

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ В АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Боровик Дарья Александровна, магистрант,
БФУ им. И. Канта, Россия, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, д. 14,
dashaborovik@gmail.com

Аннотация. В статье проводится рассмотрение вопроса и перспективы использования алюминия как материала, способного улучшить технические характеристики производимых транспортных средств, экологическую и экономическую ситуации в Российской Федерации и мире в целом. Обосновывается целесообразность применения алюминия в автомобильной индустрии. Доказывается актуальность замены в автомобилестроении стальных деталей кузова на алюминиевые, что обуславливается высокими технико-эксплуатационными, физико-химическими свойствами материала.

Стремительно растет необходимость в изучении вопроса алюминия в сфере автомобильной и аэрокосмической промышленности. Модифицированные сплавы и усложненные процессы обработки расширяют спектр применения материала. Соответствующая металлу конструкция и экономичная обработка требуют тщательного исследования, знаний специальных эксплуатационных характеристик.

С начала XX века отрасль российской алюминиевой промышленности придерживается четкой ориентации на экспорт, куда направляется порядка 80% - 85% производимой продукции. В то же время сама сырьевая база обеспечивает менее половины потребности алюминиевых заводов нашей страны, остальное обеспечивается за счет импорта.

На основе справочных материалов и научных источников проанализирована история становления алюминия в автомобильной индустрии и оценена возможность расширения сферы применения данного металла в конструкции транспортных средств, описаны его основные преимущества и недостатки среди других металлов, используемых в промышленности.

Представлено проанализированное заключение о целесообразности и актуальности дальнейшего поэтапного развития технологии внедрения алюминиевых деталей и узлов в конструкцию выпускаемых автотранспортных средств, подтвержденное соответствующими выводами.

Ключевые слова: автомобильная промышленность, алюминий, крылатый металл, потребление алюминия, мировой рынок, автомобиль, кузовные материалы,

кузов автомобиля, окружающая среда, экология, расход топлива, сплавы, «Mercedes-Benz», перспективы развития, принцип действия, технология, ремонт.

PROSPECTS FOR THE USE OF ALUMINUM IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Borovik Daria A., undergraduate,
I. Kant BFU, 14, Alexandra Nevsky str., Kaliningrad, 236041, Russia,
dashaborovik@gmail.com

Abstract. The article examines the issue of the evolution of technologies in the automotive industry and the prospects for the use of aluminum as a material capable of improving the technical characteristics of manufactured vehicles, the environmental and economic situation in the Russian Federation and the world as a whole. The expediency of using aluminum in the automotive industry is substantiated. The relevance of replacing steel body parts with aluminum in the automotive industry is proved, which is due to the high technical and operational, physico-chemical properties of the material.

There is a rapidly growing need to study the issue of aluminum in the automotive and aerospace industries. Modified alloys and sophisticated processing processes expand the range of applications of the material. The metal-appropriate design and economical processing require careful research, knowledge of special performance characteristics.

Since the beginning of the twentieth century, the branch of the Russian aluminum industry adheres to a clear export orientation, where about 80% - 85% of the products are sent. At the same time, the raw material base itself provides less than half of the needs of our country's aluminum plants, the rest is provided by imports.

On the basis of reference materials and literary sources, the history of the formation of aluminum in the automotive industry is analyzed and the possibility of expanding the scope of application of this metal in the construction of vehicles is evaluated, its main advantages and disadvantages among other metals used in industry are described.

The analyzed conclusion on the expediency and relevance of further phased development of the technology for the introduction of aluminum parts and assemblies into the design of manufactured vehicles is presented, confirmed by the relevant conclusions.

Key words: automotive industry, aluminum, winged metal, aluminum consumption, world market, automobile, body materials, car body, environment, ecology, fuel consumption, alloys, Mercedes-Benz, development prospects, operating principle, technology, repair.

Введение. Актуальность изучения вопроса использования алюминия как материала, применяемого в автомобильной промышленности, обуславливается быстроразвивающимся прогрессом в области технических и химических наук, но вместе с тем, ухудшением экологической обстановки, связанным с нерациональным использованием природных ресурсов и материалов, нарушающих целостность окружающей среды.

Целью исследования является изучение свойств алюминия, которые позволят увеличить грузоподъемность ТС, снизить их массу, что в последствие снизит и расход топлива, а следовательно, и количество выбросов в окружающую среду.

