

УДК 678.5; 629.73

doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-106-113

Улучшение точностных характеристик формообразующей оснастки с применением композитных силовых каркасов, полученных с использованием бесконтактной измерительной системы

А.Е. Кованов, А.В. Мамонов, Н.В. Шишканов, А.И. Ирошников

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

Improving precision characteristics of the form-building equipment using the composite frameworks obtained with application of the contactless measurement system

A.E. Kovanov, A.V. Mamonov, N.V. Shishkanov, A.I. Iroshnikov

Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC

В авиационной отрасли предъявляются повышенные требования к геометрической точности изделий. Изготовление деталей из полимерных композиционных материалов основано на получении конечных геометрических характеристик изделия в результате формования на прецизионной формообразующей оснастке. Опыт изготовления формообразующей оснастки из полимерных композиционных материалов показал, что оболочка, подкрепленная стенками, является наиболее эффективной как в конструктивном отношении, так и технологическом, и ее можно рассматривать в качестве основной расчетной схемы формообразующей оснастки. Одним из критических факторов, влияющих на точность формы оснастки, является соединение каркаса с формообразующей оболочкой. Для повышения точности изготовления формообразующей оснастки предложен метод, предполагающий сканирование обратной стороны формообразующей оболочки и последующую обработку композитного опорного каркаса на станке с числовым программным управлением по результатам сканирования, что позволяет снизить максимальные отклонения от теоретического контура оболочки. Анализ результатов апробации этого метода показал увеличение площади контакта каркаса с формообразующей оболочкой и, как следствие, площади клеевого соединения, что позволило увеличить сроки эксплуатации оснастки.

Ключевые слова: формообразующая оснастка, полимерные композиционные материалы, силовой каркас, клеевое соединение, мастер-модель, станок ЧПУ

Aviation industry presents the increased demand to geometric accuracy of a product. Component production from the polymer composite materials is based on obtaining final geometric characteristics of a product, as a result of machining on the precision molding equipment. Experience in manufacture of forming equipment from the polymer composite materials demonstrated that a shell reinforced with walls was most effective both structurally and technologically; and it could be considered as the main design scheme for the forming equipment. One of the critical factors influencing the equipment shape accuracy is connection between the frame and the form-building shell. To increase accuracy in manufac-

turing the form-building equipment, a method is proposed that involves scanning the back-side of the form-building shell and subsequent machining of the composite support frame on a CNC machine based on the scanning results, which allows reducing maximum deviations from the shell theoretical contour. Analyzing results of testing this method showed an increase in the frame contact area with the form-building shell and, as a consequence, the adhesive connection area, which made it possible to increase the equipment service life.

Keywords: form-building equipment, polymer composite materials, load-bearing frame, adhesive connection, master model, CNC machine

Постоянное совершенствование авиационной техники и, соответственно, повышение требований к точности изготовления их составляющих, ставит новые задачи перед технологией их производства. Наиболее характерными направлениями развития самолета являются: усложнение конструктивных форм, увеличение габаритных размеров и взлетной массы. Возрастающие максимальной скорости полета требует увеличения жесткости планера и точности его внешних обводов.

Чтобы удовлетворить эти требования, значительно увеличивают размеры обводообразующих деталей планера, изыскивают и используют новые, более совершенные материалы для их производства. При этом особое внимание уделяют объемной оснастке для изготовления деталей внешних обводов [1].

Выполнение деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) основано на получении конечных геометрических характеристик в процессе производства на прецизионной технологической оснастке.

Обеспечение соответствия геометрических характеристик формообразующей оснастки форме конечного изделия и сохранение этих характеристик при повышении давления (до 7 атм) и температуры (до 200 °С), а также при перемещении оснастки в процессе эксплуатации является одной из главных задач ее проектирования и изготовления.

Конструкция технологической оснастки и материалы, из которых она выполнена, непосредственно влияют на качество и стоимость изготовленных на ней деталей из ПКМ [2]. Этим вызвана необходимость разработки обоснованных методов расчета и проектирования конструкций и процессов их изготовления. В таких методах должны быть полностью учтены действительные условия работы конструкции, а также механические и физико-технологические свойства материалов.

