

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-50-62

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОЛИМЕРНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В КОНСТРУКЦИИ ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЕТА

Ю.А. Гусев¹, М.Н. Усачева¹, И.В. Парахин¹, А.В. Коваленко¹, А.Н. Васюков¹

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

Аннотация. Приведен обзор современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) и полимерных наполнителей, применяемых в лопастях вертолетов в РФ и мире, а также история и перспективы их развития. Приведены основные требования к материалам вертолетных лопастей, примеры элементов лопастей, в которых используются ПКМ и полимерный наполнитель, основные схемы армирования и технологии изготовления. Проведен анализ современных углеродных наполнителей, рассмотрены основные отличия среднемодульных и высокопрочных углеродных волокон.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, полимерный наполнитель, лопасть вертолета, препреги, изделия авиационного назначения, углепластик, стеклопластик

Для цитирования: Гусев Ю.А., Усачева М.Н., Парахин И.В., Коваленко А.В., Васюков А.Н. Применение композиционных материалов и полимерного наполнителя в конструкции лопасти вертолета // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-50-62.

Scientific article

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS AND POLYMER FILLER IN A HELICOPTER BLADE DESIGN

Yu.A. Gusev¹, M.N. Usacheva¹, I.V. Parakhin¹, A.V. Kovalenko¹, A.N. Vasyukov¹

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

Abstract. This article presents the overview of modern polymer composite materials and polymer fillers used in helicopter blades in Russia and worldwide, as well as the history and prospects for their development. The main requirements for helicopter blade materials, examples of blade elements using PCM and polymer filler, basic reinforcement schemes and manufacturing technologies are presented. The analysis of modern carbon fillers is carried out, and the main differences between medium-modulus and high-strength carbon fibers are considered.

Keywords: polymer composite materials, polymer filler, helicopter blade, prepregs, aviation products, carbon fiber reinforced plastic, fiberglass reinforced plastic

For citation: Gusev Yu.A., Usacheva M.N., Parakhin I.V., Kovalenko A.V., Vasyukov A.N. Application of composite materials and polymer filler in a helicopter blade design. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-50-62.

Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в конструкциях вертолетной техники. В частности, из ПКМ изготавливают элементы интерьера, обтекатели двигателя, панели фюзеляжа, двери и приборные панели, элементы молниезащиты, но наиболее ответственными являются конструкции несущей системы вертолета.

Конструкция и производство лопастей несущего винта вертолета – объект пристального внимания и инноваций, поскольку именно лопасти определяют летные возможности и безопасность вертолета. Сложная картина движения лопасти зависит от ее динамических характеристик, крепления к втулке, режима полета и других переменных. Поиск оптимальных решений в этой области требует интенсивных исследований и внедрения новейших материаловедческих технологий [1–4].

На протяжении всей истории вертолетостроения (от первых моделей до современных) для изготовления силовых элементов лопасти применяли разнообразные материалы: дерево, коррозионностойкие легированные стали, алюминиевые и титановые сплавы. В последние десятилетия широкое распространение получили лопасти из композитов. В отечественных и большинстве зарубежных средних и тяжелых вертолетов лонжероны лопастей выполняются с D-образным сечением. Такая форма оптимизирует крутильную жесткость при минимальной массе лопасти. Широкое распространение получают также лопасти интегрированной безлонжеронной конструкции [5].

Основные преимущества композитных лопастей связаны с их повышенной удельной прочностью (соотношение прочности к плотности материала). Важный фактор также – особенность разрушения армированных композитов. В отличие от металлов, в которых микротрещина обычно растет лавинообразно, в композитах локальное повреждение (разрыв волокна) не вызывает мгновенного разрушения. Связующее (матрица) перераспределяет напряжения на соседние волокна, локализуя дефект в микрообъеме, что существенно повышает усталостную долговечность.

Применение сферопластиковых наполнителей в сэндвич-конструкциях из стекло- или углепластика в условиях с предельными влажностно-температурными, электро- и теплофизическими свойствами, а также физико-механическими характеристиками позволяет упрочнить сотовые элементы. Сферопластики представляют собой в основном композиции холодного отверждения или подвергающиеся эндотермическому воздействию, что позволяет за один технологический этап проводить работы по повышению прочности, жесткости в зонах установки крепежа, для заделки торцевых участков, заполнения различных полостей, закрепления электротехнических кабелей, жгутов провода противообледенительной системы (ПОС) и т. п. Такие характеристики сферопластиков, как прочность и низкое набухание в воде, позволяют распределять действующие на деталь нагрузки с подтверждением требуемого уровня свойств. Наполнители из сферопластика можно применять для защиты от химических, коррозионных, механических и других видов воздействий [6].

Применяемая в настоящее время в конструкциях лопастей несущего и рулевого винтов вертолетной техники мастика характеризуется повышенной коррозионной агрессивностью к металлам и низкой технологичностью. Взамен мастики требуется создание материала, который будет обладать необходимым уровнем механических свойств, небольшой плотностью, технологичностью и сниженной коррозионной агрессивностью.

