



УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-3-3

**АМОΡФНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В СОСТАВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АКТЮАТОРОВ**

Ю.В. Столянков

*кандидат технических наук*

И.Н. Гуляев

*кандидат технических наук*

В.М. Алексашин

*кандидат технических наук*

Н.В. Антюфеева

*кандидат технических наук*

**Апрель 2015**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-3-3

*Ю.В. Столянков<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, В.М. Алексахин<sup>1</sup>, Н.В. Антюфеева<sup>1</sup>*

## **АМОРФНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В СОСТАВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ-АКТЮАТОРОВ**

*Рассматривается вопрос использования аморфных металлических лент в составе слоистых металлополимерных функциональных элементов (актюаторов) для материалов интеллектуального типа. Отличительной особенностью аморфных металлических материалов является их структурно-химическая однородность, высокая пластичность, стойкость к многократному изгибу и высокая коррозионная стойкость. Предложено использовать аморфные металлические материалы в виде лент в сочетании с сегнетоэлектрической керамикой из цирконата-титаната свинца (ЦТС) для создания многослойных пьезоэлектрических элементов. Исследованы процессы фазовых превращений в аморфном металлическом материале на основе никеля марки ВПр51 типа металл-металлоид методами дифференциально-сканирующей калориметрии и термомеханического анализа. Установлено, что данный сплав в аморфном состоянии сохраняет аморфную «структуру» и работоспособность в температурном диапазоне, свойственном для эксплуатации пьезоэлектрических материалов на основе титаната-цирконата свинца вплоть до 380°C.*

**Ключевые слова:** *аморфный металлический материал, исполнительный механизм, металлополимерный композиционный материал, многослойная конструкция, фазовые превращения, дифференциально-сканирующая калориметрия, термомеханический анализ.*

*Y.V. Stolyankov, I.N. Gulyaev, V.M. Aleksashin, N.V. Antyufeeva*

## **AMORPHOUS METAL MATERIALS IN PIEZOELECTRIC LAMINATED ACTUATORS COMPONENTS**

*The matter of amorphous metal bands application in the laminated metal-polymeric functional components (actuators) for smart materials is hereby considered. The remarkable feature of the metal amorphous materials is their structural and chemical homogeneity, high plasticity and their resistance to repeated bending and corrosion. It is suggested to use the*

*amorphous metal materials as bands in conjunction with ferroelectric ceramics made of lead zirconium-titanate to create laminated piezoelectric cells. Phase transformation process in nickel-based amorphous alloy VPr51 of metal-metalloid type by means of differential scanning calorimetry and thermo-mechanical analysis methods is studied as well. It is determined that the given nickel-based amorphous alloy keeps its structural homogeneity and workability in the temperature range up to 380°C relevant to the piezoelectric materials based on lead titanate-zirconium operation.*

**Keywords:** *amorphous metallic material, actuator, laminated metal-polymeric material, sandwich construction, phase transformation, differential scanning calorimetry (DSC), thermo-mechanical analysis (TMA).*

---

<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**

Одним из направлений развития современного материаловедения является создание композиционных материалов интеллектуального типа [1]. Интеллектуальные композиционные материалы – это материалы, способные контролировать свое состояние при эксплуатации и активно реагировать на внешнее воздействие путем изменения своих свойств, геометрических параметров, формы и т. д. Такие материалы должны адаптироваться к сложной или критической ситуации при эксплуатации с целью сохранения работоспособности конструкции и сведения к минимуму отрицательных последствий внешнего воздействия [2, 3]. Способность интеллектуальных материалов к самоконтролю и адаптации обеспечивается как самими армирующими элементами, так и функциональными или исполнительными элементами, интегрированными в структуру материала, такими, например, как сенсоры и актюаторы [4–6].

## **Материалы и методы**

В качестве актюаторов могут быть использованы пьезоэлектрики, магнито-стрикционные сплавы, сплавы с памятью формы, электрореологические и магнитные жидкости, бифункциональные сополимеры и другие материалы, свойства которых можно изменять с помощью электрических сигналов и/или электромагнитного воздействия. Актюаторы, введенные в структуру интеллектуального материала, способны изменять его конструктивную жесткость или геометрию при определенных условиях – например, при воздействии электрического тока или электромагнитного поля. Это дает возможность гасить опасные вибрации, предотвращать потерю устойчивости кон-

струкций, изменять акустические свойства, регулировать термическое расширение и предотвращать образование или рост трещин в изделиях.

