quad (4)$$

$$\theta = \frac{p_{cm} - p_a}{\sigma} \text{ – критерий Стьюдента;}$$

$$\nu = \frac{\sigma}{p_{cm}} \text{ – коэффициент вариации нагрузки;}$$

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение нагрузки;

$\bar{J}_h$  – интенсивность изнашивания при постоянной нагрузке на узел.

Если учесть, что  $\bar{J}_h = c \left(\frac{p_{cm}}{p_{пр}}\right)^n$ , то из (1) следует, что удельная нагрузка в

узле не должна превышать величины

$$p = p_{np} \sqrt[n]{\frac{1}{\lambda}}. \quad (5)$$

Условие несущей способности будет выполнено, если расчет работоспособности узла производить по нагрузке

$$p_{cp} = p_{cm} \sqrt[n]{\lambda}. \quad (6)$$

Полагаем, что закон изменения нагрузки  $p(\alpha)$  (рис. 1) является известным и в процессе эксплуатации остается неизменным.

В этом случае за расчетную удельную нагрузку  $p_p$  принимаем среднюю нагрузку, которая легко находится при известном  $p(\alpha)$  по формуле

$$p_{cp} = \frac{1}{\alpha_0} \int_{\alpha_0}^{\alpha} p(\alpha) d\alpha. \quad (7)$$

Зная  $(p_{cp})$  и схему изнашивания сопряжения, можно произвести расчет работоспособности узла на трение и износ, обеспечив при вариации конструктивных параметров узла  $(d, \delta_n, \bar{\Delta})$  условие  $p \leq p_{np}$ .

При этом также необходимо учесть, что в узле при кососимметричном нагружении величина предельной удельной нагрузки должна учитывать неравномерность  $Q_{\text{пог}}$  (см. рис. 1) [4]

$$p_{np} = p_{cp} \alpha_q^m, \quad (8)$$

где  $\alpha_q^m$  – коэффициент избыточности погонных усилий в зоне трения.

С учетом коэффициента избыточности погонных усилий  $\alpha_q^m$  при кососимметричном нагружении узла:

– для модели износа типа "а"

$$\frac{p_{cp} \cdot \alpha_q^m}{r} \cdot \frac{1}{\arccos \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_o + y_o} + \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_o + y_o} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_o^2}{(\varepsilon_o + y_o)^2}}} = p_{np}; \quad (9)$$

– для модели износа типа "б"

$$\alpha_q^m \cdot p_p = p_{np} \frac{r \varphi_0 y_0 (\varphi_0 + \sin \varphi_0 \cos \varphi_0)}{(\varepsilon_o + y_o + h_o) \sin \varphi_0 - \varphi_0 (\varepsilon_o + h_o)}, \quad (10)$$

где  $h_o$  – предельно допустимый линейный износ сопряжения модели „б”.

На основе зависимостей (9) и (10) путем последовательных приближений оценено влияние начальных радиальных зазоров  $\varepsilon_o$ , образовавшихся при сборке узлов, и зазоров  $h$ , появляющихся в процессе износа сопряжения на изменения работоспособности узлов. Эти данные представлены на рис. 2. Очевидно, что с увеличением начальных радиальных  $\varepsilon_o$  зазоров  $\alpha_q^m p_p$  уменьшается в обеих моделях изнашивания.

Совсем по-другому влияет на величину  $\alpha_q^m p_p$  предельно допустимый износ  $h_o$  в сопряжении. Если для модели „а” его величина (согласно выражению (9)) не

оказывает влияния на  $p_p \alpha_q^M$ , то для модели „б” с увеличением  $h_o$  работоспособность узла снижается.