В данной статье приведен обзор современных ПКМ и полимерных наполнителей, применяемых в лопастях вертолетов в РФ и мире, а также перспективы их развития.

Результаты и обсуждение

Вертолет – это винтокрылый летательный аппарат, где лопасти являются частью крупной динамической системы, называемой ротором, которая предназначена для обеспечения подъемной силы, тяги и управления [7]. Безопасность вертолета в значительной степени зависит от ротора и лопастей. С точки зрения конструкции лопасть представляет собой непрерывный несущий элемент, у которого четко определены направления главных осей напряжения. Наибольшее напряжение в лопасти возникает от действия центробежных сил и направлено вдоль ее длины [8]. Во время полета лопасти испытывают сжимающие циклические нагрузки.

В вертолетостроении все чаще применяют композиционные материалы для проектирования более легких, тихих и безопасных летательных аппаратов. Например, вертолеты Eurocopter EC175 фирмы Airbus, Sikorsky S-76D фирмы Sikorsky полностью оснащены композитными лопастями несущего винта, вертолет UH-60M Blackhawk фирмы Sikorsky имеет широкохордную лопасть несущего винта полностью из ПКМ, конвертоплан V-22 Osprey фирм Bell Helicopter и Boeing Rotorcraft Systems сделан почти полностью из композиционных материалов (угле- и стеклопластиков на основе эпоксидных связующих) [9]. Для лопастей вертолета Airbus H145 фирмы Airbus Helicopters используют стеклянные ткани для несущего винта. Материал обеспечивает хорошую прочность и геометрическую форму длинных лопастей нового вертолета [10]. У вертолета S-64 Skycrane фирмы Erickson Inc. металлические лопасти заменены на композиционные из угле- и стеклопластиков [11].

Раньше вертолеты, например, такие как Bell 47 фирмы Bell Aircraft, оснащались лопастями несущего винта из дерева. Прочность и гибкость древесины сделали ее идеальным материалом для первых конструкций лопастей. Однако древесина легко повреждалась птицами, пылью, камнями и осадками, что приводило к сильным вибрациям из-за разбалансировки несущей системы. По мере развития отрасли лопасти стали изготавливать из металлов. Использование металлов решило некоторые проблемы, присущие деревянным лопастям, но возникли другие. Деформационное разрушение металлических конструкций привело к тому, что срок службы лопастей несущих винтов стал ограниченным. До этого считалось, что деревянные лопасти могут служить очень долго [12]. Таким образом, металлы заменили древесину, а теперь композиционные материалы заменяют металлы [13].

Современные лопасти несущего винта вертолета изготавливают из различных материалов, включая титан, ПКМ на основе углеродных и стеклянных наполнителей, сталь и алюминий [12].

Следует отметить, что конструкционные металлы (алюминий, сталь и титан) ограничены по величине значений удельной прочности и жесткости. Титан обладает наилучшими механическими характеристиками, но его применение ограничено высокой стоимостью и труднодоступностью. Композиционные материалы на основе эпоксидного связующего, стекло- и углеволокна, а также арамидного волокна имеют более высокие значения удельной прочности и жесткости, что делает их более выгодными и подходящими для применения в конструкции лопастей. По усталостным характеристикам ПКМ также превосходят металлы, что обеспечивает более длительный срок службы лопастей [14].

Использование препрегов для изготовления лопасти предпочтительнее, чем контактное формование, так как качество изготавливаемой детали можно лучше контролировать, хотя препрег стоит дороже [15]. Кроме ручной выкладки в мире широко используются автоматизированные методы – Automated Tape Laying (ATL) и Automated Fiber Placement (AFP), применение которых позволяет существенно уменьшить трудоемкость производства и увеличить точность выкладки изделия [16, 17].

В России на раннем этапе развития авиастроения лопасти также выполнялись из дерева, позже их стали изготавливать из стали (для вертолетов Ми-6, Ми-10, Ми-26) и дюралюминия (для вертолетов Ми-2, Ми-24Д, Ми-24В, Ми-24П и др.). Первые лопасти из ПКМ разработаны в 60-е гг. XX в. для вертолета Ка-18, в начале 1970-х гг. лопасти несущего винта из ПКМ созданы для вертолета Ка-26. Несколько позже композитные лопасти для несущих винтов легких и средних вертолетов и рулевых винтов разработаны для вертолетов семейства «Ми». Изначально в конструкции лопастей использовали стекло- и углепластики на основе связующих ЭДТ-10П и 5-211Б растворного типа, которые позволяли обеспечить повышенный ресурс лопастей (по сравнению с металлическими) [18, 19].

В настоящее время в РФ для производства лопастей вертолетов активно осваивают материалы на основе связующего расплавного типа марки ВСП-3М. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ с использованием данного связующего разработана широкая серия материалов на основе высокопрочных углеродных волокон, стекло- и углеволокон, стекловинтов, стеклянных и углеродных тканей [20]. Препреги обладают жизнеспособностью не менее 90 сут при температуре 20 °С и контролируемой текучестью, а ПКМ на их основе – высоким уровнем физико-механических свойств и термовлагодостойкостью, что позволяет использовать их в сложных климатических условиях. Эти материалы позволили обеспечить более высокие эксплуатационные характеристики и еще больше увеличить ресурс работы лопастей [18, 21, 22].

