

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РОССИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ

© 2024 г. А.В. Макаров^{a,*}, А.А. Иноземцев^{b,**}, В.Г. Дегтярь^{c,***},
Е.В. Харанжевский^{d,****}, А.Б. Котельников^{e,*****},
А.А. Вопнерук^{e,*****}

^aИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^bАО “ОДК-Авиадвигатель”, Пермь, Россия

^cАО “Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева”, Миасс, Россия

^dУдмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

^eАО «Научно-производственное предприятие “Машпром”», Екатеринбург, Россия

*E-mail: avm@imp.uran.ru

**E-mail: office@avid.ru

***E-mail: src@makeyev.ru

****E-mail: eh@udsu.ru

*****E-mail: kab@mprom.biz

*****E-mail: rp.mmp@mprom.biz

Поступила в редакцию 01.02.2024 г.

После доработки 06.02.2024 г.

Принята к публикации 16.03.2024 г.

В статье приведены результаты реализации трёх стратегически важных программ создания газотурбинных авиационных двигателей нового поколения ПД-14, ПД-8 и ПД-35 с целью обеспечения технологического суверенитета России в области гражданского авиадвигателестроения. Рассмотрены приоритетные для гражданского ракетостроения разработки ракеты-носителя с многоразовой возвращаемой первой ступенью и полностью многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки, в конструкции которых применяются многослойные композиционные материалы. Представлены новые технологии получения короткоимпульсным лазерным оплавлением керамических покрытий на основе карбида бора с микротвёрдостью до 43 ГПа и легированных висмутом поверхностных слоёв стали с уникальными триботехническими характеристиками: превосходной износостойкостью и сверхнизким коэффициентом трения (до 0.03) без смазки. Представлены также российские инновационные технологии ремонта и производства новых стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок с износостойкими композиционными покрытиями, восстановления толщины медных стенок способом многопроходной плоскостной сварки трением с перемешиванием.

Ключевые слова: газотурбинные авиационные двигатели, лопатки вентилятора, мотогондола, горение топлива, многоразовая ракета-носитель, полимерные композиционные материалы, углепластик, керамические покрытия, карбид бора, оксиды металлов, сверхнизкий коэффициент трения, стенки кристаллизаторов, композиционные покрытия, сварка трением с перемешиванием.

DOI: 10.31857/S0869587324030068, EDN: GGSFLK

МАКАРОВ Алексей Викторович – член-корреспондент РАН, заведующий отделом материаловедения ИФМ УрО РАН. ИНОЗЕМЦЕВ Александр Александрович – академик РАН, заместитель генерального директора АО “ОДК” по управлению НПК “Пермские моторы”, управляющий директор – генеральный конструктор АО “ОДК-Авиадвигатель”. ДЕГТЯРЬ Владимир Григорьевич – академик РАН, генеральный директор, генеральный конструктор АО “ГРЦ Макеева”. ХАРАНЖЕВСКИЙ Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией УдГУ. КОТЕЛЬНИКОВ Александр Борисович – генеральный директор АО «НПП “Машпром”». ВОПНЕРУК Александр Александрович – кандидат технических наук, руководитель проекта АО «НПП “Машпром”».

Металлургия и машиностроение – системообразующие отрасли промышленности Российской Федерации, без которых невозможно решение ни одной из стратегических задач государственной политики – от авиакосмического сектора и национальной обороны до микроэлектроники и медицины. Для обеспечения технологического суверенитета в этих отраслях необходимо опираться на новейшие научные разработки и создавать научный задел на будущее на основе фундаментальных исследований. Сложность возникающих научно-технических проблем требует привлечения усилий широкого круга научных организаций, ведущих исследования такого уровня. То есть сформировалась насущная потребность в укреплении сотрудничества реального сектора экономики России с государственными научными центрами и научными организациями РАН.

Серьёзной проблемой на протяжении последних десятилетий стала зависимость Российской Федерации от массового импорта гражданских самолётов. Развитие же отечественного гражданского авиастроения во многом определяется созданием собственных газотурбинных двигателей нового поколения, поэтому первоочередная задача обеспечения технологического суверенитета нашей страны в области гражданской авиации заключается в разработке и освоении серийного производства современных гражданских турбовентиляторных двигателей пятого поколения ПД-14 и ПД-35. Решение в предельно сжатые сроки этой задачи потребует концентрации научного и технологического потенциала страны с участием профильных государственных научных центров (ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ) и институтов РАН в разработке научных основ, а также ключевых материалов и технологий.

Возвращение Российской Федерации на передовые позиции в космонавтике – также в числе приоритетов государственной политики. Выведение в космическое пространство и обеспечение функционирования орбитальных группировок космических аппаратов необходимо для осуществления навигации, телекоммуникации, дистанционного зондирования Земли, повышения обороноспособности, проведения научных экспериментов и, наконец, для изучения Вселенной. Эффективность и конкурентоспособность космической отрасли в современных условиях во многом определяется созданием экономичных ракет-носителей нового поколения и перспективных ракетно-космических систем как частично, так и полностью многообразных.

Выход из строя более 80% изделий машиностроения происходит в результате их поверхностного разрушения при изнашивании, коррозии, эрозии при кавитации, воздействии высоких температур и контактных нагрузок. Усталостные трещины также зарождаются именно на поверхности деталей. В этой связи применением эффективных способов модифицирования поверхности нередко достигается кратное повышение ресурса деталей, узлов

и механизмов. Для обеспечения технологического суверенитета в этой области следует развивать передовые отечественные лазерные технологии создания сверхтвёрдых, износостойких и антифрикционных покрытий и легированных слоёв.

В обеспечении национальной безопасности в области сталелитейной промышленности стратегически важное значение имеют разработки материалов и технологий изготовления и ремонта кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок (на таких машинах осуществляется более 96% мирового объёма выпуска стали).

Рассмотрим подробнее пути решения перечисленных задач.

СОЗДАНИЕ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Авиационное двигателестроение – наукоёмкая, высокотехнологичная и динамично развивающаяся отрасль, имеющая существенное значение для обороноспособности и социально-экономического развития страны. Для обеспечения технологического суверенитета в этой сфере реализуются три стратегически важные программы: “ПД-14”, “ПД-8” и “ПД-35”.

Первая из них предполагает создание семейства авиационных двигателей пятого поколения в диапазоне тяги 9–18 т. Базовый двигатель ПД-14, предназначенный для нового российского ближне-среднемагистрального самолёта МС-21-310, – это первый двигатель гражданского назначения, созданный в современной России с “осевой линии”, его разработка заложила фундамент для развития российского двигателестроения на десятилетия вперёд. Магистральный самолёт МС-21-310 с ПД-14 возвращает нашу страну на передовые позиции в мировой авиации (рис. 1).

Проектирование ПД-14 выполнено в АО “ОДК-Авиадвигатель”. Серийное производство налажено в АО “ОДК-Пермские моторы” в тесной кооперации с предприятиями Объединённой двигателестроительной корпорации (ГК “Ростех”). Впервые в истории отечественного двигателестроения пермским КБ создана двигательная установка, включающая в себя, помимо двигателя, и мотогондолу (в ней использованы современные полимерные композитные материалы, что позволило существенно снизить массу силовой установки). ПД-14 имеет все необходимые лётные сертификаты. Научно-методологическое сопровождение программы выполнено государственными научными центрами ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ. Необходимо отметить и весомый вклад Института проблем сверхпластичности металлов РАН в разработку технологии изготовления пустотелой лопатки вентилятора, являющейся важнейшим элементом двигателя, Института механики сплошных сред УрО РАН, а также профильных институтов СО РАН в решение прикладных задач.



