

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ШАССИ ПО КРИТЕРИЮ ЖЁСТКОСТИ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ

В настоящее время расчёты на прочность ответственных деталей ведут исходя из механических свойств материалов, определяемых стандартными методами при растяжении-сжатии. При этом не учитывается влияние вида напряжённого состояния (НС) на механические свойства материалов, которое определяется характеристикой «Жёсткость напряжённого состояния» (ЖНС), впервые введённой Я.Б. Фридманом [1 – 3]. ЖНС зависит от соотношения нормальных и касательных или главных напряжений и определяет способность материалов пластически деформироваться в процессе разрушения. Это особенно важно учитывать для деталей, работающих в малоцикловой области, так как их работоспособность и долговечность зависят в большей степени от пластических свойств материала.

Для характеристики жёсткости напряжённо-деформированного состояния (НДС) важно иметь наиболее чувствительную и адекватную характеристику ЖНС, учитывающую особенности НС. Поэтому в работе [4] в зависимости от основных типов напряжённого состояния сделан анализ различных критериев, используемых в отечественной и зарубежной литературе. Результаты расчётов и анализа различных выражений ЖНС для основных типов НС показали, что для практических расчётов наилучшим образом подходит критерий Г.А. Смирнова-Аляева [5 – 7]

$$K_{\text{ж}} = \frac{3\sigma_0}{\sigma_1} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  – октаэдрическое напряжение;  $\sigma_1$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

При минимальной ЖНС при чистом сдвиге критерий  $K_{\text{ж}}$  принимает нулевое значение и обладает свойством монотонности: разделяет области растяжения и сжатия, соответственно, с положительными и отрицательными значениями  $K_{\text{ж}}$ , величина которых, соответственно, увеличивается до  $+\infty$  и  $-\infty$  при равномерном всестороннем растяжении и сжатии. Критерий Смирнова-Аляева более чувствителен к соотношениям величин главных напряжений и адекватно характеризует знаки НС.

Для оценки уровня напряжённости деталей в работе предлагается использовать выражение для удельной полной энергии упругой деформации  $U_0$

$$U_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (2)$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

В практических расчётах удобнее использовать безразмерные критерии. Поэтому энергетический критерий получим, взяв отношение  $U_0$  к  $U_{0y\text{пред}}$  при растяжении:  $\sigma_1 = \sigma_T$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

$$K_{Uy} = \frac{U_0}{U_{0\text{пред}}} = \frac{1}{\sigma_T^2} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]. \quad (3)$$

В задачах оптимизации размеров и формы деталей с целью уменьшения напряжённости детали в наиболее опасных местах предлагается безразмерный энергетический критерий

$$K_{Uy.o} = \frac{U_0}{U_{0\text{исх}}} = \frac{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]}{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]_{\text{исх}}}. \quad (4)$$

Для диагностики наиболее нагруженных опасных мест в области концентраторов напряжений деталей в качестве комплексного критерия  $K$  следует использовать произведение критериев ЖНС  $K_{ж}$  и энергетического  $K_{Uy}$

$$K = K_{ж} \cdot K_{Uy} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]}{\sigma_T^2 \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}. \quad (5)$$

Для поиска наиболее опасных мест следует на основе анализа НДС сначала по критерию  $K_{Uy}$  выявить наиболее нагруженные области. Затем на основе критерия  $K$  по его наибольшей величине  $K_{\max}$  и близких к нему значениям определяют области с наибольшей вероятностью образования микро- и макротрещин. В этом случае для деталей с концентраторами напряжений для оптимизации размеров и формы и параметров концентраторов следует использовать по аналогии с (4) отношение критериев  $K$

$$K_{\text{опт}} = \frac{K}{K_{\text{исх}}} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Для проверки разработанных критериев проведены исследования НДС образцов из стали 30ХГСА с различными концентраторами напряжений (рис. 1).

