

УДК: 621.455.4

Прогнозирование свойств конструкционных материалов для электродов ионных двигателей

В.В. Балашов, Ю.А. Волков, А.С. Демидов, В.В. Кашелкин, А.В. Пашутов,
С.А. Хартов

Аннотация. Анализируются возможности оценки накопления поврежденности в консольных образцах из композитного материала «углерод-углерод» при виброиспытаниях путем наблюдения за изменением собственной частоты образцов и размаха колебаний. Даются ссылки на ранее полученные аналогичные результаты для образцов из нержавеющей стали и других материалов. Рассматривается возможность упрощенного варианта построения поверхности прочности для композитного материала на базе тензорно-полиномиального критерия разрушения.

Ключевые слова: конструкционные материалы электродов ионных двигателей; композитный материал «углерод-углерод»; ресурс; поврежденность; виброиспытания; модальные характеристики; консольные образцы; тензорно-полиномиальный критерий разрушения; поверхность прочности

I. В настоящее время задачи проектирования ионно-оптических систем (ИОС) высокоресурсных электроракетных двигателей (ЭРД) являются весьма актуальными. Для осуществления межпланетных полетов обитаемых космических аппаратов требуется обеспечить их ресурс от 30 до 93 тысяч часов [1]. При изготовлении электродов ИОС, от которых в первую очередь зависит реальный ресурс ЭРД, могут применяться такие материалы, как нержавеющая сталь, сплавы на основе титана, композитные материалы типа «углерод-углерод» (УУКМ). Разработчики двигателей должны располагать информацией по прочностным и теплофизическим свойствам конструкционных материалов электродов и моделям их поврежденности. Для ряда металлических материалов можно с определенной долей уверенности использовать классификацию, приведенную в справочнике [2], где такие

материалы в отношении своего поведения разбиты на пять групп. За основу разбиения и классификации принят характер проявления внутреннего трения, определяемый по величине накапливаемой деформации ползучести при циклическом нагружении образцов. Наши экспериментальные исследования, проведенные на более чем 100 образцах из магния АМг-3, дюралюминиевого сплава Д16Т и стали 10Х18Н10Т, подтвердили обоснованность такой классификации, однако она является неполной, в особенности в отношении конструкционных неметаллических материалов.

Для металлических материалов авторами статьи [3] была предложена модель поврежденности, опирающаяся на гипотезу о подобии типичных кривых ползучести и кривых накопления поврежденности. Кривые, имеющие такую форму, называют многостадийными. Следует отметить, что такие материалы, как титановый сплав ВТ5-1 и в особенности сталь 10Х18Н10Т, обладают относительно высокими значениями коэффициентов термического линейного расширения α (см. таблицу 1) [4, 5] и это оказывается серьезным недостатком при их использовании для изготовления электродов.

Таблица 1

Коэффициенты линейного расширения $\alpha \times 10^6$, 1/град

Температура, °С	Сталь 10Х18Н10Т	Титановый сплав ВТ5-1	КМ «углерод-углерод»
20-100	16,1	8,3	-1,0
20-200	17,0	8,9	-0,67
20-300	17,4	9,1	-0,21
20-400	17,8	9,3	-0,05
20-500	18,2	9,5	0,17
20-600	18,6	9,6	0,34
20-700	19,1	9,8	-
20-800	19,4	10,1	0,56

Из-за того, что смежные электроды ИОС на рабочем режиме имеют взаимно отличающуюся и к тому же переменную по радиусу температуру, соосные отверстия в них “смещаются” относительно друг друга, что приводит к снижению КПД двигателя. Этот отрицательный эффект особенно существенен при значительных размерах электродов. В наименьшей степени

таким недостатком обладают электроды из УУКМ. Для этого материала величины коэффициента α приведены в той же таблице 1, некоторые механические свойства - в таблице 2 [6].

Таблица 2

Свойства отечественного КМ «углерод-углерод»

Прочность при растяжении, кгс/мм ²	26
Прочность при сжатии, кгс/мм ²	14
Модуль Юнга при растяжении, кгс/мм ²	7500
Предельная деформация при растяжении, %	0,25
Коэффициент Пуассона	0,1

Из таблицы видно, что этот материал имеет и другие особенности: очень низкую пластичность и обратное по сравнению со многими металлами соотношение свойств прочности при растяжении и сжатии. Причиной последней особенности является структура композитного материала (рис.1).

