

УДК 669.018.95

С.И. Войнов<sup>1</sup>, Г.Ф. Железина<sup>1</sup>, И.А. Волков<sup>1</sup>, Н.А. Соловьева<sup>1</sup>

## ИНГИБИТОРЫ КОРРОЗИИ В СОСТАВЕ СЛОИСТОГО МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И УГЛЕПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-6-6

*Рассмотрена возможность применения ингибиторов коррозии в составе слоистых металлополимерных композиционных материалов на основе листов алюминиевого сплава и слоев углепластика. Исследовано влияние ингибиторов коррозии на коррозионные процессы алюминиевого сплава при контакте со слоями углепластика. Слоистый композит «алюминий–углепластик» с разделительными слоями, содержащими ингибитор коррозии, обладает высокой коррозионной стойкостью, что позволяет рассматривать такой слоистый композит как перспективный материал для использования в авиационной технике.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** углеродные волокна, углепластик, алюминиевые сплавы, слоистые металлополимерные композиционные материалы.

*The article discusses opportunity of application corrosion inhibitors in the layered metal-polymer composite material based on aluminum alloy sheets and layers of carbon fiber. The influence of corrosion inhibitors on corrosion processes, that occur when aluminum alloy sheet contacts with layer of carbon fiber, was investigated. Layered composite «aluminum–carbon fiber reinforced plastic» with separation layer, witch is contented corrosion inhibitors, has high corrosion resistance, which allows to consider layered composite «aluminum-carbon fiber reinforced plastic» as perspective material for application in aviation technology.*

*This work was done as part of the complex scientific direction 6.2. «Layered crack resistance, high strength metal-polymer materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** carbon fiber, CFRP, aluminum alloys, fiber-metal laminates.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Современное развитие авиации тесно связано с разработкой и внедрением новых материалов в конструкциях авиационной техники. Как снизить массу детали – над этим работают многие ученые и разработчики материалов авиационного назначения [2–3]. Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) взамен металлических сплавов позволит снизить массу конструкций и деталей авиационной техники, что в свою очередь повлечет за собой уменьшение потребления топлива и увеличение полезной нагрузки [4–6]. Один из возможных способов снижения массы деталей и конструкций из алюминиевых сплавов – замена алюминиевых сплавов слоистыми металлополимерными композиционными материалами (МПКМ). Слоистые МПКМ состоят

из листов алюминиевого сплава и слоев ПКМ на основе различных армирующих наполнителей – арамидных, углеродных, стеклянных. Кроме пониженной плотности слоистые МПКМ обладают более высокими значениями механических характеристик и хорошей трещиностойкостью по сравнению с алюминиевыми сплавами [7–9].

В составе слоистого МПКМ целесообразно сочетать листы алюминиевого сплава со слоями углепластика, которые способны обеспечить высокую жесткость и прочность композита. Основная проблема, которую необходимо решить при создании слоистых МПКМ на основе алюминиевых сплавов и углепластиков, – это исключение контактной коррозии листов алюминиевого сплава. Известно, что эта проблема не возникала при разработке слоистых МПКМ первого поколения на основе арамидных или стеклянных волокон, которые гальванически нейтральны по отношению к алюминиевым сплавам. По этой причине использование арамидных и стеклянных волокон в составе МПКМ нашло широкое применение [10].

Во ФГУП «ВИАМ» разработан широкий ассортимент слоистых МПКМ на основе сочетания алюминиевых листов с арамидными органопластиками (АЛОРа) и стеклопластиками (СИАЛы). Слоистые металлополимерные композиты АЛОРа и СИАЛ, а также их зарубежные аналоги ARALL и GLARE отличаются высокой усталостной долговечностью, стойкостью к распространению трещин [11–16]. Недостатком этих материалов является относительно низкое значение модуля упругости, которое не превышает значения модуля упругости алюминиевого сплава, кроме этого, для МПКМ типа «алюминий–углепластик» могут быть достигнуты значительно более высокие уровни прочности, чем в материалах типа АЛОРа и СИАЛ [17, 18].