Цель работы — исследование методов повышения точности изготавливаемой формооб-

разующей оболочки (ФОО), предусматривающих использование бесконтактных измерительных систем для анализа отклонений и создания математических моделей, используемых для дополнительной доработки элементов оснастки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Методы и материалы. Выбор материала для изготовления крупногабаритной формообразующей оснастки является непростой задачей вследствие необходимости подбора наилучшего соотношения показателей для конкретной производственной ситуации [3]. На выбор материала для формообразующей оснастки влияют требования, предъявляемые к конструкции, метод и особенности технологии ее производства [4].

Согласно результатам исследований применяемые для формообразующей оснастки ПКМ должны удовлетворять специальным требованиям, основными из которых являются:

- высокие жесткость и размеростабильность при длительной работе в условиях циклических нагрузжений;
- стабильность свойств в процессе эксплуатации и хранения при температуре 18...40 °С в течение 5–7 лет;
- стойкость к износу и минеральным смазкам при трении об металл;
- отсутствие корродирующего действия на металлы.

Методика определения областей применения ПКМ для разных видов технологической оснастки основана на анализе их прочности и жесткости, реологических и технологических свойств, а также существующих и перспективных цен для выявления их наибольшего соответствия специфическим условиям изготовления и эксплуатации формообразующей оснастки.

Эксплуатационные и экономические параметры изделий часто противоречат друг другу. Так, улучшение качества технологической

оснастки влечет за собой резкое увеличение себестоимости получаемого изделия, вследствие чего возникает проблема выбора оптимального конструктивно-технологического решения конкретной задачи [5, 6].

Технологическую оснастку, как и любую другую силовую конструкцию, следует проектировать в рамках некоторой заранее выбранной расчетной схемы. Основным элементом конструкции, воспринимающим контактное давление со стороны детали, является тонкая оболочка из квазиизотропного ПКМ, жестко опертая на стенки каркаса.

При одной и той же массе подкрепленных и гладких оболочек жесткость первых существенно больше. Поэтому, учитывая габаритные размеры оснастки и высокие требования к жесткости системы, определяемые стремлением к точному формообразованию детали, необходимо предусмотреть наличие продольных и поперечных диафрагм-стенок, подкрепляющих оболочку.

Опыт изготовления формообразующей оснастки из ПКМ показал, что подкрепленная стенками оболочка является наиболее эффективной как в конструктивном отношении, так и технологическом, и ее можно рассматривать в качестве основной расчетной схемы оснастки.

Таким образом, проектируемая конструкция представляет собой квазиизотропную оболочку, опирающуюся на регулярную систему стенок, которые разбивают ее на отдельные ячейки прямоугольной формы.

К геометрической точности изделий для авиационной отрасли предъявляют повышенные требования. На точность конечного изделия влияют следующие главные этапы технологического процесса изготовления формообразующей оснастки:

- механическая обработка мастер-модели, выполненная с требуемой точностью;
- изготовление ФОО из ПКМ методами вакуумной инфузии или контактного формования, первичное отверждение ФОО на мастер-модели;
- надежная фиксация ФОО на силовом каркасе для сохранения точности геометрических характеристик после снятия оснастки с мастер-модели и для обеспечения размеростабильности;
- окончательное термостатирование формообразующей оснастки в сборе с каркасом при температуре, превышающей таковую для формования на них изделий.

Изготовление формообразующей оснастки. Чтобы получить оснастку с нужными геометрическими характеристиками, изготавливают мастер-модель. Последнюю формируют из плит модельного пластика, склеенных в единый массив на жестком металлическом основании.

Заготовку мастер-модели проектируют с необходимым припуском и предусмотренными базами для последующей механической обработки на станке с ЧПУ. После склейки мастер-модель устанавливают на фрезерный станок с ЧПУ, выставляют по предусмотренным в заготовке базам и проводят механическую обработку. В результате получают поверхность, определяющую геометрические характеристики формообразующей оснастки, удовлетворяющие требуемым параметрам точности.

Оболочку изготавливают из ПКМ методом вакуумной инфузии смолы или контактным формованием, что обусловлено необходимостью первичного отверждения при температуре, близкой к комнатной, а таким свойством обладают связующие для указанных способов формования.

Армирующий материал выбирают исходя из материала формуемой на оснастке детали так, чтобы коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) оснастки был максимально близок КЛТР формуемой детали с использованием квазиизотропной схемы армирования.

