

Научная статья

УДК 678.8:621.43

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-86-101

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

Д.В. Косолапов<sup>1</sup>, Л.Г. Ходыкин<sup>1</sup>, А.Н. Няфкин<sup>1</sup>, Д.Л. Ходыкин<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Представлен краткий обзор научно-технической литературы в области применения металлических композиционных материалов (МКМ) при изготовлении двигателя внутреннего сгорания, в частности при проектировании и производстве поршней. Описаны методы получения МКМ с различными армирующими компонентами. Показаны результаты испытаний МКМ и изготовленных из них поршней. Отражены результаты работы по изготовлению заготовок поршней из МКМ в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

**Ключевые слова:** поршень, двигатель внутреннего сгорания, композиционный материал, алюминиевый сплав, механические свойства

**Для цитирования:** Косолапов Д.В., Ходыкин Л.Г., Няфкин А.Н., Ходыкин Д.Л. Применение металлических композиционных материалов при изготовлении двигателя внутреннего сгорания в автомобилестроении // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-86-101.

Scientific article

## THE USE OF METAL COMPOSITE MATERIALS IN THE MANUFACTURING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

D.V. Kosolapov<sup>1</sup>, L.G. Khodykin<sup>1</sup>, A.N. Nyafkin<sup>1</sup>, D.L. Khodykin<sup>1</sup>

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

**Abstract.** A brief scientific and technical literature review is presented in the field of application of metal composite materials (MMCs) in manufacturing of internal combustion engines, in particular, design and manufacturing of pistons. Methods for producing MMCs with various reinforcing components are described. The test results for MMCs and pistons made from them are shown. The results of work on manufacturing of piston blanks from MMCs at the National Research Center “Kurchatov Institute” – VIAM are presented.

**Keywords:** piston, internal combustion engines, composite material, aluminum alloy, mechanical properties

**For citation:** Kosolapov D.V., Khodykin L.G., Nyafkin A.N., Khodykin D.L. The use of metal composite materials in the manufacturing of internal combustion engines in the automotive industry. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-86-101.

## Введение

Создание новых материалов, технологических решений, их совершенствование и модификация предполагают организацию полного жизненного цикла материала – реализацию принципа неразрывности материала, технологии и конструкции [1–3].

Автомобильный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – это сложный механизм, состоящий из большого количества деталей, обеспечивающий движение автомобиля за счет преобразования энергии расходуемого топлива. При работе автомобильного двигателя детали поршневой группы подвергаются значительным циклическим, механическим и тепловым нагрузкам. Поршень, являясь одной из важных частей двигателя, воспринимает давление газов, образующихся при сгорании топливно-воздушной смеси, а затем передает его через поршневой палец на шатун и коленчатый вал. Поршни ДВС обладают высокими прочностными характеристиками, обеспечивающими необходимую надежность и долговечность в условиях воздействия динамических и тепловых нагрузок. При этом они должны обладать малой массой, высокой износостойкостью контактных поверхностей, оптимальной теплопроводностью, а также низкими значениями коэффициента трения при минимальных монтажных зазорах в цилиндре и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР).

Традиционно для производства поршней в отечественной и мировой практике применяют алюминиевые сплавы, легированные кремнием, чугуны и стали.

Чугунные и стальные поршни отличаются высокими прочностными характеристиками, износостойкостью и низким значением ТКЛР, однако из-за большой массы они получили малое распространение. Стальные поршни нашли применение в дизельных ДВС, работающих при повышенных температурах. Чугунные поршни применяются в поршневых компрессорах, где использованию поршней из легких сплавов препятствует коррозия. Несмотря на разработку высококачественных сортов чугуна, близких по своим качествам к стали и позволивших значительно снизить массу деталей, чугунные поршни в автомобильных двигателях применяются редко.

