

ходного транспортного средства с колесной формулой 6×6; установлено, что в шинах низкого давления наблюдается большая неравномерность распределения нормальных давлений, имеющая седлообразную форму как в продольных, так и поперечных сечениях, а также предложен новый критерий энергоэффективности.

#### Список литературы

1. Работа автомобильной шины / под ред. В. И. Кнорова. – М. : Транспорт, 1976. – 238 с.
2. Транспортные средства на высокоэластичных движителях / Н. Ф. Бочаров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1974. – 208 с.
3. Бархатанов Л. В., Беляков В. В., Кравец В. Н. Пройдемость автомобиля. – Н. Новгород : НГТУ, 1996. – 200 с.

4. Котляренко В. И. Научное обоснование создания и разработка ходовых систем на пневмоколесных движителях сверхнизкого давления : дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2009. – 280 с.

5. Расчет проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу / В. В. Беляков [и др.] // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 3(47). – С. 35–38.

6. Гончаров К. О., Макаров В. С., Беляков В. В. Влияние экскавационно-бульдозерных эффектов, возникающих при криволинейном движении колеса, на сопротивление качению // Наука и образование. – 2010. – № 6.

7. Влияние бульдозерных эффектов, возникающих при криволинейном движении колесных машин, на нагруженность элементов трансмиссии / В. С. Макаров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2008. – № 9. – С. 47–51.

A. A. Alipov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University after R. E. Alekseev  
V. V. Belyakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University after R. E. Alekseev  
A. N. Blokhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University after R. E. Alekseev  
D. V. Zezulin, Post-Graduate Student, Nizhny Novgorod State Technical University after R. E. Alekseev

#### Pressure Distribution in Road Tire Contact

*New experimental results of tubeless pneumatic extra-low pressure tire to road contact interaction are presented. These results were received with use of instruments which passed metrological examination. A new energy efficiency estimation criterion for wheeled running gear tests is proposed.*

**Key words:** energy efficiency, passability, moveability, cross-country vehicle, extra-low pressure tyre, wheeled running gear, pressure distribution.

УДК 629.76.03

А. В. Хмелева, кандидат технических наук, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета

## УПРАВЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИМИ СИТУАЦИЯМИ ПО ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ\*

*Показана возможность управления критическими ситуациями, возникающими при эксплуатации стеклопластиковых элементов воспламенительного устройства, транспортно-пускового контейнера с помощью математического моделирования.*

**Ключевые слова:** трещиностойкость, критические ситуации, математическая модель.

**Ш**ирокое применение композиционных материалов в ракетной технике вызвано их хорошими конструктивными, теплозащитными свойствами. Например, стеклопластики применяются при изготовлении корпусов камер сгорания РДТТ, воспламенительных устройств, растробов сопел, несущих элементов транспортно-пускового контейнера.

По сравнению с другими материалами стеклопластики обладают следующими существенными преимуществами:

– высокая удельная прочность, которая обеспечивает сопротивляемость силовым и температурным нагрузкам при малой массе;

– хорошие теплоизолирующие, звукоизолирующие, демпфирующие и диэлектрические свойства;

– при небольшом удельном весе имеют высокие физико-механические характеристики;

– высокая коррозионная стойкость;

– стойкость к вибрационным нагрузкам;

– значительная усталостная прочность при воздействии переменных нагрузок.

Но, несмотря на вышеуказанные достоинства композиционных материалов, при их длительной эксплуатации происходят процессы старения, что приводит к ухудшению физических, механических, теплофизических характеристик материалов.

© Хмелева А. В., 2011

Получено 08.10.10

\* Научно-исследовательская работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Перечислим факторы, влияющие на изменение свойств стеклопластиков:

- снижение механических свойств и процессы диффузии воды способствуют ослаблению адгезионной прочности стекловолокон с полимерным связующим, в результате чего происходит обнажение волокна, т. е. верхний тканевый слой отслаивается;

- стеклопластики при силовых воздействиях имеют тенденцию к прогрессирующим и необратимым повреждениям в виде отслаивания волокон от матрицы вплоть до полного разрушения;

- влияние абразивных частиц, и, как результат, появление абразивной эрозии, которая вызывается ударами механических частиц, взвешенных в воде или в воздухе.

Таким образом, старение композиционного материала со временем необходимо учитывать при оценке состояния конструктивных элементов ракетной техники после длительного срока эксплуатации.