В разных странах проводятся исследования по поиску различных методов для исключения коррозии вследствие контакта алюминиевого сплава и углепластика [19–21]. Для этих целей многие исследователи используют специальную обработку поверхности листов алюминиевого сплава [22–25]. Результаты исследований эффективности подготовки поверхности алюминиевых сплавов показали, что используемые технологии подготовки поверхности не обеспечивают надежность защиты слоистых материалов типа «алюминий–углепластик» [26, 27]. Для обеспечения отсутствия контакта между листом алюминиевого сплава и слоем углепластика необходимо использовать разделительный слой [28].

Использование разделительных слоев предотвращает контакт алюминиевого сплава и углепластика и может обеспечить защиту от контактной коррозии. Однако это не исключает возможности возникновения коррозионных поражений на поверхности алюминиевых листов из-за проникновения влаги. Предотвратить или снизить скорость коррозионных процессов при их возникновении на поверхности алюминиевых слоев возможно путем введения ингибиторов коррозии в состав МПКМ типа «алюминий–углепластик». Проведение исследований по выбору ингибиторов коррозии для МПКМ типа «алюминий–углепластик» являлось целью данной работы.

### Материалы и методы

Объектами исследования в данной работе являлись образцы слоистого композита «алюминий–углепластик», состоящие из листов алюминиевого сплава Д16-АТ и слоев углепластика. Для армирования слоев углепластика использовали однонаправленную ткань фирмы Porcher с расположением нитей преимущественно (98%) вдоль основы ткани с поверхностной плотностью  $130 \pm 10$  г/м<sup>2</sup>. В качестве полимерной матрицы для слоев углепластика использовали эпоксидное связующее марки ВСЭ-34.

Образцы с антикоррозионной защитой отличались от образцов без антикоррозионной защиты наличием между листами алюминиевого сплава и слоями углепластика разделительного слоя на основе связующего ВСЭ-34 и стеклянной ткани Э1-100-18 с добавлением ингибитора коррозии  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ .

В работе исследовали следующие виды ингибиторов коррозии:  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ; хромат-циклогексилламин (ХЦА); бензотриазол (БТА); ХЦА+БТА;  $\text{KMnO}_4$ ;  $\text{CeCl}_3$ ;  $\text{Ce}(\text{SO}_2)_3$ ;  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ . Выбранные ингибиторы являются типовыми, используемыми в промышленности для наполнения защитных анодно-оксидных покрытий, входящими в состав ЛКП, а также применяемыми для ингибирования алюминиевых сплавов в агрессивных средах [29].

В качестве подготовки поверхности алюминиевого сплава использовали электрохимическую обработку в комбинированном электролите, содержащем фосфорную и серную кислоты. Уплотнение покрытия проводили в растворе танина. Сформированное анодно-оксидное покрытие имело толщину 1,5–2,0 мкм.

Изготовление образцов слоистого композита и углепластиков проводили методом прямого прессования плит размером 270×230 мм, из которых методом механической обработки изготавливали образцы для испытаний.

Для электрохимического исследования контактной коррозии соединения алюминиевого сплава с углепластиком использовали образцы из сплава Д16-АТ размером 20×40 мм с удаленной путем травления плакировкой и образцы углепластика того же размера. Образцы погружали в электролит, содержащий  $\text{NaCl}$  (0,1 и 0,6%) и ингибиторы коррозии с концентрацией 1 г/л, и осуществляли выдержку при температуре 20°C в течение 3 сут. Для контроля проводили испытания без наличия ингибиторов коррозии в электролите. Далее проводили замеры контактного тока и определяли изменение массы образцов алюминиевого сплава. Замеры контактного тока проводили на анализаторе частотного отклика. Интенсивность электрохимических процессов оценивали по величине контактного тока в паре «алюминий–углепластик» и изменению массы алюминиевых образцов после выдержки в электролите.

