

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 658.562, 621.763

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ

Антипова Т.Н., Олешко А.Ю.

Технологический университет, Королев, Московская область, Россия

**Аннотация.** **Постановка задачи (актуальность работы):** в настоящее время производство волокнистых металлокомпозиатов приобрело устойчивый характер, в том числе благодаря восстановлению отечественного производства высокопрочных высокомодульных неметаллических армирующих волокон, что делает актуальной разработку элементов системы управления качеством с учетом особенностей технологии получения. Решение этой задачи позволит своевременно выявлять и устранять причины несоответствий и стабильно поставлять продукцию, отвечающую требованиям потребителей, используя принципиально новые подходы. **Цель работы:** разработка элементов управления качеством продукции из металлических композиционных материалов, армированных волокнами на основе рациональных параметров технологических операций для получения изделий с заданными свойствами. **Используемые методы:** при разработке концептуальной модели управления качеством и процессно-ориентированной модели технологии изготовления продукции из волокнистых металлокомпозиатов использованы методы системного и процессного подходов и моделирования. **Новизна:** к элементам новизны относятся методические основы управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозиатов, отраженные в разработанной концептуальной модели управления, которая позволяет обосновать рациональные управляющие воздействия (параметры технологических операций) и на основе информации обратной связи выстроить структуру мониторинга производства изделий. **Результат:** полученные результаты теоретического исследования являются развитием работ в области управления качеством продукции из металлокомпозиата, армированного волокнами. **Практическая значимость:** обоснованы основные предварительные и окончательные операции, последовательность их выполнения и рациональные параметры технологических режимов, с учетом особенностей получения продукции из волокнистых металлокомпозиатов.

**Ключевые слова:** управление качеством продукции, контроль, системный и процессный подходы, модели, волокнистый металлокомпозит.

© Антипова Т.Н., Олешко А.Ю., 2020

### Для цитирования

Антипова Т.Н., Олешко А.Ю. Методические основы управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозиатов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 55–62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## BASIC PROCEDURES OF PRODUCT QUALITY CONTROL FOR FIBER METAL COMPOSITES

Tatyana N. Antipova, Alexey Y. Oleshko

University of technology, Korolev, Moscow Region, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance):** Currently, the production of fiber metal composites has acquired a stable character, including due to the restoration of domestic production of high-strength high-modulus non-metallic reinforcing fibers, which makes it relevant to develop elements of the quality control system taking into account the peculiarities of the production technology. By solving this task, we can timely identify and eliminate the causes of nonconformities and consistently deliver products that meet the requirements of consumers, using fundamentally new approaches. **Objectives:** Development of quality control elements for products made of metal composite materials reinforced with fibers based on rational parameters of technological operations to obtain products with specified properties. **Methods Applied:** When developing a conceptual model of quality control and a process-oriented model of manufacturing technology for fiber metal composite products, the authors used the methods of system and process approaches and modeling. **Originality:** The elements of novelty include the basic procedures of quality control of fiber metal composite products, reflected in the developed conceptual control model, which allows us to justify rational control actions (parameters of technological operations) and build a structure of the production monitoring using feedback information. **Findings:** The obtained results of the theoretical study are the development of studies in the field of quality control of products made of metal composite reinforced with fibers. **Practical Relevance:** The paper contains a rationale for the main preliminary and final operations, their sequence and rational parameters of process parameters taking into account the manufacturing peculiarities of products from fiber metal composites.

**Keywords:** product quality control, control, system and process approaches, models, fiber metal composite.

### For citation

Antipova T.N., Oleshko A.Y. Basic Procedures of Product Quality Control for Fiber Metal Composites. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 55–62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62>

### Введение

Продукция из композиционных материалов на металлической основе, армированная высокопрочными высокомодульными неметаллическими волокнами, является перспективным классом изделий в конструкционных материалах. Такие металлокомпозиты по удельной прочности и жесткости в 2–3 раза превосходят традиционные конструкционные металлические материалы – стали, алюминиевые и титановые сплавы, что определяет высокую эффективность применения продукции на их основе в части снижения веса конструкций [1–5]. Основными потребителями этой продукции являются предприятия, производящие ракетно-космическую технику, руководствующиеся в своей деятельности требованиями к системам менеджмента качества организаций ГОСТ Р 56518-2015 [6].