Наибольшее распространение в качестве электромеханических актюаторов получили элементы, работающие на основе пьезоэффекта (преобразования механической энергии в электрическую) и обратного пьезоэффекта. Наличие прямого и обратного пьезоэффектов дает возможность использовать подобные элементы в качестве сенсоров и/или актюаторов для контроля и управления параметрами материалов или конструкций, выполненных из них.

Пьезоэлектрические материалы на основе сегнетоэлектрической керамики применимы для создания пьезоэлектриков благодаря своей низкой стоимости и возможности их получения в виде различных форм: пленок, пластин, волокон и т. д. При этом среди сегнетоэлектрических керамик наибольшее применение нашла керамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС), обладающая наибольшими способностями трансформации энергий при минимальных собственных потерях.

В настоящее время актюаторы изготавливают в различных видах: жестких или гибких монолитных пьезопластин; композиционных, армированных микроволоконном элементов-актюаторов (MFC), в том числе многослойных композиционных актюаторов.

Упомянутые выше многослойные пьезоэлектрические элементы имеют ряд недостатков, которые ограничивают их использование в качестве актюаторов в составе интеллектуальных материалов. Это, прежде всего, высокая хрупкость и обусловленная ею низкая конструкционная прочность керамических пластин, их низкая деформативность.

Кроме того, важной проблемой при введении актюаторов в состав композиционного материала является создание контактной группы для подачи управляющего электрического сигнала на актюатор и обеспечивающей работоспособность микромеханического элемента.

При введении актюатора в структуру интеллектуального материала важно не допустить искривления армирующих волокон и снижения упруго-прочностных свойств композита [7]. Поэтому необходимо минимизировать размеры актюатора и обеспечить высокую адгезионную прочность на границе раздела актюатора с основными компонентами композиционного материала. Также для получения максимального эффекта трансформации и наибольшего перемещения (рабочего хода) актюаторов, исполнительный элемент, введенный в состав композита, должен быть анизотропным. Это мо-

жет быть достигнуто путем применения сложных композиционных актюаторов, состоящих из слоев, волокон или пленок пьезокерамики, совмещенных с полимерной матрицей. Особую роль играет связующее [8], от выбора которого зависит совместимость компонентов, уровень адгезионной прочности на границе раздела «наполнитель–матрица». Кроме того, использование различных по химической природе материалов в составе композитов с различными значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) может приводить к возникновению высоких внутренних напряжений и дефектных областей (расслоений, трещин) в композиционном материале как в процесс его изготовления, так и при его эксплуатации [9].

Для решения этих задач предлагается использовать структурно-анизотропные актюаторы, представляющие собой многослойные композиционные материалы третьего поколения с непрерывными армирующими элементами [10].

Основным требованием к таким конструкциям является возможность выполнения самодиагностики состояния с последующей самоадаптацией и «реакцией» на внешнее воздействие. Эффект самоадаптации достигается и введением в состав материала конструкционных пластичных (стойких к многократному изгибу) элементов с высокими прочностными характеристиками и элементов, обладающих способностью изменяться в соответствии с характером внешнего воздействия.

Одним из возможных вариантов конструктивного исполнения является использование в качестве непрерывных армирующих элементов тонкопленочных металлических материалов с аморфной структурой (рис. 1) [11].

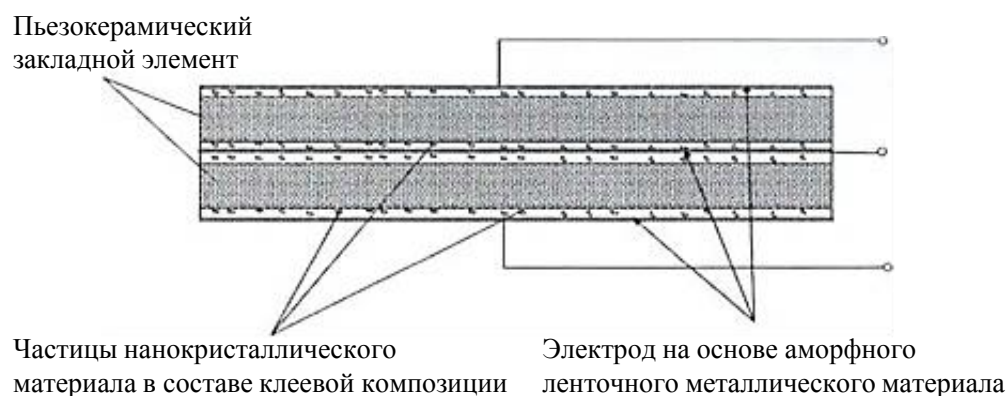


Рис. 1. Структурный элемент пьезоэлектрического актюатора на основе аморфного металлического материала марки ВПр51

Остановимся на некоторых особенностях таких материалов, позволяющих использовать их в составе многослойных конструкций.