Результатом атмосферного воздействия на элементы узлов из композиционных материалов является в конечном итоге уменьшение несущей способности элементов; тогда в какой-то момент времени количество и размеры дефектов превысят допустимый уровень, и возникнет критическая ситуация [1]. Она связана с проявлением в элементах конструкции свойства трещиностойкости.

В [2] разработаны нормы дефектности, основанные на принципах линейной механики разрушения (ЛМР). С помощью ЛМР процедура определения роста трещин сводится к расчету коэффициентов интенсивности напряжений вдоль контура трещин при заданных нагрузках. Затем экспериментально определяются характеристики трещиностойкости материала и проводится их сравнение на основе критериев ЛМР. В итоге определяются предельные размеры трещин.

Допустим, что микротрещина распределяется по поверхности стеклопластиковой цилиндрической оболочки и создает дополнительные нормальные –  $\sigma_x, \sigma_y$  – и касательные –  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  – напряжения (рис. 1).

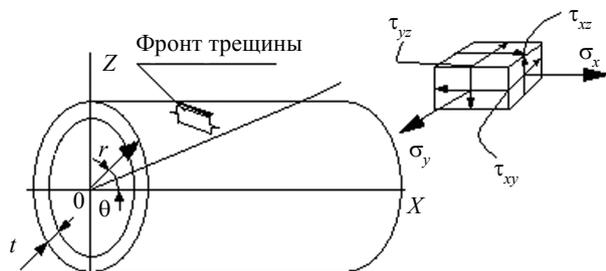


Рис. 1. Напряжения в элементе оболочки в окрестности фронта трещины

Наибольшие значения напряжений достигаются вблизи фронтов трещины. При достижении трещиной критических размеров происходит разрушение цилиндрической оболочки. Этот случай и принимаем за критическую ситуацию (КС). Момент возникно-

вения КС зависит от геометрических размеров трещин, от их количества, местоположения на оболочке, а также вида и величины внешних нагрузок.

Математическая модель представляется в виде множества показателей:

$$Y_i(t) = \{ \bar{y}_{i,j}(t, Z, X), j = \overline{1, n} \}, \quad (1)$$

каждый из которых оценивает определенную КС.

Показатели, оценивающие возникновение КС по свойству трещиностойкости для несущих цилиндрических оболочек, составляют вектор:

$$\bar{y}_{li} = k_{\text{корр},j} \sigma_i(t) / \sigma_{\text{инр}}(t),$$

или

$$\bar{y}_{li}(t) = k_{\text{корр},j} h_{yi}(t) / h_{\text{укр}}(t). \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_i(t), \sigma_{\text{инр}}(t)$  – эквивалентное и предельное напряжения, возникающие в оболочке;  $h_{yi}(t), h_{\text{укр}}(t)$  – текущее и допустимое значения дефекта в оболочке;  $k_{\text{корр},j}$  – коэффициент коррекции, учитывающий расхождение расчетных и экспериментальных данных.

Все эти показатели зависят от параметров, входящих в векторы состояния системы  $X(t)$ , воздействия внешней среды  $Z(t)$  и времени эксплуатации оболочки  $t$ . Для сравнения моментов возникновения критических ситуаций все показатели отнормированы. Значения их находятся в диапазоне  $0 \leq y_i \leq 1,0$ , так что при достижении любым из них верхнего предела считается, что наступила критическая ситуация.

На рис. 2 представлена классификация трещин, которые могут появиться в исследуемых композиционных цилиндрических оболочках.

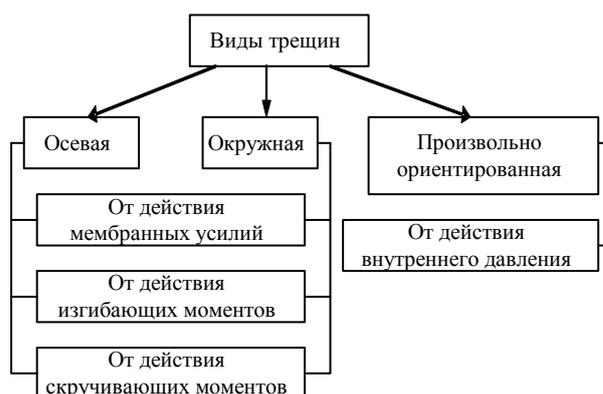


Рис. 2. Классификация трещин

Разработана структура показателей, оценивающих возникновение различных критических ситуаций по трещиностойкости: от неровностей, складок на поверхности –  $\bar{y}_{1,1}$ ; от количества отслоений, забоин, раковин, царапин, осевых и кольцевых рисок на поверхности элемента –  $\bar{y}_{1,2}$ ; от числа посторонних включений на поверхности –  $\bar{y}_{1,3}$ ; от площади побелений и отслоений на поверхности –  $\bar{y}_{1,4}$ ; оцен-