Изготовление композитного каркаса с припуском. Для оснастки применяют как цельнометаллический стальной каркас, требующий развязки с пластиком ФОО, так и каркасы из ПКМ различных видов формования. Критическими характеристиками пластиков каркаса является КЛТР, близкий КЛТР ФОО, жесткость и теплостойкость.

В качестве каркаса рассматривали конструкцию из трехслойных панелей с сотовым наполнителем, склеенных клеем ВК-36. Обшивки изготавливали из препрега с углеродным наполнителем. Ложементы каркаса имели шаг 400...500 мм, обеспечивающий необходимую жесткость конструкции. Для дополнительного усиления каркаса в местах крепления ложементов можно выполнить локальную забивку сотового наполнителя полимерной пастой. Ложементы каркаса вырезали из заготовки трехслойной панели на фрезерном станке с помощью специальных твердосплавных фрез роутерного типа.

Первоначально предполагалось, что ложементы каркаса можно прецизионно обработать на стадии их изготовления по отдельности. Однако опытным путем установлено, что погрешности при последующей сборке каркаса (особенно для крупногабаритных оснасток) нивелируют все достоинства такого метода.

В связи с этим приняли решение о предварительном изготовлении ложементов каркаса с технологическим припуском 3...5 мм в местах контакта с ФОО, их сборке и склейке для обеспечения возможности последующей обработки на станке с ЧПУ.

Сканирование обратной стороны ФОО.

В процессе получения ФОО на имеющейся поверхности мастер-модели рабочая поверхность оболочки точно повторяет заданную форму. Однако обратная поверхность ФОО ничем неограничена в процессе формования, что обусловлено технологией ее изготовления методом вакуумной инфузии смолы.

Таким образом, ФОО будет иметь разнотолщинность вследствие неравномерности обратной поверхности. На практике локальная толщина может превышать эталонную на 4...6 мм (рис. 1 и 2).

Если такую разную по толщине оболочку установить на каркас, изготовленный исходя из идеальной математической модели, то возникнет много проблем. Первая и главная из них связана с невозможностью получения требуемой точности рабочей поверхности ФОО, так как выступы на обратной стороне при попытке придавить к ней каркас выдавят оболочку наружу. Кроме того, при таком подходе пло-

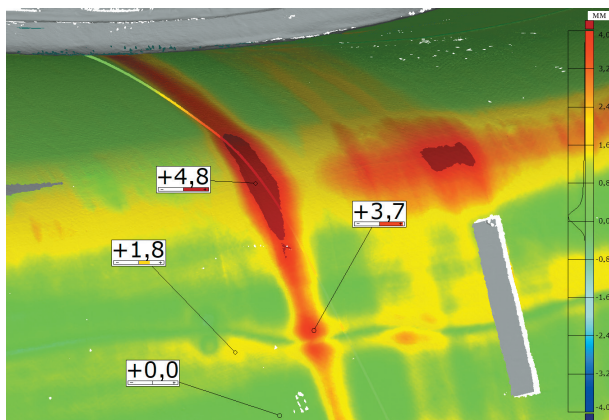


Рис. 1. Поле отклонения толщины, мм, в ФОО, полученное с помощью совмещения полигональной сетки отсканированной обратной стороны ФОО с ее эталонной математической моделью

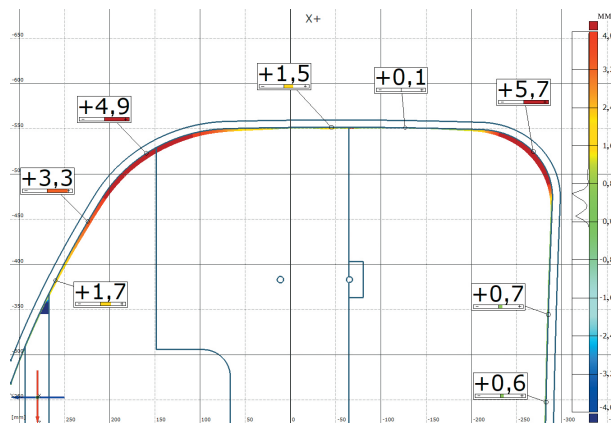


Рис. 2. Распределение отклонений толщины, мм, в поперечном сечении ФОО

щадь опирания ФОО на каркас оснастки из-за присутствия локальных выступов сокращается в десятки раз.