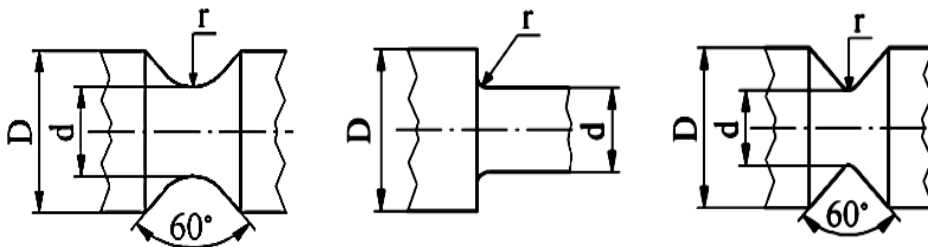


Рис. 1. Образцы из стали 30ХГСА с различными концентраторами напряжений

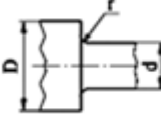
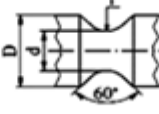
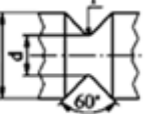
В пакете ANSYS разработаны модели образцов в виде 3D-объёмов, которым присваивались свойства материалов исследуемых образцов. Для сравнения характеристик и определения коэффициентов концентрации были созданы также модели гладких цилиндрических образцов (без концентраторов напряжений), диаметр которых принимался равным минимальному диаметру, измеряемому по дну концентраторов для каждого из рассматриваемых образцов. Модели образцов размечены элементами Solid 185. В моделях заданы осевая растягивающая нагрузка и опора в виде заделки в соответствии с условиями испытаний натуральных образцов на растяжение. Для возможности сравнения параметров и критериев НДС величину нагрузки для каждого образца определяли исходя из равенства номинальных напряжений  $\sigma_{ном} = 150$  МПа в цилиндрических гладких образцах.

Результаты расчётов представлены в табл. 1. Корректность расчётов подтверждается совпадением величин коэффициентов концентрации напряжений с табличными [8], а также малостью величин главных напряжений  $\sigma_3$ , действующих по нормали к поверхности в образцах без концентраторов напряжений. Анализ полученных результатов расчёта показывает, что в концентраторах напряжений возникает объёмное НДС растяжения при значительной концентрации всех главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ . Но коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$  определяется по отношению величин только первых главных напряжений  $\sigma_1$ . Поскольку удельная энергия деформирования материала учитывает все компоненты НДС, то более адекватной характеристикой концентрации напряжений может служить коэффициент концентрации энергии, определяемый отношением удельных энергий деформаций в концентраторах и в гладком образце

$$k_U = \frac{U_{0\text{конц}}}{U_{0\text{глад}}} \quad (7)$$

Коэффициенты  $k_U$  по сравнению с  $k_\sigma$  имеют существенно бóльшую величину и обладают бóльшей чувствительностью к концентрации напряжений. Если при уменьшении радиуса в указанных выше концентраторах увеличение  $k_\sigma$  не превышает величины в 1,52 раза, то увеличение  $k_U$  достигает, соответственно 2,28.

Таблица 1. Результаты расчёта параметров и критериев НС образцов с концентратором напряжений из стали 30ХГСА в упругой области при  $\sigma_{нагр} = 150$  МПа

Параметры НДС	Типы образцов										
	 D = 15 мм, d = 14 мм		гладкий образец d = 14 мм		 D = 15 мм, d = 10 мм		гладкий образец d = 10 мм		 D = 15 мм, d = 7,5 мм		гладкий образец d = 7,5 мм
радиус концентратора r, мм	0,3	0,5	–	0,1	0,3	–	0,1	0,5	–		
главные напряжения	$\sigma_1$ , МПа	394	348	150	605	414	150	691	454	150	
	$\sigma_2$ , МПа	101	77	0,0	204	114	0,0	235	142	0,0	
	$\sigma_3$ , МПа	58	23	0,0	99	43	0,0	49	23	0,0	
интенсивность напряжений $\sigma_i$ , МПа	317	301	150	463	341	150	572	386	150		
удельная энергия $U_{0y}$ , МНм/м <sup>3</sup>	0,326	0,269	0,057	0,753	0,368	0,057	1,047	0,459	0,057		
коэффициент концентрации напряжений $k_\sigma$	2,627	2,320	1,0	4,033	2,760	1,0	4,607	3,027	1,0		
коэффициент концентрации энергии $k_U$	5,675	4,694	1,0	13,126	6,413	1,0	18,242	7,996	1,0		
критерий ЖНС $K_{ж}$	1,746	1,480	1,0	1,963	1,674	1,0	1,704	1,606	1,0		
критерий энергетический $K_{Uy}$	0,246	0,203	0,043	0,569	0,278	0,043	0,791	0,347	0,043		
критерий комплексный $K = K_{ж} \cdot K_{Uy}$	0,430	0,302	0,043	1,117	0,465	0,043	1,347	0,556	0,043		

Результаты исследований показывают значительную информативность разработанных критериев, величина которых существенно зависит от вида НС, типа концентраторов и степени концентрации напряжений. Это подтверждает целесообразность использования указанных критериев для анализа НДС ответственных деталей с концентраторами напряжений и оптимизации их геометрических параметров с целью повышения надёжности, статической прочности и циклической долговечности.

