

УДК 51-72:629.735.45.05

Анализ прочности композитной лопасти несущего винта вертолета при ударных повреждениях*

Сидоров И.Н.¹, Митряйкин В.И.¹, Горелов А.В.¹, Шабалин Л.П.¹

Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ¹

Аннотация: Приведены результаты расчета предельного состояния лопасти несущего винта вертолета «АНСАТ» при различных режимах полета с учетом возможного повреждения лопасти в комлевом сечении. Определены коэффициенты запаса прочности лопасти в комлевом сечении в зависимости от азимутального угла поворота лопасти для случая, когда все обобщенные усилия изменяются пропорционально одному параметру нагружения.

Ключевые слова: теория предельного равновесия, коэффициент запаса, метод вариации упругих постоянных, композитная лопасть несущего винта вертолета, повреждение.

В работах [1], [2] предложен алгоритм расчёта, приведены результаты расчёта нижней границы нагрузки в комлевом сечении лопасти несущего винта (НВ) вертолётa, соответствующей её предельному состоянию для режима висения, а также сделан вывод, что оценка прочности лопасти должна проводиться только по предельной нагрузке. Оценка предельного состояния лопасти основана на методе вариации упругих постоянных, рассмотренного в работе [3]. Цель настоящей работы – определение коэффициента запаса статической прочности (нижней границы предельной нагрузки) лопасти НВ в комлевом сечении, имеющей повреждения в виде отверстий, для различных скоростей горизонтального полета вертолётa. Выявление экспериментальных повреждений лопасти при ударных воздействиях и сравнение их с расчётными.

Исследуемая лопасть НВ крепится к торсиону (рис. 1) в комлевом сечении (рис. 2) состоит из двух основных элементов: лонжерона и хвостового отсека, наружные обводы которых соответствуют аэродинамическому профилю НАСА-23012. Материал лопасти – многослойный стеклопластик Т-25(ВМ). Лонжерон в поперечном сечении представляет собой многослойную профилированную трубу. Пределы прочности при растяжении, сжатии и сдвиге в осях ортотропии слоя материала Т-25(ВМ) по данным ВИАМ, которые использовались при расчетах, следующие: $\bar{\sigma}_1^+ = 933$ МПа, $\bar{\sigma}_1^- = 615$ МПа, $\bar{\sigma}_2^+ = 110$ МПа, $\bar{\sigma}_2^- = 244$ МПа, $\bar{\tau}_{12} = 11$ МПа. Здесь: индекс 1 соответствует направлению вдоль нитей основы, 2 – поперек нитей основы; индексы для пределов прочности «+» и «-» обозначают растяжение и сжатие; схема укладки слоев лонжерона и хвостовой обшивки по отношению к оси лопасти соответственно: $[0^\circ / \pm 45^\circ / 0^\circ / \pm 45^\circ / 0^\circ]$ и $[0^\circ / \pm 45^\circ / 0^\circ]$; порядок чередования слоев снаружи внутрь лопасти; толщина каждого слоя 0,28 мм.

Согласно алгоритму, предложенному в работе [1], в расчетах реальная лопасть заменялась аналогом, состоящим из участков (рис. 3) (точками показаны границы участков, цифрами – номера участков).

Повреждения моделировались отверстиями в виде полос по всей длине участка поперечного сечения комлевой части лопасти с постоянными характеристиками (рис. 1). При этом в сечении лопасти (рис. 3) на участке, соответствующем этой полосе, пределы прочности