Вследствие наличия этих проблем для обеспечения соответствия геометрических характеристик рабочей поверхности ФОО ее математическому эквиваленту разработан комплексный метод адаптации изготовленного каркаса к реальной обратной поверхности ФОО.

Чтобы обеспечить максимальное соответствие каркаса с формой обратной стороны ФОО, необходимо иметь точную математическую копию обратной поверхности. Для этого выполняют полное растровое сканирование обратной поверхности ФОО со всеми ее неточностями. По полученной в результате сканирования математической модели проводят механическую обработку (доработку) ложементов собранного и склеенного каркаса в зонах контакта с ФОО.

Для сканирования поверхности можно использовать любую оптическую бесконтактную измерительную систему, обеспечивающую необходимую плотность точек сканирования в требуемом объеме измерений. Если объем измерений поверхностей больше, чем у используемой системы, то могут потребоваться дополнительные аппаратные и программные инструменты, точно связывающие между собой отдельные сканированные сегменты.

Можно обойтись и без подобных систем. Поскольку сканируемая обратная поверхность ФОО имеет, как правило, неповторяющийся «рисунок», метод наилучшего совпадения перекрывающихся сканируемых областей дает достаточный результат для составления полной картины поверхности из сканируемых сегментов.

Чтобы обеспечить наилучшую точность при совмещении сегментов, необходимо значительно перекрыть сканируемые области. Это значительно увеличивает время сканирования и «склейки» лоскутов всей поверхности, так как доля перекрытия сегментов может достигать 50...70 % при условии однородности и регулярности утолщений на поверхности.

По окончании процесса сканирования получают набор координат локальных вершин и впадин на поверхности. Однако вследствие конечной разрешающей способности сканирующих датчиков получаемая полигональная сетка имеет несоответствия с реальной поверхностью. Следовательно, на этапе механической обработки каркаса по данным этой неточной модели, могут остаться локальные области, в которых ФОО будет «зависать». Как показывает практика, значения этих неточностей достаточно малы, и ими можно пренебречь.

Так как полученная в результате сканирования полигональная сетка не имеет привязки к системе координат каркаса, при сканировании обратной стороны ФОО следует заранее добавить определенные метки, которые в дальнейшем позволят установить каркас точно в соответствии с результатами сканирования.

Обработка каркаса по отсканированной электронной модели. После получения электронной модели поверхности отсканированной обратной стороны ФОО эту поверхность

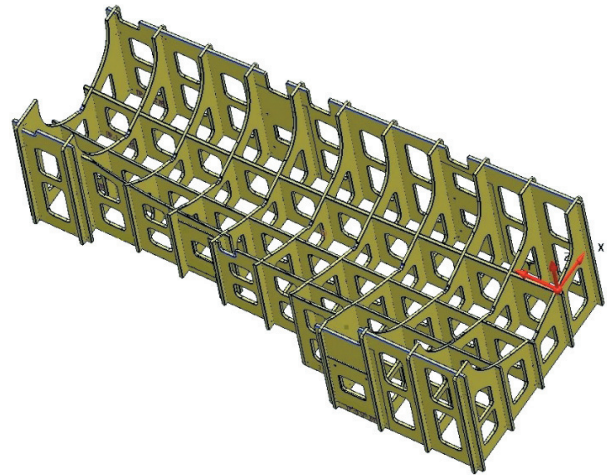


Рис. 3. Модель обработанного каркаса в сборе

накладывают на модель каркаса и позиционируют так, чтобы ложементы каркаса в зонах контакта с ФОО выступали выше этой поверхности наиболее равномерно. При этом величина выступов должна укладываться в заложенный в этих местах ложементов припуск (3...5 мм).

Далее каркас обрабатывают на станке с ЧПУ в ранее указанных зонах (рис. 3) с помощью твердосплавных фрез роутерного типа со сферическим торцом диаметром 10 мм. При этом используют стратегию обработки растром в направлении вдоль ложементов с шагом 1 мм, которого вполне достаточно для достижения необходимой точности обработки, обеспечива-