Испытания образцов слоистого композита «алюминий–углепластик» в камере солевого тумана проводили в условиях наиболее жестких с точки зрения развития коррозионных процессов. Известно, что ионы хлора, повышенная температура и влажность ускоряют коррозионные процессы в металле, поэтому испытания проводили в камере солевого тумана в соответствии с ГОСТ 9.905 и ГОСТ 9.308. Для оценки эффективности ингибиторов коррозии образцы слоистого композита «алюминий–углепластик» подвергали коррозионным испытаниям без защитных покрытий на торцах, чтобы коррозионные процессы проходили более интенсивно. При этом поверхность образцов защищали системой ЛКП.

Для проведения испытаний использовали камеру объемом 1,5 м<sup>3</sup>, в которой непрерывно распыляется профильтрованный раствор хлористого натрия концентрацией 55 г/л, приготовленный на дистиллированной воде с рН=7, при температуре 36°C и относительной влажности 98%. Образцы в камере располагали под углом 30 град к вертикали. Солевой туман свободно циркулировал вокруг всех образцов.

Для образцов из углепластика и слоистого композита «алюминий–углепластик» определяли предел прочности и модуль упругости при растяжении в соответствии с ГОСТ 25.601–80; плотность – по ГОСТ 15139–69, а также предел прочности при сдвиге в соответствии с ASTM D 2344.

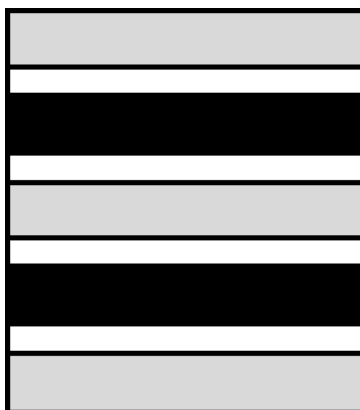


Рис. 1. Схема изготовления пятислойных экспериментальных образцов из МПКМ типа «алюминий–углепластик» с разделительными слоями:

■ – слой алюминия; □ – разделительный слой; ■ – слой углепластика

Для испытаний по определению предела прочности и модуля упругости при растяжении, предела прочности при сдвиге и плотности использовали образцы пятислойной структуры слоистого композита «алюминий–углепластик», структура которого представлена на рис. 1.

### Результаты

Для того что бы оценить какой ингибитор коррозии эффективней снижает интенсивность коррозионных процессов при контакте алюминиевого сплава и углепластика, проведены исследования электрохимических процессов при контакте алюминиевого сплава Д16-АТ с углепластиком в электролите. Результаты испытаний представлены в табл. 1. Установлено, что в присутствии азотнокислого церия ( $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ) наблюдается более значительное снижение силы тока контактной пары.

Таблица 1

**Контактный ток и потеря массы образцов из сплава Д16-АТ в паре «алюминий–углепластик» в результате протекания электрохимических процессов в зависимости от состава электролита**

Состав электролита	Ингибитор коррозии	Контактный ток в паре «алюминий–углепластик», $\text{mA}/\text{cm}^2$	Потеря массы образцов, $\text{г}/(\text{дм}^2 \cdot \text{сут})$
Растворы NaCl (0,1 и 0,6%)	Без ингибитора	0,31–0,60	0,0015–0,0024
	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	0,10–0,17	0,0010–0,0029
	ХЦА	0,11–0,19	0,00003–0,0003
	БТА	0,22–0,31	0,0002–0,0007
	ХЦА+БТА	0,13–0,20	0,0002–0,0004
	$\text{KMnO}_4$	0,11–0,22	0,0008–0,0012
	$\text{CeCl}_3$	0,02–0,04	0–0,0002
	$\text{Ce}(\text{SO}_4)_2$	0,10–0,17	0,0035–0,0040
	$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$	0–0,01	0–0,0003

Влияние ингибитора коррозии на коррозионную стойкость слоистого композита «алюминий–углепластик» оценивали по величине падения прочностных характеристик после экспозиции в камере солевого тумана (КСТ) в течение 500 ч. Результаты представлены в табл. 2. Показано, что при указанных сроках экспозиции не удается получить коррозионные поражения, значительно меняющие прочностные характеристики слоистого композита «алюминий–углепластик». При экспозиции образцов композита «алюминий–углепластик» в КСТ в течение 500 ч, сохранение прочности при растяжении составило не менее 94%, а модуля упругости при растяжении – не менее 97%.

