

УДК 629.7.045

Формование элемента конструкции из углепластика на основе полиэфирэфиркетона методом горячей штамповки листовых заготовок

К.В. Михайловский^{1,2}, А.С. Илларионов^{1,2}, А.В. Каледин^{1,3}¹ АО «Композит»² МГТУ им. Н.Э. Баумана³ ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук

Molding the PEEK carbon fiber reinforced plastic structural elements by hot stamping the sheet blanks

K.V. Mikhaylovskiy^{1,2}, A.S. Illarionov^{1,2}, A.V. Kaledin^{1,3}¹ Kompozit JSC² Bauman Moscow State Technical University³ Institute of Solid State Physics named after Yu.A. Osipyan

Предложен метод штамповки листовых заготовок для получения силовых элементов конструкций из углепластика на основе полиэфирэфиркетона, а также дальнейшего формования изделия. Исследованы особенности формования кронштейнов и влияние температуры процесса на структуру и физико-механические характеристики. Метод штамповки листовых заготовок обладает такими преимуществами перед другими методами формования, как повышение производительности путем уменьшения времени технологического процесса и снижение энергозатрат благодаря сокращению цикла производства. Рассмотрен образец силового элемента конструкции из углепластика на основе полиэфирэфиркетона, изготовленный по предложенному методу при подобранных параметрах технологического режима. Изучены особенности переформования листа в деталь и состояние изделия после остывания в месте сгиба. Проведено исследование микроструктуры и оценены физико-механические характеристики. По результатам исследования подтверждена возможность изготовления деталей сложной формы из углепластика на основе полиэфирэфиркетона с применением отечественных материалов, доступных для массового производства.

EDN: RIOSFX, <https://elibrary/riosfx>**Ключевые слова:** элемент конструкции из углепластика, полиэфирэфиркетон, штамповка листовых заготовок, силовой элемент, обработка давлением

The paper proposes a method for stamping the sheet blanks to obtain the load-bearing structural elements made of the polyetheretherketone-based carbon fiber reinforced plastic, as well as for the further product molding. It analyzes features of molding the brackets, and effect of the process temperature on the structure and the physical and mechanical properties. The sheet blank stamping method has the following advantages over the other molding methods: increased productivity by reducing the process time and reduced energy costs due to the shorter production cycle. The paper considers a sample of the load-bearing structural element made of the polyetheretherketone-based carbon fiber reinforced plastic using the proposed technology and the selected process mode parameters. It studies features of the sheet reforming into an element and the product state after cooling in the bending area. Microstructure is analyzed, and the physical and mechanical properties are assessed. Study results confirm a possibility of manufacturing complex-shaped elements from the

carbon fiber reinforced plastic based on the polyetheretherketone using the domestic materials available for mass production.

EDN: RIOSFX, <https://elibrary/riosfx>

Keywords: carbon fiber reinforced plastic structural element, polyetheretherketone, sheet blanks stamping, power element, pressure treatment

Использование термопластичного связующего в качестве полимерной матрицы в непрерывно армированных углепластиках имеет такие преимущества перед терморезактивными связующими, как длительный срок хранения сырья и препрегов на основе термопластов (не менее одного года) и меньшие временные затраты на технологические процессы получения изделий благодаря отсутствию необходимости их отверждения [1].

К технологическим достоинствам полимерного композиционного материала (ПКМ) с термопластичной матрицей относится возможность формования деталей на металлургическом оборудовании методами штамповки или прокатки [2].

Для изготовления изделий авиационной и ракетно-космической техники широко применяют высокотемпературные термопласты из семейства полиарилэфиркетонов, в частности полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), обладающий высокой механической прочностью и вязкостью разрушения, химической стойкостью к практически любым агрессивным средам и низким коэффициентом влагопоглощения. Имея температуру плавления около 340 °С, ПЭЭК также используется для производства изделий, работающих при повышенной температуре [3].