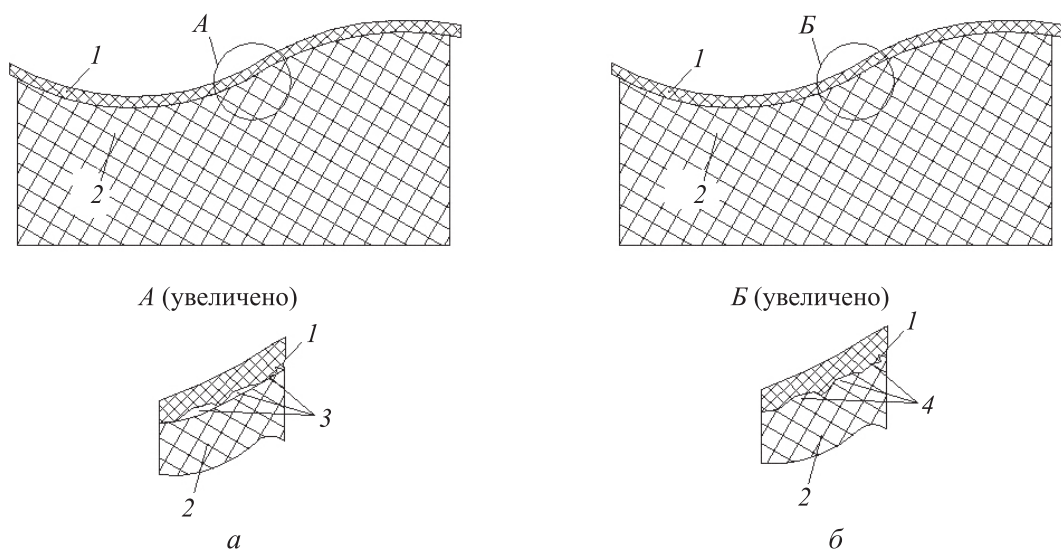


Рис. 4. Схемы прилегания ложемента к ФОО до (а) и после (б) доработки каркаса предлагаемым методом:

1 — ФОО; 2 — ложемент каркаса в сборе, 3 — зоны неприлегания; 4 — зоны прилегания, полученные в соответствии с математической моделью

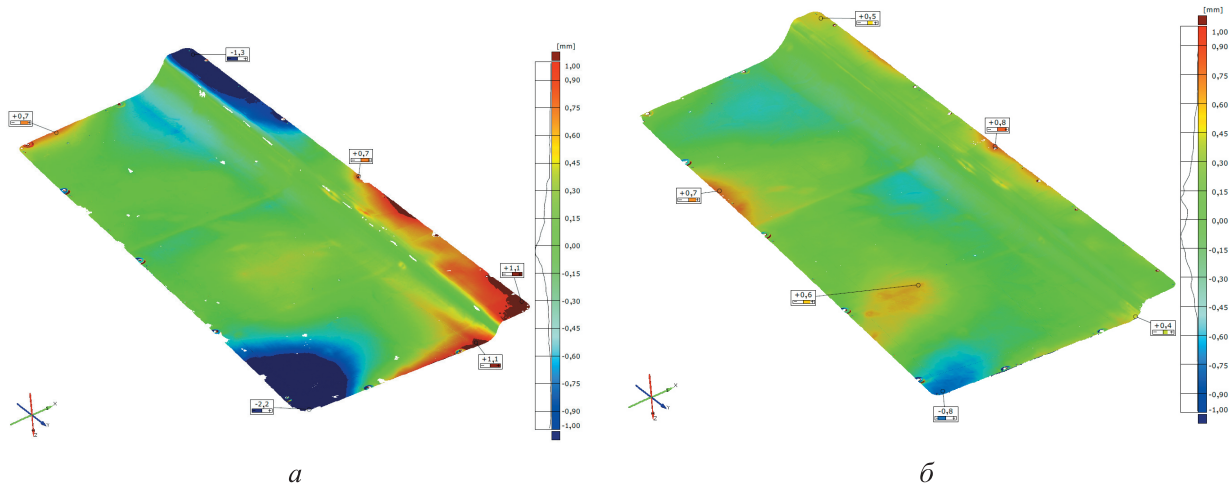


Рис. 5. Поля отклонений, мм, контуров ФОО от теоретического, полученных стандартным (а) и предлагаемым (б) методами

ющей прилегание каркаса к обратной стороне ФОО.

Теоретические и практические основы механической обработки сложных поверхностей на оборудовании с ЧПУ, а также рекомендации по подбору режимов резания и инструмента, выбору и способам корректирования управляющих программ для оборудования с ЧПУ рассмотрены в работах [7–11].