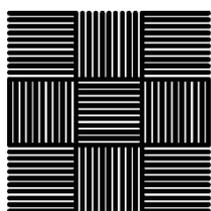


Рис.1. Характер расположения углеродных нитей и прядей в композитном материале

Нити углеродных волокон объединены в пряди, имеющие так называемое полотняное переплетение, а завершающей технологической операцией изготовления материала является спекание волокон при высокой температуре.

Расчетным путем приближенно оценить предел прочности на сжатие композитного материала такой структуры можно, обратившись к схеме на рис.2. За основу возьмем предположение, что начало разрушения материала при сжимающих силах, действующих в его плоскости, происходит при потере устойчивости одной из нитей, после чего процесс разрушения

принимает лавинообразный характер. Принятое допущение соответствует результатам исследований в области механики разрушения волокнистых композитов [7].

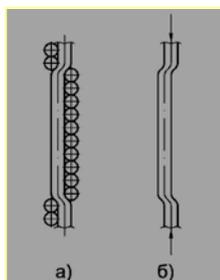


Рис.2. Структура и нагружение композитного материала: а) сечение по одной из прядей; б) схема приложения сил к отдельной нити при испытаниях материала на сжатие

Для сжимаемого стержня со свободно опертыми концами критическая сила определялась по известной формуле [8]

$$P_{кр} = 4\pi^2 EJ/L^2, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, J – момент инерции сечения углеродной нити, L – расчетная длина стержня.

Располагая геометрическими данными по структуре УУКМ, где

диаметр углеродной нити $d = 0,2$ мм,

размер ячейки пряди $2,5 \times 2,5$ мм,

количество нитей в одной пряди $n = 10$,

принимая значение модуля Юнга из таблицы 2, длину L как размер стороны ячейки, момент инерции сечения нити $J = 0,05d^4$, получаем $P_{кр} = 0,38$ кгс. При площади сечения одной нити $0,0314$ мм² напряжение сжатия в ней в момент потери устойчивости оказывается равным $12,1$ кгс/мм². Эта цифра близка к пределу прочности на сжатие материала, приведенному в таблице 2.

Заметим, что при таком подходе не была учтена начальная погибь нити, равная, как это следует из рис.2а, половине ее толщины. Если бы погибь была учтена, это привело бы к *уменьшению* искомой величины напряжения сжатия. С другой стороны, если бы были учтены наличие прямолинейного участка нити (см. схему приложения сил на рис. 2б), а также эффект слипания нитей между собой и каждой пряди с поперечной прядью, то это привело бы к *увеличению* искомой величины – предельного

напряжения сжатия материала. В первом приближении можно представить, что неучтенные факторы в какой-то степени компенсируют друг друга.

Результаты большого числа экспериментов показали [9] (и это не противоречит данным, приведенным в источнике [10]), что при виброиспытаниях балочных образцов из металлических материалов их собственная частота непосредственно перед разрушением снижается на 5-12%, величина логарифмического декремента, как правило, заметно возрастает, а размах колебаний уменьшается в несколько раз. Следовательно, изменение названных модальных характеристик по наработке позволяет оценивать степень поврежденности материала деталей. Отметим, что учет изменения частотной характеристики дает в этом отношении наиболее надежные результаты. Экспериментальная работа была проведена с 2-мя плоскими образцами из УУКМ.

Образец № 1 с размерами $141 \times 16,3 \times 0,6$ мм (толщина образца указана приближенно, что объясняется особенностями структуры материала и влиянием процесса спекания), закреплялся в приспособлении на вибростенде таким образом, что длина его консольной части составляла 100 мм. Техника экспериментальной работы и применяемая аппаратура были подобными описанным в статье [11].

Экспериментально определенная первая собственная частота образца составила 88,46 Гц. Затем при частоте возбуждения 89,6 Гц образец был подвергнут испытаниям на усталость с последовательным увеличением размаха колебаний (см. таблицу 3).

Таблица 3

Результаты виброиспытаний образца № 1

Число наработанных циклов	Собственная образца, Гц	Размах колебаний, мм	Величина изгибных напряжений, кгс/мм ²
0	88,46		
686988	88,4	7	2,366
2302788	88,46		
2947908	88,23	13	4,394
4647948	87,5		
4955828	87,5		
6280008	87,5	16	5,408
6810408	87,5		
9356328	87,5		
10527828	79,7	32	10,816
12081978	79,7		
13038378	79,7		
16676088	79,1		
18099888	79,1		
19632846	79,1		
Разрушения нет			

После того, как число циклов нагружения достигло почти 20 млн, образец №1 был снят с вибростенда и было принято решение определить изгибное напряжение разрушения при нагружении по 4-точечной схеме (рис. 3).

