

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7- 50-62

## МЕТОДЫ ИНФУЗИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор).<sup>\*</sup> Часть 2

А.В. Хрульков<sup>1</sup>, К.И. Донецкий<sup>1</sup>, М.Н. Усачева<sup>1</sup>, А.Н. Горянский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Полимерные композиционные материалы (ПКМ) все активнее вытесняют традиционные материалы. Постоянно ведутся разработки новых ПКМ, более экономичных и в то же время обеспечивающих качественное изготовление деталей и конструкций из них. Процесс инфузии уверенно занимает важное место среди таких процессов, как автоматизированная намотка и автоматизированная выкладка препрега с последующим формованием в автоклаве. Однако при использовании автоклавной технологии имеются ограничения по габаритам формируемых деталей, кроме того, этот метод – достаточно дорогостоящий в эксплуатации. Поэтому процесс инфузии все шире применяют при изготовлении деталей в авиа- и судостроении, строительной индустрии и др.

**Ключевые слова:** инфузия, вакуумная инфузия, полимерные композиционные материалы, автоклавное формование, экономическая эффективность

**Для цитирования:** Хрульков А.В., Донецкий К.И., Усачева М.Н., Горянский А.Н. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 2 // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-50-62.

Scientific article

## INFUSION METHODS FOR THE MANUFACTURE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review). Part 2

A.V. Khrul'kov<sup>1</sup>, K.I. Donetskiy<sup>1</sup>, M.N. Usacheva<sup>1</sup>, A.N. Goryansky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Polymer composite materials (PCM) are increasingly replacing traditional materials. New PCMs are constantly being developed, which are more economical and at the same time provide high-quality manufacturing of parts and structures from them. The infusion process has a well-established position among such processes as automated winding and automated prepreg lay-up followed by autoclaving. However, when using autoclave technology, there are restrictions on the dimensions of the molded parts, in addition, this method is quite expensive to operate. Therefore, the infusion process is increasingly used in the manufacture of parts in aircraft and shipbuilding, the construction industry, etc.

**Keywords:** infusion, vacuum infusion, polymer composite materials, autoclave molding, economic efficiency

**For citation:** Khrul'kov A.V., Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Goryansky A.N. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 2. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-50-62.

---

\* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (112), 2022.

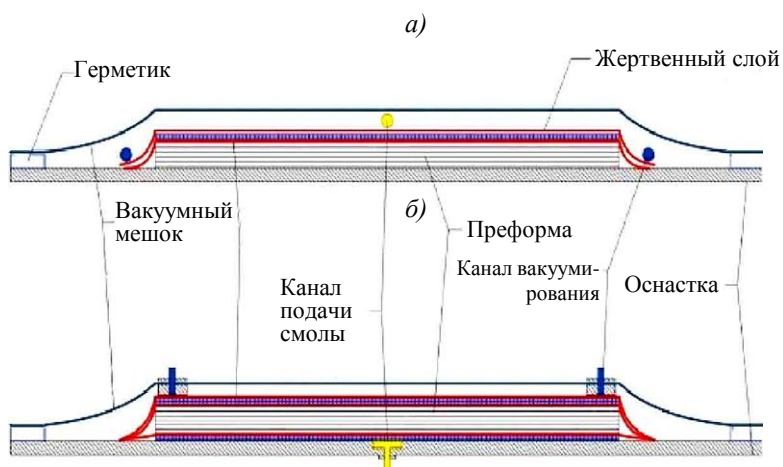
### Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) применяют практически во всех отраслях промышленности: в атомной индустрии, судостроении, строительстве, авиации и космосе. Это можно объяснить несколькими обстоятельствами. В некоторых случаях традиционные материалы, такие как сталь и алюминиевые сплавы, не могут применяться из-за слишком большой массы или недостаточной жесткости. А иногда просто невозможно изготовить интегральную конструкцию по существующим технологиям из металлов. С целью обеспечения композитной индустрии необходимыми материалами и технологиями разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1]. Работы по этим направлениям позволили обеспечить разработку ПКМ нового поколения и современных технологий их переработки [2–4]. Разработаны материалы с повышенной прочностью после удара благодаря использованию высоковязкой матрицы [5, 6]. Проведены различные исследования и представлены обзоры материалов, применяемых в авиационной и автомобильной промышленности, а также перспективных «зеленых» материалов. Кроме того, разработаны различные связующие и ПКМ на их основе [7–12].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Инфузионный метод с гибкой оснасткой

Модификацией метода вакуумной инфузии (Vacuum Assist Resin Transfer Molding – VaRTM) является процесс инфузии композитной смолы Симанна (Seeman Composite Resin Infusion – SCRIMP). Для быстрого ее распределения используется среда с низким сопротивлением течению смолы (рис. 1). Это может быть сетка, тканое или трикотажное полотно, обеспечивающие низкое сопротивление потоку и быстрое плоскостное распределение смолы, после чего преформа в виде волокнистого материала пропитывается в направлении толщины [13]. Данный процесс был изобретен Уильямом Симанном и впервые запатентован в 1990 г. в США [14]. В 1993 г. метод одобрен в Великобритании [15] и Европе [16]. Основным отличием патентов Великобритании и Европы от патента США является то, что в них рассматривается использование двух сред для распределения смолы, в то время как среда распределения смолы в патенте США расположена в верхней части преформы (рис. 1, а). В двух других патентах вторая среда распределения смолы дополнительно расположена между заготовкой и формой. Кроме того, в поверхность пресс-формы встроен литниковый канал (рис. 1, б).