Основная часть. Алюминий – химический элемент с порядковым номером 13 серебристо-белого цвета, легкой массы, мягкий металл, относящийся к III группе периодической системы элементов Д. И. Менделеева (рис. 1). Температура плавления достигает до 700°C (жаропрочный), плотность составляет $2,7 \text{ г/см}^3$, атомный вес 26,98 а.е.м. Обладает высокой тепло- и токопроводностью с максимальным пределом прочности 150 МПа, упругостью 7 000 Мпа. В случае повреждения поверхностной пленки – оксид подвержен коррозии из-за активного взаимодействия с кислородом [1].

Добыча осуществляется путем технической обработки бокситовой руды, залежи которой находятся на поверхности Земли (например, Россия, Америка, Франция) [1].

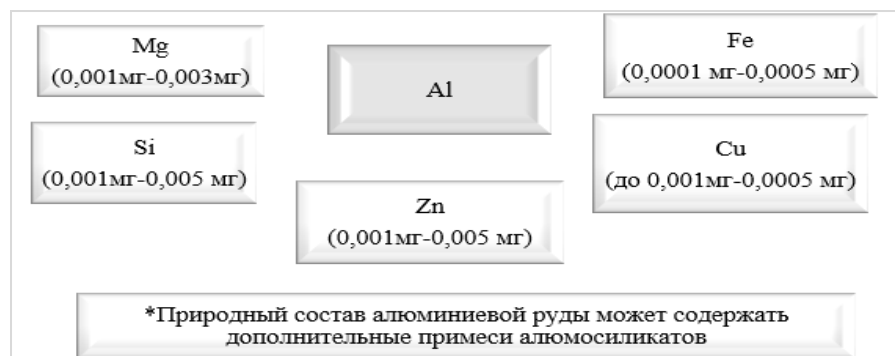


Рис. 1. Состав алюминия

Исторически алюминий – прочный, пластичный и легкий материал, обладающий высоким сопротивлением к торсионным нагрузкам, которому дали второе имя: «крылатый металл» из-за того, что он идеально пригоден для создания управляемых летательных аппаратов [1].

Наиболее распространенный транспорт в мире – автомобильный. Приоритетными направлениями развития отрасли являются конструкционная и эксплуатационная безопасность ТС (транспортного средства), экономичность, экологичность – снижение выбросов CO₂ (углекислого газа) в атмосферу [2].

На сегодняшний день ни один автомобиль, сошедший с конвейера, не обходится без деталей, содержащих алюминий. Обоснованность его массового применения обуславливается лёгкостью – ТС с деталями, изготовленными из алюминия, весят на четверть меньше, чем с аналогичными деталями из стали, что в свою очередь, благоприятно сказывается на экономии топлива (согласно заключению «Ассоциацией автомобилестроителей»: снижение расхода топлива ($\pm 1,0\%$) происходит вследствие снижения общей массы ТС – 0,1 тонна алюминия экономит порядка 1000 литров топлива на каждые 200 000 км и снижает выбросы CO₂ в окружающую среду на 2,5 тонны) [2].

Использование алюминия в автомобильной индустрии началось в тот момент, когда металл не был изучен до конца, но явно были видны признаки (лёгкость, прочность и устойчивость к коррозии), которые давали ему преимущество применения на фоне остальных.

В 1899 году на Берлинской международной выставке был продемонстрирован спортивный автомобиль «Dürkopp», с полностью изготовленным из алюминия корпусом, а в 1901 году, для нищевых гонок Карлом Бенцом был сконструирован автомобиль с полностью

алюминиевым двигателем, который придавал ТС максимум маневренности и скорости, однако дорогостоящая и сложная обработка материала уменьшала его популярность, позже такой двигатель стали использовать при производстве гоночных автомобилей (болидах «Формулы-1»), так и в массовом сегменте [3].

После 1945 года со стороны автопроизводителей возрос интерес к алюминию, что обуславливалось снижением его себестоимости и увеличением доступности. В 1970 году интерес подстегнулся нефтяным кризисом, вследствие которого, возникла задача экономии топлива, которую производители решили путем облегчения общего веса ТС, используя вместо стальных деталей – алюминиевые [3].