Кроме того, данный термопласт является трудногорючим полимером [4]. Благодаря уникальному сочетанию свойств именно ПЭЭК и ПКМ на его основе рассматриваются в качестве материала, который позволяет заменить отдельные металлы и их сплавы в аэрокосмической отрасли [5].

Так как углепластик на основе ПЭЭК — высокопрочный и термостойкий материал, его используют при производстве изделий в различных отраслях промышленности [6, 7].

Самые распространенные методы формования углепластиков — непрерывное горячее прессование [8, 9] и автоклавное формование [10] — имеют такие недостатки, как высокая стоимость оборудования и сложность его технического обслуживания, длительное время процесса, высокие требования к точности изго-

товления и шероховатости поверхности оснастки.

Технология автоматизированной выкладки препрега на основе ПЭЭК имеет ограничения по геометрическим характеристикам изготавливаемых изделий с учетом размера выкладываемой головы, ролика и системы подачи препрега [11].

В связи с этим разработка альтернативных методов формования, позволяющих снизить затраты и повысить производительность процесса, становится актуальной задачей.

Метод штамповки листовых заготовок обеспечивает уменьшение затрат и увеличение производительности процесса получения изделий сложной конфигурации из углепластика на основе ПЭЭК. Штамповка листовых заготовок из углепластика на основе термопластов, в том числе из ПЭЭК, получила широкое применение за рубежом, в частности в США, Франции, ФРГ, Италии, Великобритании, Японии и КНР [12].

В данном исследовании приведены примеры формования кронштейнов из углепластика на основе ПЭЭК, изготовленных методом штамповки листовых заготовок. Штамповка выполнена при температуре выше температуры размягчения ПЭЭК, что позволяет существенно сократить время выдержки и снизить давление прессования по сравнению с аналогичными параметрами традиционных методов. Преимуществами этого метода перед другими являются повышение производительности изготовления деталей из углепластика на основе ПЭЭК и снижение энергозатрат благодаря отказу от необходимости нагревать оснастку до температуры плавления ПЭЭК (340 °С). Кроме того, при штамповке листовых заготовок не происходит адгезии полимерной матрицы к поверхности оснастки, вследствие чего не требуется нанесение антиадгезионных составов перед началом процесса.

Цель работы — определение влияния технологических параметров процесса штамповки листовых заготовок и профильных деталей на уровень физико-механических характеристик и

остаточную пористость, дефектность микро-структуры.

Материалы и методы. В качестве исходных заготовок использовали пластины углепластика, полученные методом непрерывного изостатического прессования из коммерчески доступного сырья — углеродной ткани АСМ С200Т производства Umatex и порошка ПЭЭК производства АО «Институт пластмасс» имени Г.С. Петрова [13]. Результаты исследования основных свойств отечественного ПЭЭК и их сравнение с таковыми зарубежного аналога приведены в работе [14].

Компоненты укладывали послойно в металлическую оснастку (рис. 1) и подвергали прессованию в высокотемпературном прессе ДЕ 2428 согласно следующему режиму:

- нагрев выше температуры плавления ПЭЭК в диапазоне 340...400°C в зависимости от габаритных размеров и толщины;
- выдержка 30 мин;
- подача давления в диапазоне 0,1...100,0 МПа;
- выдержка 30 мин;
- свободное остывание.

Предложенный режим можно скорректировать исходя из фактических результатов. Например, при короблении листовой заготовки или образовании микротрещин матрицы остывание можно проводить с регулируемой скоростью, например 2 °С/мин [15]. Первая выдержка необходима для полного перехода порошка ПЭЭК в вязкотекучее состояние, вторая — для перераспределения по слоям углеродной ткани заготовки.

