

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК С УЧЕТОМ МЕЖСЛОЙНЫХ ДЕФЕКТОВ  
ДЛЯ КОНСТРУКЦИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ  
СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ<sup>1</sup>**

Доктор техн. наук, профессор **Медведев Ю.С.**,  
кандидат физ.-мат. наук, доцент **Жучкова В.В.**  
(Краснодарское высшее военное авиационное училище лётчиков  
имени Героя Советского Союза А.К. Серова)

**METHOD FOR DETERMINING THE LIMIT LOADS TAKING INTO ACCOUNT INTERLAYER DEFECTS  
FOR THE DESIGN OF THE CATALYTIC CONVERTER OF EXHAUST GASES  
OF POWER PLANTS OF VEHICLES**

Doctor (Tech.), Professor **Medvedev Y.S.**,  
Ph.D. (Phys-Math.), Associate Professor **Zhuchkova V. V.**  
(Krasnodar higher military aviation school for pilots  
the name of the Hero of Soviet Union A. K. Serov)

*Каталитический нейтрализатор отработавших газов.*

*Exhaustgascatalytic Converter.*

*Для точного прогнозирования срока службы каталитического нейтрализатора требуется оценить влияние внутренних дефектов материала на его прочностные характеристики. Предлагается методика определения критических размеров межслойных дефектов конструкции многоступенчатого каталитического нейтрализатора, которая позволяет довольно точно оценить ее напряженно-деформированное состояние и, тем самым, исключить преждевременный выход из строя каталитического нейтрализатора в результате разрушения.*

*To accurately predict the service life of a catalytic Converter, it is necessary to evaluate the effect of internal material defects on its strength characteristics. The proposed method for determining the critical dimensions of interlayer defects in the structure of a multi-stage catalytic Converter allows us to fairly accurately assess its stress-strain state and, thereby, exclude premature failure of the catalytic Converter as a result of destruction.*

Стремительное развитие транспорта требует неуклонного ужесточения норм, ограничивающих токсичность отработавших газов двигателей. В связи с этим даже самый современный двигатель для выполнения экологических норм оснащается нейтрализатором. Каталитическая нейтрализация - это наиболее действенный метод нейтрализации отработавших газов силовых установок. Основной тенденцией развития конструкций каталитических нейтрализаторов является создание многоступенчатых систем [1]. Это обусловлено необходимостью очищения отработавших газов от нескольких нормируемых токсичных веществ, являющихся компонентами отработавших газов. С целью увеличения срока службы таких нейтрализаторов включают в работу дополнительные ступени нейтрализации с ростом расхода отработавших газов. При достижении критического состояния катализатора осуществляется его автоматическая регенерация. На основании исследований [2, 3] был разработан полностью автоматический многоступенчатый каталитический нейтрализатор с термической регенерацией катализатора, обеспечивающий эффективное снижение токсичности отработавших газов в течение всего срока службы силовой установки [2]. Ввиду того что нейтрализатор работает в агрессивных средах, при весьма значительных перепадах

температур, к долговечности его конструкции предъявляются повышенные требования [4].

Для прогнозирования срока службы элементов конструкции каталитического нейтрализатора следует учесть влияние межслойных дефектов на прочность материала. С этой целью необходимо правильно определить предельные значения внешних нагрузок. Для этого требуется оценить для различных сред критические размеры дефекта, при котором начнется прорастание трещины.

В качестве математической модели поставленной задачи рассматривается напряженно-деформированное состояние двухслойной оболочки с дефектами в межслойном соединении.

Напряженно-деформированное состояние многослойной оболочки с межслойными дефектами решается в два этапа [6]:

1) определяется напряженно-деформированное состояние оболочки, не содержащей дефектов,

2) а затем определяется коэффициент интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины. Задача о развитии дефектов типа трещин вполне решается нахождением КИН вдоль контура, которые характеризуют местное распределение напряжений, деформаций, смещений вблизи кромки трещины.

<sup>1</sup> Грант Президента РФ МД-146.2010.8.

Пусть имеется двухслойная цилиндрическая оболочка с конечным числом продольных связей. На оболочку действует внутреннее и внешнее давление, осевое растяжение, а также имеется давление среды в пространстве между оболочками.

Предполагается, что нагрузка не меняется по длине оболочки, а значит, деформация оболочки является плоской.