Рис. 1. Самолёт MS-21-310 с двигателями ПД-14

Вторая программа касается создания авиационного двигателя ПД-8, многие технологии и материалы которого уже серийно освоены в ПД-14. ПД-8 предназначен для замены российско-французского двигателя SaM146 и установки на пассажирский самолёт Sukhoi Superjet New. ПД-8 также планируется устанавливать на самолёт-амфибию Бе-200, оснащённый в настоящее время украинскими двигателями. Таким образом, в результате реализации программ “ПД-14” и “ПД-8” Россия достигает полного технологического суверенитета в области двигателестроения для ближне-среднемагистральной авиации.

Третья программа предусматривает разработку ключевых технологий двигателей большой тяги, демонстрацию готовности технологий на двигателе-демонстраторе ПД-35, создание семейства конкурентоспособных двигателей (диапазон взлётной тяги от 24 до 50 т) в востребованных рынках классов тяги. В числе 20 новых ключевых технологий (поколение 5+) – создание рабочей лопатки вентилятора из полимерных композиционных материалов (рис. 2 а), малоэмиссионной камеры сгорания, высокотемпературных турбин с уменьшенным расходом охлаждающего воздуха, мотогондолы с естественным ламинарным обтеканием, изготовление деталей двигателя, в частности крупногабаритных, с применением аддитивных технологий, изготовление литых, в том числе крупногабаритных и сложнофасонных, деталей из жаропрочных, титановых и цветных сплавов, конструктивно-технологические решения для производства подшипниковых опор роторов двигателя и др. Всего в рамках третьей программы с участием ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ и профильных институтов РАН планируется решить более 1200 крупных научно-инженерных задач. Рассмотрим некоторые из них.

Авиационные материалы. Для перспективных образцов авиационной техники разрабатывается новый класс материалов, обладающих улучшенными эксплуатационными свойствами. Так, под руководством академика РАН Е.Н. Каблова в НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ выполнен

большой объём НИОКР по созданию нового поколения конструкционных высокотемпературных, полимерных композиционных, аддитивных, интерметаллидных и функциональных материалов [1]. Всего учёными и специалистами ВИАМ для ПД-35 предложено 13 новых материалов с повышенными показателями физико-механических свойств и ещё 6 находятся в стадии разработки. Керамические композиционные материалы могут обеспечить длительную работу теплонапряжённой части двигателя при температурах до 1400°C без “дорогостоящего” воздушного охлаждения, что даёт дополнительный выигрыш в топливной эффективности. Для обеспечения требуемых параметров рабочего цикла двигателя в НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ разрабатывается бескислородный керамический композиционный материал с матричным составом системы Si-B-Mo-C [2].

В Институте проблем сверхпластичности металлов РАН под руководством члена-корреспондента РАН Р.Р. Мулюкова разработан γ -TiAl интерметаллидный сплав [3]. В интервале температур 600–800°C он демонстрирует самые высокие удельные прочностные и упругие свойства среди известных конструкционных материалов, что обеспечивает снижение массы лопаток турбины низкого давления и повышение надёжности.

Аэродинамика. Для повышения дальности полёта актуально снижение аэродинамического сопротивления двигательной установки и самолёта в целом за счёт организации естественного ламинарного обтекания поверхности мотогондолы. Сотрудниками Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН под руководством академика РАН В.М. Фомина предложен программный продукт на основе e^N -метода для расчёта затягивания положения ламинарно-турбулентного перехода на поверхности мотогондолы [4, 5]. В ЦАГИ под руководством академика РАН С.Л. Чернышева и члена-корреспондента РАН К.И. Сыпало проведён цикл исследований проточной модели мотогондолы, спроектированной с учётом расчётов, проведённых в ИТПМ СО РАН. Получены положительные результаты.

В настоящее время учёные ЦАГИ, ИТПМ СО РАН и специалисты “ОДК-Авиадвигатель” совместно проектируют демонстратор мотогондолы с естественным ламинарным обтеканием для испытаний в составе летающей лаборатории. По предварительным оценкам, применение такой мотогондолы может привести к уменьшению потребного расхода топлива на 1.0–1.5%, что повысит конкурентоспособность российского двигателя большой тяги.

Повышение усталостной прочности элементов двигателя. В Институте механики сплошных сред УрО РАН под руководством члена-корреспондента РАН О.А. Плехова создана опытная установка для упрочнения деталей лазерным ударом, которая обеспечивает наведение поверхностных сжимающих остаточных

напряжений на глубину свыше 1 мм [6]. Внедрение этой технологии позволит существенно повысить эксплуатационную надёжность лопаток компрессора при возможном попадании града, льда, песка, иных посторонних предметов на вход двигателя.

Оптические измерительные технологии. В Институте теплофизики СО РАН под руководством академика РАН Д.М. Марковича создан современный стенд для испытаний отсека камеры сгорания с оптическим доступом, позволяющий детально исследовать рабочий процесс в модельной камере ПД-35 при повышенном давлении (до 20 атм) и температуре воздуха на входе в отсек (до 600°C). Оптические технологии способствуют также повышению качества математического моделирования процессов распыления и горения топлива, образования выбросов NO_x , CO (в 4D постановке).

Работы по созданию технологий двигателей большой тяги стартовали в 2018 г. С 2021 г. проводятся испытания газогенератора-демонстратора ПД-35. Первые испытания полноразмерного двигателя-де-

монстратора технологий ПД-35 (рис. 2 б) начались в АО «ОДК-Авиадвигатель» в феврале 2024 г. В апреле 2024 г. достигнута проектная взлётная тяга 35 тс. Для испытаний семейства таких двигателей в пригороде Перми сооружён уникальный испытательный стенд открытого типа, не имеющий аналогов в России, Евросоюзе и странах Азии (рис. 2 в).

ПРИОРИТЕТНЫЕ РАЗРАБОТКИ МНОГОРАЗОВЫХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Первоочередная задача в гражданском ракетостроении – разработка полностью многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки с применением отечественных многослойных композиционных материалов. Такая ракета-носитель будет способна не только выводить полезную нагрузку в космос, но и возвращать с орбиты отработавшие и вышедшие из строя космические аппараты.