Однако, как показывает многолетняя практика получения продукции из металлокомпозитов, несоответствия данного класса выявляются прежде всего на стадии жизненного цикла изделия – производство [7]. Отличительной особенностью технологии является одновременное получение композиционного материала и изготов-

ление из него изделия, когда при одних и тех же технологических параметрах необходимо обеспечить выполнение требований заказчика к продукции по физико-механическим свойствам материала и геометрическим размерам.

Проблема обеспечения потребителей продукцией из металлокомпозитов с заданными свойствами пока решается только за счет наличия контрольных операций, позволяющих в ходе технологического процесса отделить некачественную продукцию, без системного подхода к управлению качеством. Решение этих задач позволит актуально выявлять и устранять причины и следствия несоответствий продукции из волокнистого металлокомпозита, и обеспечивать стабильные поставки изделий, отвечающие требованиям потребителей.

### Методы исследований

Для решения поставленных задач, а именно разработки процессно-ориентированной модели технологии изготовления, иерархически организованной информационной подсистемы получения и концептуальной модели управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита, в качестве методологической основы

приняты методы системного и процессного подходов, концептуальные основы Всеобщего управления качеством (TQM-Total quality management), экспериментальные исследования, моделирования [8–10].

**Результаты исследования и их обсуждение**

В результате изучения всех этапов получения композиционных материалов, используя системный и процессный подходы [10], а также причинно-следственную диаграмму Исикавы, описано последовательное проведение операций по изготовлению продукции из рассматриваемого класса композитов и факторов, воздействующих на качество промежуточной и конечной продукции (рис. 1).

Процессно-ориентированная модель получения металлокомпозитов рассматриваемого класса состоит из двух блоков, последовательно исполняемых технологических процессов: изготовление полуфабрикатов и получение на их основе изделия путём сборки и последующей консолидации заготовки. Каждый из двух блоков представляет собой комплекс технологических операций.

На первой стадии производства приобретаются основные и вспомогательные исходные материалы. Исходные характеристики качества материалов являются факторами, обуславливающими качество конечного изделия.

Первая технологическая операция по формированию равномерного распределения армирую-

щих волокон представляет собой начальную стадию переработки исходного материала и может быть самостоятельным полуфабрикатом. Волокно является основным компонентом, определяющим прочностные характеристики изделия. Назначение операции – создать упорядоченный ряд волокон, при определённых параметрах, которые оказывают воздействие на технико-экономические характеристики изделий [11, 12].

Вторая технологическая операция предназначена для добавления матричного материала по параметрам, отклонения от которых оказывают существенное влияние на прочностные характеристики конечного изделия. В результате данной операции формируется промежуточный полуфабрикат волокно-матрица.

Следующая технологическая операции включают в себя сборку многослойной заготовки полуфабриката. Правильность исполнения данной операции в значительной мере зависит от человеческого фактора, который практически не поддаётся формализации и автоматизации. Кроме того, на данной операции качество вспомогательного исходного материала может оказывать большое влияние на выполнение последующих операций.

Завершающей технологической операцией, которая окончательно формирует полуфабрикат в изделие, является консолидация заготовки. Параметры консолидации в значительной степени оказывают влияние на качество прочностных характеристик готового изделия.



Рис. 1. Процессно-ориентированная модель технологии изготовления продукции из волокнистых металлокомпозитов

Fig. 1. A process-oriented model of a process flow of products from fiber metal composites

Процессно-ориентированная модель представляет собой систему, элементами которой являются процессы (технологические операции) получения продукции из волокнистых металлокомпозитов. Система производства рассматриваемого класса металлокомпозитов – это множество взаимосвязанных элементов, каждый из которых прямо или косвенно связан с любым другим элементом.

В соответствии с теоретическими положениями системного подхода изменение хотя бы одного элемента гарантирует качественное изменение всей системы. Таким образом, качество работы системы является свойством целого, которое в свою очередь определяется качеством работы её частей и характером связей между ними, не являясь простой суммой этих качеств [9].