Широкое распространение в автомобилестроении получили поршни из эвтектических и заэвтектических алюминиевых сплавов с содержанием кремния от 11 до 23 %. Основными достоинствами алюминиевых сплавов перед сплавами на основе других металлов являются: небольшая плотность, высокая теплопроводность и удовлетворительные трибологические характеристики [4]. При этом очевидные недостатки поршней, изготовленных из освоенных промышленностью алюминиевых сплавов, такие как значительное снижение прочностных характеристик при высоких температурах, высокий ТКЛР и низкая износостойкость, преодолеваются за счет конструкционных и технологических мероприятий, среди которых выделяют:

- разработку специальных сплавов с добавлением компонентов, улучшающих прочностные характеристики при высоких температурах и уменьшающих тепловое расширение;

- использование специальных технологий изготовления заготовок поршней (литье под давлением, изотермическая штамповка для эвтектических сплавов и изотермическая ковка для заэвтектических сплавов, в том числе гранулированных).

Необходимо отметить, что возможности традиционных сплавов для поршней уже не удовлетворяют производителей ДВС, сконцентрировавших усилия на повышении износостойкости, термической и механической прочности, снижении потерь на трение при одновременном уменьшении массы поршня. Поэтому разработчики активно ведут исследования с целью замены традиционных материалов на композиционные [5–13].

Одной из главных задач, которую необходимо решить исследователям, является разработка металлических композиционных материалов (МКМ) на основе алюминиевых сплавов, упрочненных керамическими наполнителями. Данный подход позволяет

в значительной степени повысить эксплуатационные характеристики деталей, среди которых трибологические свойства, коррозионная стойкость, механическая прочность и др. Кроме того, изменяя соотношение количества матрицы и наполнителя, можно получить изделие, обладающее заданными свойствами. В качестве матричных сплавов при производстве МКМ и деталей из них используется широкая номенклатура как литейных, так и деформируемых алюминиевых сплавов. Среди многообразия керамических материалов ведущую позицию в качестве армирующего компонента занимает карбид кремния благодаря низкой стоимости, химической стойкости, высокой твердости и небольшой плотности. Следует отметить, что композиционные материалы на основе алюминия, модифицированные карбидом кремния, уже нашли широкое применение в автомобильной промышленности [14].

Цель работы – обзор и анализ источников научно-технической литературы, посвященной изготовлению поршней из МКМ для ДВС в автомобилестроении.

### Композиционные материалы для изготовления поршней

Авторы работы [15] исследовали процесс литья заготовок поршней из МКМ с алюминиевой матрицей из сплава состава  $AlSi12CuMgNi$  (аналог сплава АК12М2МгН). Для эксперимента изготовлено два состава МКМ. Первый состав содержит частицы карбида кремния (фракция частиц размером 25 мкм) в количестве 15 % (по массе). Второй состав армирован смесью частиц карбида кремния (фракция частиц размером 25 мкм) и аморфного стеклоглерида (фракция частиц размером 100 мкм) в количестве 15 % (по массе). Заготовки поршней получали методом гравитационного литья по 6 шт. для каждого состава МКМ. Все отливки соответствовали размерам формы, отливка поршня показана на рис. 1.

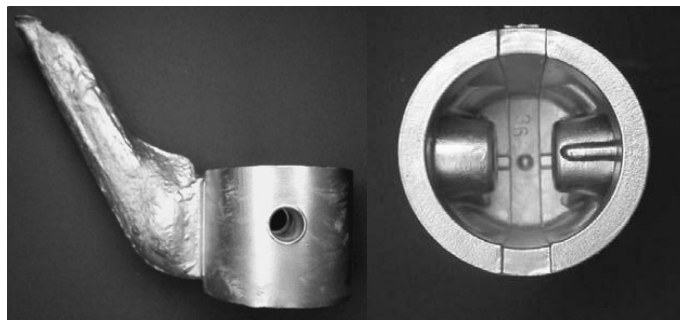


Рис. 1. Отливка поршня из сплава состава  $AlSi12CuMgNi$ , армированного смесью карбида кремния и стеклоглерида (15 % (по массе)) [15]

Внутреннюю структуру заготовок поршней исследовали со стороны литниковой системы и в противоположной ей области. Авторы работы [15] на основании микроструктурных наблюдений установили, что распределение армирующих частиц как  $SiC$  (рис. 2), так и смеси  $SiC$  и стеклоглерида (рис. 3) в матрице на исследуемом сечении поршня было равномерным. Однако пористость также встречается в структуре, особенно в областях литниковой системы.