Давление прессования подбирали с учетом толщины заготовки, геометрической формы и других параметров. При недостаточном давлении расплав термопласта не пропитает слой армирующего наполнителя. При подаче избы-

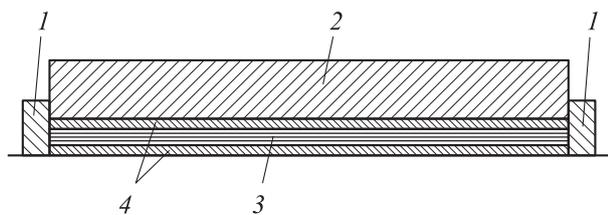


Рис. 1. Схема выкладки компонентов в металлическую оснастку:
1 — боковые ограничители; 2 — пуансон;
3 — слой углеродной ткани и ПЭЭК;
4 — зеркальные обкладные листы



Рис. 2. Внешний вид поверхности листовой заготовки для штамповки кронштейна

точного давления происходит искажение слоистой структуры изделия и равномерности толщины.

Полученные пластины размером 500×500 мм и толщиной 2 мм нарезали на листы меньшего размера (220×240 мм) для изготовления образцов кронштейнов методом штамповки. Режим механической обработки (скорость резания, глубина подачи и т. д.) выбирали таким, чтобы обеспечить ровную линию среза без наплывов термопластичного связующего (вызванных локальным перегревом материала при резании), отсутствие задиров, остаточных микротрещин и расслоений. Внешний вид листовой заготовки показан на рис. 2. Поверхность листовой заготовки — ровная и глянцевая.

При осмотре листовой заготовки размером 500×500 мм выявлены следующие особенности: структура углеродной ткани по краям пластины изменена, после расплавления порошка ПЭЭК и подачи давления углеродная ткань ближе к краям разъезжается вследствие движения расплава. Данный дефект не скажется на конечном изделии, так как в заготовку заложен технологический припуск, и края будут обрезаны при последующей механической обработке. При использовании материала с более низким показателем текучести расплава нарушение структуры углеродной ткани более выраженное, так как скорость течения потока расплавленного полимера обратно пропорциональна его вязкости [16, 17].

При визуальном осмотре торца пластины не выявлены дефекты, в частности крупные расслоения, способные существенно повлиять на механические свойства полученного изделия. Путем осмотра торца можно определить наличие



Рис. 3. Микроструктура пластины

непропитанных областей. Их маркером служат распушенные сухие пучки армирующего материала, выступающие за контур изделия. Убедительным свидетельством равномерности пропитки ПЭЭК по толщине пластины могут служить результаты исследования микроструктуры в объеме материала, приведенные на рис. 3.

Штамповку проводили в специальной оснастке, обеспечивающей геометрические характеристики получаемого изделия. Так как процесс выполняли при температуре меньшей, чем температура плавления ПЭЭК, требования к шероховатости были нестрогими: показатель шероховатости Ra не более 40 мкм. По этой же причине отсутствовала необходимость нанести разделительный состав на поверхности оснастки, контактирующие с материалами изделия. Листовую заготовку устанавливали между матрицей и ответной частью пресс-формы. После центровки собранной оснастки и установки по периметру рабочей зоны блоков тепловой изоляции верхнюю плиту прессы опускали до смыкания с ними.

Для штамповки использовали следующий режим:

- нагрев выше температуры размягчения ПЭЭК;
- выдержка 30 мин;
- подача давления;
- остывание со скоростью 2 °С/мин до 150 °С;
- свободное остывание до 60 °С.

В ходе экспериментов температуру штамповки варьировали в диапазоне 200...280 °С с шагом 10 °С. Давление прессования, как и время выдержки, было фиксированным и составляло 10 % давления прессования при консолидации исходной заготовки.

Также исследовали микроструктуру и физико-механические характеристики образцов кронштейнов. Для исследования микрострук-

туры образцов использовали два метода — оптический и сканирующей электронной микроскопии. Испытания образцов выполняли на разрывной машине серии УТС по ГОСТ 25.601–80. Сначала из областей криволинейных участков вырезали сегменты, чтобы получить представительные фрагменты. Затем проводили шлифование и полировку образца с помощью абразивных материалов разной зернистости для получения гладкой поверхности. Далее образцы исследовали на оптическом микроскопе Olympus VX51 при увеличении $\times 50$ (снимки) и $\times 100$ (сшивка).