Поперечное сечение многослойной оболочки в процессе деформирования остается плоским. При этом нужно учитывать, что условие плоской деформации осуществляется на некотором удалении от торцов.

Чтобы определить напряженно-деформированное состояние оболочки, нужно отсечь продольные связи и заменить их неизвестными усилиями  $P$  (МПа).

Решение этой задачи известно, например [5].

В данном случае в наружной оболочке возникают максимальный изгибающий момент и перерезывающая сила:

$$M_x = \frac{\pi P R_2}{2n}; \quad Q_x = \frac{P}{2}.$$

Однако при большом числе связей напряжения изгиба малы по сравнению с равномерно распределенными по толщине оболочки напряжениями растяжения. Будем считать, что вместо усилий на оболочку действует среднее давление  $\sigma = \frac{nP}{2\pi R_2}$  (МПа),

где  $n$  – число продольных связей ( $n \geq 15$ );

$R_2$  – радиус наружной оболочки.

Далее рассматривается проблема распространения трещины, лежащей на границе раздела соединенных сред. Предполагается, что среда состоит из трех материалов (рис.1).

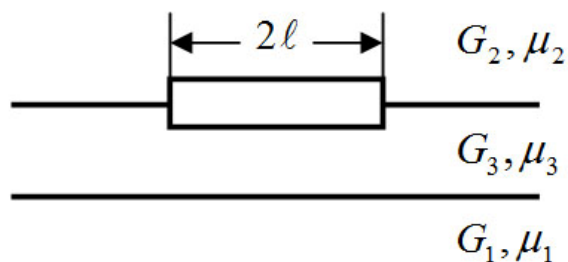


Рис.1.Схема составной среды с трещиной на границе раздела

Рассматривается плоская деформация соединенной среды, которая имеет дефект типа трещины на одной из поверхностей раздела. Решение подобных задач имеется в работах [2, 3]. Напряжения находятся из решения системы интегральных уравнений при заданных начальных условиях на трещине. После ряда преобразований с помощью преобразования Фурье и полиномов Якоби систему интегральных уравнений можно свести к системе алгебраических уравнений относительно неизвестных постоянных  $C_n$ :

$$\phi(x) = \sum_0^k C_n W(x) p_n.$$

В случае двух полуплоскостей, содержащих дефект на поверхности раздела сред, существует следующее точное решение.

Пусть заданы граничные условия на трещине:

$$P_1(x) = -\sigma; \quad P_2 = 0.$$

Тогда, из решения системы алгебраических уравнений, можно найти неизвестные константы  $C_1; C_2$ , которые равны, соответственно,

$$C_1 = \frac{8\sigma(1-\mu_3)}{\sqrt{1-\gamma^2} \cdot a_{12} \cdot G_3};$$

$$C_0 = C_n = 0, \text{ при } n = 2, 3, \dots$$

где  $\gamma = \frac{a_{11}}{a_{12}}$ ,

$a_{11}, a_{12}$  – постоянные величины, определяемые значениями модуля сдвига и коэффициента Пуассона  $i$ -слоя ( $i = 1, 2, 3$ );

$G_1, \mu_1$  – модуль сдвига и коэффициент Пуассона внутренней оболочки;

$G_2, \mu_2$  – модуль сдвига и коэффициент Пуассона наружной оболочки;

$G_3, \mu_3$  – модуль сдвига и коэффициент Пуассона соединительного слоя.

Следуя теории линейной механики разрушения [6], определим параметры  $K_I, K_{II}, K_{III}$ , которые позволяют найти все характеристики напряженно-деформированного состояния вблизи вершины трещины. Параметры  $K_I, K_{II}, K_{III}$  носят название коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины. Коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  характеризует нормальный отрыв, а  $K_{II}$  – поперечный сдвиг.

После ряда преобразований определяются КИН в вершине трещины:

$$K_I = \frac{[\cos(b \lg 2l) + 2b \sin(b \lg 2l)] \sigma \sqrt{\pi l}}{\cos \pi b h};$$

$$K_{II} = \frac{[\sin(b \lg 2l) - 2b \cos(b \lg 2l)] \sigma \sqrt{\pi l}}{\cos \pi b h},$$

где  $b = \frac{1}{2\pi} \cdot \lg \frac{G_1 + (4 - 3\mu_1)G_2}{G_2 + (4 - 3\mu_2)G_1}$ .