На рис. 2 представлена классическая блок-схема управления, которую предлагается рассматривать как основополагающую для разработки модели управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита. При построении дан-

ной модели были учтены особенности технологии получения композиционных материалов.

Объект управления предлагается представить как совокупность элементов, полученных в результате проведения каждой технологической операции. Каждый элемент характеризуется рядом параметров  $X_1, X_2 \dots X_i$ .

В блоке принятия решений обосновывается комплекс управляющих воздействий и характеристики – параметры технологических операций. В результате последовательных управляющих воздействий каждый элемент объекта изменяет или приобретает новые свойства, которые следует характеризовать соответствующими численными параметрами. Совокупность параметров по каждому элементу объекта управления является информационной основой мониторинга или межоперационного контроля.

Неотъемлемой частью системы управления является информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов, которая имеет иерархическую структуру (рис. 3).

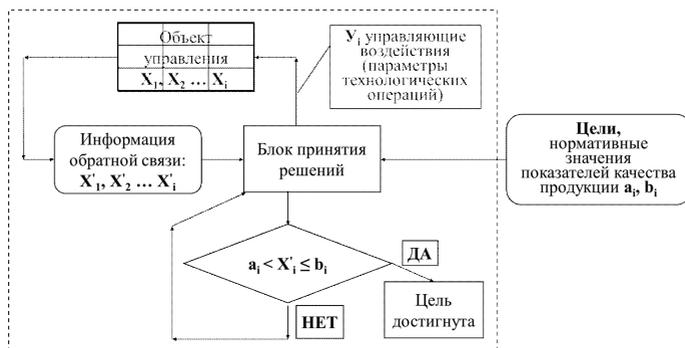


Рис. 2. Блок-схема управления качеством продукции

Fig. 2. Product quality control structure diagram



Рис. 3. Иерархически организованная информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов

Fig. 3. A hierarchical information subsystem of manufacturing products from composite materials

Особенность иерархической организации любой системы заключается в том, что при движении вверх по иерархии моделируемый объект не просто является совокупностью соответствующих элементов нижнего уровня, а приобретает принципиально новые качественные свойства, отсутствующие на предыдущем уровне, реализуя принцип целостности [13].

Предлагается выделить два уровня информационной подсистемы: уровень заказчика и технологический уровень.

Первый уровень информационной подсистемы отражает требования заказчика к объекту разработки, то есть реализует принцип приоритета критериев более высокого уровня управления.

В соответствии с ГОСТ Р 56518-2015 [6] требования заказчика (потребителя) – это набор критериев, формализующих цели в виде показателей качества продукции, где в роли заказчика выступает государственный орган, или организация, который совместно с государственным заказчиком осуществляет заказы в той части, которая является их интересом, участвует в выдаче технических заданий (исходные данные) на создание продукции или составных частей, и(или) выполнение процессов (услуг) [6], для волокнистых металлокомпозиций в основном – это предприятия ракетно-космической отрасли.

Выбор основных показателей качества продукции из металлокомпозита, армированного волокнами, обусловлен необходимостью учета специфики условий эксплуатации изделий в жесткостных конструкциях, а также экономического эффекта для потребителя [14–16].

На рис. 4 представлены обобщенные свойства продукции из металлокомпозита, армированного волокнами.

Данная структура включает:

- физические показатели, такие как плотность ( $\text{г/см}^3$ ), коэффициент линейного термического расширения ( $\cdot 10^{-6}$ ,  $\text{град}^{-1}$ ), диапазон рабочих температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) и др.;

- механические показатели, такие как прочность на растяжение (МПа), модуль упругости (МПа), ударная прочность ( $\text{кДж/м}^2$ ) и др.;

- показатели технологичности, такие как трудозатраты (ч), степень механизации (%), степень автоматизации (%) и др.;

- экономические показатели, такие как себестоимость (руб.), годовой экономический эффект (руб.) и др., сопряженные с показателями технологичности.

Перечисленные показатели качества следует рассматривать как обобщенные свойства продукции из волокнистого металлокомпозита, которые необходимы для оценки полученных результатов формирования продукции и служат источником информации о конечном объекте управления для получения обратной связи с системой управления, в зависимости от требований заказчика они могут варьироваться.