Результаты и обсуждение. Влияние температуры процесса на геометрические характеристики конечного изделия. В различных литературных источниках температура размягчения ПЭЭК составляет 250...280 °С [18, 19], что существенно ниже температуры формования любыми другими способами, когда требуется полный переход связующего в жидкое состояние, где температура процесса равна 370...400 °С [20]. Таким образом, для штамповки не требуется специальное высокотемпературное оборудование и большие усилия прессования, что снижает затраты времени и энергии, тем самым повышая производительность изготовления изделий из углепластиков на основе ПЭЭК.

Внешний вид кронштейна, полученного методом штамповки из углепластика на основе углеродной ткани и ПЭЭК, при установленной в ходе экспериментов рациональной температуре 270 °С приведен на рис. 4.

Эксперименты, проведенные при меньших значениях температуры, не привели ни к нужному уровню деформации листовой заготовки до полного повторения геометрических характеристик формообразующей оснастки, ни к нарушению ее целостности в местах изгиба (рис. 5). Повышение давления прессования при



Рис. 4. Внешний вид кронштейна из углепластика на основе углеродной ткани и ПЭЭК



Рис. 5. Внешний вид листовой заготовки с дефектом в месте изгиба

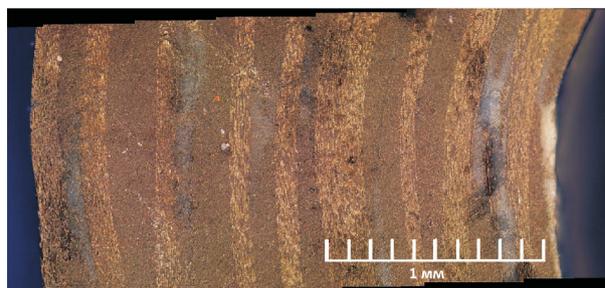
недостаточной температуре может привести к трещинам и разрушению пластины.

Повышение температуры процесса более 270 °С является целесообразным с точки зрения проведения дальнейшей работы по оптимизации технологических параметров с одновременным уменьшением времени выдержки. Важно отметить, что давление при штамповке листовых заготовок более чем в 10 раз ниже значения, необходимого для консолидации и обеспечения высокой степени пропитки ткани при горячем непрерывном прессовании. Относительно низкое давление минимизирует вероятность возникновения дефекта в виде расползания ткани в размягченном ПЭЭК, а также существенно снижает вероятность заклинивания (закусывания) заготовки в оснастке при ее неправильной центровке.

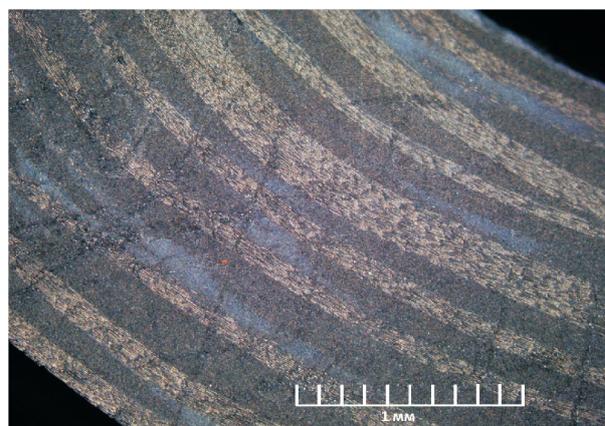
Изучение микроструктуры. Анализ микроструктуры позволяет оценить гомогенность, распределение слоев углеродной ткани и полимерной матрицы, а также выявить наличие дефектов.