Автопроизводители сегмента премиум класса первыми стали применять алюминий для изготовления кузова. «Audi A8» в 1994 году стала первым серийным автомобилем с полностью алюминиевым кузовом. В 1997 году на Франкфуртском автосалоне была презентована «Audi A2» с цельноалюминиевым кузовом», а с 1999 года она стала серийной моделью. Снижение массы кузова на 43% было зафиксировано вследствие его замены со стального на алюминиевый – ТС стало весить 0,96 т вместо прежних 1,7 т. Примечателен тот факт, что для алюминиевого кузова требуется в 1,5 раза меньше деталей, чем для аналогичного стального. Компания «Audi» продемонстрировала технологическое решение «Audi Space Frame» («ASF») – в конструкции кузова используется сочетание штампованных и литых под давлением элементов (рис. 2). Панели – крыша, пол и боковые части — интегрированы в кузов и несут на себе часть силовой нагрузки. При этом форма и профиль отдельных элементов напрямую зависят от их назначения. Полностью собранный алюминиевый кузов закаливают при температуре 200°C в течение 40 минут. Таким

образом технология «ASF» использовалась при проектировании «Audi A2» (2000 г.), «Audi TT» (2006 г.), «Audi R8» (2008 г.), «Audi A8» двух поколений (2002 г. и 2010 г.). Новая технология сплавки алюминия со сталью была воплощена в спорткаре «Mazda RX-8», что дало возможность выпуска обновленных и комбинированных кузовов, бортов полуприцепов и других деталей, скреплённых сваркой, а не заклёпками [3].

К использованию ковального алюминиевого сплава в основе конструкции ТС, например, в деталях подвески и подрамнике прибегли и другие концерны, выпустив «Honda NSX», «Jaguar XJ220», «Ferrari 512GT», «Plymouth Prowler», «Porsche 928», «Chevrolet Corvette», «Mercedes S-Class» «BMW», «Land Rover», «Jaguar» [3].

Инженерам «Jaguar Land Rover» удалось получить образец сплава, сопоставимого по качеству с металлом, применяемым при выпуске автомобилей премиум сегмента путем рециклинга (переработка и повторное использование алюминиевых крышек, банок, деталей списанных ТС (рис. 3). В период с 2007 года по настоящее время автопроизводитель проводит декарбонизацию сокращая выбросы CO₂ на 50,7%, с сентября 2013 по март 2020 гг. по замкнутому циклу было переработано порядка 360 000 тонн металлолома, впоследствии использованного при производстве легкой алюминиевой архитектуры кузова для всех моделей «Jaguar» и «Land Rover».

В 2014 году из-за перехода на алюминий «Ford F-150» стал легче на 315 кг по сравнению с предыдущей моделью. Это позволило сократить расход топлива, уменьшить выхлоп, сделав динамичнее разгон и торможение, при этом не потеряв надежности, что подтвердил рейтинг «NHTSA» (5 звезд вместо 4 в предыдущей модели) [3].

Сопротивление алюминия ударным нагрузкам (гашение удара) делает соблюдение критерия безопасности в два раза эффективнее, чем при применении стали. Локализация деформации в алюминиевых конструкциях возникает непосредственно в компактных зонах, не затрагивая другие части кузова ТС и сохраняя максимальный показатель критерия безопасности салона [4]. В частности, из-за этого автопроизводители давно используют этот металл в изготовлении бамперов. Например, в автомобиле «Tesla Model S» нижняя часть изготовлена из 8-миллиметровой алюминиевой пуленепробиваемой брони, которая является защитой литий-ионного аккумулятора и гарантом безопасности в момент движения на скорости в 200 км/ч. На автомобилях этой марки также дополнительно установлена алюминиево-титановая защита, позволяющая преодолевать препятствия, попадающие под колеса, не теряя курсовой устойчивости и управляемости [3].