Изложенный метод диагностики опасных мест деталей с использованием критерия ЖНС апробирован на примере анализа причин разрушения основного элемента авиационного шасси – траверсы Ил-76, изготавливаемой из сплава ВТ-22. Испытания траверсы на многоцикловую усталость выявили преждевременные разрушения в местах, не совпадающих с расположением максимальных напряже-

ний (рис. 2). Расчёт НДС траверсы в пакете ANSYS Workbench показал отсутствие пластических деформаций. Конечно-элементная модель (рис. 3) представляет собой основную опору шасси в сборе, включающую: колёсную ось, шток, звенья шлиц-шарнира, буксы амортизатора, цилиндры и рычаг разворота, которые выполнены в виде недеформируемых моделей. Взаимодействие звеньев шлиц-шарнира с колёсной осью и цилиндром, а также передача усилий от штока к траверсе обеспечивается посредством шарнирных элементов MPC184. Передача нагрузок от цилиндра к траверсе через втулки осуществляется контактными элементами.



Рис. 2. Место зарождения и роста усталостной трещины

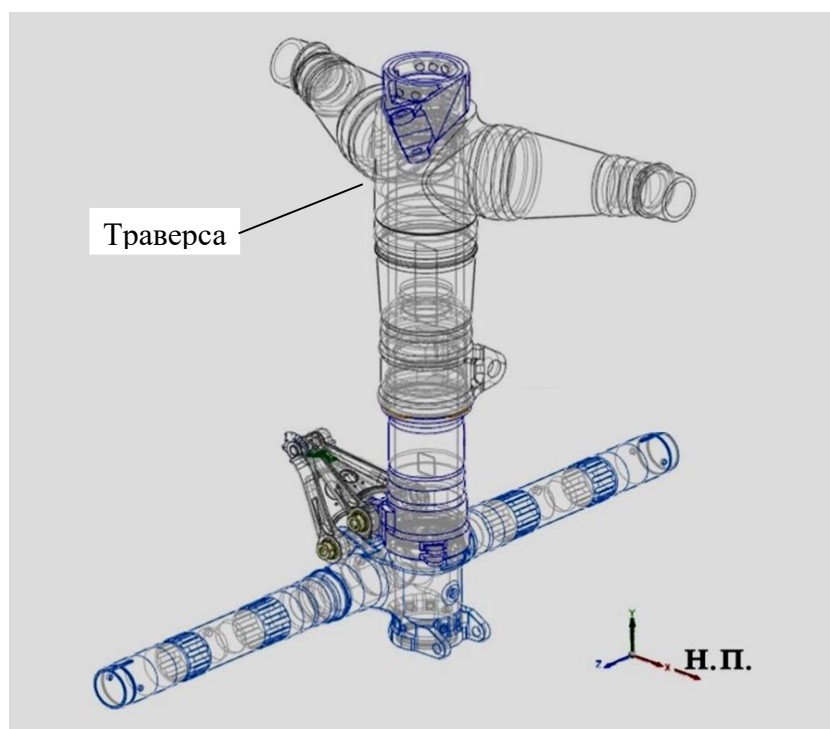


Рис. 3. Конечно-элементная модель шасси в сборе

Анализ НДС с использованием комплексного критерия  $K$  показал наличие двух опасных зон. На рис. 4 эти зоны показаны стрелками – позиции 1 и 2, в