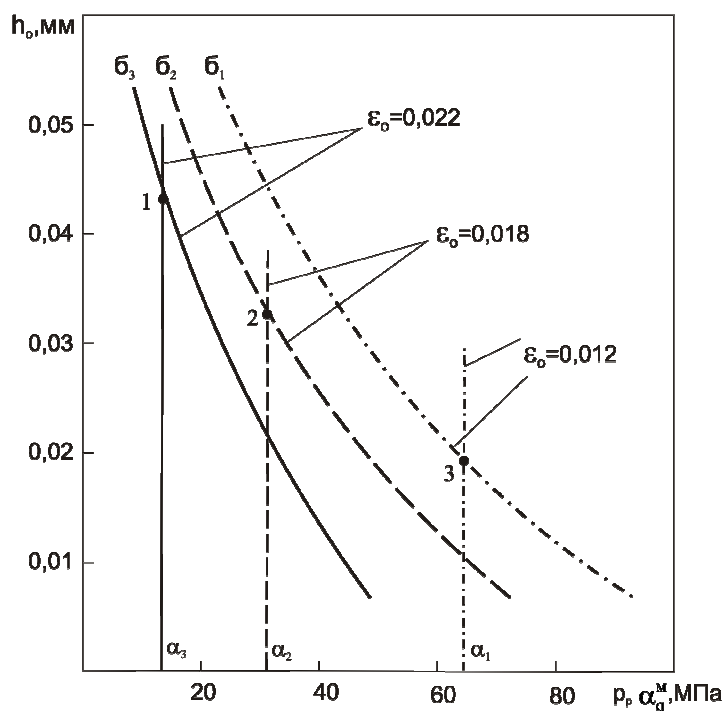


Рис. 2. Влияние начальных зазоров  $\epsilon_o$ , моделей изнашивания и предельно допустимого износа  $h_o$  на величину работоспособности подвижных узлов:  $a_1, a_2, a_3$  — — для модели изнашивания типа „а”;  $b_1, b_2, b_3$  — — — для модели изнашивания типа „б”

Из данных, приведенных на рис. 2, также следует, что предельная удельная нагрузка ( $p_{np} = p_p \alpha_q^M$ ) существенно зависит от схемы изнашивания и начальных радиальных зазоров  $\epsilon_o$  в сопряжении. С увеличением  $\epsilon_o$  предельная удельная нагрузка уменьшается как для схемы изнашивания по типу „а” (на рис. 2 – прямые), так и для типа „б” (на рис. 2 – кривые).

Несколько по-другому влияет на  $p_{np} = \alpha_q^M p_p$  предельно допустимый износ в сопряжении  $h$ . Если для схемы изнашивания по типу „а” предельно допустимый износ –  $h_o$  не оказывает влияния на предельную погонную нагрузку, то для схемы изнашивания по типу „б” с увеличением  $h_o$  предельная удельная нагрузка уменьшается. Однако необходимо учитывать, что при малых значениях предельно допустимых износов несущая способность сопряжений по типу „б” превышает несущую способность сопряжений по типу „а”. Так, до точек 3, 2, 1 предельная нагрузка в узлах, работающих по схеме „а”, выше, тогда как в узлах, работающих по схеме „б”, она существенно выше за этими точками (см. рис. 2).

Коэффициент избыточности удельной нагрузки  $\alpha_q^M$ , обусловленный косо-симметричностью внешней нагрузки на узел (во всех случаях он больше 1,0), при равной величине  $p_{np}$  существенно снижает значение  $p_p$  в обеих схемах изнашивания.

Таким образом, приведенная модель (в выражениях 9 и 10) по оценке предельной нагрузки с учетом  $\varepsilon_o$ ,  $h$  и  $\alpha_q^M$  значительно повышает точность расчетов. Проводимые в настоящее время проектировочные расчеты подвижных узлов по средним удельным нагрузкам без учета  $\varepsilon_o$ ,  $h$  и  $\alpha_q^M$  могут привести к ошибке до 30 %.

### Выводы

1. В работе предложена модель оценки предельного состояния по параметру погонных усилий в зонах трения подвижных узлов самолетных агрегатов, воспринимающих и передающих кососимметричную нагрузку при нестационарном её характере.