ки местных трещин клевого шва в стыке –  $\bar{y}_{1,5}$  и расслоений в структуре стенки –  $\bar{y}_{1,6}$  оболочки; связанных с появлением окружных –  $\bar{y}_{1,10}$  и осевых –  $\bar{y}_{1,7}$ , трещин от действия мембранных усилий; от распространения осевой трещины под действием изгибающих моментов –  $\bar{y}_{1,8}$ ; при произвольно ориентированной трещине –  $\bar{y}_{1,9}$  и с одним закрепленным торцом –  $\bar{y}_{1,11}$  под действия внутреннего давления.

Каждый из показателей является функцией параметров внешнего или внутреннего фактора системы.

В качестве примеров рассмотрим показатели:

–  $\bar{y}_{1,6}$ , учитывающий КС от расслоений в структуре стенки стеклопластиковой цилиндрической оболочки;

–  $\bar{y}_{1,7}$ , определяющий КС по трещиностойкости в случае действия мембранных усилий на оболочку, которая является несущей конструкцией из состава корпуса транспортно-пускового контейнера ракеты (ТПК) (рис. 3).

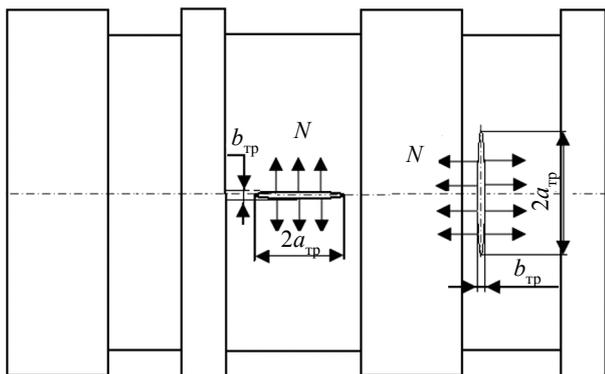


Рис. 3. Оболочка с дефектами – осевой и окружной трещиной

При длительной эксплуатации оболочки происходит образование местных трещин клевого шва в структуре стенки. Увеличение размеров этих трещин с течением времени приведет к КС по показателю

$$\{\bar{y}_{1,6}\} = \frac{C_{\Sigma\phi}}{C_{\Sigma\text{тр}}} k_{\text{кор}1,6}, \quad (3)$$

где  $C_{\Sigma\phi}$ ,  $C_{\Sigma\text{тр}}$  – суммарная и предельная площади расслоения в структуре стенки оболочки;  $k_{\text{кор}1,6}$  – коэффициент коррекции.

При появлении трещины оболочка будет находиться в напряженно-деформированном состоянии. Дальнейшее увеличение размеров трещины приведет к КС и разрушению оболочки. Выражение показателя КС для цилиндрической оболочки с осевой трещиной от действия мембранных усилий имеет вид

$$\{\bar{y}_{1,7}\} = \frac{\sigma_{\text{эк}}}{[\sigma_{\text{пр}}]} k_{\text{кор}1,7}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{эк}} = \max\{\sigma_{\text{эк}1}, \sigma_{\text{эк}2}\}$ ;  $[\sigma_{\text{пр}}]$  – эквивалентное и предельно допустимое напряжения, возникающие в оболочке;  $k_{\text{кор}1,7}$  – коэффициент коррекции;  $\sigma_{\text{эк}1} = \sqrt{\sigma_{\text{из}y1}^2 + 3\tau_{\text{макс}1}^2}$ ,  $\sigma_{\text{эк}2} = \sqrt{\sigma_{\text{из}y2}^2 + 3\tau_{\text{макс}2}^2}$  – эквивалентные напряжения от действия мембранных усилий и изгибных напряжений;

$$\sigma_{\text{из}y1}(t) = \frac{\sigma_x^m + \sigma_y^m}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x^m - \sigma_y^m)^2 + 4(\tau_{xy}^m)^2},$$

$$\tau_{\text{макс}1}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x^m - \sigma_y^m)^2 + 4(\tau_{xy}^m)^2},$$

$$\sigma_{\text{из}y2}(t) = \frac{\sigma_x^b + \sigma_y^b}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x^b - \sigma_y^b)^2 + 4(\tau_{xy}^b)^2},$$

$$\tau_{\text{макс}2}(t) = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x^b - \sigma_y^b)^2 + 4(\tau_{xy}^b)^2},$$

$$\sigma_x^m(r, \theta) = \frac{k_1^m}{(2r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right],$$

$$\sigma_y^m(r, \theta) = \frac{k_1^m}{(2r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right],$$

$$\tau_{xy}^m(r, \theta) = \frac{k_1^m}{(2r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} - \text{мембранные}$$