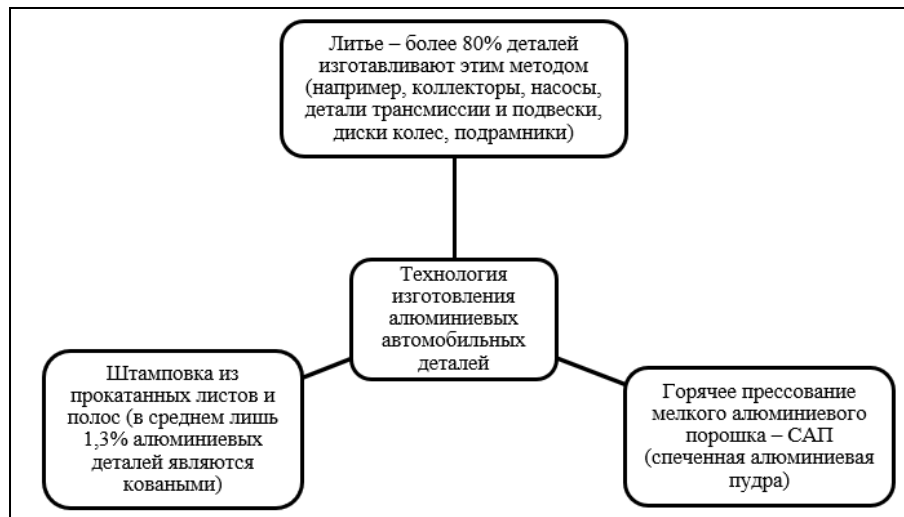


Рис. 2. Технология изготовления алюминиевых автомобильных деталей

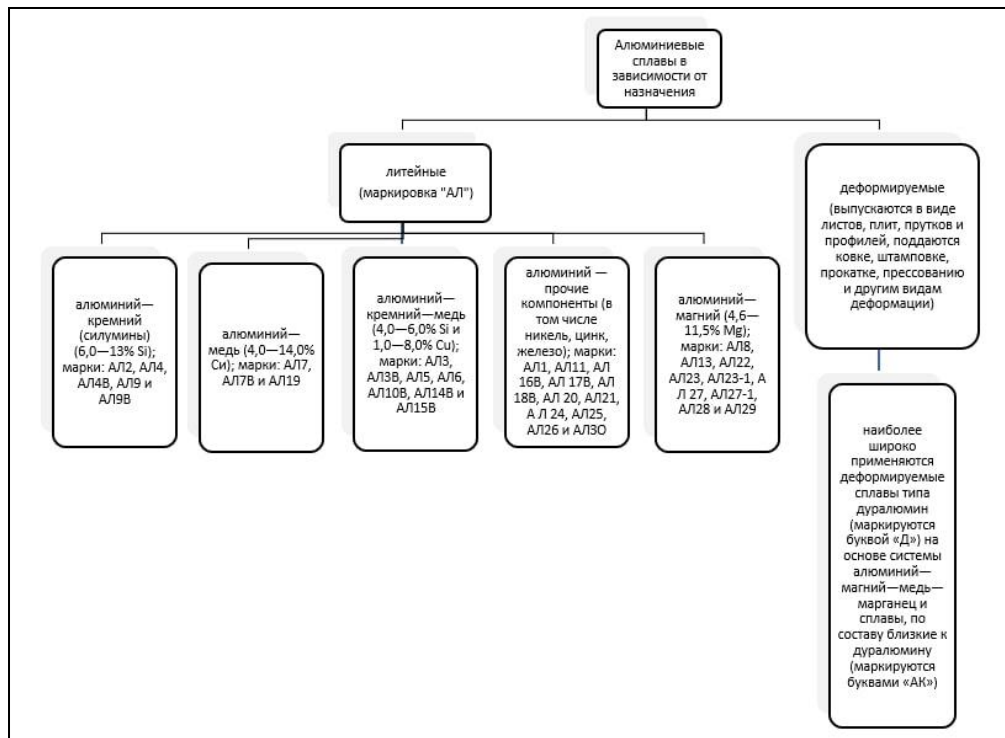


Рис. 3. Алюминиевые сплавы в зависимости от назначения

Из алюминиевых сплавов, чаще силуминов, в автомобильной промышленности делают такие детали как: картеры, блоки цилиндров, головки блоков цилиндров, шкивы [5].

Вследствие того, что на поверхности сплавов всегда присутствует тугоплавкая пленка окислов, они обладают скрытой теплотой плавления, высокими теплопроводностью и коэффициентом линейного расширения — процессы восстановления являются сложными (рис. 4). Затруднения в процессе сварки также вызывают плохая сплавляемость металла, большая усадка остывающего алюминия, что может приводить к образованию трещин по шву или в его близости, а также к образованию пор в металле шва [6].