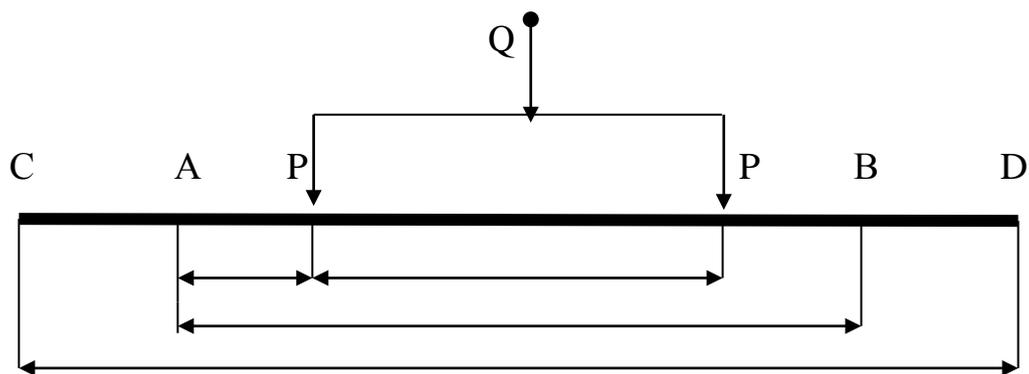


Рис.3. Схема нагружения образца по 4-точечной схеме:
*A и B – точки свободного опирания; $Q = 2P$; $PP = 60$ мм;
 $AB = 110$ мм; $CD = 141$ мм.*

Величина изгибного разрушающего напряжения, равная 13,8 кгс/мм², оказалась близкой к напряжению сжатия в нити, определенному при расчете на потерю устойчивости (12,1 кгс/мм²) и пределу прочности материала на сжатие (14 кгс/мм²) – см. таблицу 4.

Таблица 4

Результаты испытаний образца № 1, нагруженного по схеме на рис.3

Усилие Р, кгс	Прогиб в центре балки, мм	Изгибные напряжения в сечениях Р, кгс/мм ²
0	0	
0,45	0,5	
0,82	2,9	
1,27	4	
1,73	6,5	
2,18	8	
2,54	9,5	
3,0	Треск. Через 10 секунд разрушение в точке приложения нагрузки Р	13,8

Образец № 2 с размерами 141×16,6×0,6 мм, установленный на том же стенде аналогичным образом, также был подвергнут виброиспытаниям.

Таблица 5

Результаты виброиспытаний образца № 2

Число наработанных циклов	Собственная частота образца, Гц	Размах колебаний, мм	
0	79,2	32	
1140480	78,9		
2533680	77,4		
4068180	77,5		
5443380	75,3		
6816780	76,2		
8234100	76,2		
8554560	76,3		
9926160	76,2		
10026160	76,3		
11381560	75,3		40
12733360	75,1		
14083360	75,0		
15497080	74,8		
16955680	74,8		
18303880	74,8		
Срыв вибродатчика, аварийное отключение вибростенда. Собственная частота образца по сравнению с исходной снизилась на 5,5 %.			

После замены вибродатчика испытания были возобновлены и наработка образца № 2 достигла 29,3 млн циклов, при этом размах колебаний составлял 50 мм, а частота практически не изменялась. Затем испытания были прекращены. Цвет образца в зоне воздействия максимального изгибающего момента несколько изменился, что связано, по-видимому, с начальной стадией разрушения материала. По данным таблицы 5 был построен график (рис.4). Некоторая нестабильность частотной характеристики при наработке порядка 5,5 млн циклов объясняется, на наш взгляд, сочетанием особенностей поверхностной структуры образца с условиями закрепления (зажима) в приспособлении вибростенда.