Таблица 2

**Значения физико-механических свойств образцов  
слоистого композита «алюминий–углепластик» с разной антикоррозионной защитой,  
до и после экспозиции в камере солевого тумана (КСТ)**

Разделительный слой	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности при растяжении, МПа		Модуль упругости при растяжении, ГПа	
		до КСТ	после КСТ	до КСТ	после КСТ
Без разделительного слоя	2,11	1230	1160	90	90
Стеклоткань Э1-100-18	2,14	1210	1160	90	87
Стеклоткань Э1-100-18, пропитанная $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$	2,12	1220	1160	90	89

Кроме исследований физико-механических характеристик слоистого композита «алюминий–углепластик», оценивали также глубину коррозионных поражений после экспозиции в КСТ в течение 500 ч. Для оценки эффективности антикоррозионных защитных систем, изучали коррозионные поражения, возникающие на незащищенных торцах образцов и распространяющиеся в глубину образцов по поверхности алюминиевого сплава. Величину коррозионных поражений оценивали как показано на рис. 2, глубины распространения коррозионных поражений измеряли с помощью бинокулярного микроскопа. Результаты исследований представлены в табл. 3. Показано, что коррозионная стойкость слоистого композита «алюминий–углепластик», в составе которого использован разделительный слой, выше, чем у слоистого композита без разделительного слоя. В 20 раз снижается глубина коррозионных поражений в листах из алюминиевого сплава, если в состав слоистого композита «алюминий–углепластик» введен разделительный слой, содержащий ингибитор коррозии – азотнокислый церий ( $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ). Если разделительный слой не содержит ингибитор коррозии, то коррозионная стойкость слоистого композита «алюминий–углепластик» в 10 раз превышает коррозионную стойкость слоистого композита «алюминий–углепластик» без разделительного слоя.

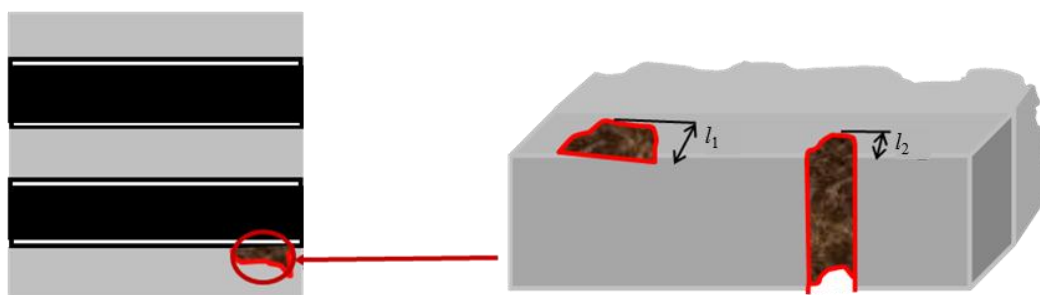


Рис. 2. Схема коррозионных поражений пятислойного образца из МПКМ с тремя слоями алюминиевого сплава Д16-АТ (■) и двумя слоями углепластика (■), а также с антикоррозионными разделительными слоями (□) при глубинах распространения коррозионных поражений от торца по поверхности слоя металла ( $l_1$ ) и сквозных коррозионных поражений в слое металла ( $l_2$ )

Таблица 3

**Глубина коррозионных поражений образцов слоистого композита  
«алюминий–углепластик» после экспозиции в камере солевого тумана**