Аморфные металлические материалы сочетают свойства, присущие металлическим системам, со свойствами, характерными для неметаллических материалов. Получаемые методом сверхбыстрой закалки расплава (со скоростью охлаждения от 1 до 10 млн °C/с) такие материалы сохраняют структуру перегретой жидкости, в которой отсутствует дальний порядок [12, 13]. При низких температурах (значительно ниже температуры стеклования) сплавы в стеклообразном состоянии обладают высокими пластическими свойствами, что позволяет назвать такие материалы «пластичными стеклами» [14, 15]. Высокие прочностные характеристики быстрозакаленных материалов системы «металл–металлоид» (например, сплав марки ВПр51) обеспечены повышенной склонностью данной системы к аморфизации [16], которая, в свою очередь, определяет содержание аморфной фазы и, следовательно, уровень свойств материала, для которого характерна «бездефектная структура». Предел прочности таких материалов на основе никеля находится на уровне 100 ГПа, твердость достигает 1000 НВ [17], что позволяет использовать их в качестве армирующих элементов в составе композиционных материалов [18].

Известно, что аморфная структура является термически нестабильной и при повышении температуры переходит в более термодинамически стабильное состояние. Фазовое превращение такого рода сопровождается кристаллизацией и проходит с выделением тепла, т. е. – с точки зрения теплофизической терминологии – является экзотермическим. Проведенные авторами по современным методикам [19] термоаналитические исследования – методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) – показали, что с температуры стеклования в диапазоне температур 310–315°C (на рис. 2 не показана) начинают развиваться процессы кристаллизации, а при температурах 500–510°C интенсивность процесса настолько высока, что позволяет говорить о преобладании в структуре быстрозакаленного материала кристаллической фазы (см. рис. 2).

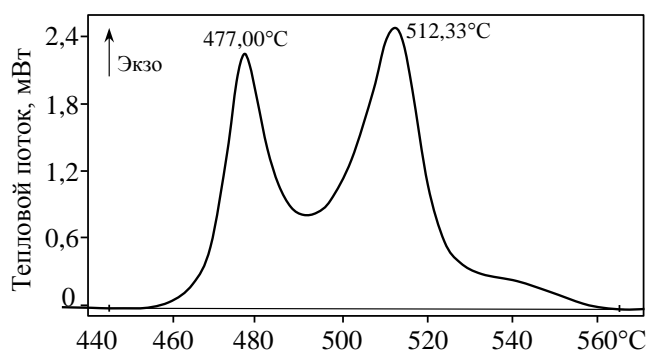


Рис. 2. Термограмма ДСК аморфного металлического материала марки ВПр51 при скорости нагрева 10°C/мин

Справедливо возникает вопрос о работоспособности аморфных металлических материалов в составе многослойных металлополимерных материалов [16], к числу которых и относятся актюаторы, в условиях повышенных температур. Следует отметить, что традиционные пьезокерамические исполнительные элементы, выполненные на основе керамики из цирконата-титаната свинца (например, ЦТС 83), имеют рабочий диапазон температур, не превышающий  $300^{\circ}\text{C}$ , а температура точки Кюри составляет  $360^{\circ}\text{C}$ . Проследим влияние температуры на основные механические свойства тонкопленочных аморфных металлических материалов.