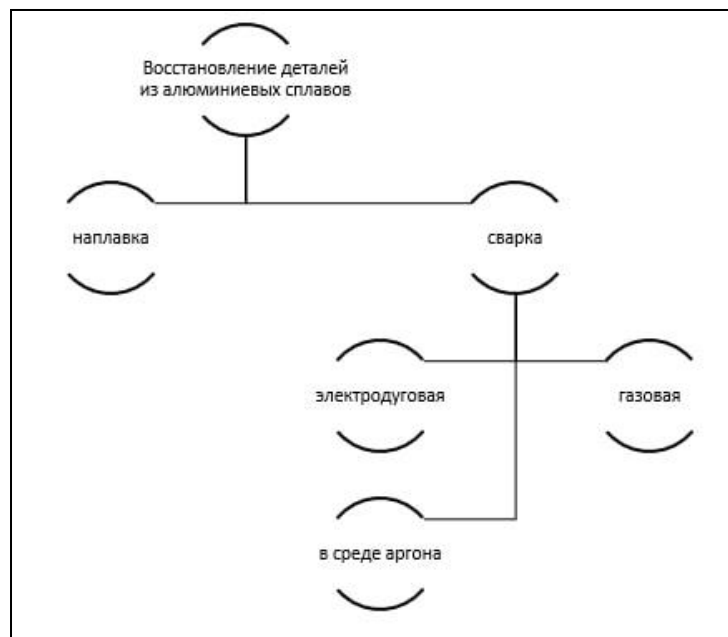


Рис. 4. Восстановление поврежденных и изношенных деталей из алюминиевых сплавов

Таблица 1

Основные прокатные алюминиевые сплавы, которые применяют в автомобилестроении и родственных областях

Обозначение сплава	Номинальный химический состав сплава	Применение алюминиевого сплава
1050	Al99,5	тепловые экраны, ребра теплообменников
3003	Al-1,2Mn-0,12Cu	теплообменники
5005	Al-0,8Mg	тепловые экраны, несущие конструкционные элементы
5052	Al-2,5Mg-Cr	шасси, несущие конструкционные элементы
5454	Al-3Mg-Mn-Cr	колесные диски
5754	Al-3Mg-Mn-Cr	шасси, оси, внутренние панели
5182	Al-4,5Mg-0,4Mn	несущие конструкционные элементы
5083	Al-4,5Mg-0,7Mn-0,15Cr	несущие конструкционные элементы
6016	Al-1,2Si-0,45Mg	кузов, наружные панели
6181A	Al-0,9Si-0,8Mg	кузов, внутренние панели
6111	Al-0,9Si-0,8Mg-0,7Cu-Mn	кузов, наружные панели
6022	Al-1,2Si-0,6Mg-Mn	кузов, наружные панели

*Алюминиевые сплавы 6016, 6022, 6111 и 6181A разработаны специально для автомобилестроения и являются относительно новыми.

В период с 2014 по 2020 годы мировая автомобильная промышленность (без учета Китая) потребила порядка 30 млн тонн

алюминия, чему поспособствовал рост производства ТС и, как следствие, повышение использования алюминия в их конструкции [5].

Согласно статистике за последние 20 лет вес легковых автомобилей увеличился на 0,15 тонн вследствие увеличения габаритов, повышением требований к безопасности и комфорту водителя и пассажиров эксплуатируемого ТС несмотря на то, что Европейский союз, например, на момент 2015 года и по настоящее время, регламентирует ограничение выбросов CO₂ в 1,0 г/км для бензиновых двигателей (рис. 5) и в 0,5 г/км для дизельных двигателей (рис. 5), что может быть достигнуто при массе ТС не более 0,07 т или 0,03 т для бензиновых и дизельных двигателей соответственно. На сегодняшний день содержание алюминия в автомобилях, произведенных в Северной Америке, порядка 0,120 т, в японских и южнокорейских – 0,093 т, западноевропейских – 0,090 т, а российских 0,030-0,040 т [5].