Для определения степени искажения слоистой структуры и наличия дефектов вследствие деформации, возникшей при штамповке на углах сгиба, проанализирована микроструктура полученных образцов. Рассмотрены три образца: два без видимых дефектов и один с видимым дефектом в месте изгиба. Анализ микроструктуры двух образцов из кронштейнов позволил выявить отсутствие значительных дефектов и подтвердил, что при штамповании листовых заготовок углепластика на основе ПЭЭК сохраняется межслоевая адгезия и целостность матрицы даже в местах наибольших деформаций (рис. 6, а и б). Кроме того, можно заключить, что при консолидации исходной листовой заготовки обеспечены рациональные технологические параметры, так как на приведенных фотографиях отсутствуют поры и расслоения внутри слоистой структуры, не выявленные при визуальном осмотре торца.

Анализ микрошлифа образца с видимым дефектом в месте изгиба подтвердил, что при температуре ниже требуемого значения в слоистой структуре возникают деформации существенно выше предельных, что приводит



а



б

Рис. 6. Микроструктура образцов без дефектов:
а — шивка при увеличении $\times 100$;
б — снимок на увеличении $\times 50$



Рис. 7. Микроструктура образца с дефектами в области сгиба

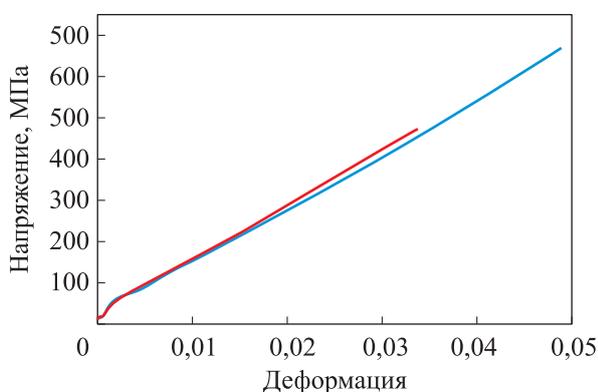


Рис. 8. Результаты испытаний образцов с дефектом (—) и без дефекта (—)

к трещинам в местах изгиба. На рис. 7 хорошо заметна трещина, идущая поперек слоев.

Эти результаты подтверждают эффективность и целесообразность применения предложенного метода производства элементов конструкций и являются важным вкладом в понимание структуры и свойств данных материалов.

Также проведены исследования по определению влияния режимов изготовления на физико-механические характеристики материалов. Анализ полученных результатов (рис. 8) показал, что предел прочности при одноосном растяжении образца без дефектов составляет

675 МПа, а образца с дефектами — 480 МПа, что меньше на 28,8 %.

Выводы

1. Предложен метод штамповки листовых заготовок, позволяющий формировать из углепластиков на основе ПЭЭК силовые элементы сложной конфигурации. По сравнению с традиционными методами горячего прессования и автоклавного формования предложенный метод обеспечивает существенное снижение затрат энергии на процесс формирования, так как не требует полного перехода связующего в жидкое состояние. Время процесса, начиная от размещения заготовки в прессе и заканчивая извлечением готового кронштейна, составило 7,5 ч против 12...24 ч при автоклавном формовании (экономия времени 31...63 %). Формообразующая оснастка нагревается до уровня, превышающего температуру размягчения ПЭЭК.

2. По результатам серии экспериментов установлено, что для выбранных значений давления и времени выдержки рациональная температура штамповки составляет 270 °С.

3. Исследование микроструктуры образцов кронштейнов показало, что штамповка не оказывает негативного влияния на целостность заготовки и обеспечивает нужный уровень деформации для получения изделия с требуемыми геометрическими характеристиками, а изучение физико-механических характеристик выявило высокую прочность полученных образцов.

4. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию всех технологических параметров для получения высококачественных изделий с оптимальными свойствами, а также установление ограничений на радиусы кривизны получаемых изделий. Также будут рассмотрены вопросы математического моделирования процессов, происходящих при прессовании заготовок из углепластика.

Литература

- [1] Буланов И.М., Воробей В.В. *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 513 с.
- [2] Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов. *Российский химический журнал*, 2010, т. 54, № 1, с. 34–40.
- [3] Ноздрин Л.В., Короткова В.И., Бейдер Э.Я. Термопластичные полимеры для конструкционных композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*, 1991, № 1, с. 9–21.