Поры и агломераты частиц концентрируются на внутренних стенках поршней, тогда как внешние области и противоположная литниковой системе область имеют незначительную пористость с редкими пустотами вокруг равномерно распределенных керамических частиц. Описанное неблагоприятное явление пористости связано как с технологическими параметрами литья, так и с процессами затвердевания и кристаллизации матрицы.

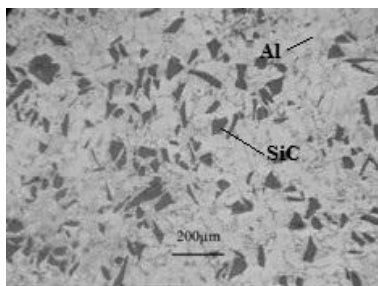


Рис. 2. Распределение армирующих частиц карбида кремния в алюминиевой матрице [15]

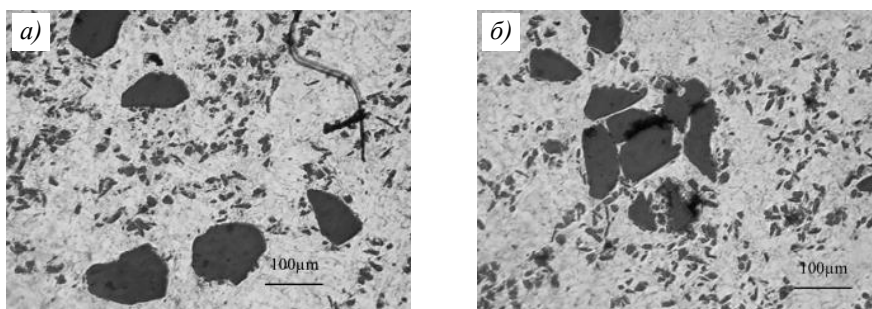


Рис. 3. Микроструктуры поршня из сплава состава AlSi12CuMgNi, армированного смесью карбида кремния и стеклоглуглерида (15 % (по массе)): *a* – область, противоположная литниковой системе; *б* – область литниковой системы [15]

Твердость исследовали на испытательной машине Бринелля в 18 точках измерения на поперечном сечении поршня, показанного на рис. 4. Полученные результаты представлены на рис. 5.

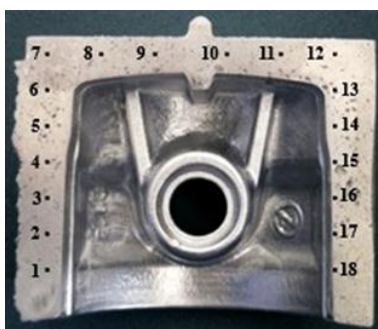


Рис. 4. Точки измерения твердости в поперечном сечении поршня [15]

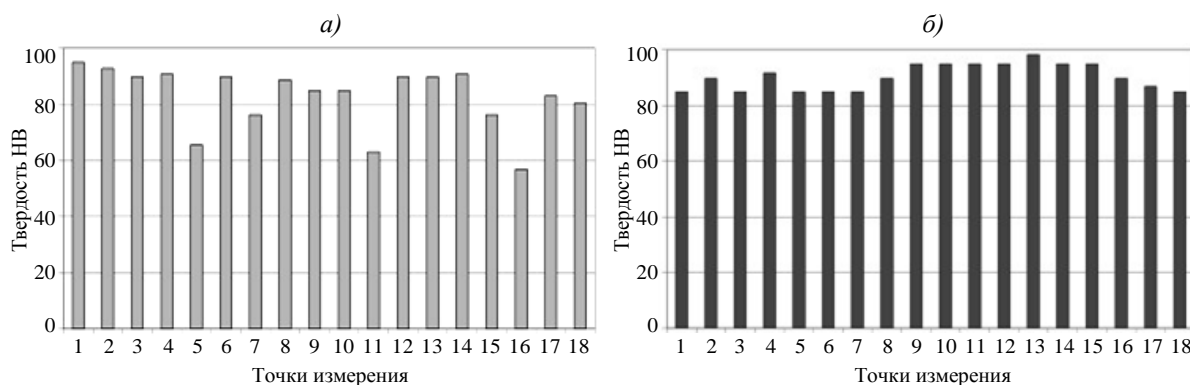


Рис. 5. Твердость поршней из сплава состава AlSi12CuMgNi, армированного карбидом кремния (*a*) и смесью карбида кремния и стеклоглуглерида (*б*) [15]