нормальные и касательные напряжения в продольном и окружном направлениях;

$$\sigma_x^b(r, \theta, z) = \frac{k_2^b}{(2r)^{1/2}} \frac{z}{2vt} \left[ \sin \frac{5\theta}{2} - \frac{9+7\mu}{1-\mu} \sin \frac{\theta}{2} \right],$$

$$\sigma_y^b(r, \theta, z) = \frac{k_2^b}{(2r)^{1/2}} \frac{z}{2\mu t} \left[ \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{5\theta}{2} \right],$$

$$\tau_{xy}^b(r, \theta, z) = \frac{k_2^b}{(2r)^{1/2}} \frac{z}{2vt} \left[ \frac{5+3\mu}{1-\mu} \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{5\theta}{2} \right] - \text{изгибные}$$

напряжения от действия нормальных и касательных сил;  $v = \frac{(3+\mu)}{(1-\mu)}$  – модуль сдвига.

$$k_1^m = F^m \sigma_m \sqrt{a_{\text{тр}}}; \quad k_1^b = \frac{3+\mu}{[(1-\mu^2)/3]^{1/2}} F^b \sigma_m \sqrt{a_{\text{тр}}};$$

$$\sigma_m = \frac{N_x}{t}; \quad \lambda = \frac{[12(1-\mu^2)]^{1/4} a_{\text{тр}}}{(Rt)^{1/2}}; \quad N_x = \frac{1,9P_x}{\pi 2a_{\text{тр}}},$$

где  $t$  – толщина оболочки;  $R$  – радиус оболочки;  $a_{\text{тр}}$  – длина трещины;  $z$  – глубина трещины;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $N_x$  – погонное напряжение, возникающее по длине осевой трещины;  $P_x$  – осевая сила;  $b_{\text{тр}}$  – ширина трещины;  $\lambda$  – гибкость;  $k_1^m$ ,  $k_1^b$  – коэффициенты интенсивности напряжений;  $F^m = f(\lambda, \mu)$  – коэффициент интенсивности мембранных напряжений;  $F^b = f(\lambda, \mu)$  – коэффициент интенсивности изгибных напряжений [2].

Изменение механических характеристик стеклопластика учтено функциональными зависимостями от времени предела прочности, модуля упругости [3]:

$$\sigma_p = \sigma_{p\max}^0 - 15 \lg \frac{\tau_i}{\tau_0}, \quad E_p = E_{p\max}^0 - 0,045 \cdot 10^4 \lg \frac{\tau_i}{\tau_0}, \quad (5)$$

где  $\sigma_p, E_p$  – разрушающее напряжение и модуль упругости при растяжении после воздействия атмосферы на стеклопластик, МПа;  $\sigma_{p\max}^0, E_{p\max}^0$  – начальные значения напряжения и модуля упругости при растяжении, МПа;  $\tau_i$  – время воздействия атмосферных факторов на стеклопластик;  $\tau_0 = 0,1$  года.

Для показателя  $\bar{y}_{1,7}$  параметрами, характеризующими внешние воздействия, является осевая сила  $P_x$ .

Параметры состояния определяются механическими свойствами материала пределом прочности, модулем упругости –  $\sigma_b(t), E(t)$ , нормальными и касательными напряжениями –  $\sigma_{ixy1}(t), \sigma_{ixy2}(t), \tau_{\max1}(t), \tau_{\max2}(t)$ , возникающими в оболочке, а также геометрическими параметрами –  $R, t, a_{тр}, z_{тр}, b_{тр}$ .

Рассмотрим стеклопластиковую цилиндрическую оболочку ТПК, которая имеет следующие геометрические, механические и физические параметры.