- [4] Саламов А.Х., Микитаев А.К., Беев А.А. и др. Полиэфирэфиркетоны (ПЭЭК) как представители ароматических полиариленэфиркетонов. *Фундаментальные исследования*, 2016, № 1–1, с. 63–66.
- [5] Буслович Д.Г., Панин С.В. Механические и трибологические свойства антифрикционных композитов на основе ПЭЭК, полученных методом горячего прессования и 3D-печати. *Техника и технологии машиностроения. Мат. X Межд. науч.-тех. конф.* Омск, ОмГТУ, 2021, с. 33–39.
- [6] Sudhin A.U., Remanan M., Ajeesh G. et al. Comparison of properties of carbon fiber reinforced thermoplastic and thermosetting composites for aerospace applications. *Mater. Today: Proc.*, 2020, vol. 24–2, pp. 453–462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.297>
- [7] Иванов М.С., Сагомонова В.А., Морозова В.С. Отечественный термопластичный углеродный пластик на основе полиэфирэфиркетона. *Труды ВИАМ*, 2022, № 12, с. 49–62.
- [8] Кирилин Б.С., Сорокин А.Е., Бойчук А.С. Углеродный пластик на основе полиэфирэфиркетона. *Труды ВИАМ*, 2020, № 4-5, с. 22–31, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-45-22-31>
- [9] Li T., Song Z., Yang X. et al. Influence of processing parameters on the mechanical properties of peek plates by hot compression molding. *Materials*, 2022, vol. 16, no. 1, art. 36, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16010036>
- [10] Lystrup A., Andersen T.L. Autoclave consolidation of fibre composites with a high temperature thermoplastic matrix. *J. Mater. Process. Technol.*, 1998, vol. 77, no. 1-3, pp. 80–85, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00398-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00398-1)
- [11] Gomer A., Zou W., Grigat N. et al. Fabrication of fiber reinforced plastics by ultrasonic welding. *J. Compos. Sci.*, 2018, vol. 2, no. 3, art. 56, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs2030056>
- [12] Bigg D.M., Preston J.R. Stamping of thermoplastic matrix composites. *Polym. Compos.*, 1989, vol. 10, no. 4, pp. 261–268, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.750100409>
- [13] Гуреньков В.М., Чеботарев В.П., Прудскова Т.Н. и др. Способ получения полиэфирэфиркетона. Патент РФ 2673242. Заявл. 37.06.2018, опубл. 23.11.2008.
- [14] Гуреньков В.М., Горшков В.О., Чеботарев В.П. и др. Сравнительный анализ свойств полиэфирэфиркетона отечественного и зарубежного производства. *Авиационные материалы и технологии*, 2019, № 3, с. 41–47, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-3-41-47>
- [15] Панин С.В., Ань Н.Д., Корниенко Л.А. и др. Экструдированные антифрикционные композиты на основе полиэфирэфиркетона для аддитивных технологий производства. *Химия и химическая технология в XXI веке. Мат. XIX Межд. науч.-практ. конф. им. профессора Л.П. Кулева*. Томск, ТПУ, 2018, с. 536–537.
- [16] Морозова В.С., Иванов М.С., Шестаков А.М., Павлюкович Н.Г. Влияние текучести расплава полиэфирэфиркетона на характеристики углеродного пластика на его основе. *Труды ВИАМ*, 2024, № 1, с. 44–51.
- [17] Богущкий В.Б., Шрон Л.Б. К вопросу о применении показателя текучести расплава при переработке полимеров. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*, 2021, т. 7, № 2, с. 22–29.
- [18] Адаменко Н.А., Казуров А.В., Зерщиков К.Ю. и др. Исследование влияния наполнителя на термомеханические свойства полиэфирэфиркетона. *Известия ВолгГТУ*, 2010, № 4, с. 52–54.
- [19] Седакова Е.Б., Козырев Ю.П., Бураков И.С. Влияние фрикционного нагрева на диапазон рабочих нагрузок полимерных композитов. *Неделя науки СПбПУ. Мат. науч. конф. с межд. участием Т. 2*. Санкт-Петербург, СПбПУ, с. 156–158.
- [20] Arquier R., Piropoulos I., Régnier G. et al. Consolidation of continuous-carbon-fiber-reinforced PAEK composites: a review. *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 32, art. 104036, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104036>