Для определения предельных значений внешних нагрузок существенное значение приобретают численные методы вычисления критических размеров дефектов, снижающих прочностные свойства системы.

Авторами построена численная зависимость коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  от отношения толщины  $h$  (м) соединительного слоя к длине  $l$  (м) трещины для различных сред. Графики зависимости коэффициентов интенсивности напряжений – КИН от отношения  $h/l$  для различных материалов представлены на рисунке 2 (кривые 1, 2, 3).

В качестве критерия роста трещины выбран критерий локального разрушения [6]:  $K_I \leq K_c$ . Т.е. рост трещины происходит в том случае, когда КИН достигает некоторого критического значения  $K_c$ , постоянного для

данного материала. Величина  $K_c$  называется вязкостью материала и определяется экспериментально. Зная значения коэффициентов интенсивности напряжений для различных сред, численно определяются критические размеры внешних усилий, при которых начинается прорастание трещины.

Предлагаемая методика позволяет определять влияние межслойных дефектов конструкции многоступенчатого каталитического нейтрализатора на его прочность. Это позволяет довольно точно оценить напряженно-деформированное состояние каталитического нейтрализатора и, тем самым, исключить преждевременный выход из строя каталитического нейтрализатора в результате разрушения, а также прогнозировать срок его службы.

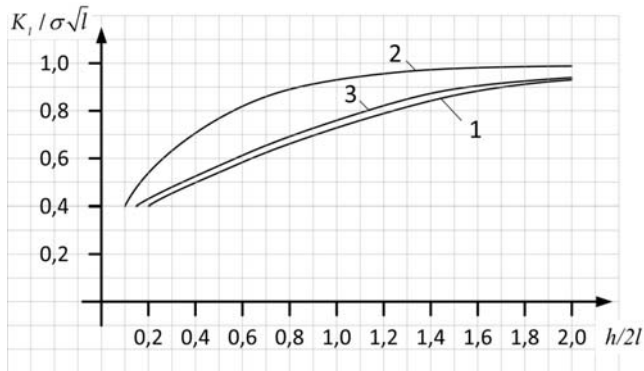


Рис.2. Зависимость коэффициент интенсивности напряжений для двух полуплоскостей, соединенных слоем.

Кривая (1) для материала: сталь – алюминий – эпоксидная смола;

кривая (2) для материала: алюминий – алюминий – эпоксидная смола;

кривая (3) для материала: алюминий – сталь – эпоксидная смола.

В результате разработана конструкция полностью автоматического многоступенчатого каталитического нейтрализатора отработавших газов с термической регенерацией катализатора, действительно уменьшающего токсичность отработавших газов в течение всего срока службы двигателя.

## Литература

1. Гетманец Г.В., Лиханов В.А. Социально-экологические проблемы автомобильного транспорта.- М.: Наука, 1993.-330 с.
2. Медведев Ю.С., Жучкова В.В. Прогнозирование долговечности конструкций с поверхностными дефектами при проектировании систем снижения токсичности отработавших газов//Экология и промышленность России: Ежемес. общественный науч.-техн. журнал – М., 2015.- № 5. - С. 31-33.
3. Медведев Ю.С., Жучкова В.В. Применение деформационного критерия разрушения к анализу прочности при проектировании системы снижения токсичности отработавших газов // Транспорт: наука, техника, управление: Научн. инф. сб.- М.: ВИНТИ РАН, 2019. - № 1.- С. 43-46.
4. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин. / Отв. ред. Н.А. Махутов. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. - 576 с.
5. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластики и оболочки. - Либроком, 2007. - 640 с.
6. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1989. -636 с.

## Сведения об авторах

**Медведев Юрий Станиславович**, доктор технических наук, профессор; Краснодарское высшее военное авиационное училище лётчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова.

350005. г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135. КВВАУЛ.

Тел. моб. + 7 903 450 28 12

E-mail: ysm-73@yandex.ru.

**Жучкова Виктория Владимировна**, кандидат физ.-мат. наук, доцент; Краснодарское высшее военное авиационное училище лётчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова.

350005. г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135. КВВАУЛ.

Тел. моб. + 7 909 468 09 89.

E-mail: vvzh.53@mail.ru.