После механической обработки каркас накладывают на обратную сторону ФОО и приклеивают к ней. Так как точность формообразующей оснастки зависит главным образом от прилегания ФОО к каркасу, его прижатие к ФОО необходимо выполнять по всей поверхности оснастки.

Схемы прилегания ложементов к ФОО до и после доработки каркаса предлагаемым методом показаны на рис. 4.

Применение метода, предполагающего сканирование обратной стороны ФОО и последующую обработку композитного опорного каркаса на станке с ЧПУ по результатам сканирования, позволило снизить максимальные от-

клонения контура ФОО от теоретического с 3,3 до 1,6 мм на оснастке длиной 8 м (рис. 5).

Выводы

1. Описаны конструктивно-технологические приемы изготовления ФОО оснастки. Проанализирован процесс производства опорных каркасов.

2. Для повышения точности изготовления формообразующей оснастки, предложен метод, предполагающий сканирование обратной стороны ФОО и последующую обработку композитного опорного каркаса на станке с ЧПУ по результатам сканирования. Применение этого метода позволило снизить максимальные отклонения контура ФОО от теоретического с 3,3 до 1,6 мм на оснастке длиной 8 м.

3. Апробация предложенного метода показала увеличение площади контакта каркаса с ФОО и, как следствие, площади клеевого соединения, что повысило (примерно на 15 %) сроки эксплуатации оснастки до текущего профилактического ремонта.

Литература

- [1] Боголюбов В.С. *Формообразующая оснастка из полимерных материалов*. Москва, Машиностроение, 1979. 183 с.
- [2] Преображенский И.Н., Преображенский П.М. Прочность, жесткость и технологичность деформируемых несущих конструкций. *Научно-технический прогресс в машиностроении. Сер. Прочность, жесткость и технологичность изделий из композиционных материалов*, 1991, № 29, с. 3–17.
- [3] Андреев Ю.С., Тимофеева О.С., Яблочников Е.И. Проектирование и изготовление формообразующей оснастки в условиях мелкосерийного производства. *Известия ву-*

- зов. *Приборостроение*, 2016, т. 59, № 7, с. 592–599, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-7-592-599>
- [4] Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф., Молодцов Г.А. и др. *Размеростабильное интегральное изделие из композиционных материалов, способ его изготовления и форма для осуществления способа*. Патент РФ 2230406. Заявл. 27.08.2001, опубл. 10.06.2004.
- [5] Андреев А.В., Петропольский В.С. Оптимизация выбора материала мастер-моделей для изделий из полимерных композиционных материалов в условиях единичного и опытного производства в изделиях авиационной техники. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*, 2015, № 2, с. 20–28.
- [6] Петропольский В.С. *Разработка рациональных конструктивно-технологических решений формообразующей оснастки для изготовления деталей из композиционных материалов*. Дисс. ... канд. тех. наук. Харьков, ХАИ, 1998. 160 с.
- [7] Архангельская М.А., Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю. и др. Корректировка управляющей программы обработки формообразующей оснастки для обеспечения точности изготовления деталей из полимерных композиционных материалов по результатам их измерений на координатно-измерительной машине. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2016, т. 18, № 1–2, с. 145–147.
- [8] Братухин А.Г., Боголюбов В.С., Сироткин О.С. *Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении*. Москва, Готика, 2003. 516 с.
- [9] Радзевич С.П. *Формообразование поверхностей деталей. Основы теории*. Киев, Растан, 2001. 592 с.
- [10] Сулимов А.Н., Наговицин В.Н., Белоусов П.В. Изготовление и полировка поверхности композиционной формообразующей оснастки для изготовления трехслойных рефлекторов. *Решетневские чтения*, 2017, т. 1, с. 179–180.
- [11] Чесноков А.В. Прогрессивные технологии производства пространственной формообразующей оснастки для конструкций из композитов. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2013, № 1, с. 5–8.