References

- [1] Bulanov I.M., Vorobey V.V. *Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Technology of rocket and aerospace structures from composite materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1998. 513 p. (In Russ.).

- [2] Petrova G.N., Beyder E.Ya. Construction materials based on reinforced thermoplastics. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 34–40. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. J. Gen. Chem.*, 2011, vol. 81, no. 5, pp. 1001–1007, doi: <https://doi.org/10.1134/S1070363211050318>)
- [3] Nozdrina L.V., Korotkova V.I., Beyder E.Ya. Thermoplastic polymers for structural composite materials. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 1991, no. 1, pp. 9–21. (In Russ.).
- [4] Salamov A.Kh., Mikitaev A.K., Beev A.A. et al. Polyetheretherketone (peek) as a representative of aromatic polyarylene. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, no. 1–1, pp. 63–66. (In Russ.).
- [5] Buslovich D.G., Panin S.V. [Mechanical and tribological properties of antifriction composites based on PEEK obtained by hot pressing and 3D printing]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya. Mat. X Mezhd. nauch.-tekh. konf.* [Engineering and Technology of Mechanical Engineering. Proc. X. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Omsk, OmGTU Publ., 2021, pp. 33–39. (In Russ.).
- [6] Sudhin A.U., Remanan M., Ajeesh G. et al. Comparison of properties of carbon fiber reinforced thermoplastic and thermosetting composites for aerospace applications. *Mater. Today: Proc.*, 2020, vol. 24–2, pp. 453–462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.297>
- [7] Ivanov M.S., Sagomonova V.A., Morozova V.S. Domestic thermoplastic carbon plastic based on polyetheretherketone. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2022, no. 12, pp. 49–62. (In Russ.).
- [8] Kirin B.S., Sorokin A.E., Boychuk A.S. Carbon fiber reinforced thermoplastic on the basis of polyetheretherketones. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2020, no. 4–5, pp. 22–31, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-45-22-31> (in Russ.).
- [9] Li T., Song Z., Yang X. et al. Influence of processing parameters on the mechanical properties of peek plates by hot compression molding. *Materials*, 2022, vol. 16, no. 1, art. 36, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16010036>
- [10] Lystrup A., Andersen T.L. Autoclave consolidation of fibre composites with a high temperature thermoplastic matrix. *J. Mater. Process. Technol.*, 1998, vol. 77, no. 1–3, pp. 80–85, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00398-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00398-1)
- [11] Gomer A., Zou W., Grigat N. et al. Fabrication of fiber reinforced plastics by ultrasonic welding. *J. Compos. Sci.*, 2018, vol. 2, no. 3, art. 56, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs2030056>
- [12] Bigg D.M., Preston J.R. Stamping of thermoplastic matrix composites. *Polym. Compos.*, 1989, vol. 10, no. 4, pp. 261–268, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.750100409>
- [13] Gurenkov V.M., Chebotarev V.P., Prudskova T.N. et al. *Sposob polucheniya poliefirefirketona* [Method of producing polyetheretherketone]. Patent RU 2673242. Appl. 37.06.2018, publ. 23.11.2008. (In Russ.).
- [14] Gurenkov V.M., Gorshkov V.O., Chebotarev V.P. et al. Comparative analysis of properties of polyetheretherketone of domestic and foreign production. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2019, no. 3, pp. 41–47, doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-3-41-47> (in Russ.).
- [15] Panin S.V., An N.D., Kornienko L.A. et al. [Extrudable antifriction composites based on polyetheretherketone for additive manufacturing technologies]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke. Mat. XIX Mezhd. nauch.-prakt. konf. im. professora L.P. Kuleva* [Chemistry and chemical technology in the XXI century. Proc. XIX Int. Sci.-Pract. Conf. n.a. L.P. Kulev]. Tomsk, TPU Publ., 2018, pp. 536–537. (In Russ.).
- [16] Morozova V.S., Ivanov M.S., Shestakov A.M., Pavlyukovich N.G. The influence of the melt flow of polyetheretherketone on the characteristics of carbon fiber plastic based on it. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2024, no. 1, pp. 44–51. (In Russ.).
- [17] Bogutskiy V.B., Shron L.B. On the application of the melt flow index in polymer processing. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* [Journal of Science and Education of North-West Russia], 2021, vol. 7, no. 2, pp. 22–29. (In Russ.).
- [18] Adamenko N.A., Kazurov A.V., Zershchikov K.Yu. et al. Investigation of filler influence on thermomechanical properties of polyether ether ketone. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2010, no. 4, pp. 52–54. (In Russ.).