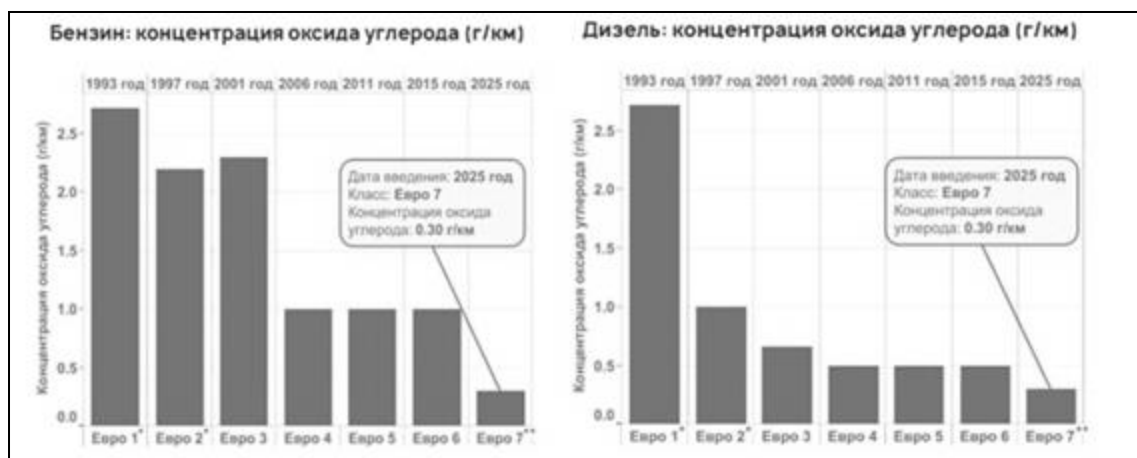


Рис. 5. Экологические стандарты для автомобилей с разным типом двигателей (в классах Евро-1 и Евро-2 разрешенные выбросы оксида азота и углеводородов приводились суммарно; нормативы и сроки реализации класса Евро-7 еще не утверждены)

Некоторые автопроизводители заключают с производителями алюминия соглашения о замкнутом цикле производства (из алюминиевых деталей утилизируемых ТС создаются запасные части для новых) [7].

«Женевский автосалон» 2017 года подтвердил тенденцию на все большее проникновение алюминия в автомобильную промышленность. Например, компания «Jaguar Land Rover Automotive PLC» презентовала «Range Rover Velar» – представителя сегмента «SUV», построенного на облегченной платформе с обширным использованием алюминия (кузов на 81% состоит из алюминия, также как и у модели «Jaguar F-Pace»), благодаря чему удалось зафиксировать на должном уровне массу базовой версии (1,804 т) и получить максимальный аэродинамический коэффициент среди всех автомобилей компании [5]. В свою очередь компания «McLaren Automotive Limited» представила «McLaren 720S», пришедшего на смену «McLaren 650S». Новая модель почти из на 100% выполнена алюминия и углеродного волокна, включая кузов, двигатель, подвеску, элементы ходовой части. Автомобиль обладает 4-литровым двигателем с мощностью 710 л.с. (разгон до 100 км/ч за 2,8 секунд). Для сравнения, «Lamborghini Huracan Perfomante», в котором алюминий использован при производстве рамы и кузова, а двигатель изготовлен из бронзы и титана, уступает «McLaren 720S» при разгоне лишь 0,1 секунды [5]. Без внимания не обходится и ниша массового сегмента, компания «Renault» реализовала спортивное купе «Alpine», у которого, в отличие от одноименного предшественника, популярного в 60–70-е годы прошлого столетия, весь кузов и ходовая часть выполнены из алюминия [5], а «Honda» - пятидверный хетчбэк «Civic» 10-го поколения, у которого из этого же металла сделаны детали подвески, элементы кузова, а также различные детали интерьера. Помимо этого, также как и большинство современных ТС, новый «Civic» оснащается легкосплавными алюминиевыми колесными дисками. «S-Class W223» 2021 года создан на новой платформе «MRA II», отличающейся использованием алюминия и углепластика, благодаря которой снаряженная масса по сравнению с «W222» стала меньше на 60 кг, а жесткость кузова возросла. Новый

гибридный кузов содержит более 50% алюминия. На данный момент электрические автомобили «Tesla» практически на 50% состоят из алюминия, при том, что на производство одной «Tesla» требуется около двух тонн металла. Выпуск этих моделей ограничен и занимает небольшую нишу на мировом рынке, но в перспективе планируется значительное расширение масштабов производства. К настоящему моменту компания представила четыре модели электрокаров – «Roadster», «Model S», «Model X» и «Model 3» (последняя стала первым бюджетным автомобилем в модельном ряду «Tesla») [5].