References

- [1] Bogolyubov V.S. *Formoobrazuyushchaya osnastka iz polimernykh materialov* [Forming tooling from polymeric materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 183 p. (In Russ.).
- [2] Preobrazhenskiy I.N., Preobrazhenskiy P.M. Strength, rigidity and manufacturability of deformable load-bearing structures. *Nauchno-tekhnicheskiiy progress v mashinostroyeni. Ser. Prochnost, zhestkost i tekhnologichnost izdeliy iz kompozitsionnykh materialov*, 1991, no. 29, pp. 3–17. (In Russ.).
- [3] Andreev Yu.S., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I. Design and manufacturing of injection molding tooling in small-scale production. *Izvestiya vuzov. Priborostroyenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 59, no. 7, pp. 592–599, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-7-592-599> (in Russ.).
- [4] Simonov V.F., Urmansov F.F., Molodtsov G.A. et al. *Razmerostabilnoe integralnoe izdelie iz kompozitsionnykh materialov, sposob ego izgotovleniya i forma dlya osushchestvleniya sposoba* [Stable-size integral part of composite materials, method and mold for its manufacture]. Patent RF 2230406. Appl. 27.08.2001, publ. 10.06.2004. (In Russ.).
- [5] Andreev A.V., Petropolskiy V.S. Optimization of master model material selection for polymer composite products in unit and pilot production conditions in aviation products. *Vo-prosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatelnykh apparatov* [Design and Production Issues of Aircraft Structures], 2015, no. 2, pp. 20–28. (In Russ.).
- [6] Petropolskiy V.S. *Razrabotka ratsionalnykh konstruktivno-tekhnologicheskikh resheniy formoobrazuyushchey osnastki dlya izgotovleniya detaley iz kompozitsionnykh materialov*. Diss. kand. tech. nauk. [Development of rational design and technological solutions for mould-generating tooling for the production of parts from composite materials. Kand. tech. sci. diss.]. Kharkov, 1998. 160 p. (In Russ.).
- [7] Arkhangel'skaya M.A., Vermel V.D., Evdokimov Yu.Yu. et al. Adjustment the control program of forming equipment machining to ensure manufacturing accuracy of parts from

- polymer composite materials by measuring data from a coordinate-measuring machine. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Izvestia RAS SamSC]*, 2016, vol. 18, no. 1–2, pp. 145–147. (In Russ.).
- [8] Bratukhin A.G., Bogolyubov V.S., Sirotkin O.S. *Tekhnologiya proizvodstva izdeliy i integralnykh konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov v mashinostroenii* [Production technology of articles and integral structures from composite materials in mechanical engineering]. Moscow, Gotika Publ., 2003. 516 p. (In Russ.).
- [9] Radzevich S.P. *Formoobrazovanie poverkhnostey detaley. Osnovy teorii* [Shaping the surfaces of parts. Fundamentals of theory.]. Kiev, Rastan Publ., 2001. 592 p. (In Russ.).
- [10] Sulimov A.N., Nagovitsin V.N., Belousov P.V. Fabricating and polishing composite forming tools to produce three-layer reflectors. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2017, vol. 1, pp. 179–180. (In Russ.).
- [11] Chesnokov A.V. Progressive technologists of production of the spatial shape-generating tool for constructions from composite. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnologiya*, 2013, no. 1, pp. 5–8. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.06.2023

Информация об авторах

КОВАНОВ Антон Евгеньевич — начальник сектора. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: akovanov@mail.ru).

МАМОНОВ Александр Валерьевич — начальник сектора. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: a_mamonoff@mail.ru).

ШИШКАНОВ Николай Васильевич — начальник сектора. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: shishkan_n@mail.ru).

ИРОШНИКОВ Андрей Игоревич — начальник сектора. АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: airoshnikov@gmail.com).

Information about the authors

KOVANOV Anton Evgenyevich — Head of Sector. Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: akovanov@mail.ru).

MAMONOV Alexandr Valeryevich — Head of Sector. Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: a_mamonoff@mail.ru).

SHISHKANOV Nikolay Vasilievich — Head of Sector. Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: shishkan_n@mail.ru).

IROSHNIKOV Andrei Igorevich — Head of Sector. Obninsk Research and Production Enterprise Tekhnologiya named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: airoshnikov@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кованов А.Е., Мамонов А.В., Шишканов Н.В., Ирошников А.И. Улучшение точностных характеристик формообразующей оснастки с применением композитных силовых каркасов, полученных с использованием бесконтактной измерительной системы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 10, с. 106–113, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-106-113

Please cite this article in English as:

Kovanov A.E., Mamonov A.V., Shishkanov N.V., Iroshnikov A.I. Improving precision characteristics of the form-building equipment using the composite frameworks obtained with application of the contactless measurement system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 10, pp. 106–113, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-106-113