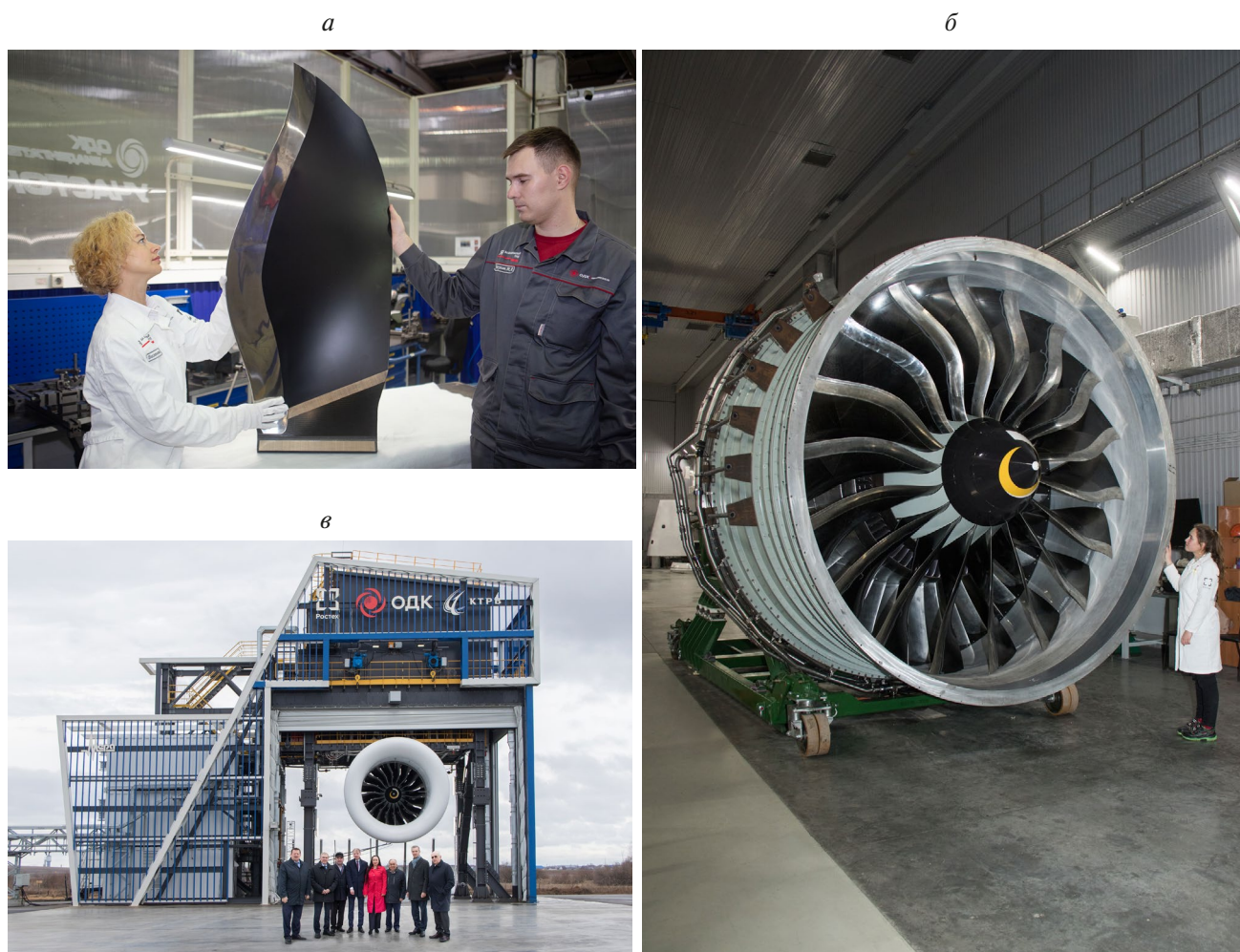


Рис. 2. Сборка и подготовка к испытаниям двигателя-демонстратора технологий ПД-35:

а – рабочая лопатка вентилятора из полимерных композиционных материалов, *б* – двигатель-демонстратор полностью собран, *в* – двигатель-демонстратор подготовлен к испытаниям

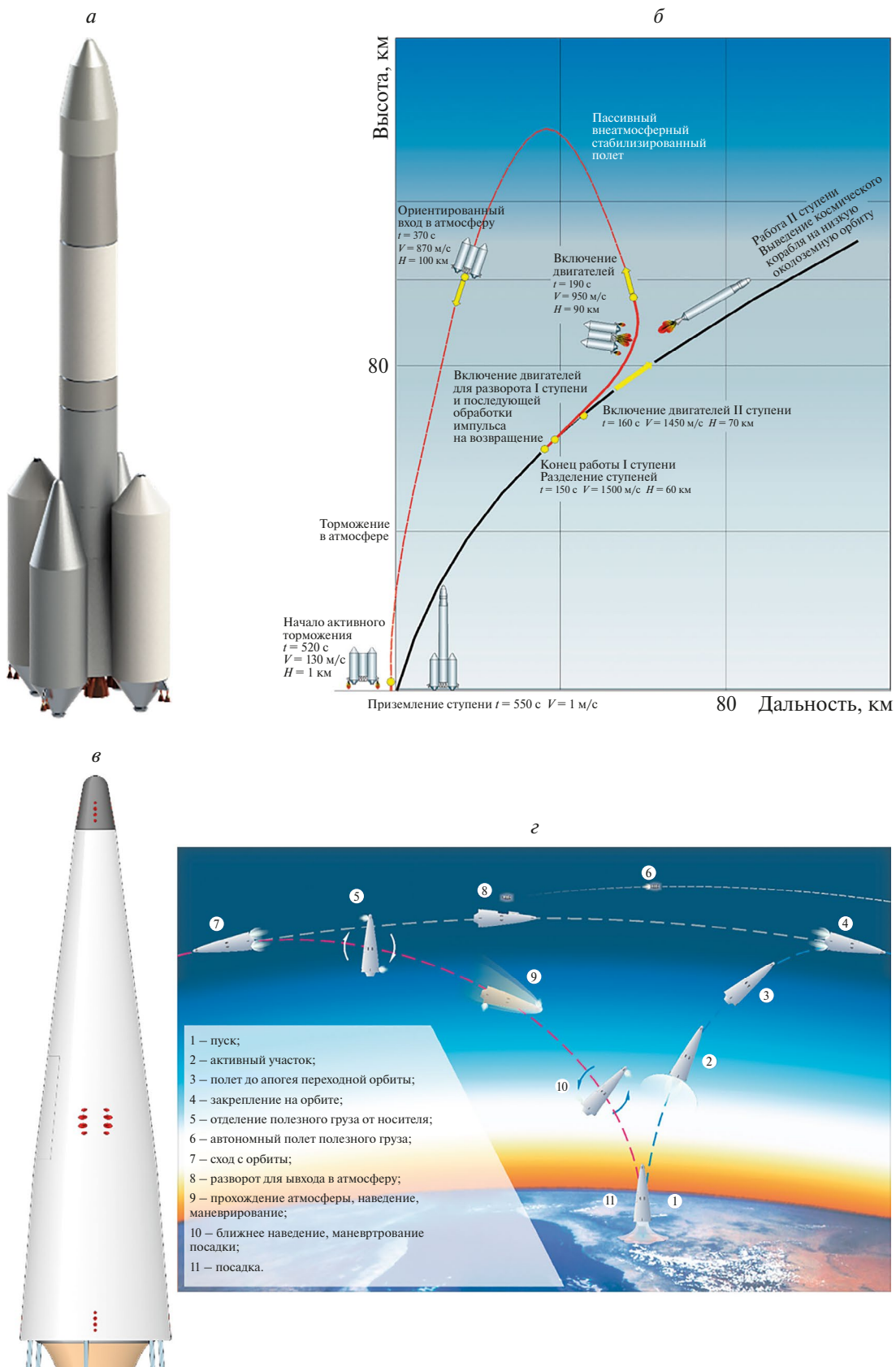


Рис. 3. Разработки многоразовых ракетно-космических систем АО “ГРЦ Макеева”: внешний вид (а) и схема полёта первой ступени (б) ракеты-носителя “Россиянка”; внешний вид (в) и схема полёта (z) ракеты-носителя КОРОНА

В АО “ГРЦ Макеева” формируется проектный облик многоразовых ракетно-конструкторских систем. Подготовлен проектный задел по ракете-носителю “Россиянка” с многоразовой возвращаемой первой ступенью (рис. 3 а, б), в которой в качестве топлива используются жидкий кислород и сжиженный природный газ [7]. Получены патенты на “Способ возвращения на космодром многоразовой первой ступени ракеты” [8] и “Способ использования многоразовой первой ступени ракеты-носителя” [9]. Здесь же ведутся проектно-конструкторские проработки полностью многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки КОРОНА (рис. 3 в, г) [10]. Результаты защищены патентом [11].

Для достижения проектных параметров ракет-носителей нового поколения и перспективных ракетно-космических систем, как частично, так и полностью многоразовых, требуется комплексное развитие наукоёмких технологий в различных отраслях отечественной промышленности. Одна из таких критических технологий, необходимых для достижения совершенства конструкций по массе, уменьшения трудоёмкости изготовления и металлоёмкости конструкций, – создание баков большого диаметра из многослойных композиционных материалов.