- [19] Sedakova E.B., Kozyrev Yu.P., Burakov I.S. [Influence of frictional heating on the range of working loads of polymer composites]. *Nedelya nauki SPbPU. Mat. nauch. konf. s mezhd. uchastiem* T. 2 [SPbPU Week of Science. Proc. Sci. Conf with Int. Anticipation. Vol. 2]. Sankt-Petersburg, SPbPU Publ., pp. 156–158. (In Russ.).
- [20] Arquier R., Iliopoulos I., Régnier G. et al. Consolidation of continuous-carbon-fiber-reinforced PAEK composites: a review. *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 32, art. 104036, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104036>

Статья поступила в редакцию 04.12.2024

Информация об авторах

МИХАЙЛОВСКИЙ Константин Валерьевич — начальник отдела. АО «Композит» (141070, Королёв, Российская Федерация, ул. Пионерская, д. 4); кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: info@kompozit-mv.ru).

ИЛЛАРИОНОВ Артем Сергеевич — инженер-технолог. АО «Композит» (141070, Королёв, Российская Федерация, ул. Пионерская, д. 4); аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: info@kompozit-mv.ru).

КАЛЕДИН Алексей Владимирович — инженер-технолог. АО «Композит» (141070, Королёв, Российская Федерация, ул. Пионерская, д. 4); аспирант. ФГБУН Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (142432, Черноголовка, Российская Федерация, ул. Академика Осипьяна, д. 2, e-mail: info@kompozit-mv.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Михайловский К.В., Илларионов А.С., Каледин А.В. Формование элемента конструкции из углепластика на основе полиэфирэфиркетона методом горячей штамповки листовых заготовок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 9, с. 53–61.

Please cite this article in English as:

Mikhaylovskiy K.V., Illarionov A.S., Kaledin A.V. Molding the PEEK carbon fiber reinforced plastic structural elements by hot stamping the sheet blanks. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 9, pp. 53–61.

Information about the authors

MIKHAYLOVSKIY Konstantin Valerievich — Head of the Department. Kompozit JSC (141070, 141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4); Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket and Space Composite Structures. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block, 1, e-mail: info@kompozit-mv.ru).

ILLARIONOV Artem Sergeevich — Manufacturing Engineer. Kompozit JSC (141070, 141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4); Postgraduate, Department of Rocket and Space Composite Structures. Baumann Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block. 1, e-mail: info@kompozit-mv.ru).

KALEDIN Aleksey Vladimirovich — Manufacturing Engineer. Kompozit JSC (141070, 141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Pionerskaya St., Bldg. 4); Postgraduate. Institute of Solid State Physics named after Yu.A. Osipyan (142432, Chernogolovka, Russian Federation, Akademika Osipyan, St. 2, e-mail: info@kompozit-mv.ru).