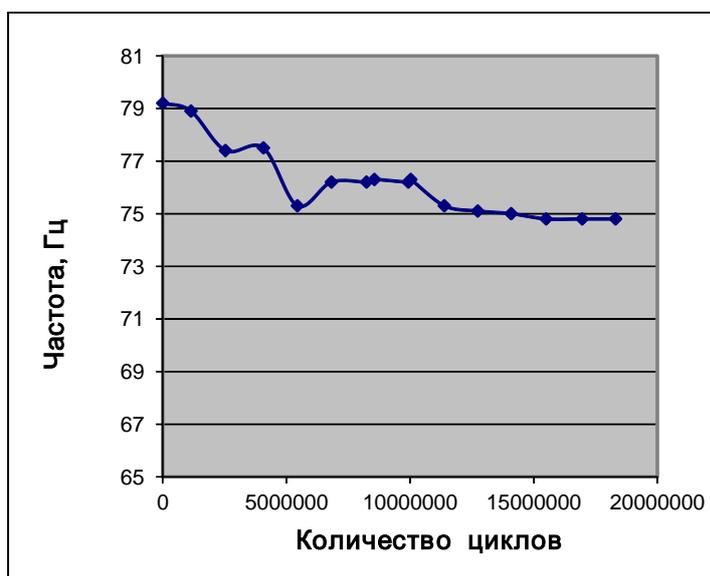


Рис.4. Зависимость собственной частоты образца № 2 от наработки

Результаты виброиспытаний показали, что накопление поврежденности балочных образцов из УУКМ имеет некоторое сходство с подобным процессом на образцах из металлов и также может оцениваться через изменение собственной частоты.

II. Рассматривалась возможность применения к композитным материалам типа исследованного выше так называемого тензорно-полиномиального

критерия разрушения. В наиболее простой форме, когда учитываются только линейные и квадратичные члены, уравнение имеет вид типа приведенного в источнике [12]

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{16}\sigma_1\sigma_6 + 2F_{26}\sigma_2\sigma_6 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 = 1 \quad (2)$$

и дает возможность (за некоторыми исключениями) описать любую поверхность разрушения в виде эллипсоида или параболоида для анизотропного материала. Исключения составляют такие материалы, как чугун, а также некоторые плетеные и слоистые композиты.

В работе [12] указывается, что если главные оси симметрии исследуемого композита не считаются известными, то для определения напряжений, позволяющих вычислить параметры прочности F_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$), необходимо провести девять экспериментов (рис.5).

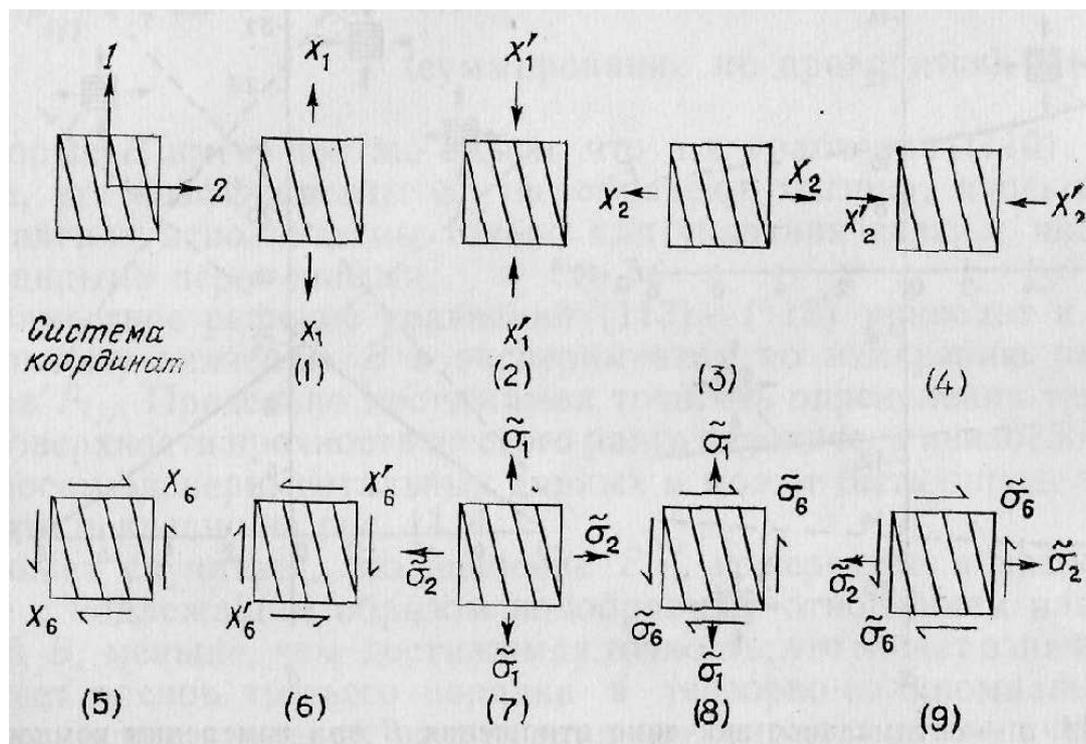


Рис.5.Схемы девяти экспериментов для измерения компонент тензора поверхности прочности при использовании квадратичного критерия разрушения

Для материала со структурой, показанной на рис.1, вследствие наличия симметрии необходимо проведение только экспериментов 1, 2, 5 и 7.