Метод пропитки сухого волокнистого материала, аналогичный процессу SCRIMP, изобрел Джей Джонсон. В изобретении используется перфорированная пленка, которую помещают на сухой волокнистый материал и приклеивают к форме по краям. Это образует внутреннюю камеру, которая соединена с вакуумным насосом и покрыта неперфорированной пленкой вакуумного мешка. Область между перфорированной и неперфорированной пленками называется внешней камерой. Внешняя камера соединена с резервуаром для смолы. Во время процесса пропитки смола сначала поступает во внешнюю камеру и распределяется по поверхности детали. После распределения смола пропитывает сухой волокнистый материал в направлении толщины [17]. На практике часто используют комбинацию SCRIMP и метод Джонсона. Поэтому перфорированная пленка из патента Джонсона применяется в качестве разделительной пленки, а внешняя камера заполнена средой распределения смолы. Разделительная пленка обеспечивает более легкое отделение среды распределения после отверждения. В отличие от процесса SCRIMP, в процессе высококачественной вакуумной инфузии (High-Performance VaRTM – HiPerVaRTM) тканые или вязаные вспомогательные средства для повышения текучести не применяют, а используют нетканый материал с высокой проницаемостью, который обладает таким свойством, что не образует направленный поток. Таким образом, имеет место ненаправленное распределение смолы, что позволяет избежать сухих пятен [18]. Компании Mitsubishi Heavy Industries и Toray Industries разработали процесс передовой вакуумной инфузии (Advanced VaRTM – A-VaRTM), по существу, аналогичный процессу SCRIMP, при котором сухой волокнистый материал подвергается горячему прессованию перед инфузией. Согласно работе [19], данный процесс, а также удаление избытка смолы способствуют увеличению объемного содержания волокна. Другие аналогичные методы пропитки запатентованы компанией McDonnell Douglas Corporation [20] (процесс вакуумной пропитки смолой [21]) и Уильямом Роджерсом [22]. В быстром процессе вакуумной инфузии (Quick Draw VaRTM) используется пленка вакуумного мешка с тиснением во избежание применения вспомогательных материалов, таких как проточная среда. Тиснение пленки создает пути для потока смолы, которая пропитывает волокнистый материал в направлении толщины [3, 23]. В отличие от большинства других процессов, в процессе формования с переменной инфузией (Vacuum Infusion Molding Process – VIMP) волокнистый материал пропитывается изнутри компонента (рис. 2). Согласно работе [24], данный процесс имеет преимущества, заключающиеся в том, что затраты могут быть снижены, а хорошие поверхности получены с обеих сторон. Пропитка становится возможной изнутри с помощью текучей среды, расположенной между слоями волокнистого материала. Саму текучую среду также можно изготовить из вспененного материала или дерева. В этом материале предусмотрены канавки для распределения смолы. Для максимально беспрепятственного попадания смолы в текучую среду в волокнистом материале предусмотрено отверстие, расположенное сверху и совмещенное с входным отверстием для смолы. Форма может быть вакуумирована для пропитки либо смола вдавливается в форму под действием силы тяжести.

В вакуумном процессе (Vacuum Assisted Process – VAP) используется полупроницаемая мембрана для удаления газов и летучих веществ из смолы. Эта мембрана газопроницаемая, однако является непроницаемой для смолы, что позволяет поддерживать более низкое давление, чем атмосферное, во время инфузии. В других процессах, таких как VaRTM, вентиляционные отверстия расположены таким образом, что фронт потока смолы поступает туда последним. В методе VAP в этом нет необходимости, поскольку он эвакуируется по всей площади. Мембрану запаивают по краям, а также покрывают дышащей и вакуумной пленками. Бризер обеспечивает вентиляцию между пленкой вакуумного мешка и мембраной. В противном случае пленка вакуумного мешка будет просто прижата к мембране давлением окружающей

среды и удаление компонента будет затруднено. В 2015 г. компания Spirit Aerosystems запатентовала процесс, в котором текучая среда размещается под преформой в полости инструмента (рис. 3). Перфорированная заглушка, также встроенная в пресс-форму, отделяет средство для улучшения текучести от преформы. Через перфорацию в уплотняющей пластине смола может вытекать из текучей среды в заготовку и пропитывать ее в направлении толщины [26]. В сочетании с калориметрами и зонами нагрева, адаптированными к компонентам, эта стратегия инфузии образует интеллектуальную систему инфузии смолы (Intelligent Resin Infusion System – IRIS).

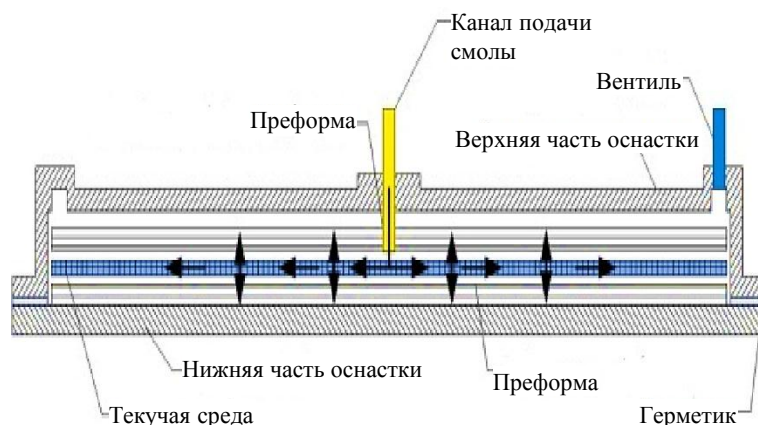


Рис. 2. Схематичное изображение процесса VIMP [25]