Тенденции расширения областей применения сферопластиков на основе новых высокопрочных связующих в многослойных композитах с обшивками из угле- или стеклопластика, демонстрирующих высокие физико-механические, диэлектрические и теплофизические свойства в различных условиях эксплуатации, включая воздействие высоких температур и повышенной влажности, описаны в научно-технических источниках [23–25].

В АО «НЦВ Миль и Камов» совместно с ПАО «Роствертол» и ПАО «КВЗ» активно осваивают новый класс материалов на основе расплавного связующего, а также внедряют в производство различные технологии изготовления лопастей из ПКМ. Лопасти проектируют с использованием методов компьютерного моделирования, изготавливают методами автоматизированной спиральной намотки, ручной и автоматизированной выкладки, а также обрабатывают технологии формования лопасти целиком в специальной пресс-форме, проводят испытания на усталость и методами неразрушающего контроля [26].

Современная лопасть вертолета с применением ПКМ представляет собой многослойную композицию, как правило, включающую:

- лонжерон – основную силовую конструкцию лопасти, которая выполняется из высокопрочного высокомодульного стеклопластика, гибридного ПКМ или углепластика с основным направлением волокон вдоль длины лопасти, а также с укладками $[\pm 45, 0, 90]$; $[0, 90, 90, 0]$; $[0, \pm 45, 0]$; $[60, 0, 60]$. Для противостояния скручиванию лонжерон может быть армирован слоями с укладкой $[\pm 45]$;

- обшивку с многослойной укладкой в разных направлениях $[\pm 45; 0; 90]$ для восприятия крутящих и изгибающих нагрузок;

- наполнитель (например, на основе арамидной бумаги, алюминия или пенопласта), обеспечивающий жесткость при минимальной массе;

- элементы молниезащиты (медные сетки, проводящие ленты);

- встроенные системы подогрева для предотвращения обледенения, которые содержат ПОС лопастей несущего и хвостового винта, систему обогрева лобовых стекол вертолета, обтекателей воздухозаборников и входных устройств двигателя. Противообледенительная система винтов и стекол основана на электротепловом принципе действия, воздухозаборников двигателей – на воздушно-тепловом, несущего или рулевого винта

с полимерным наполнителем – например, на основе токопроводящих жил, залитых заполнительной мастикой;

– титановые или композитные элементы крепления к втулке винта.

Такое сочетание позволяет не только оптимизировать массу, но и повысить устойчивость к усталостным разрушениям и вибрациям.

Большая часть объема лопасти состоит из сотового или пенопластового наполнителей (в некоторых частях лопасти – совместно с другими материалами) для обеспечения прочности и жесткости. Внедрение наполнителей существенно улучшило конструкцию лопасти и срок ее службы [12]. Передняя кромка защищена оковкой из коррозионностойкой стали или титанового сплава [27].

Один из вариантов конструкции лопасти приведен на рис. 1 [12].

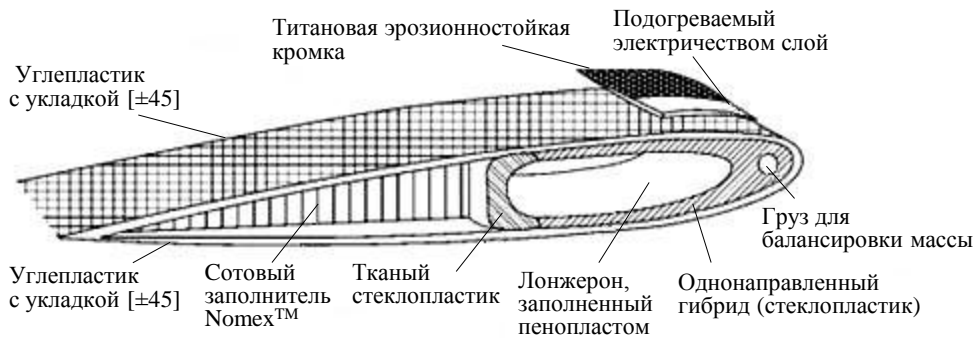


Рис. 1. Типовой вариант конструкции лопасти несущего винта вертолета

Существует также безлонжеронная конструкция лопасти [5, 26, 28], которая позволяет изготавливать ее за один технологический цикл, т. е. не требуется приклеивать отдельно обшивки и другие элементы. При такой схеме в качестве наполнителя используется предварительно сжатый на 2–5 % пенопласт, что позволяет создать необходимое давление на внутренние слои препрега для формирования ПКМ. Снаружи давление создается за счет смыкания пресс-формы (рис. 2).