Второй уровень информационной подсистемы соответствует конкретному предприятию, производящему продукцию из композиционных материалов, и включает комплекс параметров технологических операций и показатели качества исходных материалов.

Для получения волокнистых металлокомпозитов предлагается выделить три основные группы исходных материалов с показателями качества, влияющими на свойства конечной продукции [11]:

- армирующие волокна: прочность на растяжение (МПа), модуль упругости (МПа), диаметр (мкм), количество заводских склеек на таре поставщика (шт.);

- матричный материал: соответствие марки сплава, химический состав, состояние поставки, геометрические размеры (мм);

- вспомогательный материал: геометрические размеры (мм), отсутствие поверхностных дефектов.



Рис. 4. Структура показателей качества продукции из волокнистого металлокомпозита

Fig. 4. A structure of quality indicators of products from fiber metal composites

После завершения всех технологических операций формируется конечная продукция из волокнистого металлокомпозиата, которая характеризуется количественными показателями качества и должна соответствовать требованиям заказчика. Процедура соответствия качества продукции требованиям заказчика определяется следующей формулой:

$$a_i < X'_i \leq b_i \quad (1)$$

где  $X'_i$  –  $i$ -й показатель качества продукции из волокнистого металлокомпозиата;  $a_i$  и  $b_i$  – конечные значения допустимого интервала варьирования численного значения данного показателя.

Развивая теоретические положения управления качеством, разработана концептуальная модель управления качеством продукции из металлокомпозиата, армированного волокнами (рис. 5).

Данная модель состоит из основных блоков, каждый из которых представляет собой набор соответствующих ему функциональных элементов:

- объект управления – продукция из волокнистого металлокомпозиата, являющаяся совокупностью элементов (армирующие волокна, матричный материал, полуфабрикат и др.);
- блок принятия решений, где обосновывается, в том числе экспериментально, комплекс управляющих воздействий;
- управляющие воздействия – параметры

технологических операций, такие как температура, давление, время и др.;

- информация обратных связей – данные (полученные в процессе мониторинга или межоперационного контроля) о продукции из волокнистого металлокомпозиата или его элементов, изменяемых или приобретаемых новые характеристики (габаритные размеры, шаг выкладки, физико-механические свойства и др.).

Движение элементов объекта управления по технологическим операциям сопровождается двумя обязательными процессами: управляющих воздействий и снятия информации об изменении свойств элементов объекта управления. При этом если информация обратной связи входит в диапазон нормативных значений (технологической и/или технической документации), то элементы объекта управления продолжают движение по технологическим процессам. Если нет, то элементы объекта управления возвращаются на предыдущие операции для корректировки свойств путём повторного управляющего воздействия либо отбраковки. Таким образом, после последовательных управляющих воздействий формируется волокнистый металлокомпозиат с показателями качества (физическими, механическими и др.), соответствующими требованиям потребителя (заказчика).

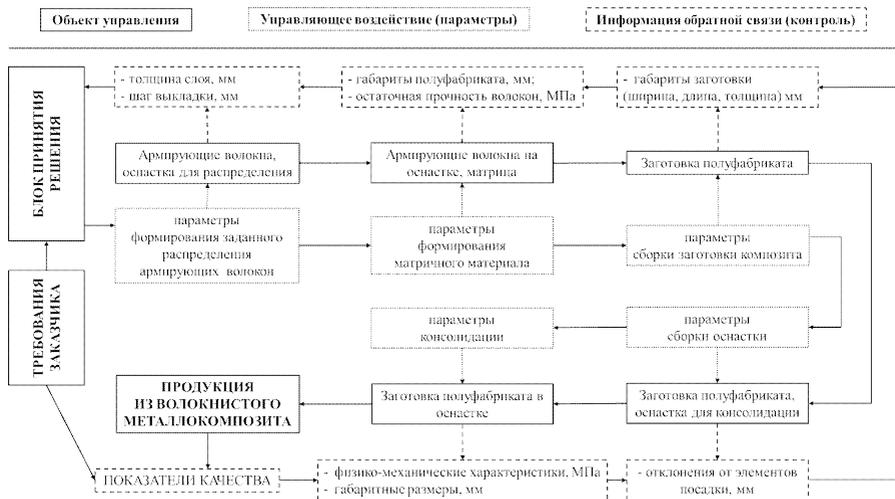


Рис. 5. Концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозиата

Fig. 5. A conceptual model of quality control of products from fiber metal composites

Разработанная концептуальная модель управления качеством продукции из композиционных материалов позволяет планировать экспериментальные исследования для обоснования рациональных управляющих воздействий и на основе информации обратной связи выстроить структуру мониторинга производства изделий.