За рубежом активно применяют полимерные композиционные материалы (ПКМ), например, в виде углеродной ленты в материале криогенных топливных баков ракет-носителей тяжёлого и сверхтяжёлого классов Falcon 9 FT, Falcon Heavy, Delta IV Heavy (США), Chang Zheng 9 (КНР), ARIANE-6 (Европейский союз), H3 Heavy (Япония), HLV и SHLV (Индия). Это даёт существенную экономию по весу и стоимости конструкций. Помимо NASA аналогичные разработки ПКМ ведутся в SpaceX, а также в Немецком авиакосмическом центре (DLR).

В российской ракетно-космической отрасли первая и пока единственная попытка изготовить криогенные топливные баки из ПКМ без металлического лайнера (тонкостенного стакана) была предпринята в 2006–2008 гг. в АО “ГКНПЦ имени М.В. Хруничева”. В 2020–2021 гг. в АО “ЦНИИ-маш” проводились научные исследования по этой же тематике. В АО “ГРЦ Макеева” в рамках работ по созданию многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки предложена конструкция бака с многослойной стенкой для криогенных компонентов топлива. Основным материалом стенки – углепластик, позволяющий избежать температурных деформаций и обеспечить термостабильность размеров элементов конструкций бака при высоких перепадах температуры. В составе стенки предусмотрены слои внутренней теплоизоляции, герметизирующий слой, силовые элементы и внешний слой теплозащитного покрытия. В рамках проекта Уральского межрегионального научно-образовательного центра с участием

Южно-Уральского государственного университета как научного партнёра разработан и изготовлен демонстратор технологии изготовления стенки криогенного бака, проведены статические испытания на прочность до и после криогенного воздействия на конструкцию демонстратора, оценена проницаемость материала.

В 2023 г. АО “ГРЦ Макеева” определён головным исполнителем НИР в рамках государственного контракта по подтверждению ключевых технологий создания многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя вертикального взлёта и посадки. Одна из ключевых – технология производства баков большого диаметра для криогенных компонентов топлива из углепластика в виде нитей, сот, гофр. Стенка изделия обеспечивает при штатной эксплуатации температуру в баках жидкого кислорода от 80 до 95 К, жидкого водорода от 14.5 до 20 К, заправку баков при температурах, соответственно, 80 К и 14.5 К.

Ёмкости для криогенных компонентов даже при существующем уровне развития композиционных технологий могут быть востребованы в таких отраслях отечественной промышленности, как газовая и нефтяная, а также в медицине, доставке криогенных компонентов (жидкие кислород и водород). Однако широкое внедрение технологий производства ёмкостей из полимерных композиционных материалов требует масштабирования и кратного увеличения выпуска углеродного волокна, что возможно только при государственной поддержке и выделении этого направления в отдельную государственную программу.

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ С УНИКАЛЬНЫМИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Для обеспечения технологического суверенитета в машиностроении и металлургии первоочередной интерес вызывают методы, реализующие новые научные принципы и поэтому позволяющие ожидать действительно прорывных результатов. К ним можно отнести впервые разработанный метод нанесения на металлические подложки керамических покрытий, обладающих высокой твёрдостью (до 43 ГПа) и адгезионной прочностью соединения со сталями, никелевыми, титановыми и другими сплавами [12]. Этот метод позволяет также добиваться сверхнизкого коэффициента трения скольжения деталей, работающих в условиях ограниченной смазки или в её отсутствии [12, 13]. Для нанесения керамических покрытий используется способ высокоскоростного лазерного плавления дисперсных порошков лучом лазера с наносекундными импульсами. Высокоскоростной нагрев поверхности до 3500°С обеспечивает расплавление и смешивание практически любых материалов. При последующем интенсивном охлаждении за

счёт сверхвысоких скоростей затвердевания расплавов возникают сильнонеравновесные, аморфные состояния и пересыщенные твёрдые растворы, обеспечивающие материалам новые свойства.

Уникальное сочетание триботехнических и прочностных характеристик получено на образцах с керамическими покрытиями состава $B_4C-BN-MgO-Li_2O$ [12]. В результате высокочастотной короткоимпульсной лазерной обработки формируется аморфное керамическое покрытие с нанодисперсными включениями, состоящее в основном из карбидов и нитридов бора. Хорошее сцепление таких покрытий с металлами объясняется формированием новых фаз на границе керамика–подложка в результате лазерной обработки [14]. Благодаря высокой скорости охлаждения, развиваемой из-за локальности короткоимпульсного лазерного воздействия, формируемый керамический слой хорошо смачивает металлическую поверхность, имеет высокую сплошность и низкую шероховатость. Максимальная микротвёрдость этих керамических покрытий, достигающая 43 ГПа, что соответствует почти половине твёрдости алмаза, зафиксирована для состава карбид бора B_4C – 50% нитрида бора BN , нанесённого на никелевую подложку.

Для высокотемпературных применений способом высокоскоростного лазерного плавления получены керамические покрытия на основе нитридов и боридов циркония (с возможным добавлением карбида кремния SiC) с жаростойкостью до $1050^\circ C$.

В целях улучшения эксплуатационных свойств покрытий при трении скольжения разработаны составы с добавлением оксидов металлов [14]. В этом случае снижение коэффициента трения достигается за счёт образования на трущихся поверхностях специального третьего тела, которое обеспечивает лёгкое скольжение даже при температурах до $500^\circ C$ и высоких контактных напряжениях. Добавление оксида лития в состав покрытия позволяет резко снизить коэффициент трения скольжения без смазки, достигнуть рекордного значения 0.03 даже при малых нагрузках и температурах в зоне контакта [12].

Уникальные триботехнические результаты получены также благодаря легированию поверхности стали висмутом. Висмут, несмотря на то, что не смешивается с железом или медью даже в жидком состоянии, может быть диспергирован и внедрён в сталь с помощью короткоимпульсной лазерной обработки, при этом достигается крайне неравновесное состояние вещества [15, 16]. На рисунке 4 а показано поперечное сечение вала, легированного висмутом после лазерной обработки и алмазной притирки. Висмут появляется в стали в виде наноразмерных включений частиц металла и оксидов (рис. 4 б). Стальные валы, легированные висмутом, демонстрируют превосходную износостойкость и устойчивость к трению при отсутствии смазки и имеют сверхнизкий коэффициент

трения. Переход к сверхнизкому трению происходит по двойному механизму: за счёт устранения адгезии между телами скольжения (не происходит сцепления трущихся поверхностей) и образования в результате химических реакций особых поверхностных слоёв, которые обеспечивают лёгкое скольжение при трении без смазки. В отличие от всех известных твёрдых смазок на основе дисульфида молибдена MoS_2 , графита и тефлона, валы из легированной висмутом стали сохраняют эффективность даже в условиях скольжения при очень высоких нагрузках, линейных скоростях и скоростях вращения, например, в турбинах.

Для подтверждения полученных характеристик покрытий проводили испытания турбокомпрессоров двигателя внутреннего сгорания с узлом трения “стальной вал – бронзовая втулка” [15]. Турбокомпрессор со стандартным валом (без легирования висмутом) быстро вышел из строя уже после пяти циклов испытаний в условиях граничной смазки, что привело к значительному увеличению вибрации вала. При этом на его поверхности образовались сильные повреждения в местах контакта с бронзовыми втулками, а также следы адгезионного переноса бронзы (рис. 4 в).

Испытания турбокомпрессора с валом из стали, легированной висмутом, показали возможность его длительной бесперебойной работы без смазки при скорости вращения 75 000 об/мин (линейная скорость скольжения около 32 м/с). На поверхности легированного вала даже после 500 циклов испытаний без капли смазки не выявлено каких-либо повреждений и переноса бронзы (рис. 4 г). Таким образом, легирование висмутом исключает адгезию и массоперенос между телами скольжения, обеспечивая выдающиеся антифрикционные свойства и долговременную надёжность при скольжении на высоких линейных скоростях без смазки [15].