Условия проведения экспериментов и получаемые результаты сведены в таблицу 6, туда же включены данные для нашего материала.

Таблица 6

Условия нагружения и результаты

Номер, характер и условия проведения экспериментов (см. рис.5)	Результаты (пределы прочности, кгс/мм ²)
1.Растяжение в направлении оси 1($\sigma_2 = \sigma_6 = 0$)	$\sigma_1 = X_1 = 26$
2.Сжатие в направлении оси 1 ($\sigma_2 = \sigma_6 = 0$)	$\sigma_1 = -X'_1 = 14$
3.Растяжение в направлении оси 2 ($\sigma_1 = \sigma_6 = 0$)	$\sigma_2 = X_2 = 26$
4.Сжатие в направлении оси 2 ($\sigma_1 = \sigma_6 = 0$)	$\sigma_2 = -X'_2 = 14$
5.Чистый сдвиг в плоскости 1-2 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$)	$\sigma_6 = X_6 = 9,46 *$
6.Чистый сдвиг в плоскости 1-2 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$)	$\sigma_6 = -X'_6 = 9,46 *$
7.Двухосное растяжение в плоскости 1-2 ($\sigma_6 = 0$) при $B = 1$	$\sigma_1 = \acute{\sigma}_1 = 26; \sigma_2 = \acute{\sigma}_2 = 26$
8.Комбинированное нагружение в плоскости 1-6 ($\sigma_2 = 0$)	$\sigma_1 = \acute{\sigma}_1; \sigma_6 = \acute{\sigma}_6$
9.Комбинированное нагружение в плоскости 2-6 ($\sigma_1 = 0$)	$\sigma_2 = \acute{\sigma}_2; \sigma_6 = \acute{\sigma}_6$

Параметры прочности $F_1, F_2, F_6, F_{11}, F_{22}, F_{66}$ определяются по формулам $F_i = 1/X_i - 1/X'_i$, $F_{ii} = 1/(X_i X'_i)$. При проведении эксперимента 7 с двухосным растяжением образца между напряжениями $\sigma_1 = \acute{\sigma}_1$ и $\sigma_2 = \acute{\sigma}_2$ должно выполняться условие

$$B = \acute{\sigma}_1 / \acute{\sigma}_2 . \quad (3)$$

Величина B зависит от соотношения прочностных свойств материала по направлениям 1 и 2. Поскольку в нашем материале эти направления равнозначны, при очевидном $B = 1$ соответствующее уравнение приобретает вид:

$$(F_{11} + 2F_{12} + F_{22}) \acute{\sigma}_2^2 + (F_1 + F_2) \acute{\sigma}_2^2 = 1 \quad (4)$$

Отсюда определяется параметр F_{12} , характеризующий взаимное влияние нормальных напряжений.

Экспериментальное определение предела прочности при чистом сдвиге (эксперименты 5,6) обычно выполняется путем нагружения трубчатых образцов на кручение. В связи с отсутствием таких данных для исследуемого листового материала примем в самом первом приближении, что $\sigma_6 = X_6 =$

$X_1 G/E$, где G – модуль сдвига, E – модуль Юнга, $X_1 = 26 \text{ кгс/мм}^2$ (в таблице 6 величины X_6 и X'_6 обозначены *). В данном случае только при определении предела прочности при чистом сдвиге в виде исключения пришлось пренебречь анизотропией материала.

Нашей целью являлось показать, что для рассматриваемого материала, имеющего простую симметричную структуру, все параметры прочности могут считаться известными, если имеются данные по пределам прочности на растяжение и сжатие X_1 и X'_1 по одной из главных осей симметрии, а также по пределу прочности при чистом сдвиге. Полученное уравнение поверхности кратковременной прочности имеет вид

$$0,00275\sigma_1^2 + 0,00275\sigma_2^2 + 0,0112\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 - 0,033\sigma_1 - 0,033\sigma_2 = 1 \quad (5)$$

и позволяет получать дополнительную информацию, например, путем аналитического сечения поверхности плоскостями $\sigma_1\sigma_2$ и $\sigma_1\sigma_6$.