Разделительный слой	Глубина распространения, мм, коррозионных поражений от торца по слою металла	
	поверхностные поражения	сквозные поражения
Без разделительного слоя	До 3,00	До 2,00
Стеклоткань Э1-100-18	До 0,3	До 0,2
Стеклоткань Э1-100-18, пропитанная $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$	До 0,15	До 0,10

Известно, что в слоистых композитах при возникновении коррозионных процессов велика вероятность расслоения в материале или снижение адгезии между слоями. Одним из видов испытаний, при котором можно оценить этот процесс, является определение прочности при межслойном сдвиге. После экспозиции в камере солевого тумана в течение 500 ч проведены испытания на межслойный сдвиг слоистого композита «алюминий–углепластик», содержащего разделительный слой и без него. Результаты испытаний представлены в табл. 4. Показано, что образцы с разделительным слоем имеют значение предела прочности при сдвиге на 12% выше, чем образцы слоистого композита «алюминий–углепластик» без разделительного слоя. У образцов без разделительного слоя после экспозиции в камере солевого тумана в течение 500 ч сохранение значений прочности при сдвиге составило 78%. У образцов слоистого композита «алюминий–углепластик» с разделительным слоем, содержащим ингибитор коррозии  $Ce(NO_3)_3$ , после 170 ч экспозиции в камере солевого тумана стало проследиваться отсутствие падения прочности при сдвиге, а сохранение значений предела прочности при сдвиге составило 94% от исходного значения характеристики.

Таблица 4

**Предел прочности при сдвиге образцов слоистого композита «алюминий–углепластик» до и после экспозиции в камере солевого тумана**

Продолжительность экспозиции, ч	Предел прочности при сдвиге, МПа, слоистого композита «алюминий–углепластик»	
	без разделительного слоя	с разделительным слоем
В исходном состоянии	82	92
25	80	92
75	76	88
105	71	88
170	71	86
250	69	85
340	67	85
500	64	86

### Обсуждение и заключения

Показано, что при наличии ингибиторов коррозии электрохимические процессы при контакте алюминиевого сплава и углепластика проходят менее интенсивно. Установлено, что азотнокислый церий ( $Ce(NO_3)_3$ ) является наиболее эффективным ингибитором электрохимической коррозии алюминиевого сплава при контакте с углепластиком.

При использовании разделительного слоя, содержащего ингибитор коррозии – азотнокислый церий ( $Ce(NO_3)_3$ ), антикоррозионная стойкость слоистого композита «алюминий–углепластик» увеличивается, глубина коррозионных поражений на листах из алюминиевого сплава Д16-АТ снижается в 20 раз (по сравнению с композитом без разделительного слоя) после экспозиции в камере солевого тумана в течение 500 ч.

При использовании разделительного слоя, содержащего ингибитор коррозии – азотнокислый церий ( $Ce(NO_3)_3$ ), сохранение значений предела прочности при сдвиге слоистого композита «алюминий–углепластик» составило 94% после экспозиции в камере солевого тумана в течение 500 ч.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что для обеспечения коррозионной стойкости алюминиевого сплава в составе композита «алюминий–углепластик» при эксплуатации в различных климатических условиях, в процессе которой материал может подвергаться отрицательному воздействию факторов внешней среды, необходимо исключить возможность возникновения контактной коррозии при