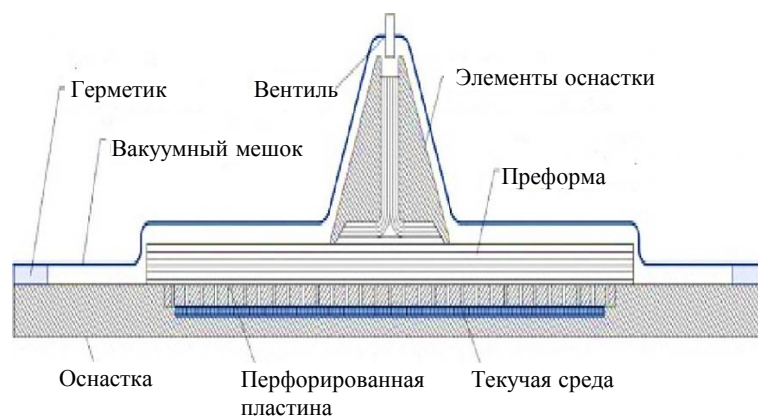


Рис. 3. Схематичное изображение метода инфузии, запатентованного компанией Spirit Aerosystems [26]

На рис. 4 представлено фото оснастки для реализации технологии IRIS.

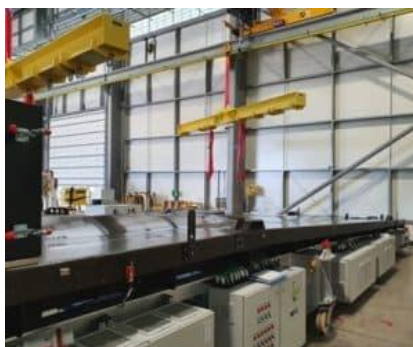


Рис. 4. Оснастка для изготовления нижней обшивки крыла самолета A220 методом IRIS [26]

Для улучшения объемного содержания волокна и распределения толщины корпорация Boeing запатентовала в 2003 г. процесс инфузии смолы при контролируемом атмосферном давлении (Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion – CAPRI). Здесь преформа сначала сжимается путем циклической нагрузки и разгрузки. Так называемое уменьшение объема производится с помощью попеременного вакуумирования и аэрации вакуумного мешка. В отличие от других методов вакуумируется не только вакуумный мешок, но и емкость подачи смолы (рис. 5). В результате градиент давления между полостью и источником смолы снижается, тем самым уменьшается градиент толщины ПКМ. Однако при снижении градиента давления продолжительность инфузии может увеличиться [27]. Этот процесс сравним с процессом инфузии при различном давлении (Differential Pressure Resin Transfer Moulding – DP-RTM), только при более низком его уровне.

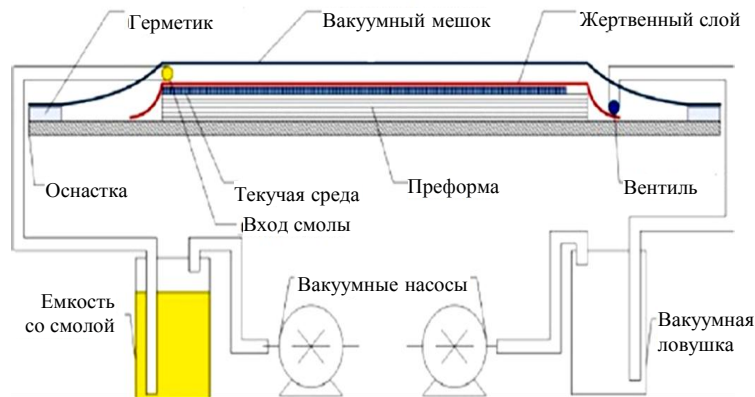


Рис. 5. Схематичное изображение процесса CAPRI [27]

Отличие процесса модифицированной вакуумной инфузии (Modified Vacuum Infusion – MVI) от других процессов, таких как VaRTM, заключается в изменении подключения в конце процесса наполнения. Когда сухой волокнистый материал полностью пропитывается смолой, ловушка и резервуар для смолы соединяются вакуумной трубкой. Таким образом, создается выравнивание давления между входом и выходом смолы, и поток смолы прекращается. Благодаря выравниванию давления распределение толщины по детали сглаживается и возникает равномерное соотношение объемов волокон. В 1999 г. компания Eurocopter France впервые запатентовала этот процесс (рис. 6) [28].

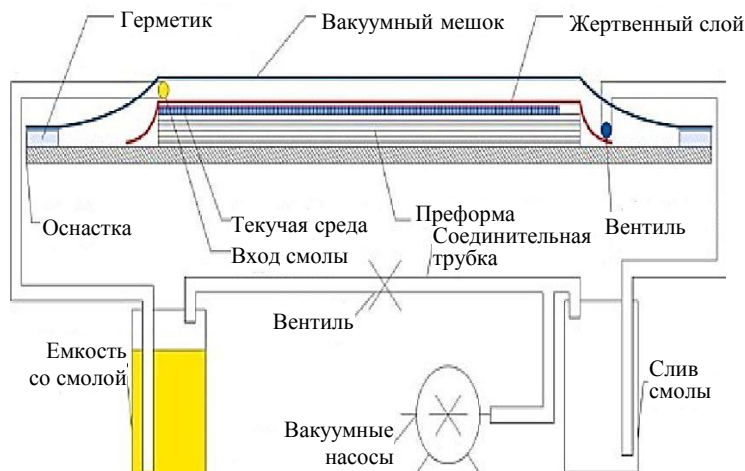


Рис. 6. Схематичное изображение процесса MVI [28]

С помощью перечисленных ранее методов можно изготавливать различные детали из ПКМ: например, методом SCRIMP – лопасти винтов судов, методом VAP – грузовую дверь самолета Airbus A400M, методом IRIS – обшивку крыла, методом CAPRI – подвижную заднюю кромку крыла самолета Boeing B787.