Разработанная технология нанесения керамических сверхтвёрдых покрытий со сверхнизким коэффициентом сухого трения скольжения, основанная на новых научных принципах и обеспечивающая прорывной результат в виде многократного улучшения свойств материалов, находит применение в машиностроении, нефтегазовой и электронной промышленности. Так, период стойкости инструмента (стальных валцов) для горячей обработки давлением металлических и керамических материалов для электронной промышленности увеличивается с нескольких дней до нескольких месяцев. При нанесении сверхтвёрдого керамического покрытия термостойкость детали клапана двигателя внутреннего сгорания сохраняется до температуры $1000^\circ C$, сопротивление окислительному и абразивному изнашиванию увеличивается на 480%, а срок службы деталей – в 10 раз. Ресурс вала гидромотора при применении технологии высокоскоростного лазерного плавления вырос на 30%, стойкость пуансонов для изготовления

полимерных трубопроводов – в 100 раз, а производительность процесса – почти наполовину.

Новая технология может быть модифицирована под потребности отраслей машиностроения, авиа-

ции и космоса. Инновационный метод обработки пар трения отличается экономичностью, простотой, надёжностью и подходит для массового производства [16].

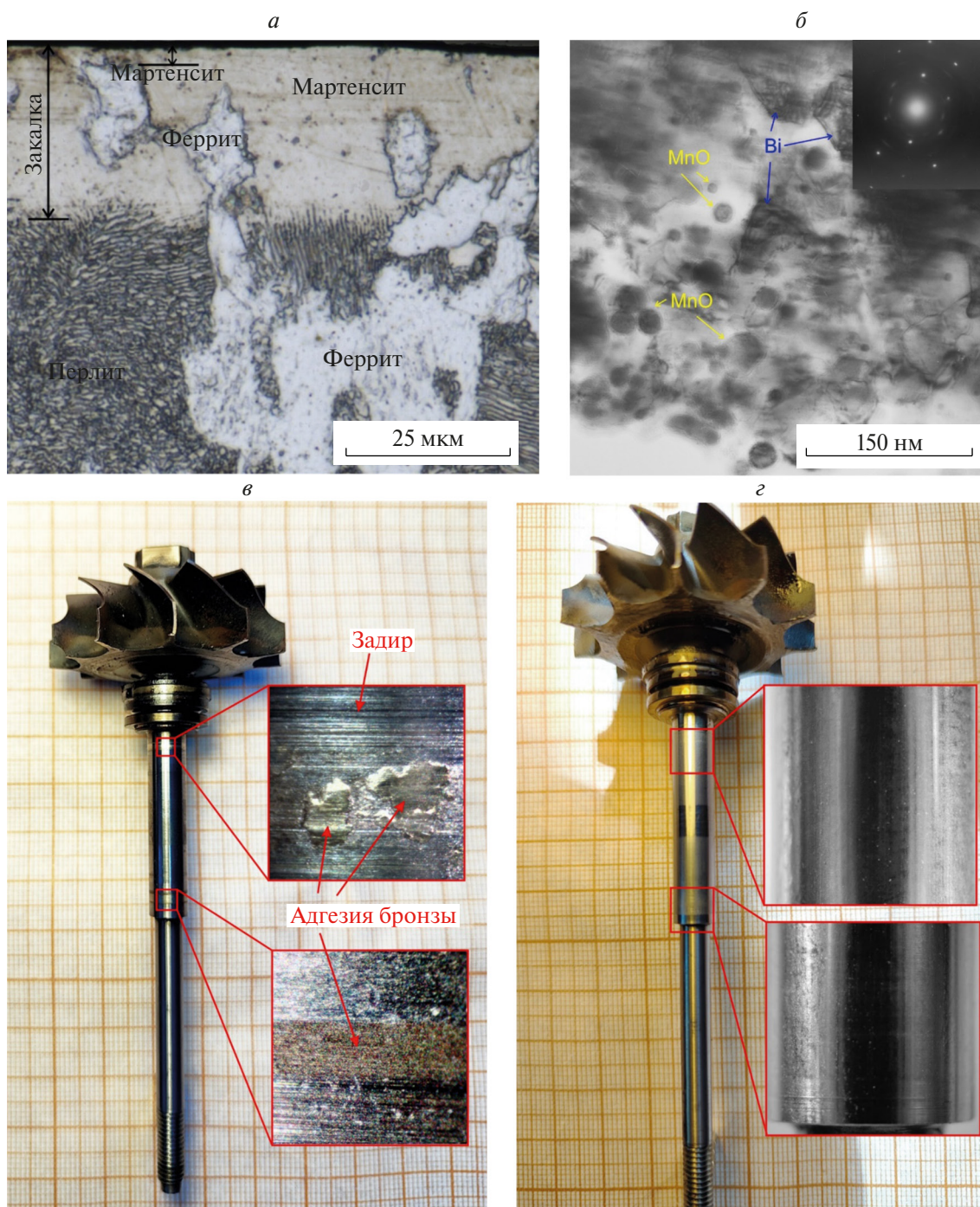


Рис. 4. Поверхностные покрытия нового поколения:

a – структура поперечного сечения поверхностного слоя стального вала, легированного висмутом, после лазерной обработки и алмазной притирки; *б* – просвечивающая электронная микроскопия и электронограмма (на вставке) микроструктуры вблизи поверхности вала; *в* – стальной вал турбокомпрессора в состоянии поставки после испытаний на трение скольжения с граничной смазкой при 75 000 об/мин в течение 5 циклов; *з* – стальной вал турбокомпрессора, легированный висмутом, после испытаний на трение скольжения без смазки при 75 000 об/мин в течение 500 циклов

ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Основным технологическим узлом машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) служит кристаллизатор (рис. 5 а). Для обеспечения качества поверхности слитков и уменьшения его износа при эксплуатации стенок (плит) из медных сплавов на их рабочую поверхность наносят защитные покрытия [17]. Доля импортозависимости в применении стенок с защитными покрытиями в 2012 г. составляла 97%, что критично для национальной безопасности. В 2022 г. с российского рынка ушли производители и поставщики плит кристаллизаторов из Германии, Италии и Японии. Следует учитывать, что импортные гальванические защитные покрытия на основе никеля и его сплавов как распространённый способ защиты рабочей поверхности медных плит кристаллизаторов не лишены серьёзных недостатков: в их числе низкая стойкость и неэкологичность, к тому же они не способны обеспечить требуемый уровень свойств для современных МНЛЗ.

В России объединёнными усилиями специалистов Института физики металлов УрО РАН, Ин-

ститута машиноведения УрО РАН, Уральского федерального университета, АО «НПП «Машпром»» и металлургических предприятий разработана и внедрена в промышленность инновационная технология восстановительного ремонта и производства новых стенок кристаллизаторов МНЛЗ с износостойкими композиционными покрытиями [17, 18]. При этом был решён комплекс важных задач.

1. Разработаны металлокерамические порошковые смеси для износостойких покрытий на основе порошков системы легирования Ni–Cr с введением в состав карбидных (WC, Cr₃C₂, SiC, TiC), боридных (CrB₂, TiB₂) и металлических (Cr, Mo) соединений. Предложена уникальная технология роботизированного сверхзвукового газозвукового напыления покрытий (рис. 5 б) на водоохлаждаемые широкие и узкие стенки кристаллизатора (рис. 5 в, г).

2. Научно обоснована наибольшая эффективность применения композиционных покрытий с крупными упрочняющими фазами [19].