Установлено, что более высокая твердость и более равномерное распределение твердости на поперечных сечениях поршней имеет гетерофазный композит (рис. 5, б). Повышенные значения твердости могут указывать на более равномерное распределение армирующих частиц и наличие второй фазы в алюминиевой матрице.

Проведенные технологические испытания подтвердили возможность изготовления поршней из МКМ с гомо- и гетерофазным армированием в процессе литья под давлением.

Авторы работы [16] получили поршень из композита на основе бронзы, армированного алюминием и кремнием, и сравнили его с поршнем из алюминиевого сплава состава AlSi12CuNiMg. В табл. 1 представлены составы материалов для поршней.

Таблица 1

**Химический состав материалов для поршней [16]**

Материал	Содержание элемента, % (по массе)										
	Бронза	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
МКМ на основе бронзы, армированный Al и Si	70	18	12	–	–	–	–	–	–	–	–
Сплав состава AlSi12CuNiMg	–	80,54	12,362	0,4556	4,361	0,011	1,181	0,075	0,002	0,946	0,011

Примечание. МКМ – металлический композиционный материал.

Композиционный материал изготовлен методом вакуумного литья с перемешиванием. Расплав композиционного материала заливали в матрицу и получали поршень необходимой формы с последующей финишной механической обработкой.

Механические свойства, такие как предел прочности при растяжении и твердость, рассчитывали экспериментальным путем. Анализировали пять образцов и регистрировали среднее значение. Результаты проведенных испытаний показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Средние значения результатов испытаний материалов для поршней [16]**

Материал	Предел прочности при растяжении, МПа	Твердость HB
Металлический композиционный материал на основе бронзы, армированный Al и Si	684	159
Сплав состава AlSi12CuNiMg	420	137

Авторы также провели испытания для определения скорости износа поршней при следующих условиях: нагрузка 10 Н, скорость скольжения 1 м/с, расстояние скольжения 500 м. Скорость износа составила 0,00357 мм<sup>3</sup>/м для поршня из МКМ, 0,01436 мм<sup>3</sup>/м – для поршня из сплава состава AlSi12CuNiMg.

Применение композита на основе бронзы для поршня позволило повысить предел прочности при растяжении на 38,5 %, твердость – на 13,8 %. Улучшилось распределение температуры, уменьшилась скорость износа. Несмотря на эти достижения, применение МКМ на основе бронзы из-за большой плотности (~8 г/см<sup>3</sup>) и, соответственно, большей массы поршня возможно только в тихоходных двигателях или двигателях с малыми объемами.

В работе [17] авторы описывают технологию получения МКМ и процесс изготовления поршня для машин, участвующих в гоночном чемпионате «Формула-1».

Для уменьшения инерционной массы поршневых систем и увеличения количества оборотов двигателя разработан МКМ с алюминиевой матрицей. Взамен алюминиевого сплава AA2618 (аналог сплава АК4-1) для изготовления поршня ДВС используется МКМ на основе алюминиевого сплава AA2124 (аналог сплава Д16), армированного частицами карбида кремния (фракция частиц размером 3 мкм) в количестве 25 % (объемн.).