Кроме уже представленных методов инфузии известны также методы, в которых используют два вакуумных мешка. К ним относится метод импульсной инфузии. Под первой пленкой вакуумного мешка расположена среда для распределения давления, изготовленная, например, из силикона, а второй пленкой вакуумного мешка производится герметизация от атмосферы. Распределение давления может осуществляться по-разному, в зависимости от изготавливаемой детали. Установив разницу давлений, можно поднять первую пленку, тем самым распределив смолу при реализации процесса разовой инфузии (Single Piece Infusion – SPI). Кроме того, разность давлений между первой и второй вакуумными камерами можно регулировать пульсирующим образом (Dynamic Pulsed Infusion – DPI). В результате волокнистый материал пропитывается в направлении толщины [29].

Для изготовления обшивки крыла самолета Bombardier C Series используется свой метод инфузии смолы (Resin transfer infusion – RTI) (рис. 7). Для обеспечения требуемого содержания волокна в богатых смолой областях давление окружающей среды повышают с помощью автоклава после полной пропитки. Повышение атмосферного давления приводит к выдавливанию смолы из этих областей. Таким образом, объемное содержание волокна можно довести до желаемого уровня [30].

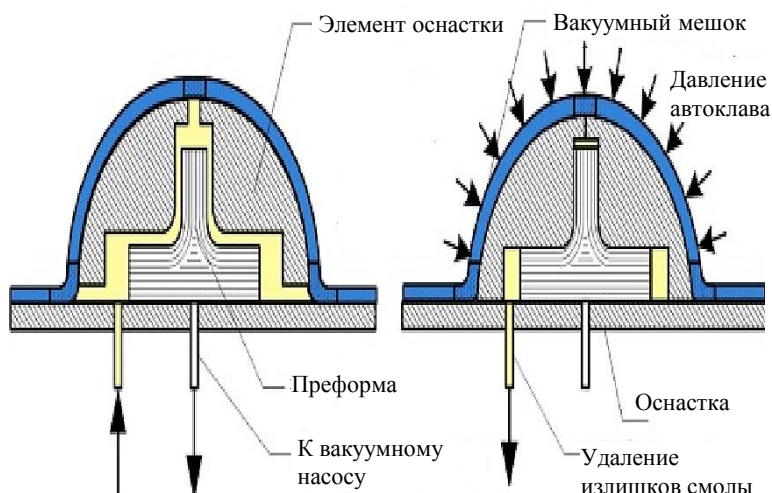


Рис. 7. Схематичное изображение процесса RTI [30]

Процесс вакуумной релаксации преформы (Vacuum Induced Preform Relaxation – VIPR) является усовершенствованием процесса VaRTM (рис. 8). Присоединяемая вакуумная камера, которая размещается на пленке вакуумного мешка, позволяет увеличить локальную проницаемость волокнистого материала. Воздействие контролируется давлением в вакуумной камере. Если давление в вакуумной камере меньше давления под пленкой вакуумного мешка, проницаемость увеличивается, поскольку сжатие волокнистого материала снижается [31]. Процесс с камерой (Fastest Injection Speed – FFC) аналогичен процессу VIPR. Но для процесса VIPR предусмотрен зазор между волокнистым материалом и вакуумным мешком. В отличие от вакуумной релаксации преформы смола сначала распределяется по всему волокнистому материалу, поэтому направление первичной пропитки перпендикулярно поверхности детали.

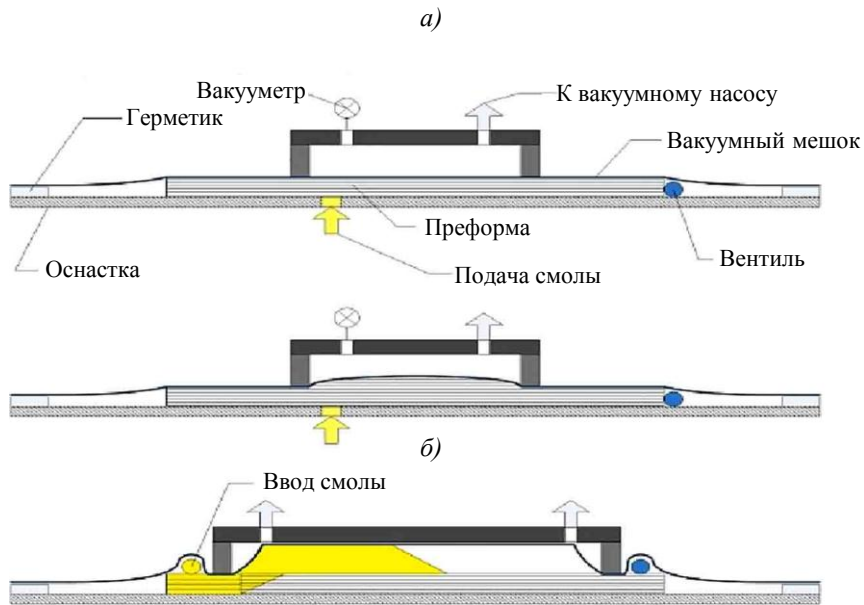


Рис. 8. Схематическое изображение процессов VIPR (a) и FFC (б) [31]