3. Разработана технология термической обработки, обеспечивающая упрочнение медного сплава, улучшение адгезии покрытия с медной основой и повышение тепло- и износостойкости покрытия

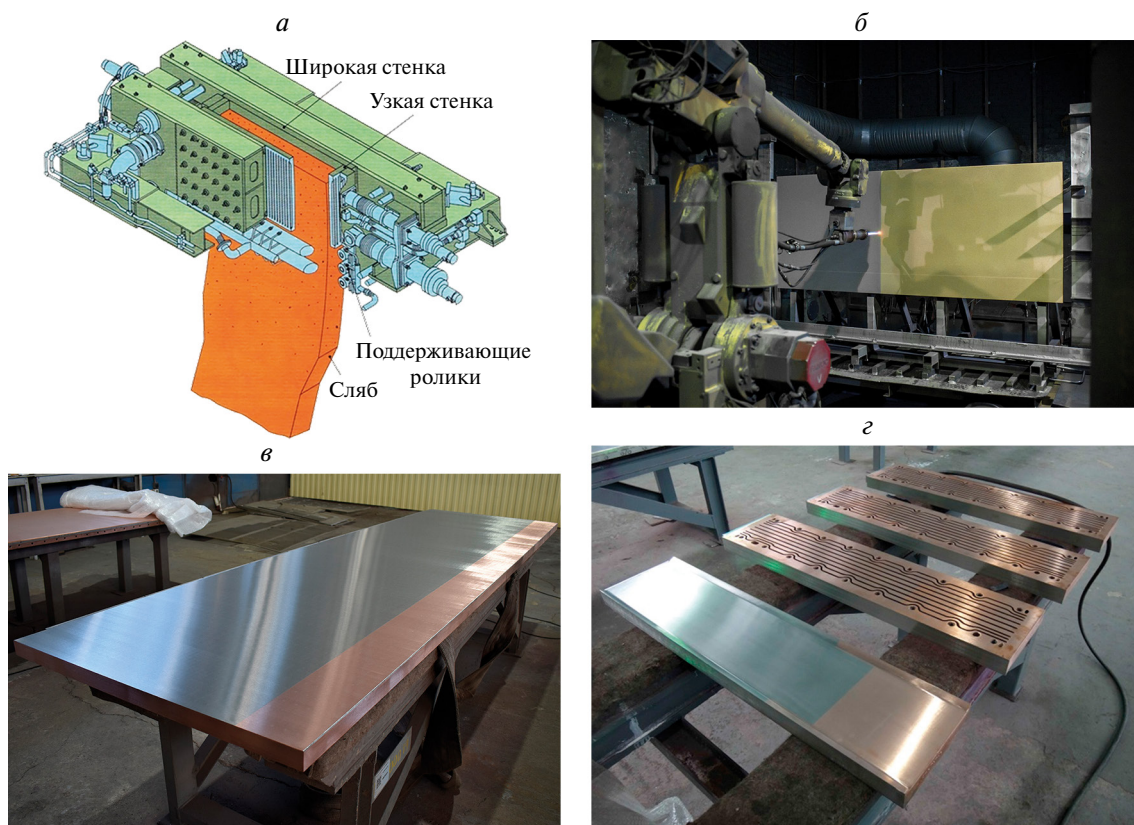


Рис. 5. Инновационная технология восстановительного ремонта и производства новых стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок: конструкция кристаллизатора слябовой МНЛЗ (а); процесс роботизированного сверхзвукового газозвукового напыления покрытий (б); широкая (в) и узкие (г) стенки кристаллизатора с напылённым защитным покрытием и водоохлаждаемыми каналами

в результате формирования при отжиге износостойкого каркаса из крупных карбидных и боридных частиц [20–23].

Предлагаемые композиционные покрытия обладают высокими адгезионными, антикоррозионными и триботехническими характеристиками. В ходе промышленных испытаний на металлургических предприятиях установлено, что разработанные кристаллизаторы по надёжности и ресурсу превосходят показатели аналогов от зарубежных производителей в 4–20 раз с повышением качества получаемых непрерывнолитых заготовок. Стойкость композиционных покрытий против изнашивания достигает 700 тыс. т разливаемой стали на одном межремонтном цикле [24]. Экологичность, энерго- и ресурсоэффективность производства кристаллизаторов, реализованного НПП “Машпром” в г. Нижний Тагил [17], существенно превосходит соответствующие показатели гальванического производства зарубежных компаний. Благодаря внедрению технологии на основных металлургических предприятиях России доля отечественной продукции в применении слябовых кристаллизаторов с защитным покрытием увеличена с 3% в 2012 г. до 60% к концу 2023 г., что превышает показатель, заданный Планом мероприятий по импортозамещению в отрасли тяжёлого машиностроения Российской Федерации на период до 2024 г.

С целью продления ресурса и удешевления расходных компонентов МНЛЗ рассмотрены пути решения актуальной задачи восстановления медных плит слябовых кристаллизаторов после достижения ими минимально допустимой толщины в результате эксплуатации и ремонтов. Обоснованы преимущества восстановления плит кристаллизаторов из хромоциркониевой бронзы современным экологичным способом многопроходной плоскостной сварки трением с перемешиванием при наложении на восстанавливаемую плиту присадочной пластины из этого же материала (рис. 6 а) [24, 25].

Серией последовательных проходов вращающимся коническим инструментом из жаропрочного сплава ЖС6К (рис. 6 б) достигается однослойное или двухслойное сварное соединение (восстановленный слой бронзы толщиной соответственно ~5 и ~10 мм) (рис. 6 в) без разрывов, трещин, пор (рис. 6 г). При послойном нанесении бронзы с использованием аддитивной технологии на основе сварки трением с перемешиванием получение слоя большой толщины не требует массивного сварочного инструмента и мощного сварочного оборудования [25]. Прогрессивный способ сварки наряду с экономической эффективностью обеспечит несомненные экологические преимущества, поскольку уменьшится потребность во вредном металлургическом производстве новых плит кристаллизаторов из медных сплавов [24].

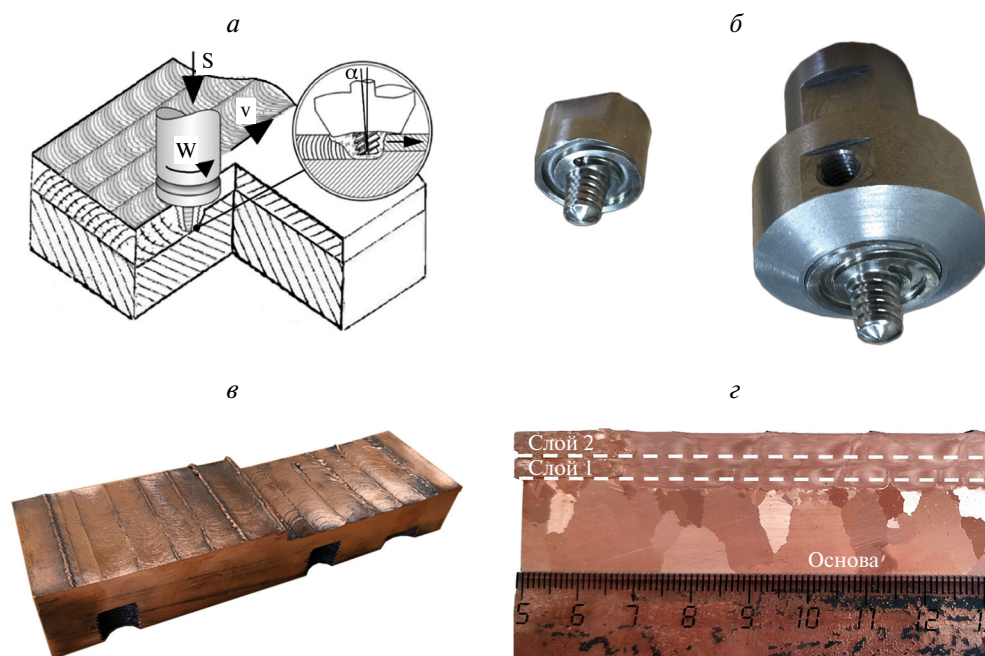


Рис. 6. Инновационная технология восстановительного ремонта стенок (плит) кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок способом плоскостной сварки трением с перемешиванием (СТП):