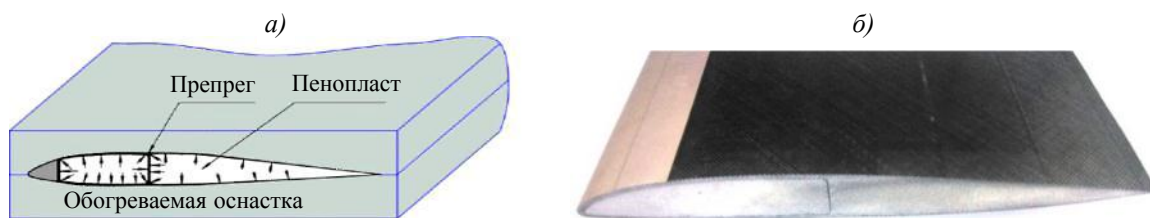


Рис. 2. Схема оснастки для формирования лопасти безлонжеронной конструкции (а) и фрагмент изготовленной лопасти (б)

Требования к лопастям отражают, как правило, требования ко всему летательному аппарату и могут быть сведены к следующему [29]:

- необходимо сочетание высокой удельной прочности и жесткости, а также высокое сопротивление усталости;
- важно снижать массу вертолета для увеличения полезной нагрузки и/или повышения летных характеристик;
- для обеспечения безопасности конструкции материалы должны иметь высокие запасы прочности;

- лопасти должны быть устойчивы к ударным нагрузкам – например, к столкновению с птицами;
- проявлять эрозионную стойкость – лопасти вращаются в воздухе с высокой скоростью, в результате чего частицы, содержащиеся в воздухе (пыль, песок и т. д.), являются абразивом. Эрозионное воздействие особенно сильно проявляется при взлете и посадке, когда потоки воздуха поднимают с земли частицы, поэтому для передних кромок лопастей следует использовать абразивостойкие материалы;
- коррозионностойкие материалы позволяют сократить расходы на техническое обслуживание и увеличить запас прочности для используемого материала;
- необходимо обеспечить надежную конструкцию при минимальных затратах, снизив стоимость за счет автоматизации процесса и сократив затраты на техническое обслуживание;
- повысить износостойкость – срок службы лопастей существенно влияет на эксплуатационные расходы, поэтому его необходимо увеличивать для экономической эффективности и сокращать затраты на обслуживание. Срок службы также сокращается из-за усталостного воздействия эрозии и коррозии;
- в конструкции должны быть предусмотрены молниезащита и противообледенительная защита. На рис. 3 и 4 приведены типовые схемы расположения нагревательной накладки и нагревательных элементов лопастей вертолетов.

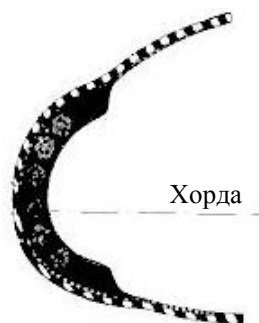


Рис. 3. Нагревательная накладка лопасти несущего винта, состоящая из слоев стекло- или углеткани, жил силовых проводов нагревательного элемента и заполнителя

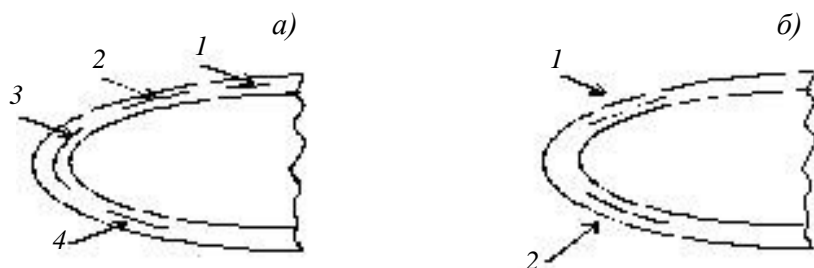


Рис. 4. Схема размещения секций (1–4) нагревательных элементов несущего (а) и рулевого (б) винтов (схема из открытых источников)

Применяемый в настоящее время в конструкции ПОС герметизирующий наполнитель на основе полисульфидного олигомера и эпоксидной смолы способен вызывать образование коррозионных поражений на поверхности металлического нагревательного элемента, а также сопряженных металлических деталей, находящихся в контакте с ним. Данные образования могут являться центрами развития коррозии, а вследствие того, что металлические детали контактируют также с конструкциями из углепластика, может наблюдаться интенсивное развитие коррозионных поражений.

Использование полимерного заполнителя на основе микросфер из-за специфики его состава и свойств позволит снизить концентрационные напряжения и коррозионное воздействие. Такой заполнитель обладает химической стойкостью и инертностью, пониженной пожароопасностью, повышенной стойкостью к растрескиванию, улучшенным сопротивлением материала разрушению под влиянием атмосферных воздействий и влаги [30]. Сниженная коррозионная агрессивность – один из основных параметров из-за непосредственного контакта материала с системой ПОС. Плотность материала должна находиться в конкретном диапазоне значений для создания однородности конструкции и необходимых аэродинамических характеристик лопастей. Материал должен обеспечивать возможность изготовления накладки с ПОС за единый технологический цикл и минимизировать количество дефектов, возникающих во время формирования изделия. Так, высокое сопротивление наполненных материалов разрушению, обеспечивающее прочность деталей при различных силовых воздействиях и снижение коррозии за счет отсутствия серных групп полисульфидного каучука и нейтральности среды, должно значительно увеличить регламентное время налета несущих и рулевых лопастей.