Процесс, сравнимый с процессом импульсной инфузии, также известен из запатентованного процесса переноса смолы с помощью канала (Channel Assisted Resin Transfer Molding – CARTM) (рис. 9) [32]. Здесь используется распределитель давления с каналами (рис. 8), которые представляют собой полые профили, размещаемые под пленкой вакуумного мешка на преформе. Установив перепад давления между полостью канала и давлением в полости, каналы можно открывать и закрывать. Кроме того, указанные профили можно использовать и в закрытом инструменте. Поэтому полые каналы вставляют в одну из двух половин пресс-формы.

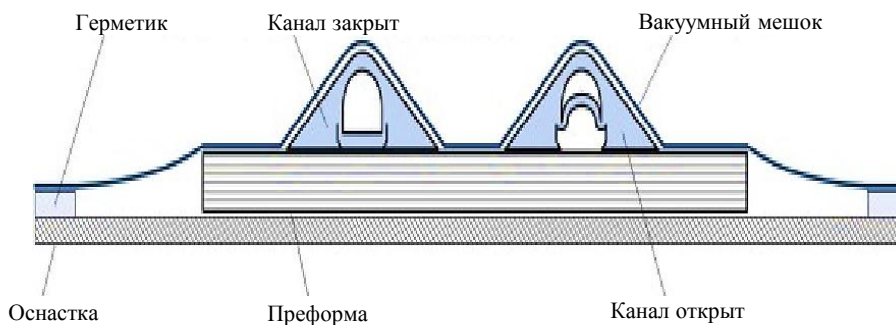


Рис. 9. Схематическое изображение процесса CARTM [32]

Благодаря встроенным каналам с дистанционным управлением также используется своего рода многоразовая проточная среда. Между первой и второй пленками вакуумного мешка вставлен инструмент, имеющий встроенные каналы. Перед инфузией вентилируют первый вакуумный мешок или полость. Поскольку второй вакуумный мешок откачан, разность давлений приводит к тому, что вакуумная пленка первого вакуумного мешка оседает в каналах. Затем первый вакуумный мешок снова откачивают для инфузии и открывают подачу смолы. По окончании инфузии второй вакуумный мешок отключают и восстанавливают каналы.

В работе [28] показано, что, подвергнув вибрации смолу или форму, можно сократить время заполнения и содержание пор. Для этого используют два подхода.

Сначала форму с преформой возбуждают для вибрации – этот метод называется литьем смолы с вибрацией. В другом подходе смола на входе в форму подвергается вибрации – этот метод называется формованием жидкого композита с вибрацией. Причиной улучшенной текучести является снижение вязкости из-за явления, известного как разжижение при сдвиге.

### Вакуумная инфузия в двойном мешке

Для обеспечения большей надежности при реализации инфузионной технологии используют второй вакуумный мешок. Однако при применении второй пленки вакуумного мешка необходимо обеспечить достаточный дренажный эффект между вакуумными пленками. На практике это делают, например, с помощью самоклеящихся полос или слоев дренажного материала (бризеров).

На рис. 10 схематично представлена структура вакуума для двух пленок вакуумного мешка (где  $p_0$  – атмосферное давление;  $p_{1/2}$  – давление между первой и второй пленками вакуумного мешка;  $p_c$  – давление смолы;  $p_R$  – давление внутри формируемой детали).

Это иллюстрация поведения двух пленок для вакуумных пакетов: *a* – используется только одна пленка для вакуумного мешка; *б* – зона между пленками вакуумного мешка не вакуумируется, так что давление между ними соответствует атмосферному давлению; *в* – зона между пленками вакуумного мешка вакуумируется таким образом, чтобы давление между ними соответствовало давлению в полости; *г* – полость заполнена смолой, так что давление в полости увеличивается до давления смолы. Гораздо более низкое давление сжимает пленки вакуумного мешка вместе.