а – схема процесса плоскостной СТП: *S* – нагрузка; *W* – скорость вращения инструмента, об/мин; *V* – скорость сварки, мм/мин; α – угол наклона, град; *б* – внешний вид сварочного инструмента из жаропрочного сплава без оправки и в оправке; *в* – фрагмент плиты из хромоциркониевой бронзы, восстановленной одним слоем толщиной 5 мм (справа) и двумя слоями (слева) бронзы; *г* – макроструктура восстановленных слоёв и основы плиты в поперечном сечении

Разработаны и реализованы инновационные кристаллизаторы с износостойкими композиционными покрытиями для всех типов МНЛЗ в производстве слябов толщиной от 90 до 400 мм со скоростями разливки 0.6–5.0 м/мин, применяемых в судостроительной, нефтегазовой, строительной и оборонной отраслях промышленности. Новые технологии внедрены на крупнейших металлургических комбинатах Российской Федерации [17]. Отливаемые слябы используются в получении толстого листа для труб большого диаметра, в том числе по заказам Газпрома и Транснефти для газопроводов “Турецкий поток”, “Южный коридор”, “Сила Сибири” и других. Суммарный экономический эффект за 2019–2023 гг. превысил 30 млрд руб.

Перспективы направления связаны с разработкой технологии лазерной наплавки композиционных износостойких покрытий на медные плиты. Это позволит решить актуальную задачу снижения себестоимости процесса нанесения покрытия за счёт повышения производительности и коэффициента использования порошка до 95–97%, улучшит адгезию покрытия с медной основой, качество покрытий и их свойства, а также расширит применение тугоплавких материалов. Однако активный переход на современные лазерные технологии ограничивается низким коэффициентом поглощения бронзой (~10%) излучения мощных технологических лазеров с длиной волны $\lambda=1064$ нм. Скачкообразный рост коэффициента поглощения до 50–55% наблюдается для лазерного излучения видимого диапазона (“зелёный” лазер с $\lambda=515$ нм и “синий” лазер с $\lambda=450$ нм) [26]. Эти факторы определяют потребность в развитии производства в России ультракоротковолновых технологических лазеров.

* * *

Перспективные базовые наукоёмкие технологии невозможно купить, их можно только создать и развивать. Технологический суверенитет и комплексная безопасность государства определяются степенью технологической независимости объектов его критической инфраструктуры и способностью самостоятельно создавать и выпускать высокотехнологичную продукцию, необходимую для достижения стратегических целей развития. Ещё раз подчеркнём: всё это невозможно без серьёзного научного задела и использования перспективных научных разработок, что определяет возрастающую координирующую роль РАН и потребность в укреплении кооперации научных организаций и предприятий реального сектора экономики Российской Федерации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования, представленные в разделе “Керамические покрытия с уникальными триботехническими характеристиками”, выполнены при финансовой

поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20012). Исследования, представленные в разделе “Инновационные материалы и технологии для оборудования непрерывной разливки стали”, проведены в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Структура”, № 122021000033-2) и комплексного проекта “Разработка новых материалов и технологий для формирования покрытий, стойких в условиях абразивного и коррозионного изнашивания” Уральского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня “Передовые производственные технологии и материалы” [27].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каблов Е.Н., Антипов В.В.* Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023. V. 93. № 10. P. 907–916. (In Russ.)
2. *Гончаров Б.Э., Сипатов А.М., Черкашнев Н.Н. и др.* Исследование высокотемпературной термостойкости антиокислительного покрытия для керамического композиционного материала с многослойной структурой // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4(65). С. 51–58.
Goncharov B.E., Sipatov A.M., Cherkashneva N.N. et al. Studies of thermal shock resistance of an anti-oxidation coating for a multi-layered ceramic composite // Aviation Materials and Technologies. 2021. V. 65. № 4. P. 51–58. (In Russ.)
3. *Мулюков Р.Р., Иноземцев А.А., Чинейкин С.В. и др.* Патент РФ № 2777775. Интерметаллидный сплав на основе γ -TiAl фазы для изготовления лопаток турбины низкого давления газотурбинного двигателя и способ изготовления заготовки лопатки из интерметаллидного сплава на основе γ -TiAl фазы // Бюл. № 22. Оpubл. 09.08.2022.
Mulyukov R.R., Inozemtsev A.A., Chinejkin S.V. et al. RF Patent No. 2777775. Intermetallic alloy based on the γ -TiAl phase for the manufacture of a low-pressure turbine blade of a gas turbine engine and a method for manufacturing a blade blank from an intermetallic alloy based on the γ -TiAl phase // ВИМР. № 22. Publ. 09.08.2022.
4. *Бойко А.В., Демьянко К.В., Иноземцев А.А. и др.* Определение положения ламинарно-турбулентного перехода при численном моделировании обтекания пластины дозвуковыми и транзвуковыми потоками // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 5. С. 675–683.
Boiko A.V., Demyanko K.V., Inozemtsev A.A. et al. Determination of the laminar-turbulent transition location in numerical simulations of subsonic and