Выводы:

1. Для прогнозирования длительной прочности КМ класса «углерод-углерод» и развития поврежденности в конструктивных элементах может быть использован подход, когда нарастание поврежденности увязывается с изменением одной или нескольких модальных характеристик. Результаты виброиспытаний балочных образцов из КМ «углерод-углерод» с количеством циклов до 20-30 млн. и слабым изменением их собственной частоты позволяют предположить, что зависимость этой характеристики от времени имеет сходство с такой же зависимостью для металлических материалов.
2. Анализ структуры образцов из УУКМ и проверочный расчет на устойчивость углеродной нити позволил оценить количественный эффект обратного по сравнению со многими металлами соотношения свойств прочности на растяжении и сжатии.
3. Показано, что для композитных материалов с определенной симметричной структурой уравнение поверхности прочности на базе тензорно-полиномиального критерия разрушения может быть получено, если известны

только пределы прочности на растяжение и сжатие в направлении осей симметрии, а также предел прочности при чистом сдвиге.

Библиографический список

1. Jay Polk, Ira Katz, Dan Goebel, Tom Randolph Nuclear Electric Xenon Ion System (NEXIS) – High Power Ion Engines For Deep Space Missions // Proc. of Intern. Symposium on Space Propulsion, 25-28 Aug. 2004, Shanghai, China, pp.487-517
2. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях. Справочник. – М.: Металлургия. 1991. – 248 с.
3. А.С. Демидов, В.В. Кашелкин Экспериментально-расчетная оценка поврежденности конструктивных элементов // Вестник МАИ. 2010. Т.17. №3. - С. 163-167.
4. Справочник по авиационным материалам под ред. Туманова А.Т. – Изд.5-е. – М.: Машиностроение, 1965. – Т.3. - 632 с.
5. Справочник по авиационным материалам под ред. Туманова А.Т. – Изд.5-е. – М.: Машиностроение, 1965. – Т.2. - 612 с.
6. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. - С.-Пб.: Научные основы и технологии. 2008.
7. Розен Б.У., Дау Н.Ф. Механика разрушения волокнистых композитов / В кн. “Разрушение”. Т.7.Разрушение неметаллических композитных материалов. Ч.1. Неорганические материалы. Под ред. Ю.Н. Работнова. – М.: “Мир”, 1976. – С. 300-366.
8. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. – М.: “Мир”, 1976. – 669 с.
9. Демидов А.С., Кашелкин В.В. Длительная прочность, остаточный ресурс и поврежденность конструктивных элементов двигательных и энергетических установок. – М.: Издат. МАИ, 2011. – 158 с.
10. Вернигор В.Н., Михайлов В.Л. Модальный анализ механических колебаний упругих систем. – Рыбинск: НПО Сатурн, РГАТА, 2001. – 288 с.

11. Волков Ю.А., Демидов А.С., Кашелкин В.В. Определение остаточного ресурса конструкционных материалов на образцах и изделиях.// ИВУЗ. Авиационная техника. 1999. №4. С. 9-12.

12. Эдвард М. Ву. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред / В кн. “Композиционные материалы”. Т.2. Механика композиционных материалов. Ред. Дж. Сендечки. – М.: Мир. 1978. - С.401-491.

Сведения об авторах

Балашов Виктор Владимирович, начальник отдела НИИПМЭ Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.
МАИ, Волоколамское ш., Москва, А-80,ГСП-3, 125993; e-mail: riame@sokol.ru

Волков Юрий Алексеевич, ведущий инженер ОАО “Красная Звезда”, к.т.н., e-mail: volkov-yuri@yandex.ru

Демидов Анатолий Семенович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.
МАИ, Волоколамское ш., Москва, А-80,ГСП-3, 125993; e-mail: demidov@mai.ru

Кашелкин Владимир Владимирович, начальник отдела ОАО “Красная Звезда”, д.т.н., проф., e-mail: re.entry@telcom.ru

Пашутов Аркадий Витальевич, заместитель Главного конструктора, ОАО Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения, Московская обл., г. Хотьково, к.т.н., e-mail: tsniism@tsniism.ru

Хартов Сергей Анатольевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.
МАИ, Волоколамское ш., Москва, А-80,ГСП-3, 125993; e-mail:208@mai.ru