*Работа выполнена в рамках проекта №19-08-00577 РФФИ

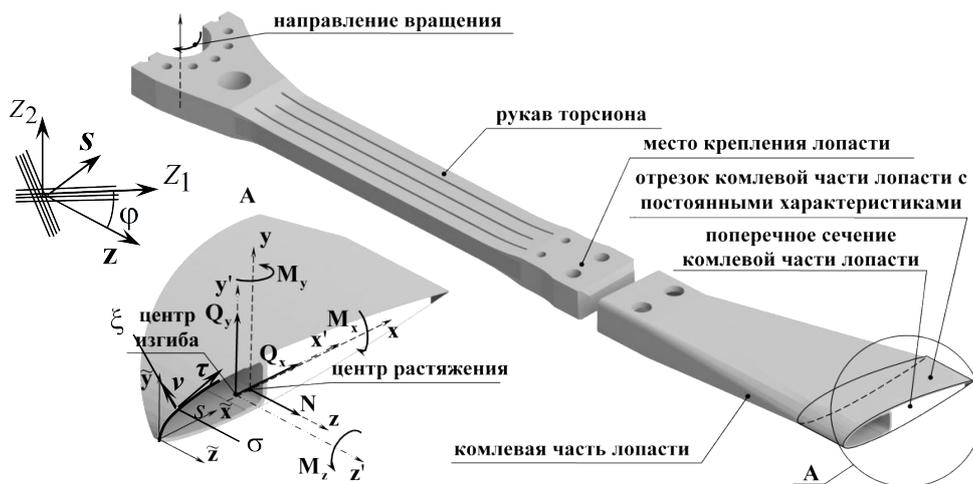


Рис. 1. Основные элементы несущего винта вертолета

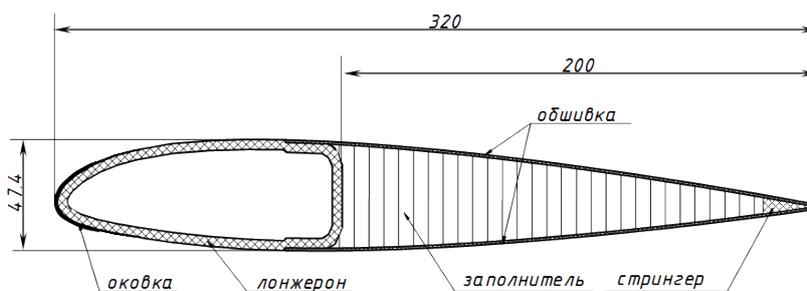


Рис. 2. Основные элементы лопасти

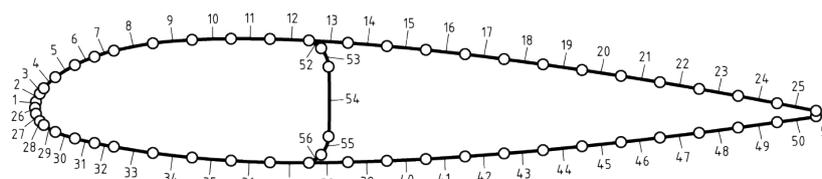


Рис. 3. Разбиение аналога лопасти на участки

слоев пакета уменьшались на 6 порядков по сравнению с соответствующими параметрами неповрежденных участков.

Основные допущения и положения теории предельного равновесия и идеального жестко - пластического тела, за который принимается материал слоёв композитной лопасти несущего винта вертолета «АНСАТ» следующие:

1. В пакете слоёв лопасти реализуется плоско-напряженное состояние и в нормально – связанной системе координат $z s \xi$ (рис. 1) для компонент напряжений в этих осях выполняются неравенства $\sigma_{\xi\xi}, \sigma_{s\xi}, \sigma_{z\xi} \ll \sigma_{zz}, \sigma_{ss}, \sigma_{zs}$ (на рис. 1 $\tau(s), \nu(s)$ – орты касательной и нормали к базовому контуру σ ; s – текущая длина базового контура; ξ

– нормальная координата вдоль ν).