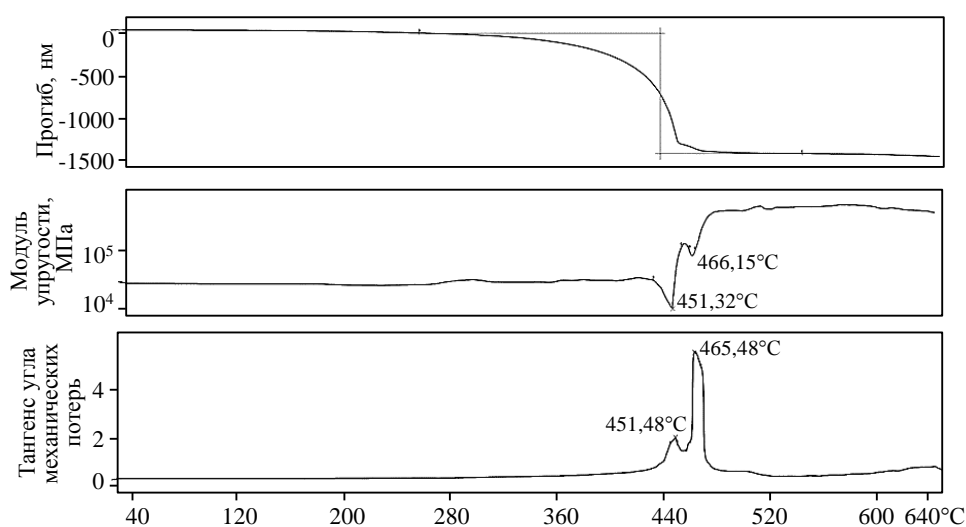


Рис. 3. Термограмма ТМА аморфного металлического материала марки ВПр51 при скорости нагрева  $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

На рис. 3 показана зависимость упругопластических свойств образца быстрозакаленного материала марки ВПр51 на основе никеля системы «металл–металлоид» толщиной 80 мкм в условиях знакопеременной нагрузки величиной 0,03–0,05 Н с частотой 1 Гц от температуры (скорость нагрева  $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ). Из данных термограммы, иллюстрирующей зависимость величины прогиба образца от температуры, видно, что вплоть до температуры  $256^{\circ}\text{C}$  присутствует упругий характер деформации, тогда как с температуры  $450^{\circ}\text{C}$  начинает накапливаться и пластическая составляющая, а при  $500^{\circ}\text{C}$  деформация материала носит чисто пластический характер. Об изменении характера деформации свидетельствует и изменение модуля упругости и тангенса угла механических потерь при деформации материала в процессе его нагрева.

### Результаты и обсуждение

Таким образом, видно, что для аморфного металлического материала марки ВПр51 критической температурой, при которой процессы фазового превращения, свя-

занные с необратимыми структурными изменениями кристаллизации, начинают стремительно развиваться, является температура, на 120–150°C превышающая верхнюю границу рабочего диапазона температур пьезокерамических материалов на основе цирконата-титаната свинца.

### Заключение

Приведенные результаты наглядно доказывают возможность использования аморфного металлического материала системы «металл–металлоид» марки ВПр51 в виде тонких лент в составе многослойных металлополимерных материалов [16], и в частности – для пьезоэлектрических элементов в материалах интеллектуального типа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2013 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
4. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М. Использование непрерывных армирующих волокон в качестве тензорезисторных сенсорных элементов //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 22–27.
5. Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы с функциями адаптации и диагностики состояния //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 242–253.
6. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
7. Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Особенности создания полимерных композиционных материалов с интегрированной активной электромеханической актюаторной системой на основе пьезоэлектриков //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 31–34.
8. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В, Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
9. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 06 (viam-works.ru).

10. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Изд-во «НОТ». 2009. 657 с.
11. Пьезоэлектрический слоистый актюатор: пат. №101271 Рос. Федерация; опубл. 10.01.2011.
12. Физикохимия аморфных (стеклообразных) металлических материалов /Под ред. Ю.К. Ковнеристого. М.: Металлургия. 1987. 328 с.
13. Аморфные металлические сплавы: Пер. с англ.; Под ред. Ф.Е. Люборского. М.: Металлургия. 1987. 584 с.
14. Ковнеристый Ю.К., Осипов Э.К., Трофимова Е.А. Физико-химические основы создания аморфных металлических сплавов. М.: Наука. 1983. 145 с.
15. Алехин В.П., Хоник В.А. Структура и физические закономерности деформации аморфных сплавов. М.: Металлургия. 1992. 248 с.
16. Столянков Ю.В., Алексашин В.М., Антюфеева Н.В. К вопросу об оценке склонности металлических систем к аморфизации //Авиационные материалы и технологии (в печати).
17. Золотухин И.В. Физические свойства аморфных металлических материалов. М: Металлургия. 1986. С. 56.
18. Столянков Ю.В., Антюфеева Н.В., Раскутин А.Е., Каримова С.А. Исследование возможности создания металлополимерных композиционных материалов с использованием тонколистовых аморфных сплавов //Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. №1. С. 25–31.
19. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М., Железина Г.Ф., Столянков Ю.В. Методические подходы термоаналитических исследований для оценки свойств препрегов и углепластиков //Приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник». 2012. №4. С. 18–27.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2013 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2013] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
3. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry in aviation materials science] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
4. Guljaev I.N., Gunjaev G.M. Ispol'zovanie nepreryvnyh armirujushhh volokon v kachestve tenzorezistornyh sensoryh jelementov [Use of continuous reinforcing fibers as tenzorezistorny touch elements] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №2. S. 22–27.
5. Guljaev I.N., Gunjaev G.M., Raskutin A.E. Polimernye kompozicionnye materialy s funkcijami adaptacii i diagnostiki sostojanija [Polymeric composite materials with functions of adaptation and condition diagnostics] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 242–253.