2. Под предельными удельными давлениями ( $p_{пр}$ ) принято понимать произведение величины расчетных удельных давлений ( $p_p$ ) и коэффициента избыточности погонных усилий ( $\alpha_q^M$ ) в зоне трения, обусловленного кососимметричностью нагружения узла, т.е. величиной  $p_{пр} = p_p \alpha_q^M$ .

3. С помощью полученных выражений (9) и (10) проведена количественная оценка влияния двух схем износа (при постоянном и переменном векторах нагружения), изначальных зазоров, обусловленных сборной узла  $\varepsilon_o$  на величину  $p_{пр}$ .

4. Полученные результаты позволяют почти на 30 % повысить точность расчетов подвижных узлов по параметру  $p_{пр}$ , т.е. обеспечить устойчивую работоспособность подвижного узла без локальных схватываний и задиров.

### Список литературы

1. Рябков, В. И. Исследование влияния конструктивно-технологических особенностей самолетных узлов на напряженное состояние их элементов [Текст] / В. И. Рябков, С. Е. Шеметов // Вопросы проектирования и производства самолетных конструкций: сб. науч. тр. ХАИ. – Вып. 2. – Х., 1979, С. 52–58.

2. Рябков, В. И. К вопросу разработки общей теории напряженно-деформированного состояния узлов [Текст] / В. И. Рябков, В. В. Меньшиков // Вопросы механики деформируемого твердого тела: сб. науч. тр. ХАИ. – Вып. 4. – Х., 1983. – С. 125–132.

3. Панасюк, В. В. Определение контактных напряжений при внутреннем соприкосновении цилиндрических тел [Текст] / В. В. Панасюк, М. И. Теплый // Прикладная математика и механика: – К., 1971. – Вып. 4. – Т.4.

4. Гафнер, С. Л. К расчету угла контакта при внутреннем сопряжении цилиндрических тел, радиусы которых почти равны машин [Текст]: справ. пособие / С. Л. Гафнер, М. Н. Добычин. – М., Машиностроение. – 1973. – №2, – С. 69–75.

5. Бычкова, Н. Н. Предельные параметры работоспособности покрытий в высоконагруженных шарнирных узлах самолетов [Текст] / Н. Н. Бычкова // Вопросы проектирования и производства самолетных конструкций: сб. науч. тр. – ХАИ. – Вып. 36(1). – Х., 2004. – С. 103–107.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В. И. Рябков, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Поступила в редакцию 20.04.2014

## **Оцінювання граничної несучої здатності рухомих вузлів при нестационарному навантаженні**

Запропоновано модель оцінювання граничного стану зони тертя рухомих кососиметричних навантажених літакових вузлів з урахуванням нерівномірності погонних зусиль у зонах контактів. Під граничним станом розуміється гранично припустима величина локальних питомих тисків, що забезпечують стійку працездатність рухомого вузла без локальних схоплювань і задирів. Установлено, що на величину граничних локальних тисків істотний вплив мають сама кососиметричність навантаження, зазори, зумовлені його збиранням, і гранично припустимі зазори, що утворюються в процесі експлуатації. Подано рекомендації щодо забезпечення заданої граничної несучої здатності з урахуванням цих факторів.

**Ключові слова:** рухомі літакові вузли, гранична несуча здатність, моделі зношування.

## **Evaluation of ultimate load capacity of mobile assemblies under unsteady loading**

A model of evaluation of the ultimate state of the friction surfaces of moving skew-symmetrically loaded aircraft assemblies considering the uneven line forces in the areas of contact is proposed. Limiting state is understood as the maximum allowable value of the local specific pressures to ensure stable operation of the mobile assembly without local seizures and scores. It is found that the skew symmetry of loading itself, clearances caused by its assembled structure, and allowable clearances that are formed during operation significantly influence the amount of the ultimate local pressures. Recommendations to ensure the limiting bearing capacity taking into account these factors are given.

**Keywords:** aircraft movable assemblies, ultimate bearing capacity, wear models.