Внедрение современных материалов в летательные аппараты с системой ПОС обеспечит поддержание регулярного авиационного сообщения, в том числе в регионах с суровым климатом: Новосибирской области, Красноярском и Камчатском краях, Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском автономных округах.

Коррозия – это серьезная проблема для металлических конструкций, особенно при эксплуатации вертолетов в морском климате. Соленая вода агрессивна к металлам, в отличие от композиционных материалов, однако для последних требуется использовать водо- и влагостойкие связующие [29]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана серия препрегов на основе тепловлагостойких связующих [31, 32].

Однако ПКМ, в отличие от металлов, не имеют высокой устойчивости к эрозионному воздействию, так как являются более «мягкими» материалами. Поэтому передние кромки лопастей, уязвимые для эрозионного воздействия, можно покрыть металлической кромкой, что обеспечит требуемую защиту [13].

Один из способов решения данной проблемы описан в патенте фирмы Bell Helicopter [33] на лопасти вертолетов из ПКМ, которые обладают рядом особенностей, повышающих их надежность с одновременным уменьшением массы. В данном изобретении также описана уникальная технология выкладки волокон, которая позволяет максимально повысить сопротивление усталости конструкции.

В лопастях для перспективных вертолетов потребуются еще более высокие упруго-прочностные характеристики используемых в них материалов [34], в том числе с повышенной прочностью и жесткостью для увеличения порога флаттера и восприятия увеличенных центробежных и крутильных нагрузок.

Увеличения упруго-прочностных характеристик ПКМ можно добиться, используя перспективные наполнители. Анализ различных типов углеродных наполнителей, используемых в ПКМ, показал, что такими наполнителями могут являться среднемодульные или высокомодульные углеродные волокна и гибридные ПКМ с использованием таких волокон, так как они обладают оптимальным соотношением значений прочности и модуля упругости.

Соотношение прочности и модуля упругости при растяжении для отечественных и зарубежных типов углеродных наполнителей показано на рис. 5.

Модуль упругости у среднемодульных углеродных волокон больше на 10–15 %, чем у высокопрочных волокон, а прочность, как правило, выше на 5–10 %.

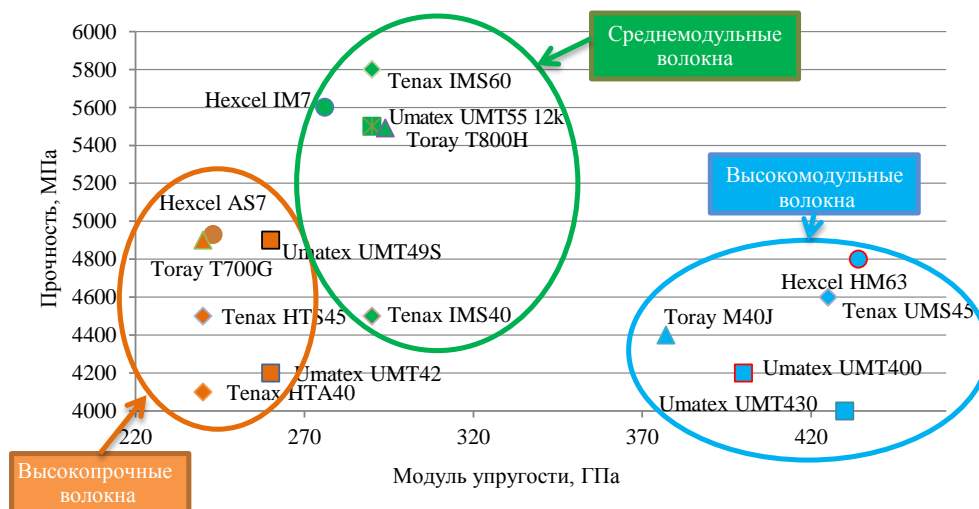


Рис. 5. Соотношение прочности и модуля упругости российских и зарубежных углеродных наполнителей

Среднемодульные углеродные волокна имеют также ряд преимуществ по сравнению с высокомодульными [34–36].

– Лучшая ударная прочность и устойчивость к повреждениям.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон обладают большей вязкостью разрушения, т. е. они менее хрупкие, чем ПКМ на основе высокомодульных волокон. Это критично для авиации, где возможны ударные нагрузки (птицы, обломки, посадка в пыльной среде). Для лопастей вертолетов важными характеристиками являются сопротивление микроповреждениям и способность материала не разрушаться мгновенно при сколах или ударах, что повышает безопасность полетов.

– Более высокая длительная прочность.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон демонстрируют лучшую длительную прочность при циклическом нагружении, что критично для вертолетных лопастей, находящихся в условиях постоянных вибраций и переменных изгибающих/центробежных нагрузок. Высокомодульные волокна более чувствительны к накоплению микротрещин в полимерной матрице и расслоению.

– Более высокая межслоевая прочность в композите за счет более сбалансированной жесткости.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон обеспечивают лучшее сцепление между слоями и с полимерной матрицей, что снижает вероятность расслоения под нагрузкой.