2. Принимается, что пластическое течение в элементах лопасти начинается при достижении вектором $\sigma = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}]^T$ ($\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$ – нормальные и касательное напряжения в осях ортотропии $z_1 z_2$ (рис. 1)) в осях ортотропии $z_1 z_2$ поверхности текучести, уравнение которой, с учетом гипотезы о малости нормальных напряжений на площадках параллельных оси лопасти по сравнению с нормальными напряжениями в её поперечном сечении $\sigma_{ss} \ll \sigma_{zz}, \sigma_{sz}$, в нормально – связанной системе координат $z s \xi$ переходит к виду $((a, l)$ – скалярное произведение векторов a, l)

$$\left(\hat{C}(\varphi) \tau_z, \tau_z \right) = 1, \quad \tau_z = \sigma_z - s_z, \quad (1)$$

$$\hat{C}(\varphi) = \frac{1}{\lambda^2} \tilde{C}, \quad s_z = -\frac{1}{2} \tilde{C}^{-1} \tilde{d}(\varphi), \quad \lambda = \frac{1}{2} \sqrt{4 + \left(\tilde{d}(\varphi), \tilde{C}^{-1} \tilde{d}(\varphi) \right)},$$

$$C(\varphi) = B(\varphi) P B(\varphi); \quad d(\varphi) = B(\varphi) b, \quad B(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & \sin 2\varphi \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & -\sin 2\varphi \\ -\frac{1}{2} \sin 2\varphi & \frac{1}{2} \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 0 \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C}(\varphi) = \begin{bmatrix} c_{11}(\varphi) & c_{13}(\varphi) \\ c_{31}(\varphi) & c_{33}(\varphi) \end{bmatrix}, \quad \tilde{d}(\varphi) = \begin{bmatrix} d_1(\varphi) \\ d_3(\varphi) \end{bmatrix},$$

где $p_i = (\bar{\sigma}_i^- - \bar{\sigma}_i^+) / (\bar{\sigma}_i^+ \bar{\sigma}_i^-)$, $p_{ii} = 1 / (\bar{\sigma}_i^+ \bar{\sigma}_i^-)$, $f = 1 / \bar{\tau}_{12}^2$, $i = 1, 2$, φ – угол поворота осей относительно оси ξ (рис. 1), $\sigma_z = \begin{bmatrix} \sigma_{zz} & \sigma_{sz} \end{bmatrix}^T$;

3. В соответствии с работами [1, 2] для вектора напряжений в осях $z s \xi$ согласно закону деформирования, ассоциированному предельной поверхности текучести (1) имеем представление

$$\sigma_z = s_z + \tau_z = s_z + \hat{\varepsilon} \varepsilon_z^p = s_z + t_{(-)} \hat{\varepsilon} k T_{\tau 0}, \quad \varepsilon_z^p = [\varepsilon_{zz}^p, 2\varepsilon_{sz}^p]^T, \quad (2)$$

$$\hat{\varepsilon}(\varepsilon_{zz}^p, \mu) = \begin{bmatrix} E_z(\varepsilon_{zz}^p, \mu) & 0 \\ 0 & G_{sz}(\varepsilon_{zz}^p, \mu) \end{bmatrix}, \quad \mu = \left[1, \frac{2\varepsilon_{sz}^p}{\varepsilon_{zz}^p} \right]^T, \quad \Lambda(\mu) = \frac{1}{\sqrt{(\mu, \tilde{\Gamma}^{-1} \mu)}},$$

$$E_z(\varepsilon_{zz}^p, \mu) = \frac{\lambda \left(\tilde{c}_{11}^{(-1)} + \tilde{c}_{12}^{(-1)} \mu \right) \Lambda(\mu)}{|\varepsilon_{zz}^p|}, \quad G_{sz}(\varepsilon_{zz}^p, \mu) = \frac{\lambda \left(\tilde{c}_{12}^{(-1)} / \mu + \tilde{c}_{22}^{(-1)} \right) \Lambda(\mu)}{|\varepsilon_{zz}^p|},$$

где $\hat{\varepsilon}(\varepsilon_{zz}^p, \mu)$ – матрица «фиктивных» модулей упругости, $\varepsilon_{zz}^p, \varepsilon_{sz}^p$ – компоненты вектора пластической деформации, k – матрица податливостей поперечного сечения лопасти на растяжение, изгиб и кручение [1], $T_{\tau 0}$, $(|T_{\tau 0}| = 1)$ – заданный единичный вектор обобщенных усилий, формирующий в сечении лопасти вектор «упругих» напряжений $\tau_{z0(e)}$, $t_{(-)}$ – нижняя граница параметра нагружения;