Композиционный материал из порошков алюминиевого сплава и карбида кремния получали путем механического легирования с помощью высокоэнергетических мельниц. Сравнительные характеристики материалов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные характеристики материалов для поршней [17]

Материал	Модуль упругости, ГПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температурный коэффициент линейного расширения, К <sup>-1</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Сплав AA2618	74,6	2,76	22,6	165
Металлический композиционный материал на основе сплава AA2124, армированного SiC	113,0	2,89	15,5	129

Полученные композиционные гранулы брикетировали, затем для уменьшения анизотропии свойств подвергали горячему изостатическому прессованию, а после проводили штамповку заготовки поршня на низкоскоростном гидравлическом прессе. На рис. 6 показана микроструктура разработанного МКМ. Можно наблюдать бесчисленное количество субмикронных частиц, равномерно распределенных между крупными частицами размером несколько микрометров. Предполагается, что эти субмикронные частицы представляют собой SiC, измельченный в процессе механического легирования и диспергированный в матрице.

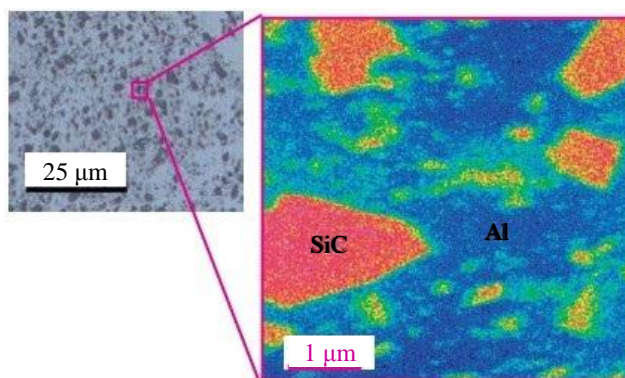


Рис. 6. Микроструктура металлического композиционного материала из сплава AA2124, армированного SiC (25 % (объемн.)) [17]

На рис. 7 показаны механические характеристики образца из верхней части материала для поршня. Высокие значения как сопротивления усталости, так и удлинения достигнуты в диапазоне рабочих температур поршня от 200 до 300 °С.

Применение МКМ позволило уменьшить массу поршня на 16 % по сравнению с алюминиевым сплавом AA2618 и увеличить количество оборотов двигателя на 400 об/мин.

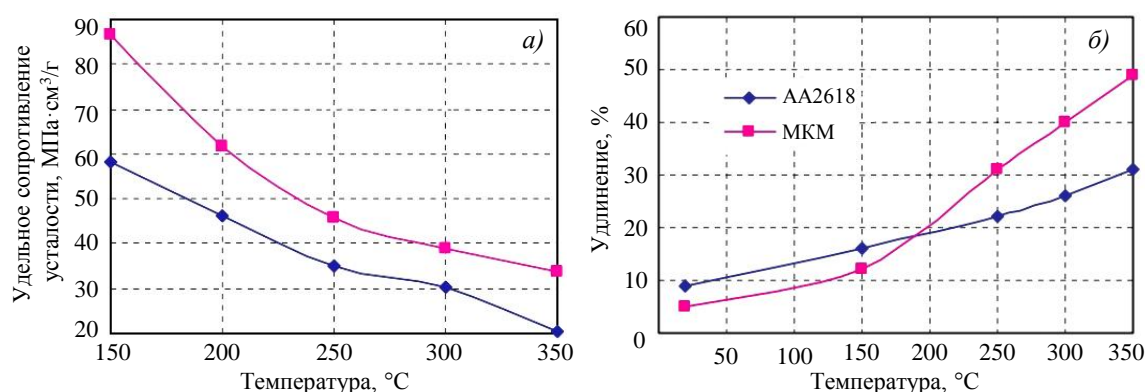


Рис. 7. Сопротивление усталости (а) и удлинение (б) сплава AA2618 и металлического композиционного материала (МКМ) из сплава AA2124, армированного SiC [17]

В работе [18] представлены результаты разработки поршней из нового композиционного сплава для ДВС. Изучен процесс кристаллизации сплава, определены прочность, твердость, ТКЛР, стойкость к схватыванию, проведены металлографические исследования и испытания на стенде в составе двигателя. В ходе испытаний размерной стабильности поршней в термокамере установлено, что остаточные деформации по диаметру поршня не превышают 2 мкм. Двигатель с поршнями из нового композиционного сплава показал меньший расход смазочного масла, а также меньший уровень токсичности выхлопных газов и шума по сравнению со стандартным двигателем.