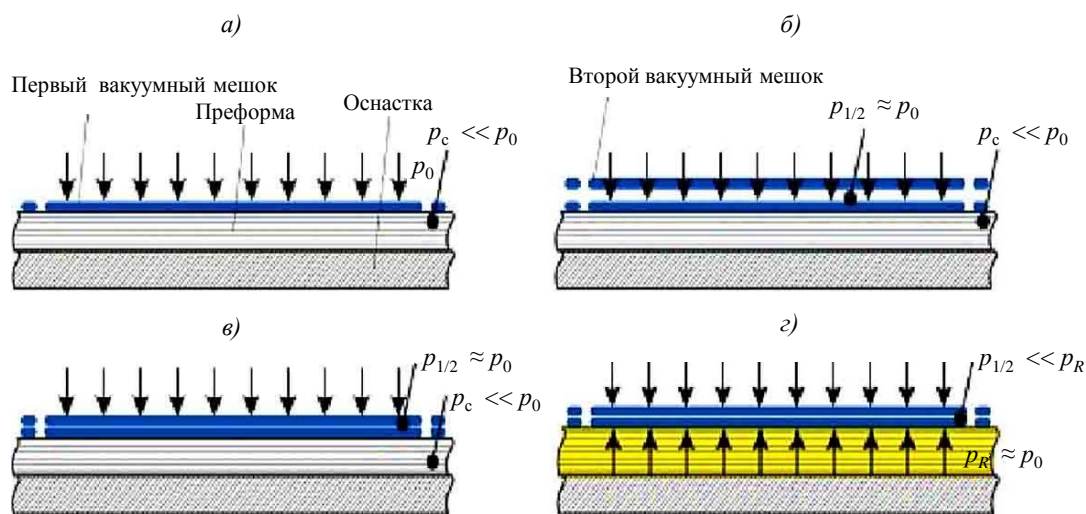


Рис. 10. Схематичное изображение процессов при применении двойного мешка

На рис. 10, *a* показано, что наклеена и запечатана по краям только первая пленка вакуумного мешка. Полость, заполненная волокнистым материалом, вакуумируется. Поэтому давление внутри полости намного меньше атмосферного давления. На рис. 10, *б* дополнительно показана вторая пленка вакуумного мешка, но давление между двумя пленками вакуумного мешка по-прежнему соответствует атмосферному давлению. В том случае, если (как показано на рис. 10, *в*) пространство между пленками вакуумного мешка вакуумируется, это давление приблизительно соответствует давлению в полости. Две пленки вакуумного мешка прижимаются друг к другу атмосферным давлением. При отсутствии между двумя мешками дренажа воздух между ними не смог бы выйти или ему это сделать было бы очень трудно. Когда смола

течет в полость (как показано на рис. 10, з), давление в полости адаптируется к давлению смолы. В зависимости от режима течения давление смолы соответствует почти атмосферному давлению, по крайней мере, при полной инфильтрации. В результате две отдельные пленки вакуумного мешка функционируют как более толстая пленка вакуумного мешка с преимуществом более высокой целостности вакуума. Это является справедливым только в том случае, когда в первом вакуумном мешке нет утечки. Если в первом вакуумном мешке происходит утечка, давление подстраивается под давление в полости. Данный фактор объясняет, почему необходим достаточный дренаж между первым и вторым вакуумными мешками. Если давление в месте утечки больше, чем давление в полости, поскольку область недостаточно откачана, воздух из области между первым и вторым вакуумными мешками нагнетается в полость, что приводит к возникновению пор или сухих участков.

Таким образом, исследования по применению двух вакуумных мешков в процессе VaRTM показали, что использование второго вакуумного мешка приводит к более высокому объемному содержанию волокна, малому градиенту толщины, меньшему количеству пустот и более высокой вакуумной герметичности по сравнению с тем, когда используется один мешок. В экспериментах между двумя пленками вакуумного мешка применяется дренаж (бризер). В патенте [32] функцию второго мешка приравнивают к функции колпачка, что объясняет указанные усовершенствования и сделанное ранее предположение о том, что при вакуумировании и использовании дренажа (бризера) между двумя вакуумными пленками создается более толстая вакуумная пленка.

Для достижения максимально возможного качества ламината при производстве компонентов из волокнистого композита, содержание пустот при оптимальном объемном содержании волокна должно быть как можно меньше. Низкое содержание пустот может быть достигнуто только в том случае, если полость максимально свободна от утечек. Поэтому часто используют второй вакуумный мешок.

При изготовлении интегральных панелей применяют такой метод получения композитных деталей, как метод инфузии [33, 34]. Предварительно осуществляется формирование заготовки стрингера. Далее на преформу обшивки устанавливаются преформы стрингеров и собираются направляющие цулаги (вспомогательные элементы оснастки). На все преформы укладываются жертвенные слои и распределительные сетки, устанавливаются каналы подачи связующего. Затем устанавливается верхняя часть полупроницаемой мембраны, которую соединяют с нижней мембраной герметизирующим жгутом, – таким образом получают полупроницаемый мешок для связующего.

Схема такого технологического пакета представлена на рис. 11.

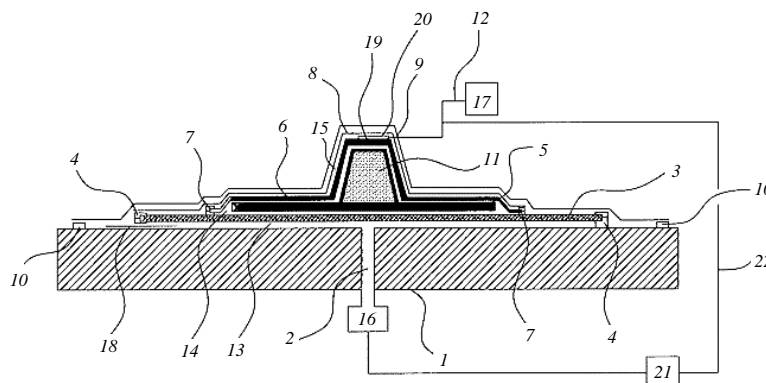


Рис. 11. Схема технологического пакета при одновременном формировании обшивки и стрингерного набора [34]: 1 – оснастка; 2 – канал подачи связующего; 3–22 – вспомогательные материалы, вакуумные каналы и формируемая заготовка

На получившийся полупроницаемый мешок кладут дренажный материал и устанавливают вакуумные каналы. Сверху устанавливают вакуумную пленку, создают вакуум для проверки герметичности, подключают каналы подачи связующего и помещают оснастку в печь (рис. 12).

После формования получается обшивка панели, подкрепленная стрингерами (рис. 13).