4. Определение вектора напряжений $\sigma_{z(-)}$, соответствующего статически возможному состоянию отсека комлевой части лопасти (рис. 1) [4], осуществляется на основе представления (2) и с помощью метода, предложенного в работе [5]. Согласно этому методу, вектор напряжений элемента сечения вычисляется в главных центральных осях (рис. 1) на основе компонент вектора обобщенных усилий

$$T_z = \begin{bmatrix} Q_x & Q_y & N & M_x & M_y & M_z \end{bmatrix}^T,$$

приложенных в соответствующих центрах сечения. Вектору напряжений $\sigma_z = s_z + \tau_z$ соответствует шестимерный вектор обобщенных усилий $T_z = T_s + T_\tau$, в котором компоненты вектора T_s вычисляются в главных центральных осях сечения с помощью s_z . В предельном состоянии поверхностям текучести слоев комлевой части лопасти в пространстве напряжений соответствует предельная поверхность в пространстве усилий и выход вектора T_z на эту поверхность эквивалентен выходу на неё вектора T_τ , исходящего из T_s .

В качестве коэффициента запаса статической прочности лопасти по допускаемой нагрузке принимается параметр нагружения $t_{(-)}^p$, равный коэффициенту увеличения «рабочего» вектора обобщенных усилий, при котором напряжения всех слоев отсека комлевой части лопасти соответствуют закону деформирования (2) и удовлетворяют уравнениям равновесия.

На рисунках 4.а, 4.б приведены диаграммы вычисленных коэффициентов для не поврежденного комлевого сечения лопасти при различных скоростях полета и лопасти имеющей повреждения в комлевом сечении для режима полета на скорости 220 км/ч. В скобках указаны номера поврежденных участков, соответствующих рис. 3.

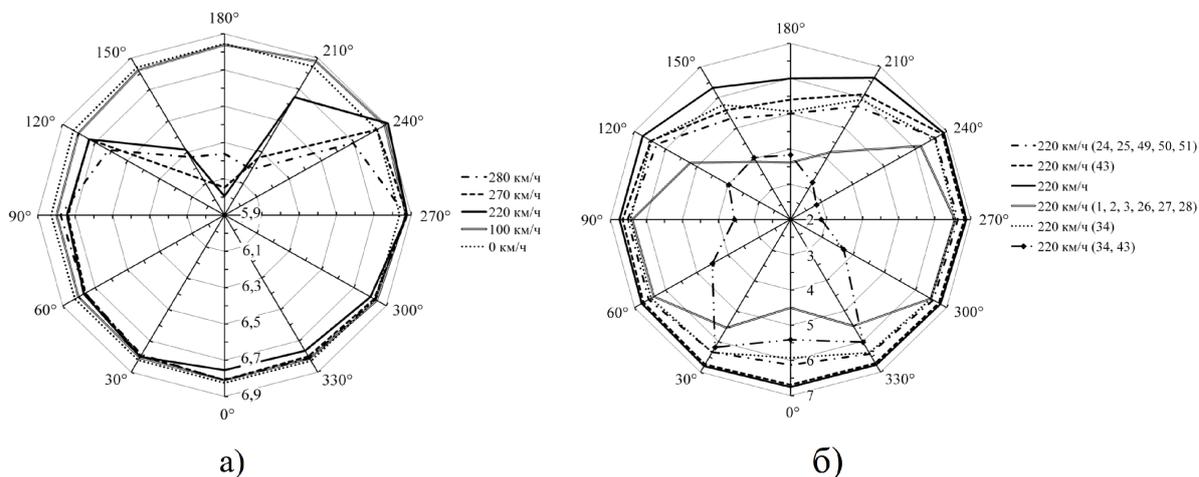


Рис. 4. Диаграммы коэффициентов $t_{(-)}^p$ комлевого сечения лопасти

Таким образом, предложен алгоритм и приведены результаты расчета запаса прочности лопасти по предельной нагрузке при повреждениях лопасти в различных участках комлевого сечения. Внешняя визуальная и внутренняя диагностика поврежденных образцов с использованием рентгеновской компьютерной томографии на основе медицинского рентге-

новского томографа фирмы "Siemens" [6] позволят производить оценку остаточных запаса прочности и несущей способности лопасти НВ вертолета.