Толщина стенки $t$ , м	0,070
Длина $L$ , м	8,020
Радиус $R$ , м	0,990
Начальные параметры трещины,	
$(a_{тр} \times b_{тр} \times z_{тр})$ , м	$(0,005 \times 0,005 \times 0,006)$
Материал	стеклопластик 27-63С
Давление $q_b$ , МПа:	
внешнее	0,101325
внутреннее	0,100325
Осевая сила $P_x$ , кН	800
Температура, К:	
режим хранения	[223–323]

расчетная 293

Коэффициент коррекции  $k_k$  1,0

При эксплуатации оболочки значения параметров состояния и воздействия внешней среды изменяются.

Изменения претерпевают: внутреннее давление при хранении  $q_b$ , модуль упругости  $E(t)$ , предел прочности материала  $\sigma_b$ , нормальные и касательные изгибные и мембранные напряжения –  $\sigma_{ixy1}(t), \sigma_{ixy2}(t), \tau_{\max1}(t), \tau_{\max2}(t)$ . Также происходит увеличение размеров и количества дефектов оболочки. Изменениями в зависимости от времени хранения  $t_{xp}$  остальных параметров пренебрегли.

В разработанном программном комплексе в среде Delphi 7.0 для решения задачи оценки КС [4], возникающих при эксплуатации стеклопластиковой оболочки по свойству трещиностойкости, использовались в качестве исходных данных геометрические параметры, физико-механические характеристики материала и действующие нагрузки.

Проведенное компьютерное моделирование процесса эксплуатации оболочки позволило установить первую критическую ситуацию, которая возникнет после  $20,5 \pm 0,2$  лет эксплуатации оболочки из-за расслоений в структуре стенки оболочки  $\bar{y}_{1,6}$  (рис. 4).

Критические ситуации по показателям  $\bar{y}_{1,9}, \bar{y}_{1,11}$  возможны при заданном уровне дефектов, в случае действия на оболочку внутреннего давления 0,3 МПа.

Показатель трещиностойкости  $\bar{y}_{1,7}$  достигает предельного значения при длине трещины 0,054 м, ширине 0,001 м, глубине 0,0603 м.

В этом случае, момент возникновения критической ситуации существенно зависит от размеров дефектов –  $a_{тр}, b_{тр}, z_{тр}$ . При варьировании этими параметрами можно отодвинуть момент наступления КС для оболочки (рис. 5).