– Лучшие технологические характеристики.

Полимерные композиционные материалы на основе среднемодульных волокон менее чувствительны к термическим и механическим дефектам при обработке: они проще в резке, укладке, автоклавной обработке. Высокомодульные волокна могут быть хрупкими при укладке, трескаться при радиусных изгибах, что усложняет производство лопастей сложной аэродинамической формы.

– Стоимость и доступность.

Среднемодульные волокна значительно дешевле высокомодульных, особенно в массовом производстве. Высокомодульные волокна (например, фирм Mitsubishi K13D2U и Toray M60J) в 2–5 раз дороже и чаще применяются только в космических летательных аппаратах, спутниках, радиопрозрачных антеннах и специализированных военных изделиях.

– Оптимальный баланс «жесткость – масса – прочность».

В конструкции лопастей критичен не максимум жесткости, а оптимальное соотношение массы, прочности и сопротивления вибрациям. Избыточная жесткость высокомодульных волокон может привести к локальным перегрузкам и снижению виброустойчивости конструкции.

Таким образом, среднемодульные углеродные волокна (например, Toray T800H, Hexcel IM7, Umatex UMT55S) – это наиболее рациональный выбор для большинства авиационных изделий, в том числе при изготовлении лопастей вертолета. Они обеспечивают:

- высокую прочность и достаточную жесткость;
- долговечность в условиях циклических нагрузок;
- хорошую технологичность;
- снижение риска хрупкого разрушения;
- приемлемую стоимость.

Высокомодульные волокна применяются точно, например, в элементах с повышенной жесткостью и строго заданными деформациями (жесткие лонжероны антенн, космические панели), но в лопастях вертолетов они практически не используются из-за вышеописанных рисков и избыточной жесткости.

Гибридные композиты на основе стеклянных и углеродных волокон представляют собой уникальные материалы, в которых синергия свойств превосходит ограничения по отдельным волокнам. Путем оптимизации соотношения компонентов, схем распределения (послойное/внутрислойное смешение) и методов переработки можно достичь баланса механических характеристик, функциональности и экономической эффективности [32, 37]. В статье [38] показано, что гибридизация внутри одного слоя материала обеспечивает более высокую прочность при растяжении и сжатии, чем послойная гибридизация.

Заключения

Использование ПКМ в конструкции лопастей вертолетов позволяет достичь значительного повышения прочностных и аэродинамических характеристик при одновременном снижении массы. Углепластики обеспечивают высокую жесткость и прочность, стеклопластики повышают ударную вязкость и снижают себестоимость, препреги позволяют реализовать сложную геометрическую форму и контролировать качество на этапе изготовления, а полимерные наполнители на основе микросфер повышают прочность и жесткость панелей сотовых конструкций в зонах установки крепежа, а также служат для заделки торцевых участков, заполнения различных полостей, закрепления электротехнических кабелей и жгутов провода ПОС. Внедрение ПКМ способствует росту ресурса лопастей, уменьшению эксплуатационных затрат и повышению безопасности полетов.

В ближайшем будущем ожидается дальнейшее развитие технологий производства композитных лопастей, включая компьютерное моделирование конструкций, автоматизированные методы выкладки, формование интегрированной конструкции за один технологический цикл, а также использование новых типов наполнителей и полимерных наполнителей с пониженной коррозионной агрессивностью.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Гунаев Г.М., Ильченко С.И. и др. Конструкционные углепластики с повышенной проводимостью // *Авиационные материалы и технологии*. 2004. № 2. С. 25–36.
2. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.

3. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.
4. Начаркина А.В., Валуева М.И., Зеленина И.В., Шошева А.Л. Высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
5. Безлонжеронная лопасть вертолета из полимерных композиционных материалов и способ ее изготовления: пат. WO2015/102521 A1 Рос. Федерация; заявл. 30.12.14; опубл. 09.07.15.
6. Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Соколов И.И., Тундайкин К.О. Сферопластик с регулируемой вязкостью для заполнения участков сотовых конструкций // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
7. Moir I., Seabridge A.G. Aircraft systems. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1992. 415 p.
8. Case J., Chilver A.H., Ross C.T.F. Strength of materials and structures. London: Arnold, 1999. 346 p.
9. Helicopters // Hexcel: офиц. сайт. URL: <https://www.hexcel.com/Markets/Space-and-Defense/Helicopters> (дата обращения: 22.07.2025).
10. SGL Carbon delivers composite materials for Airbus Helicopter rotor blades // *Composite-World.com*. URL: <https://www.compositesworld.com/news/sgl-carbon-delivers-composite-materials-for-airbus-helicopter-rotor-blades> (дата обращения: 22.07.2025).
11. Erickson S-64 Air Crane full composite main rotor blades // Jec: офиц. сайт. URL: <https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/erickson-s-64-air-crane-full-composite-main-rotor-blades> (дата обращения: 22.07.2025).
12. What are Helicopter Blades Made of? // Pilot Teacher: офиц. сайт. URL: <https://www.pilotteacher.com/what-is-a-helicopter-blade-made-of-it-used-to-be-wood/> (дата обращения: 22.07.2025).
13. Edwards K.L., Davenport C. Materials for rotationally dynamic components: rationale for higher performance rotor-blade design // *Materials and Design*. 2006. Vol. 27. P. 31–35.
14. Hancox N.L., Mayer R.M. Design data for reinforced plastics: a guide for engineers and designer. London: Chapman & Hall, 1994. 264 p.
15. Strong A.B. Manufacturing // *International encyclopedia of composites* / ed. S.M. Lee. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1990. P. 102–126.
16. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
17. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
18. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 2. С. 16–18.
19. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С. и др. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. 230 с.
20. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
21. Баранников А.А., Постнова М.В., Крашенинникова Е.В., Васюков А.Н. Применение новых технологий в производстве лопастей несущего винта вертолета // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.

22. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Хрульков А.В. Новое поколение материалов и технологий для изготовления лонжеронов лопастей вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S2. С. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
23. Соколов И.И. Сферопластики на основе терморезактивных связующих для изделий авиационной техники: дис. ...канд. техн. наук. М., 2013. 127 с.
24. Кириллов В.Н., Вапиров Ю.М., Дрозд Е.А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 4. С. 31–38.
25. Соколов И.И., Минаков В.Т. Сферопластики авиационного назначения на основе эпоксидных клеев и дисперсных наполнителей // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2012. № 5. С. 22–26.
26. Дорошенко Н.И. Применение ПКМ в конструкции лопастей винтов вертолетов // *Полимерные композиционные материалы для авиакосмической отрасли: мат. Всерос. науч.-техн. конф.* (6 дек. 2019 г., г. Москва). М.: ВИАМ, 2019. С. 23–41.
27. Pascal F., Navarro P., Marguet S., Ferrero J.-F. Study of medium velocity impacts on the lower surface of helicopter blades // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 88. P. 93–100.
28. Лопасть несущего винта вертолета и способ изготовления лопасти из композиционного материала: пат. RU 2541574 С1 Рос. Федерация; заявл. 25.12.13; опубл. 20.02.15.
29. Middleton D.H. *Composite materials in aircraft structures*. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1990. 530 p.
30. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
31. Колокольцева Т.В., Попов Ю.О., Ланцов И.А., Гусев Ю.А. Препрег и углепластик на основе связующего ВСР-3М и углеродной ткани для применения в составе конструкций лопастей рулевого винта вертолетов // *Труды ВИАМ*. 2023. № 11 (129). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-56-65.
32. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Беспалова Л.С., Хрульков А.В., Коган Д.И. Стеклопластик ВПС-31 и гибридный композиционный материал ВКГ-5 из однонаправленных препрегов на основе расплавленного связующего и жгутовых угле-, стеклонаполнителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2006. № 1. С. 10–20.
33. Composite rotor blade and method of manufacture: pat. US 6659722 B2 USA; appl. 07.11.02; publ. 09.12.03.
34. Montagnier O. Optimisation of hybrid high-modulus/high-strength carbon fiber reinforced plastic composite drive shafts // *Materials & Design*. 2013. Vol. 46. P. 88–100.
35. Morgan P. *Carbon Fibers and Their Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2005. 1200 p.
36. High Modulus Carbon Fiber: Modulus And Composite Explained // *Baetro Machining Blog*. URL: <https://baetro-machining.com/blog/high-modulus-carbon-fiber> (дата обращения: 24.07.2025).
37. Gupta M.K., Srivastava R.K. Mechanical Properties of Hybrid Fibres Reinforced Polymer Composite: A Review // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2015. Vol. 55 (6). P. 1–66.
38. Ikbal M.H., Ahmed A., Qingtao W. et al. Hybrid composites made of unidirectional T600S carbon and E-glass fabrics under quasi-static loading // *Journal of Industrial Textiles*. 2017. Vol. 46 (7). P. 1–25.

References

1. Kablov E.N., Gunyaev G.M., Ilchenko S.I. et al. Structural carbon fiber reinforced plastics with increased conductivity. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 25–36.
2. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
3. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 24, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