Директор «РУСАЛа» по сбыту алюминия в России и странах СНГ Андриюшин Р.Е. заключил: «Россия и страны СНГ в 2020 году потребила немногим больше 900 000 тонн алюминия. Когда «Tesla» будет выпускать порядка 500 000 автомобилей, то только один завод станет закупать 250 000 тонн крылатого металла, что ориентировочно составит четверть рынка РФ [8]. Руководители «РУСАЛа» убеждены, что литий-ионные аккумуляторы, используемые в «Tesla» и составляющие 0,7 их веса, являются не подходящим решением для электрокаров, и, алюминий это тот материал, способный заменить в их составе литий, в 5 раз удешевит производство и реализацию, при условии полного удовлетворения требованиям пожаро- и взрывобезопасности (в отличие от литий-ионных они не воспламеняются и не взрываются при нагреве/механическом повреждении, быстрее заряжаются) [8]. Эксперты «Алюминиевой ассоциации России» уверены, что применение крылатого металла в транспортной отрасли будет расширяться. К 2022 году доля автоконцернов в мировом потреблении достигнет почти 30% против нынешних 27% [9].

Согласно заключению компании «Lucintel» в период с 2019 г. по 2025 г. рост в спросе (>3%) демонстрируют такие материалы, как алюминий, быстрорежущая сталь/высокопрочная сталь, магний,

композиты, пластмассы же напротив демонстрируют плато (от 0% до 3%) [10].

Ожидается, что мировой рынок облегченных конструктивных материалов для автомобильной промышленности к 2025 году достигнет порядка 103,1 млрд долларов при среднем росте от 4% до 6% в период с 2020 г. по 2025 г. Основными факторами, определяющими данный рынок, являются государственное регулирование экономии топлива и контроля выбросов, ужесточение правил безопасности, увеличение производства ТС, увеличение использования облегченных конструктивных материалов, повышение цен на бензин и экономия топлива, а также замена традиционных конструктивных материалов [9].

В соответствии с проведенными всесторонними исследованиями аналитических компаний видно, что мировой рынок облегченных конструктивных автомобильных материалов будет демонстрировать высокие темпы роста в период с 2020 г. по 2025 г (рис. 6) [9].

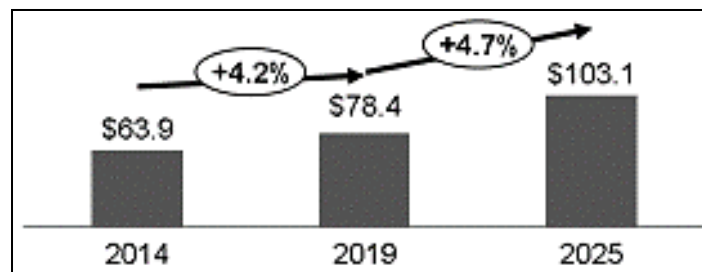


Рис. 6. Тенденции и прогноз мирового рынка облегченных конструктивных материалов в автомобильной промышленности в период с 2014 г. по 2025 г.

Сегодня на отрасль автомобилестроения приходится порядка 30% всего производимого в мире металла, в Германии этот показатель равен 50%. В одном европейском автотранспортном средстве (АТС) используется порядка 0,18 т алюминия, в российском – не более 0,07 т, причем в электрокарах его применение на 15-27% больше, чем в автомобилях с ДВС. В перспективе данный металл будет применяться для построения бионических рам с пористой структурой, подходящих для АТС

разных классов и типов. На ближайшие 5-7 лет именно данный сегмент будет оставаться локомотивом прироста потребления. Не случайно в последние годы большинство ведущих производителей металла активизировали деятельность по разработке и выпуску новых сплавов, предназначенных для автомобильной промышленности. Не остается в стороне и отечественный производитель «РУСАЛ»: алюминий компании поставляется ведущим автопроизводителям в Азии, Северной Америке, Европе и в другие регионы мира. Исследовательские компании не только констатируют прочные позиции алюминия в современном автомобилестроении, но и уверенно прогнозируют завоевание крылатым металлом новых высот в этой отрасли [8].