Цель работы [18] – замена поршней двигателей военного назначения, изготовленных ковкой из деформируемого алюминиевого сплава PA12. Поршни, полученные методом литья из эвтектического сплава системы Al–Si, должны характеризоваться аналогичными прочностными и улучшенными функциональными свойствами, которые достигаются прежде всего за счет уменьшения зазоров между поршнем и цилиндром.

В табл. 4 показан химический состав сплава PA12, средний обобщенный состав эвтектических сплавов, а также состав сплава, который является конечным результатом проведенной работы и который выбран для изготовления поршней.

Таблица 4

Химический состав сплавов для поршней двигателей [18]

Элемент	Содержание элемента, % (по массе), в сплаве		
	PA12	композиционном	эвтектическом системы Al–Si (обобщенный состав)
Si	10,5–12,5	11,5–12,5	9,5–13,0
Cu	0,5–1,5	3,0–4,0	0,5–4,0
Mg	0,8–1,8	0,3–0,6	0,4–1,7
Ni	0,5–1,5	4,0–5,0	0,5–4,0
Fe	≤0,7	0,05	0,5–0,7
Ti	≤0,1	–	0,1–1,2
Cr	–	0,05–0,80	–
Mo			
W			
V			
Mn	<0,2	0,20–0,35	0,2–0,6
Zn		–	0,05–0,20
Другие	≤0,15	–	≤0,15

В качестве базового сплава для изготовления тестовых образцов использован эвтектический сплав системы Al–Si, имеющий маркировку АК12. Исследовано влияние содержания легирующих элементов на характеристики материала. Результаты представлены на рис. 8.