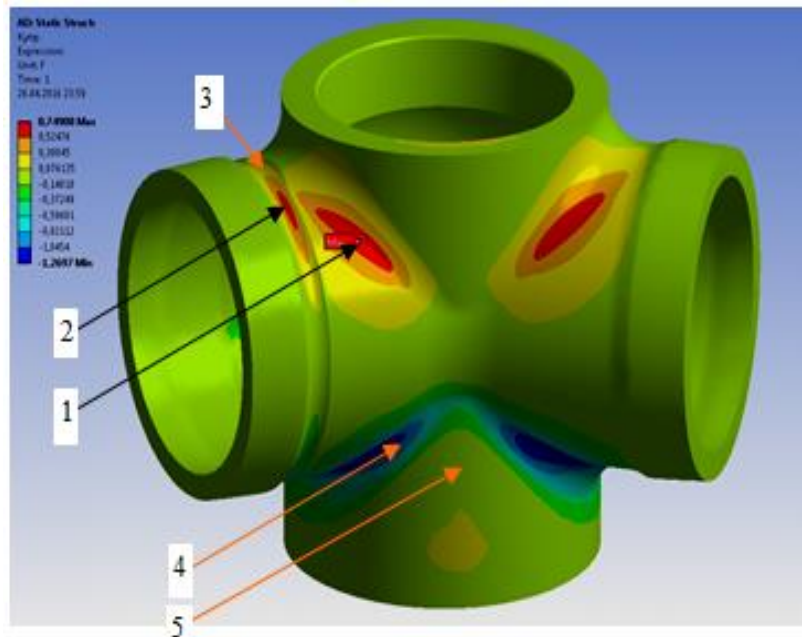


Рис. 4. Результаты анализа НДС траверсы, расположение максимальных значений критериев:

- 1 –  $K_{\max} = 0,749$ ; 2 –  $K_{\max} = 0,606$ ;  
 3 –  $K_{ж\_max} = 2,431$ ; 4 –  $\sigma_{i\ max} = 797,86$  МПа;  
 5 –  $K_U\ max = 0,726$

которых значения критерия  $K$  принимают наибольшие значения: в области позиции 1 с  $K_{\max} = 0,749$ , где образовалась трещина с последующим ростом в направлениях области позиции 2, где  $K = 0,606$ , и далее к области позиции 3 с максимальной величиной критерия ЖНС  $K_{ж} = 2,431$ . При этом расположение областей с наибольшей величиной энергетического критерия  $K_U$  – позиция 4 и интенсивности напряжений  $\sigma_i$  – позиция 5 значительно отличается от фактического места расположения очага и роста трещины. В областях 1, 2 и области 3, расположенной внутри детали, возникает объёмная концентрация напряжений со сложным НДС и повышенной ЖНС, что стало причиной образования и роста усталостной трещины. Следовательно, критерии  $K$  и  $K_{ж}$  адекватно отражают наиболее опасные области, подтверждают эффективность изложенного метода диагностики и могут использоваться для оптимизации размеров и других геометрических параметров конструкции ответственных деталей.

## Библиографический список

1. Фридман, Я.Б. Единая теория прочности материалов / Я.Б. Фридман. – М.: Оборонгиз, 1943.
2. Фридман, Я.Б. Деформация и разрушение металлов при статических и динамических нагрузках / Я.Б. Фридман. – М.: Оборонгиз, 1946. – 227 с.
3. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов. Изд.3-е, перераб.и доп. В двух частях. Часть первая. Деформация и разрушение / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
4. Букатый, А.С. Методология оптимизации конструкции и технологии поверхностного упрочнения авиационных деталей на основе критерия жёсткости напряжённно-деформированного состояния: автореф. ... докт. техн. наук: 01.02.06 / А.С. Букатый. – Самара, 2019. – 35 с.
5. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчёта операций пластической обработки материалов. 2-е изд., переработ. и доп. / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машгиз, 1961. – 463 с.
6. Смирнов-Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
7. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчёты процессов конечного формоизменения материалов. Изд. 3-е, переработ. и доп. / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
8. Петерсон, Р. Е. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчёта конструктивных элементов на прочность / Р. Е. Петерсон // Пер. с англ. И. А. Нечая, И. П. Сухарева, Б. Н. Ушакова. – М.: МИР, 1977. – 302 с.

УДК 621.787:539.319

**Букатый А.С., Зотов Е.В., Мухин А.Ю., Фёдоров Д.Г., Гуськов Д.М.**

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЙ ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Адгезия, износостойкость покрытий, получаемых плазменным и газопламенным напылением, а также гальваническими методами являются основополагающими показателями в производстве деталей шасси. Ключевым фактором, влияющим на адгезию покрытий, являются остаточные напряжения [1], которые создаются в поверхностном слое детали на подготовительных этапах технологического процесса. В производстве деталей шасси основной операцией, формирующей технологическую наследственность перед нанесением покрытий, является операция «Шлифова-