Заключение. Алюминий и сплавы на его основе в составе автомобильных конструкций имеют ряд преимуществ и являются наиболее вероятными претендентами на замену стали. Они не токсичны, коррозионно-устойчивы, обладают хорошим энергопоглощением (гашение вибраций и ударов), сопротивлением торсионным нагрузкам, низкой нагрузкой на ходовую часть и неподрессоренные массы, малый вес, оказывающий прямое влияние на экономичный расход топлива и сокращение вредных выбросов в атмосферу, улучшение динамических характеристик, высокой прочностью, возможностью переработки и повторного использования без потерь в свойствах, что положительным образом сказывается на состоянии окружающей среды. Также одним из преимуществ алюминиевого кузова/деталей/узлов автомобилей является повышенная прочность (модуль упругости в три раза меньше, чем у стали) и деформации в таких конструкциях локализуются в компактных зонах, тем самым поддерживая безопасность на должном уровне – все эти перечисленные факторы могут служить убедительными доводами в пользу применения этого металла в автомобилестроении. Согласно экспертным прогнозам и заключениям доля применения стали будет уменьшаться, а

алюминия напротив – увеличиваться, в том числе и в массовом сегменте. Однако на данный момент применение алюминия и его сплавов отчасти во многом зависит от снижения себестоимости, расширения ресайклинга, разработки новых и эффективных технологий производства автомобильных деталей.

Список литературы

1. Глубоков, Ю.М. Аналитическая химия: учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования / Ю.М. Глубоков, В.А. Головачева, Ю.А. Ефимова; под ред. А.А. Ищенко. – М.: ИЦ Академия, 2013. – 320 с.
2. Бах, Р. Сайт об алюминии»: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://aluminiumleader.ru/application/transport/> (дата обращения: 11.11.2021).
3. Столбунов, В Газета «Независимая»: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ng.ru/ideas/2017-08-17/5_7053_autoprom.html (дата обращения: 11.11.2021).
4. Кузьмин, Ю. А. Конструкционные и защитно-отделочные материалы в автомобилестроении: учебное пособие / Ю. А. Кузьмин. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 186 с.
5. Кудрявцев, С.М. Основы проектирования, производства и материалы кузова современного автомобиля: учебное пособие / С.М. Кудрявцев. – Н. Новгород, 2018. 310 с.
6. Рогов, В.А. Новые материалы в машиностроении: учебное пособие / В.А. Рогов. – М.: РУДН, 2018. – 324 с.
7. Никитин, К.В. Рециклинг металлоотходов на основе алюминия: учеб. пособие / К.В. Никитин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 67 с.
8. «Русал»: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://rusal.ru/presscenter/files/RUSAL%20Encyclopedia_full_rus_FINAL.pdf (дата обращения: 11.11.2021).
9. Центральный металлический портал РФ. – URL: <https://metallicheckiy-portal.ru/articles/mashinostr/alyuminiy-v-mashinostroenii> (дата обращения: 11.11.2021).
10. «Lucintel»: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lucintel.com/> (дата обращения: 11.11.2021).

References

1. Glubokov YU.M., Golovacheva V.A., Efimova YU.A., ed. Ishchenko A.A. *Analiticheskaya himiya* (Analytical chemistry) Moscow, IC Akademiya, 2013, 320 p.
2. Bah R., URL: <https://aluminiumleader.ru/application/transport/>
3. Stolbunov V., Gazeta «Nezavisimaya», available at: https://www.ng.ru/ideas/2017-08-17/5_7053_autoprom.html (11.11.2021)
4. Kuz'min YU. A. *Konstrukcionnye i zashchitno-otdelochnye materialy v avtomobilstroenii* (Structural and protective finishing materials in the automotive industry) Ulyanovsk, UIGTU, 2015, 186 p.
5. Kudryavcev S.M. *Osnovy proektirovaniya, proizvodstva i materialy kuzova sovremennogo avtomobilya* (Fundamentals of design, production and body materials of a modern car), N. Novgorod, 2018, 310 p.
6. Rogov V.A. *Novye materialy v mashinostroenii* (New materials in mechanical engineering), Moscow, RUDN, 2018, 324 p.
7. Nikitin K.V. *Recikling metalloothodov na osnove alyuminiya* (Recycling of metal waste based on aluminum), Samara, Samar. gos. tekhn. un-t, 2015, 67 p.
8. URL: https://rusal.ru/press-center/files/RUSAL%20Encyclopedia_full_rus_FINAL.pdf
9. URL: <https://metallicheskiy-portal.ru/articles/mashinostr/alyuminiy-v-mashinostroenii>
11. URL: <https://www.lucintel.com/>

Рецензент: В.Г. Мосур, канд. техн. наук, доц., БФУ им. И. Канта