Литература

1. Горелов А.В., Сидоров И.Н. Расчет нижней границы предельной нагрузки композитной лопасти несущего винта вертолета по теории предельного равновесия. Основные этапы алгоритма // Изв. Вузов. Авиационная техника. 2011. № 3. С. 3–8.
2. Горелов А.В., Сидоров И.Н. Расчет нижней границы предельной нагрузки композитной лопасти несущего винта вертолета по теории предельного равновесия. Результаты расчета // Изв. Вузов. Авиационная техника. 2011. № 4. С. 12–14.
3. Каюмов Р.А. Метод вариации упругих характеристик в задаче о предельной нагрузке // Прикладная механика и техническая физика. 1990. № 3. С. 134–139.
4. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. М.: Стройиздат, 1949. 280 с.
5. Горелов А.В., Сидоров И.Н. Расчёт напряженно-деформированного и предельного состояния композитной лопасти несущего винта вертолёта «АНСАТ». Казань, 2006. 40 с. Деп. в ВИНТИ 17.07.2006, № 946 - В2006.
6. Митряйкин В.И., Павлова Н.В., Лустин А.Д. Диагностика ударных повреждений лопастей вертолета на компьютерном томографе // Инновационные подходы в современной науке. 2017. № 2(2). С.33–40.

MSC2010 35Q74, 74G70

Strength analysis of composite rotor blade of helicopter under shock damage

I.N. Sidorov¹, V.I. Mitryaikin¹, A.V. Gorelov¹, L.P. Shabalin¹

Kazan national research technical University named after A. N. Tupolev – KAI¹

Abstract: The results of the calculation of the stress-strain and limit states of the rotor blade of the ANSAT helicopter under different flight conditions, taking into account the possible damage of the blade in the butt section, are presented. The safety factors of the blade in the butt section depending on the azimuth angle of rotation of the blade are determined for the case when all the generalized forces change in proportion to one loading parameter.

Keywords: limit equilibrium theory, safety factor, method of variation of elastic constants, composite rotor blade of the helicopter, damage.

References

1. Gorelov A.V., Sidorov I.N. A lower bound estimate of the critical load for helicopter main rotor composite blade according to the limit equilibrium theory. The basic steps of an algorithm. Russian Aeronautics. 2011. Vol. 54, No. 3. P. 233–241.

2. Gorelov A.V., Sidorov I.N. A lower bound estimate of the critical load for helicopter main rotor composite blade according to the limit equilibrium theory. Analysis results. Russian Aeronautics. 2011. Vol. 54, No. 4. P. 341–345.
3. Kayumov R.A. Metod variacii uprugih harakteristik v zadache o predel'noj nagruzke. Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika. 1990. No. 3. P. 134–139.
4. Gvozdev A.A. Raschet nesushhej sposobnosti konstrukcij po metodu predel'nogo ravnovesija. M.: Strojizdat, 1949. 280 p.
5. Gorelov A.V., Sidorov I.N. Raschjot naprjazhenno-deformirovannogo i predel'nogo sostojanija kompozitnoj lopasti nesushhego vinta vertoljota «ANSAT». Kazan', 2006. 40 p. № 946 - B2006.
6. Mitrjajkin V.I., Pavlova N.V., Lustin A.D. Diagnostika udarnyh povrezhdenij lopastej vertoleta na komp'juternom tomografe. Innovacionnye podhody v sovremennoj nauke. 2017. No. 2(2). P.33–40.