Рис. 12. Фото оснастки в печи при формовании интегральной панели [32]

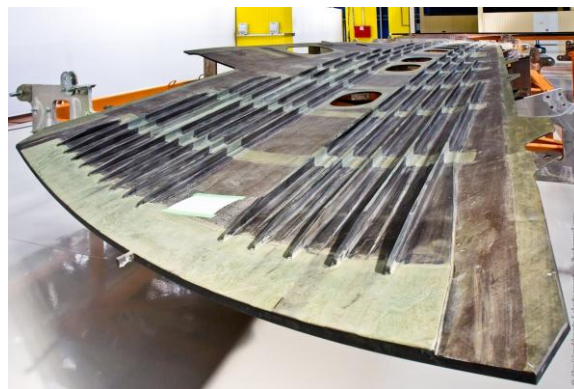


Рис. 13. Отформованная совместно со стрингерами панель крыла [32]

Такая технология позволяет получить интегральную панель, что повышает ее работоспособность и снижает трудоемкость в случае раздельного формования и последующей сборки.

### Заключения

Методы инфузии при изготовлении конструкций из ПКМ находят все большее применение, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий. С целью усовершенствования метода идет постоянная его модификация.

При изготовлении интегральных конструкций типа обшивок панелей крыла, подкрепленных стрингерными панелями, осуществляется предварительное формообразование стрингеров, а затем последовательная пропитка заготовки обшивки со стрингерами и последующее отверждение в термопечи.

Для гарантированного вакуумирования с целью обеспечения герметичности рабочих полостей при инфузии применяются двойные мешки, которые повышают надежность проведения качественной пропитки и последующего отверждения.

### Список источников

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. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
5. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.

6. Эпоксидное связующее: пат. № 2754399 Рос. Федерация; заявл. 02.11.20; опубл. 01.09.21.
7. Качук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
8. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
9. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viamworks.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
10. Боршев А.В., Гусев Ю.А. Разработка и внедрение ПКМ в автомобильную промышленность. Разновидности HP-RTM процессов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 4. С. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-48-52.
11. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
12. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S2. С. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-24-28.
13. Heider D., Simacek P., Dominauskas A. et al. Infusion design methodology for thick-section, low-permeability preforms using inter-laminar flow media // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007. Vol. 38 (2). P. 525–534.
14. Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structures: pat. US4902215A USA. No. 333747; filed 08.06.88; publ. 20.02.90.
15. Vacuum-forming fibre reinforced resin composites: pat. GB2257938A United Kingdom. No. 9116123.2; filed 08.06.88; publ. 27.01.93.
16. Vacuum-forming method and apparatus for vacuum-forming fibre reinforced resin composites: pat. EP0525263B1 German, French. No. 91307058.7; filed 01.08.91; publ. 27.03.96.
17. Process for manufacturing resin-impregnated, reinforced articles without the presence of resin fumes: pat. US 4132755A USA. No. 903212; filed 22.07.77; publ. 02.01.79.
18. High-performance infusion system for vartm fabrication: pat. US6964561B2. USA. No. 10/420398; filed 23.04.02; publ. 15.11.05.
19. Takeda F., Hayashi K., Yasuo S. et al. Research in the application of the VaRTM technique to the fabrication of primary aircraft composite structures // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2005. No. 42. P. 1–6.
20. Vacuum resin impregnation process: pat. US4942013A USA. No. 329029; filed 27.03.89; publ. 17.07.90.
21. Джохан О.М., Костенко О.П. Методы изготовления деталей из композиционных материалов пропиткой в оснастке. Часть 2. Методы вакуумной пропитки // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2012. № 1. С. 80–92.
22. Method of laminating reinforced plastics: pat. US3309450A USA; filed 05.07.61; publ. 14.03.67.
23. Cole C. Guide for low cost design and manufacturing of composite general aviation aircraft, techreport. National Institute for Aviation Research, Wichita State University, 2001. 103 p.
24. Loving D.A., Loving J., Sargent R., Sudduth R.D. Resin transfer molding involving center injection using a new production-oriented process for composites // *ICCE6 Conference Proceedings*. Orlando, 1999. P. 513–514.
25. Process for fiberglass molding using a vacuum: pat. US6508974B1; filed 15.02.96; publ. 21.03.03.
26. Method of liquid resin infusion of a composite preform: pat. US20150102535A1; filed 11.10.13; publ. 16.04.15.
27. Controlled atmospheric pressure resin infusion process: pat. EP1507647B1; filed 29.05.02; publ. 12.09.12.
28. Plant molding fibre-reinforced plastic by injection under vacuum: pat. FR2771960A1; filed 09.12.97; publ. 11.06.99.

29. Ricciardi M.R., Antonucci V., Durante M. et al. A new cost-saving vacuum infusion process for fiber-reinforced composites: pulsed infusion // *Journal of Composite Materials*. 2014. Vol. 48 (11). P. 365–373.
30. A bagging blanket and method for forming a fibre reinforced resin composite component: pat. GB2316036A; filed 05.08.96; publ. 18.02.98.
31. Alms J.B., Advani S.G., Glancey J.L. Liquid composite molding control methodologies using vacuum induced preform relaxation // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42 (1). P. 57–65.
32. Double bag vacuum infusion process: pat. US7413694B2; filed 07.12.99; publ. 19.08.08.
33. Как делают крылья для самолета MC-21. URL: [https://zen.yandex.ru/media/alexio\\_marziano/kak-delaiut-krylia-dlia-samoleta-ms21-5aa1849677d0e6cf2df9614a](https://zen.yandex.ru/media/alexio_marziano/kak-delaiut-krylia-dlia-samoleta-ms21-5aa1849677d0e6cf2df9614a) (дата обращения: 10.04.2022).
34. Способ изготовления волокнистых композитов вакуумной инфузией и устройство для осуществления способа: пат. RU2480335C1. Рос. Федерация; заявл. 07.02.12; опубл. 27.04.13.

### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
4. Kablov E.N. VIAM: New generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
5. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
6. *Epoxy binder*: pat. 2754399 Rus. Federation; filed 02.11.20; publ. 01.09.21.
7. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021. no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
8. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
9. Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Yazvenko L.N. Composite materials in automotive industry (review). *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
10. Borshchev A.V., Gusev Y.A. Development and implementation of PCM in automotive industry, varieties of HP-RTM processes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 4, pp. 48–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-48-52.
11. Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-67-29-37.
12. Doneckij K.I., Hrulkov A.V. Principy «zelenoj himii» v perspektivnyh tehnologiyah izgotovleniya izdelij iz PKM [Principles of «green chemistry» in perspective manufacturing technologies of PCM articles. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-24-28.
13. Heider D., Simacek P., Dominauskas A. et al. Infusion design methodology for thick-section, low-permeability preforms using inter-laminar flow media. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, vol. 38 (2), pp. 525–534.
14. *Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structures*: pat. US4902215A; filed 08.06.88; publ. 20.02.90.
15. *Vacuum-forming fibre reinforced resin composites*: pat. GB2257938A; filed 08.06.88; publ. 27.01.93.
16. *Vacuum-forming method and apparatus for vacuum-forming fibre reinforced resin composites*: pat. EP0525263B1; filed 01.08.91; publ. 27.03.96.

17. Process for manufacturing resin-impregnated, reinforced articles without the presence of resin fumes: pat. US 4132755A; filed 22.07.77; publ. 02.01.79.
18. *High-performance infusion system for VARTM fabrication*: pat. US6964561B2; filed 23.04.02; publ. 15.11.05.
19. Takeda F., Hayashi K., Yasuo S. et al. Research in the application of the VaRTM technique to the fabrication of primary aircraft composite structures. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 2005, no. 42. P. 1–6.
20. *Vacuum resin impregnation process*: pat. US4942013A; filed 27.03.89; publ. 17.07.90.
21. Jokhan O.M., Kostenko O.P. Methods for manufacturing parts from composite materials by impregnation in tooling. Part 2. Methods of vacuum impregnation. *Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruktivnykh letatelnykh apparatov*, 2012, no. 1, pp. 80–92.
22. *Method of laminating reinforced plastics*: pat. US3309450A; filed 05.07.61; publ. 14.03.67.
23. Cole C. *Guide for low cost design and manufacturing of composite general aviation aircraft, techreport*. National Institute for Aviation Research, Wichita State University, 2001. 103 p.
24. Loving D.A., Loving J., Sargent R., Sudduth R.D. Resin transfer molding involving center injection using a new production-oriented process for composites. *ICCE6 Conference Proceedings*. Orlando, 1999, pp. 513–514.
25. *Process for fiberglass molding using a vacuum*: pat. US6508974B1; filed 15.02.96; publ. 21.03.03.
26. *Method of liquid resin infusion of a composite preform*: pat. US20150102535A1; filed 11.10.13; publ. 16.04.15.
27. *Controlled atmospheric pressure resin infusion process*: pat. EP1507647B1; filed 29.05.02; publ. 12.09.12.
28. *Plant molding fibre-reinforced plastic by injection under vacuum*: pat. FR2771960A1; filed 09.12.97; publ. 11.06.99.
29. Ricciardi M.R., Antonucci V., Durante M. et al. A new cost-saving vacuum infusion process for fiber-reinforced composites: pulsed infusion. *Journal of Composite Materials*, 2014, vol. 48 (11), pp. 365–373.
30. *A bagging blanket and method for forming a fibre reinforced resin composite component*: pat. GB2316036A; filed 05.08.96; publ. 18.02.98.
31. Alms J.B., Advani S.G., Glancey J.L. *Liquid composite molding control methodologies using vacuum induced preform relaxation*. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, vol. 42 (1), pp. 57–65.
32. *Double bag vacuum infusion process*: pat. US7413694B2; filed 07.12.99; publ. 19.08.08.
33. *How wings are made for the MS-21 aircraft*. Available at: [https://zen.yandex.ru/media/alexio\\_marziano/kak-delaiut-krylia-dlia-samoleta-ms21-5aa1849677d0e6cf2df9614a](https://zen.yandex.ru/media/alexio_marziano/kak-delaiut-krylia-dlia-samoleta-ms21-5aa1849677d0e6cf2df9614a) (accessed: April 10, 2022).
34. *A method for manufacturing fibrous composites by vacuum infusion and a device for implementing the method*: pat. RU2480335C1. Rus. Federation; filed 07.02.12; publ. 27.04.13.

**Информация об авторах**

**Хрульков Александр Владимирович**, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Донецкий Кирилл Игоревич**, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Усачева Мария Николаевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Горянский Александр Николаевич**, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Alexander V. Khrulkov**, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Kirill I. Donetskiy**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Maria N. Usacheva**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexander N. Goryansky**, Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 22.04.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.04.2022.  
The article was submitted 22.04.2022; approved and accepted for publication after reviewing 26.04.2022.