### Заключение

На основе проведённых теоретических исследований по управлению качеством и технологии изготовления композиционных материалов с использованием системного и процессного подходов разработана процессно-ориентированная модель технологического процесса производства волокнистых металлокомполитов, которая позволяет определять основные предварительные и окончательные операции, последовательность их выполнения и особенно сти получения продукции. Модель служит осно-

вой для обоснования модели управления качеством продукции из волокнистого металлокомполита.

Сформулирована иерархически организованная информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов, которая позволяет учитывать принцип приоритета критериев более высокого уровня управления (требования потребителя/заказчика), ряд функциональных элементов (технологических операций) и качество исходных материалов.

Разработана концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомполита, которая представляет собой целостную систему и дает возможность установить системные связи между назначением изделия и его свойствами, а также между показателями качества продукции и техническими возможностями процесса производства данного изделия.

### Список литературы

1. Власенко А.В., Скрыбин В.В. Применение перспективных композиционных материалов для проектов ракетно-космической техники // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. № 1. С. 71–73.
2. ГОСТ Р 58016-2017. Композиты керамические. Карбидкремниевые волокно, армированные карбидкремниевым волокном. Классификация. М.: Стандартинформ, 2017. 15 с.
3. Композиционные материалы в авиации // Зарубежное военное образование. 2014. URL: <http://zvo.su/vvvs/kompozicionnye-materialy-v-aviacii.html> (дата обращения: 25.12.2017).
4. Тимофеева А.Н., Шайдуров В.С., Чернов В.М. Система автоматического регулирования механическими колебаниями композиционных элементов конструкций // Конструкции из композиционных материалов. 2008. №3. С. 68-71.
5. Kyle-Henney S., Flitcroft S., Shatwell R., Gibbon D., Voss G., Harkness P. Silicon carbide monofilament reinforced titanium composites for space structures a new material option, University of Glasgow School of engineering. 6 (2012).
6. ГОСТ Р 56518-2015. Техника космическая. Требования к системам менеджмента качества организаций, участвующих в создании, производстве и эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2015. 41 с.
7. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
8. Богатеев Г.Г., Коробков А.М. Контроль качества изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. Казань: Методическая комиссия инженерного химико-технологического института КГТУ, 2018. 29 с.
9. Гайдес М.А. Общая теория систем: (системы и системный анализ). М.: Глобус-пресс, 2005. 201 с.
10. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
11. Антипова Т.Н., Олешко А.Ю. Концептуальные положения системы управления качеством производства боралюминиевых трубчатых элементов ферменных конструкций космических аппаратов // Информационно-технологический вестник. 2016. №3. С. 108–113.
12. Neubauer E., Wulz H.G., Edmaier Ch., Agote I., Merstallinger A., Mozden G., Liedtke V., Stelzer N., Liedtke V., Gamsjäger N. Metal matrix composites (MMCS) as high performance metallic material. Financial, management and administrative proposal, Aerospace and advanced composites. 102 (2013).
13. Исаев, В.Г., Антипова Т.Н. Концептуальные положения управления качеством системы производства композиционных материалов для ракетно-космической техники // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4(14). С. 30-38.
14. ГОСТ 4.200-78. Система показателей качества продукции. Строительство. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 7 с.
15. Разработка структуры нормативного документа на металлопродукцию на основе принципа опережающей стандартизации / Снимщиков С.В., Полякова М.А., Лимарев А.С., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 86–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>.

16. Цыганов А.В. Иерархическая декомпозиция качества процесса контрейлерных перевозок // Качество в обработке материалов. 2018. №2(10). С. 46-49.