соединении листов алюминиевого сплава со слоями углепластика. Входящие в состав слоистого композита «алюминий–углепластик» разделительные слои тонкослойного стеклопластика на основе стеклоткани Э1-100-18, содержащие ингибитор коррозии – азотнокислый церий ( $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ), исключают возможность электрохимического контакта алюминиевого сплава с углепластиком и предотвращают возникновение контактного тока в паре «алюминий–углепластик». Слоистый композит «алюминий–углепластик» с разделительными слоями, содержащими ингибитор коррозии – азотнокислый церий ( $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ), обладает высокой коррозионной стойкостью, что позволяет рассматривать слоистый композит «алюминий–углепластик» как перспективный материал для использования в авиационной технике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // *Конверсия в машиностроении*. 2004. №4 (65). С. 65–69.
5. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегии развития композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 231–242.
6. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели: информ. бюл.* 2014. №31. С. 43–47.
7. Грабильников А.С., Машинская Г.П., Железина Г.Ф., Зиневич О.М., Деев И.С. Межслойная трещиностойкость гибридного композитного материала АЛОР // *Механика композитных материалов*. 1994. Т. 30. №2. С. 136–145.
8. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites Soviet Advanced Composites Technology Series // *Chapman & Hall*. 1995. P. 487–570.
9. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Каримова С.А. и др. Особенности формования крупногабаритных листов металлополимерных КМ, их структура и свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. №4. С. 23–32.
10. Композиционный слоистый материал и способ его получения: пат. 2565186 Рос. Федерация; опубл. 15.09.15.
11. Постнов В.И., Сенаторова О.Г., Железина Г.Ф. и др. Опыт применения МПКМ АЛОР Д16/41 в носовой части крыла самолета АН-124-100 // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. №4. С. 8–17.
12. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2016).
13. Деев И.С., Железина Г.Ф. Фрактографический анализ слоистого металлополимерного композита алор после испытаний на трещиностойкость // *Композиты и наноструктуры*. 2015. Т. 7. №3. С. 162–176.
14. Laurens B.V. Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structures // *Industrial & Engineering Chemistry*. 1983. Vol. 22 (3). P. 492–496.
15. Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., Van Der Hoeven W. Glare technology development 1997–2000 // *Applied Composite Materials*. 2002. No. 9. P. 201–219.
16. Антипов В.В. Сенаторова, О.Г., Лукина Н.Ф. и др. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 226–230.

17. Botelho E.C., Campos A.N., de Barros E. et al. Damping behavior of continuous fiber/metal composite materials by the free vibration method // *Composites. Part B*. 2006. Vol. 37. P. 255–263.
18. Freischmidt G., Coultis R.S.P., Janardhana M.N. Aluminium/lithium alloy-CFRP hybrid laminate – fabrication and properties // *Advanced composites '93: proceedings of ICACSM*. 1993. С. 491–494.
19. Каримова С.А., Павловская Т.Г. Разработка способов защиты от коррозии конструкций, работающих в условиях космоса // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2016).
20. Павловская Т.Г., Козлов И.А., Волков И.А., Захаров К.Е. Формирование твердых износостойких анодно-оксидных покрытий на деталях из литейных алюминиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №8. Ст. 04 (дата обращения: 01.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-4-4.
21. Павловская Т.Г., Волков И.А., Козлов И.А., Наприенко С.А. Экологически улучшенная технология обработки поверхности алюминиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №7. Ст. 02 (дата обращения: 01.11.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2.
22. Каблов Е.Н., Каримова С.А., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // *Коррозия: материалы, защита*. 2011. №12. С. 1–7.
23. Ostapiuka M., Surowskaa B., Bienias J. Interface analysis of fiber metal laminates // *Composite Interfaces*. 2014. Vol. 21. No. 4. P. 309–318.
24. Almeida R.S., Damato C.A., Botelho E.C., Pardini L.C., Rezende M.C. Effect of surface treatment on fatigue behavior of metal/carbon fiber laminates // *J. Mater. Sci.* 2008. No. 43. P. 3173–3179.
25. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
26. Wang W.X., Takao Y., Kashima I., Matsubara T. CFRP/Al-FRML based on nano-composite coating and its mechanical properties // *Proceedings of International Conference 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures*. 2007. P. 1–10.
27. Wang W.X., Takao Y., Matsubara T. Galvanic corrosion-resistant carbon fiber metal laminates // *Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials*. 2007. P. 1–10.
28. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Павловская Т.Г., Волков И.А. Проблема контактной коррозии при создании слоистых металлополимерных композиционных материалов на основе алюминия и углепластика // *Вопросы материаловедения*. 2016. №1 (85). С. 127–133.
29. Козлова Л.С., Сибилева С.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Ингибиторы коррозии (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 67–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-67-75.