4. Nacharkina A.V., Valueva M.I., Zelenina I.V., Shosheva A.L. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binders. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 22, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
5. *Sparless helicopter blade made of polymer composite materials and its manufacturing method*: pat. WO2015/102521 A1 Rus. Federation; appl. 30.12.14; publ. 09.07.15.
6. Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Sokolov I.I., Tundaykin K.O. Spheroplastic with adjustable viscosity for filling sections of honeycomb structures. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 30, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
7. Moir I., Seabridge A.G. *Aircraft systems*. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1992, 415 p.
8. Case J., Chilver A.H., Ross C.T.F. *Strength of materials and structures*. London: Arnold, 1999, 346 p.
9. Helicopters. *Hexcel*. Available at: <https://www.hexcel.com/Markets/Space-and-Defense/Helicopters> (accessed: July 22, 2025).
10. SGL Carbon delivers composite materials for Airbus Helicopter rotor blades. *CompositeWorld*. Available at: <https://www.compositesworld.com/news/sgl-carbon-delivers-composite-materials-for-airbus-helicopter-rotor-blades> (accessed: July 22, 2025).
11. Erickson S-64 Air Crane full composite main rotor blades. *Jec*. Available at: <https://www.jeccomposites.com/news/spotted-by-jec/erickson-s-64-air-crane-full-composite-main-rotor-blades> (accessed: July 22, 2025).
12. What are Helicopter Blades Made of? *Pilot Teacher*. Available at: <https://www.pilotteacher.com/what-is-a-helicopter-blade-made-of-it-used-to-be-wood/> (accessed: July 22, 2025).
13. Edwards K.L., Davenport C. Materials for rotationally dynamic components: rationale for higher performance rotor-blade design. *Materials and Design*, 2006, vol. 27, pp. 31–35.
14. Hancox N.L., Mayer R.M. *Design data for reinforced plastics: a guide for engineers and designer*. London: Chapman & Hall, 1994, 264 p.
15. Strong A.B. Manufacturing. *International encyclopedia of composites*. Eds. S.M. Lee. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1990, pp. 102–126.
16. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
17. Timoshkov P.N. Equipment and materials for the technology of automated calculations prepregs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 2, pp. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
18. Doroshenko N.I., Chursova L.V. Evolution of materials for blades of helicopters. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 16–18.
19. Slyusar B.N., Flek M.B., Goldberg E.S. et al. *Helicopter engineering technology. Technology of production of helicopter blades and aircraft structures from polymer composite materials*. Rostov-on-Don: Publ. house of the SSC of RAS, 2013, 230 p.
20. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
21. Barannikov A.A., Postnova M.V., Krashennnikova E.V., Vasyukov A.N. Application of new technologies in the production of helicopter main rotor blades. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-91-102.
22. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Khrulkov A.V. The new generation of materials and technologies for helicopter blade spars. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 5–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-5-9.
23. Sokolov I.I. *Spheroplastics based on thermosetting binders for aviation products*: thesis, Cand. of Sc. (Tech.). Moscow, 2013, 127 p.
24. Kirillov V.N., Vapirov Yu.M., Drozd E.A. Research of atmospheric firmness of polymeric composite materials in the conditions of the atmosphere of warm wet and moderately warm climate. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 4, pp. 31–38.

25. Sokolov I.I., Minakov V.T. Spheroplasts for aviation purposes based on epoxy adhesives and dispersed fillers. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 22–26.
26. Doroshenko N.I. Application of PCM in the design of helicopter propeller blades. *Polymer composite materials for the aerospace industry: proc. All-Rus. sci. and tech. conf. Moscow: VIAM*, 2019, pp. 23–41.
27. Pascal F., Navarro P., Marguet S., Ferrero J.-F. Study of medium velocity impacts on the lower surface of helicopter blades. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 88, pp. 93–100.
28. *Helicopter rotor blade and method of manufacturing a blade from a composite material: pat. RU 2541574 C1 Rus. Federation; appl. 25.12.13; publ. 20.02.15.*
29. Middleton D.H. *Composite materials in aircraft structures*. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1990, 530 p.
30. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S. et al. Composite materials using hollow microspheres. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
31. Kolokoltseva T.V., Popov Yu.O., Lantsov I.A., Gusev Yu.A. Prepregs and fiberglass based on VSR-3M resin and fiberglass fabrics for use in helicopter blades. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-56-65.
32. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Beshpalova L.S., Khrulkov A.V., Kogan D.I. Fiberglass VPS-31 and hybrid composite material VKG-5 from unidirectional prepregs based on melt binder and rope carbon, glass fillers. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*, 2006, no 1, pp. 10–20.
33. *Composite rotor blade and method of manufacture: pat. US 6659722 B2 USA; appl. 07.11.02; publ. 09.12.03.*
34. Montagnier O. Optimisation of hybrid high-modulus/high-strength carbon fiber reinforced plastic composite drive shafts. *Materials & Design*, 2013, vol. 46, pp. 88–100.
35. Morgan P. *Carbon Fibers and Their Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2005, 1200 p.
36. High Modulus Carbon Fiber: Modulus And Composite Explained. *Baetro Machining Blog*. Available at: <https://baetro-machining.com/blog/high-modulus-carbon-fiber> (accessed: July 24, 2025).
37. Gupta M.K., Srivastava R.K. Mechanical Properties of Hybrid Fibres Reinforced Polymer Composite: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2015, vol. 55 (6), pp. 1–66.
38. Ikbal M.H., Ahmed A., Qingtao W. et al. Hybrid composites made of unidirectional T600S carbon and E-glass fabrics under quasi-static loading. *Journal of Industrial Textiles*, 2017, vol. 46 (7), pp. 1–25.

Информация об авторах

Гусев Юрий Андреевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Усачева Мария Николаевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Парахин Игорь Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коваленко Антон Владимирович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Васюков Александр Николаевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yuri A. Gusev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria N. Usacheva, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Igor V. Parakhin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton V. Kovalenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vasyukov A. Nikolaevich, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.08.2025.
The article was submitted 18.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 22.08.2025.