6. Kablov E.N., Sivakov D.V., Guljaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Ju., Goncharov V.A. Metody issledovaniya konstrukcionnyh kompozicionnyh materialov s integrirovannoj jelektromehaničeskoj sistemoj [Methods of research of constructional composite materials with the integrated electromechanical system] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №4. S. 17–20.
7. Sivakov D.V., Guljaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Ju., Goncharov V.A. Osobennosti sozdaniya polimernyh kompozicionnyh materialov s integrirovannoj aktivnoj jelektromehaničeskoj aktjuatornoj sistemoj na osnove p'ezojelektrikov [Features of creation of polymeric composite materials with the integrated active electromechanical aktjuatory system on the basis of piezoelectric materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 31–34.
8. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [New polymeric binding for perspective methods of manufacturing of constructional fibrous PKM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
9. Deev I.S., Kablov E.N., Kobec L.P., Chursova L.V. Issledovanie metodom skanirujushhej jelektronnoj mikroskopii deformacii mikrofazovoj struktury polimernyh matric pri mehanicheskom nagruženii [Research by method of scanning electron microscopy of deformation of microphase structure of polymeric matrixes at mechanical loading] //Trudy VIAM. 2014. №7. St. 06 (viam-works.ru).
10. Mihajlin Ju.A. Special'nye polimernye kompozicionnye materialy [Special polymeric composite materials]. SPb.: Izd-vo «NOT». 2009. 657 s.
11. P'ezojelektričeskij sloistyj aktjuator [Piezoelectric layered aktjuator]: pat. №101271 Ros. Federacija; opubl. 10.01.2011.
12. Fizikohimija amorfnyh (stekloobraznyh) metallicheskih materialov [Fizikokhimiya of amorphous (stekloobrazny) metal materials] /Pod red. Ju.K. Kovneristogo. M.: Metallurgija. 1987. 328 s.
13. Amorfnye metallicheskie splavy [Amorphous metal alloys]: Per. s angl.; Pod red. F.E. Ljuborskogo. M.: Metallurgija. 1987. 584 s.
14. Kovneristyj Ju.K., Osipov Je.K., Trofimova E.A. Fiziko-himicheskie osnovy sozdaniya amorfnyh metallicheskih splavov [Physical and chemical bases of creation of amorphous metal alloys]. M.: Nauka. 1983. 145 s.
15. Alehin V.P., Honik V.A. Struktura i fizicheskie zakonomernosti deformacii amorfnyh splavov [Structure and physical patterns of deformation of amorphous alloys]. M.: Metallurgija. 1992. 248 s.
16. Stoljankov Ju.V., Aleksashin V.M., Antjufeeva N.V. K voprosu ob ocenke sklonnosti metallicheskih sistem k amorfizacii [To question of assessment of tendency of metal systems to amorfizatsiya] //Aviacionnye materialy i tehnologii (v pečati).
17. Zolotuhin I.V. Fizicheskie svojstva amorfnyh metallicheskih materialov [Physical properties of amorphous metal materials]. M: Metallurgija. 1986. S. 56.

18. Stoljankov Ju.V., Antjufeeva N.V., Raskutin A.E., Karimova S.A. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya metallopolimernyh kompozicionnyh materialov s ispol'zovaniem tonkolistovyh amorfnyh splavov [Research of possibility of creation of metalpolymeric composite materials with use of tonkolistovy amorphous alloys] //Kompozity i nanostruktury. 2014. T. 6. №1. S. 25–31.
19. Antjufeeva N.V., Aleksashin V.M., Zhelezina G.F., Stoljankov Ju.V. Metodicheskie podhody termoanaliticheskikh issledovanij dlja ocenki svojstv prepregov i ugleplastikov [Methodical approaches of thermoanalytical researches for assessment of properties of prepregs and ugleplastikov] //Prilozhenie k zhurnalu «Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik». 2012. №4. S. 18–27.