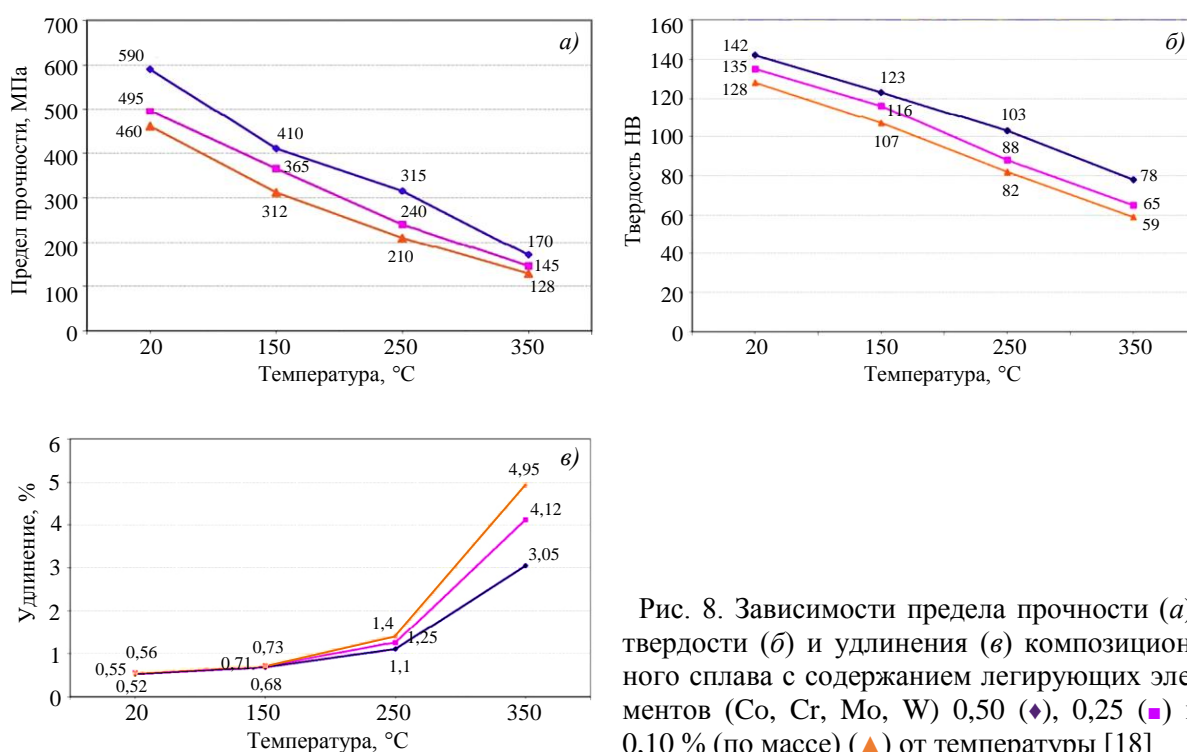


Рис. 8. Зависимости предела прочности (а), твердости (б) и удлинения (в) композиционного сплава с содержанием легирующих элементов (Co, Cr, Mo, W) 0,50 (♦), 0,25 (■) и 0,10 % (по массе) (▲) от температуры [18]

Прочность композиционного сплава сравнима с прочностью низколегированных сталей. Однако это потребовало использования большого количества легирующих элементов. В композиционном сплаве, выбранном для изготовления поршня, содержание легирующих элементов достигло 22 % (по массе), включая Si. На основании данных о влиянии содержания легирующих элементов на предел прочности при комнатной и повышенных температурах, а также результатов металлографических исследований и определения размерной стабильности выбраны химический состав и технология изготовления поршней из экспериментального сплава.

Результаты испытаний литых образцов, проведенных при температуре окружающей среды и при повышенных температурах (до 350 °C), показывают, что более высокие значения прочности и твердости получены для сплава, содержащего большое количество легирующих элементов.

Установлено, что при увеличении содержания хрома в диапазоне от 0 до 0,6 % (по массе) прочность увеличилась с 200 до 490 МПа, а при достижении 1,75 % (по массе) – снизилась до 110 МПа. При добавлении молибдена прочность повысилась при увеличении концентрации элемента до 0,5 % (по массе) с 200 до 480 МПа и уменьшилась до 200 МПа при содержании 1,4 % (по массе). Твердость при этом изменилась с 98 до 139 НВ при содержании молибдена от 0 до 1,8 % (по массе). Добавление вольфрама обеспечило аналогичный эффект, прочность увеличилась с 210 МПа (при отсутствии вольфрама) до 460 МПа (при содержании вольфрама 0,65 % (по массе)).

После определения химического состава композиционного сплава и технологии изготовления получена опытная партия поршней для проведения прочностных испытаний. Исследование позволило сравнить прочностные свойства композиционного сплава и сплава марки РА12. Образцы вырезали из днища и юбки поршня (рис. 9).

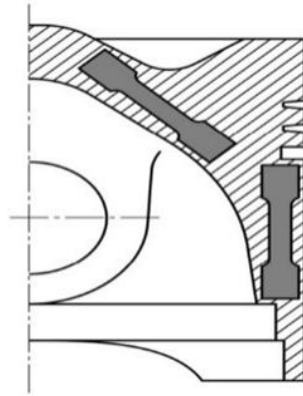


Рис. 9. Эскиз поршня с отмеченными местами для вырезки образцов [18]

В ходе испытаний определили предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и твердость по Бринеллю при температуре окружающей среды и 250 °С. Изготовлено по пять образцов из каждой головки поршня и по три образца из каждой юбки поршня.

Как показали результаты испытаний, поршни из композиционного сплава имеют более высокую прочность, чем поршни из сплава РА12. Разница значений составляет ~22 % при комнатной температуре и ~45 % при температуре 250 °С. Прочность образцов при нагреве с 20 до 250 °С снизилась на ~24 % для композиционного сплава и на ~48 % для сплава РА12. Значения удлинения при комнатной температуре были одинаковыми для обоих материалов (3,7 %). При температуре 250 °С удлинение образцов из сплава РА12 в ~2 раза больше, чем у образцов, изготовленных из композиционного сплава. Модуль упругости разработанного сплава на ~5 % больше по сравнению со сплавом РА12, твердость – на ~10 %. Усредненные результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытаний образцов, вырезанных из поршня [18]

Материал	Температура испытаний, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Сплав РА12	20	371,0	320,8	3,7
	250	250,2	215,7	11,4
Металлический композиционный материал на основе сплава системы Al-Si	20	451	385	3,7
	250	364	299	5,7

Проведены комплексные дилатометрические исследования материалов поршней. В ходе испытаний зафиксированы изменения размеров образцов при нагреве и охлаждении в диапазоне температур от 20 до 330 °С. На рис. 10 показано изменение ТКЛР образца из МКМ. Видно, что изменение ТКЛР образца при нагреве и охлаждении идентично.