Поступила 10.02.2020; принята к публикации 02.03.2020; опубликована 25.03.2020

**Антипова Татьяна Николаевна** – д-р техн. наук, профессор  
Технологический университет, Королев, Московская область, Россия. Email: antipova@ut-mo.ru

**Олешко Алексей Юрьевич** – аспирант  
Технологический университет, Королев, Московская область, Россия. Email: korolev2005-06@mail.ru

#### References

- Vlasenko A.V., Skryabin V.V. Application of advanced composite materials for designing rocket and space equipment. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Relevant problems of aviation and cosmonautics], 2016, vol. 1, no 1, pp. 71–73. (In Russ.)
- GOST R 58016-2017. Ceramic composites. Silicon carbide composites reinforced with silicon carbide fiber. Classification. Moscow: Standartinform, 2017, 15 p.
- Composite materials in the aircraft industry. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2014. Available at: <http://zvo.su/VVS/kompozitsionnye-materialy-v-aviastroeni.html> (Accessed on December 25, 2017).
- Timofeeva A.N., Shaidurov V.S., Chernov V.M. An automatic control system for mechanical oscillations of composite elements of structures. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite materials structures], 2008, no. 3, pp. 68–71. (In Russ.)
- Kyle-Henney S., Flitcroft S., Shatwell R., Gibbon D., Voss G., Harkness P. Silicon carbide monofilament reinforced titanium composites for space structures a new material option. The University of Glasgow, School of Engineering, 6 (2012).
- GOST R 56518-2015. Space products. Requirements for quality management systems of organizations participating in development, production and operation. Moscow: Standartinform, 2015, 41 p.
- GOST R 56136-2014. Life cycle management for military products. Terms and definitions. Moscow: Standartinform, 2015, 16 p.
- Bogateev G.G., Korobkov A.M. *Kontrol kachestva izdeliy iz kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie* [Quality control of products made of composite materials: textbook]. Kazan: Methodical Committee of the Institute of Engineering, Chemistry and Technology of KSTU, 2018, 29 p. (In Russ.)
- Gaides M.A. *Obshchaya teoriya sistem: (sistemy i sistemnyy analiz)* [General systems theory: (systems and system analysis)]. Moscow: Globus-press, 2005, 201 p. (In Russ.)
- GOST R ISO 9001-2015. Quality management systems. Requirements. Moscow: Standartinform, 2015, 32 p.
- Antipova T.N., Oleshko A.Yu. Conceptual provisions of the quality control system for production of boron/aluminium tubular elements of trussed structures of spacecraft. *Informatsionno-tehnologicheskii vestnik* [Information technology bulletin], 2016, no. 3, pp. 108–113. (In Russ.)
- Neubauer E., Wulz H.G., Edtmaier Ch., Agote I., Merstallinger A., Mozdzen G., Liedtke V., Stelzer N., Liedtke V., Gamsjäger N. Metal matrix composites (MMCS) as high performance metallic material. Financial, management and administrative proposal, Aerospace and advanced composites. 102 (2013).
- Isaev V.G., Antipova T.N. Conceptual provisions of quality management of the system of production of composite materials for rocket and space equipment. *Informatsionno-tehnologicheskii vestnik* [Information technology bulletin], 2017, no. 4(14), pp. 30–38. (In Russ.)
- GOST R 4.200-78. Product-quality index system. Building. Basic principles. Moscow: IPK publishing house of standards, 2003, 7 p.
- Snimshchikov S.V., Polyakova M.A., Limarev A.S., Kharitonov V.A. Development of a structure of norms for steel products based on a principle of advanced standardization. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 1, pp. 86–93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>.
- Tsyganov A.V. Hierarchical decomposition of the quality of piggyback transportation. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in materials treatment], 2018, no. 2(10), pp. 46–49. (In Russ.)

Submitted 10/02/2020; revised 02/03/2020; published 25/03/2020

**Tatyana N. Antipova** – DrSc (Eng.), Professor  
University of Technology, Korolev, Moscow Region, Russia. Email: antipova@ut-mo.ru

**Alexey Yu. Oleshko** – Postgraduate Student  
University of Technology, Korolev, Moscow Region, Russia. Email: korolev2005-06@mail.ru