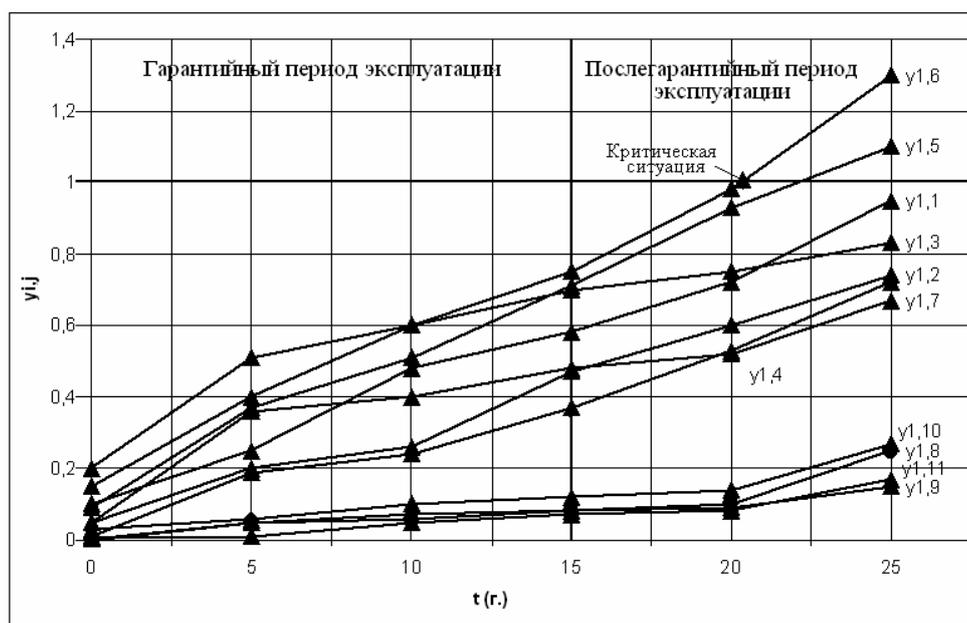


Рис. 4. Изменение показателей трещиностойкости оболочки во времени

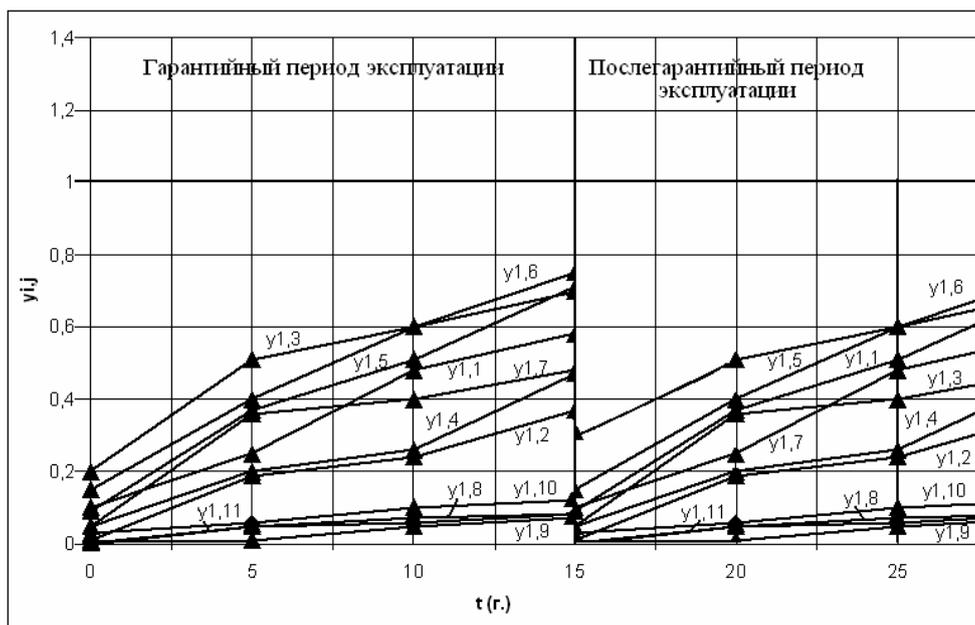


Рис. 5. Изменение проявления свойства трещиностойкости после проведения ремонта

На практике это управление сводится к заделке дефектов. Моделирование показало, для того чтобы предотвратить возникновение критической ситуации по показателю  $\bar{y}_{1,6}$ , оценивающему расслоения в структуре стенки оболочки, необходимо после пятнадцати лет эксплуатации произвести ремонт дефектных мест. Тогда показатель  $\bar{y}_{1,6}$  не превысит предельного значения. Таким образом, предотвращение критических ситуаций сводится к снижению уровня влияния трещин на напряженно-деформированное состояние оболочки.

Данную методологию определения КС можно применить и к другому объекту, например для оценки трещиностойкости корпуса воспламенительного устройства РДТТ, с соответствующей корректировкой исходных данных моделирования.

Достоверность значений показателей КС, полученных при моделировании, достигается за счет применения методов статистической обработки, экспериментальных данных, достаточно точных средств измерений, а также использования современных вычислительных средств и принятыми исходными данными.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Эксплуатация стеклопластиковых элементов сопровождается критическими ситуациями, связанными с недостаточной интенсивностью проявления свойства трещиностойкости конструкции.

2. Причиной возникновения первой критической ситуации является появление расслоений в структуре стенки оболочки, на что указывает показатель трещиностойкости  $y_{1,6}$ .

3. Моделирование критических ситуаций позволяет определять параметры, с помощью которых можно управлять состоянием оболочки при эксплуатации.

#### Список литературы

1. Проектирование технических систем на основе анализа упорядоченных во времени критических состояний : учеб. пособие / В. Н. Репко [и др.]. – Ижевск : ИжГТУ, 1999. – 268 с.
2. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений : справочное пособие в 2 т. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1990. – 1016 с.
3. Альперин В. И., Корольков Н. В. Конструкционные стеклопластики. – М. : Химия, 1979. – 360 с.
4. Хмелева А. В., Уразбахтин Ф. А. Определение действительного срока эксплуатации транспортно-пускового контейнера ракеты // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 1. – С. 15–23.

A. V. Khmeleva, Candidate of Technical Sciences, Votkinsk Branch of the Izhevsk State Technical University

#### Control of Critical Situations Based on Crack-Resistance in Rocketry Elements Composites

The possibility to control the critical situations occurred in exploiting the fiberglass plastic elements of a rocket solid-fuel igniter and transport-launch rocket containers by means of the mathematical modelling is shown.

**Key words:** crack-resistance, critical situation, mathematical model.