- transonic flows past a flat plate // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. V. 26. № 5. P. 629–637. (In Russ.)
5. *Boiko A.V., Demyanko K.V., Kirilovskiy S.V. et al.* Modeling of transonic transitional three-dimensional flows for aerodynamic applications // AIAA Journal. 2021. V. 59. Is. 9. P. 3598–3610.
 6. *Прохоров А.Е., Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Плехов О.А.* Использование метода лазерной ударной проковки в целях увеличения усталостного ресурса металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1(1). С. 92–97.
Prokhorov A.E., Vshivkov A.N., Gachegova E.A., Plekhov O.A. Experimental implementation of the laser shock peening method aimed at an increase in the fatigue properties of metals. Industrial laboratory // Industrial Laboratory. Diagnostics of materials. 2022. V. 88. № 1(1). P. 92–97.
 7. Из морских глубин – в глубины космоса / Под общ. ред. В.Г. Дегтяря. Миасс: ГРЦ Макеева, 2011.
From Deep Sea to Outer Space / Under general editorship of Degtyar V.G. Miass: JSC Makeyev Design Bureau, 2011.
 8. *Дегтярь В.Г., Данилкин В.А., Телицын Ю.С. и др.* Патент РФ № 2309089. Способ возвращения на космодром многоразовой первой ступени ракеты // Бюл. № 30. Оpubл. 27.10.2007.
Degtyar V.G., Danilkin V.A., Telitsyn Ju.S. et al. RF Patent No. 2309089. Method of return of non-expendable first stage of rocket to cosmodrome // ВИМР. № 30. Publ. 27.10.2007. (In Russ.)
 9. *Дегтярь В.Г., Калашников В.Н., Мочалов Е.Н., Слета А.В.* Патент РФ № 2678616. Способ использования многоразовой первой ступени ракеты-носителя // Бюл. № 4. Оpubл. 30.01.2019.
Degtyar V.G., Kalashnikov V.N., Mochalov E.N., Sleta A.V. RF Patent No. 2678616. Method of using the reusable first stage of a launch vehicle // ВИМР. № 4. Publ. 30.01.2019. (In Russ.)
 10. *Дегтярь В.Г., Вавилин А.В., Маханьков С.А., Молчанов С.Ф.* Вопросы создания многоразовой одноступенчатой ракеты-носителя КОРОНА. Продолжение работ. XLIV академические чтения по космонавтике, посвящённые памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. Москва 28–31 января 2020 года: в 2 т. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 46–48.
Degtyar V.G., Vavilin A.V., Makhankov S.A., Molchanov S.F. On the development of a reusable one-stage KORONA launch vehicle. Continuation of works. – Abstracts of XLIV Academic Space Conference dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding national scientists – pioneers of space exploration. Moscow January 28–31, 2020: in 2 vol. V. 1. М.: Publishing house of Bauman MSTU, 2020. P. 46–48. (In Russ.)
 11. *Вавилин А.В., Усолкин Ю.Ю., Фетисов В.А.* Патент РФ № 2309088. Одноступенчатая многоразовая ракета-носитель вертикального взлёта и посадки // Бюл. № 30. Оpubл. 27.10.2007.
Vavilin A.V., Usolkin Yu.Yu., Fetisov V.A. RF Patent No. 2309088. Non-expendable single-stage vertical takeoff and landing launch vehicle // ВИМР. № 30. Publ. 27.10.2007. (In Russ.)
 12. *Kharanzhevskiy E., Ipatov A., Krivilyov M. et al.* Ultralow friction behaviour of B₄C-BN-MeO composite ceramic coatings deposited on steel // Surface and Coatings Technology. 2020. V. 390. P. 125664.
 13. *Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V. et al.* Tribological performance of boron-based superhard coatings sliding against different materials // Wear. 2021. V. 477. P. 203835.
 14. *Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V. et al.* Effect of oxygen in surface layers formed during sliding wear of Ni–ZrO₂ coatings // Surface and Coatings Technology. 2022. V. 434. P. 128174.
 15. *Kharanzhevskiy E.V., Ipatov A.G., Makarov A.V., Gil'mutdinov F.Z.* Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication // Scientific Reports. 2023. V. 13. P. 17362.
 16. *Понизовкина Е.* Износа не будет. Уральские специалисты близки к прорыву в трибологии // Поиск. 2023. № 48(1798). С. 16.
Ponizovkina E. No wear and tear. Ural specialists are close to a breakthrough in tribology // Poisk. 2023. № 48(1798). P. 16. (In Russ.)
 17. *Котельников А.Б., Воннерук А.А., Макаров А.В. и др.* Новые материалы и технологии существенного повышения износостойкости рабочей поверхности металлургического оборудования // Тяжёлое машиностроение. 2018. № 9. С. 14–20.
Kotelnikov A.B., Vopneruk A.A., Makarov A.V. et al. New materials and technologies for significantly increase the wear resistance of the working surface of metallurgical equipment // Heavy engineering. 2018. V. 9. P. 14–20. (In Russ.)
 18. *Кушнарев А.В., Киричков А.А., Воннерук А.А. и др.* Физико-механические характеристики газотермических покрытий стенок кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок // Сварка и диагностика. 2017. № 5. С. 50–53.
Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Vopneruk A.A. et al. Physico-mechanical characteristics of thermal spray coatings of the mold copper plates of continuous casting machines // Welding and diagnostics. 2017. V. 5. P. 50–53. (In Russ.)
 19. *Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю.* Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий,

- сформированных лазерной наплавкой // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 4. С. 311–318.
- Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu.* Role of the strengthening phases in abrasive wear resistance of laser-clad NiCrBSi coatings // Journal of Friction and Wear. 2017. V. 38. № 4. P. 272–278.
20. *Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.* Патент РФ № 2492980. Способ получения теплостойкого покрытия // Бюл. № 26. Оpubл. 20.09.2013.
- Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L.* RF Patent No. 2492980. Method of producing heat-resistant coating // ВИМР. №. 26. Publ. 20.09.2013.
21. *Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л.* Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической обработкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 3. С. 39–46.
- Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Osintseva A.L.* Formation of wear-resistant chromium-nickel coating with extra high thermal stability by combined laser-and-heat treatment // Metal Science and Heat Treatment. 2015. V. 57. № 3–4. P. 161–168.
22. *Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Yu., Kharanzhevskiy E.V.* Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating with high-temperature processing // Journal of Crystal Growth. 2019. V. 525. P. 125200.
23. *Makarov A.V., Korobov Yu.S., Soboleva N.N. et al.* Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // Letters on Materials. 2019. V. 9. No. 4. P. 470–474.
24. *Макаров А.В., Лежнин Н.В., Котельников А.Б. и др.* Восстановление стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок из хромоциркониевой бронзы методом многопроходной сварки трением с перемешиванием // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 6. С. 66–83.
- Makarov A.V., Lezhnin N.V., Kotelnikov A.B. et al.* Restoration of continuous casting machine mold copper plates made of Cr-Zr bronze using multi-pass friction stir lap welding // Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy. 2023. V. 29. № 6. P. 66–83. (In Russ.)
25. *Лежнин Н.В., Макаров А.В., Валиуллин А.И. и др.* Применение аддитивной технологии на основе сварки трением с перемешиванием для восстановления исходной геометрии изношенных плит кристаллизаторов МНЛЗ // Тяжёлое машиностроение. 2023. № 11–12. С. 26–33.
- Lezhnin N.V., Makarov A.V., Valiullin A.I. et al.* The use of additive technology based on friction stir welding to restore the original geometry of worn plates of the CCM casting mold // Heavy engineering. 2023. № 11–12. P. 26–33. (In Russ.)
26. *Tang X., Chen X., Sun F. et al.* The current state of CuCrZr and CuCrNb alloys manufactured by additive manufacturing: A review // Materials & Design. 2022. V. 224. P. 111419.
27. О работе Уральского отделения РАН в 2022 году. Выступление председателя Уральского отделения РАН академика РАН В.Н. Руденко // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 8. С. 752–757.
- On the activities of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences in 2022. Speech by the chairman of the Ural branch of the RAS, RAS academician V.N. Rudenko // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023. V. 93. № 8. P. 752–757. (In Russ.)

ENSURING OF TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF RUSSIA IN METALLURGY AND MACHINE BUILDING

A.V. Makarov^{a,*}, A.A. Inozemtsev^{b,}, V.G. Degtyar^{c,***}, E.V. Kharanzhevskiy^{d,****},
A.B. Kotelnikov^{e,*****}, A.A. Vopneruk^{e,*****}**

^a*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

^b*UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russia*

^c*JSC Makeyev Design Bureau, Miass, Russia*

^d*Udmurt State University, Izhevsk, Russia*

^e*R&D Enterprise "Mashprom", JSC, Yekaterinburg, Russia*

**E-mail: avm@imp.uran.ru*

***E-mail: office@avid.ru*

****E-mail: src@makeyev.ru*

*****E-mail: eh@udsu.ru*

******E-mail: kab@mprom.biz*

******E-mail: rp.mmp@mprom.biz*

The article presents the results of the implementation of three strategically important programs for the creation of aircraft gas turbine engines of the new generation PD-14, PD-8 and PD-35 for the purpose of solving the issue of ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation in civil aircraft engine manufacturing. Considered are developments which are priority for civil rocket engineering, namely: launch vehicle with a reusable returnable first stage and a fully reusable single-stage launch vehicle for vertical take-off and landing made using multilayer composite materials. Provided are new technologies for implementation by short-pulse laser fusion of ceramic coatings based on boron carbide with microhardness up to 43 GPa and bismuth-alloyed surface layers of steel with unique tribotechnical characteristics: excellent wear resistance and ultra-low dry friction coefficient (up to 0.03). To ensure technological sovereignty in metallurgy, presented are Russian innovative technologies for the repair and production of new mold copper plates of continuous casting machines with wear-resistant composite coatings and recovering of the thickness of copper plates by multipass friction stir lap welding.

Keywords: aircraft gas turbine engine, fan blades, engine nacelle, fuel burning, reusable launch vehicle, polymer composite materials, carbon-fiber-reinforced polymers, ceramic coatings, boron carbide, metal oxides, ultra-low friction coefficient, mold copper plates, composite coating, friction stir welding.