На последнем этапе исследований проведены испытания двигателей, оснащенных поршнями из разработанного материала. Исследования проводили на динамометрическом стенде, установленном в испытательном стенде двигателя. Согласно полученным результатам исследований, поршни имеют скорректированный контур внешней поверхности, спроектированный с помощью математического моделирования. Исследования подтвердили высокое качество поршней из разработанного материала.

В результате достигаются увеличение мощности двигателя на 2–3 %, крутящего момента двигателя – на 4 %, а также снижение удельного расхода топлива на 4 %, выбросов углеводородов – на 24 %, выбросов углекислого газа – на 10–20 %, расхода масла – на 17 %, прорыва выхлопных газов в картер двигателя – на 35–45 %.

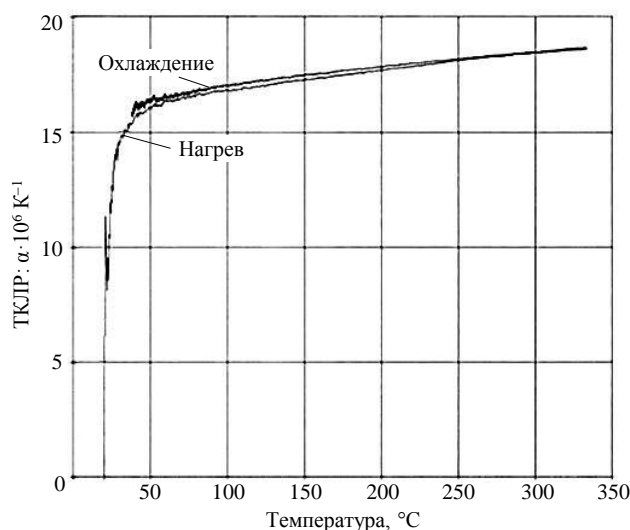


Рис. 10. Изменение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) металлического композиционного материала на основе сплава системы Al–Si при нагреве и последующем охлаждении [18]

Исследовано влияние керамических частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на механические свойства материала для поршней [19]. Поршни, имеющие повреждения (рис. 11), плавил в шахтной печи при температуре 850 °C при постоянном помешивании в течение 10 мин. Сделано четыре плавки из сплава состава AlSi12Cu1(Fe), не армированного и содержащего  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в количестве 2, 4 и 6 % (объемн.). Порошок частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  размером 25 мкм, предварительно нагретый до температуры 200 °C, добавляли в перемешиваемую смесь. Расплавленные смеси заливали в железную форму, предварительно нагретую до 400 °C.



Рис. 11. Поршень с повреждением на верхней поверхности: а – вид сверху; б – вид сбоку

Из полученных отливок изготовлены образцы для испытаний на растяжение (рис. 12, а) и для определения твердости (рис. 12, б). Полученные результаты испытаний показаны в табл. 6.

Как видно из результатов испытаний, при увеличении содержания керамических частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  предел прочности при растяжении и твердость также повышаются. Прочность при растяжении увеличивается благодаря тому, что твердые керамические частицы препятствуют движению дислокаций. Твердость МКМ повышается за счет высокой твердости керамических частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



Рис. 12. Образцы из сплава состава  $AlSi12Cu1(Fe)$  и металлического композиционного материала на его основе для испытания на растяжение (а) и для определения твердости (б)

Таблица 6

**Результаты испытаний сплава состава  $AlSi12Cu1(Fe)$  и металлического композиционного материала (МКМ) на его основе**

Материал	Предел прочности при растяжении, МПа	Твердость HV
Сплав состава $AlSi12Cu1(Fe)$	157	119,25
МКМ на основе сплава состава $AlSi12Cu1(Fe)$ с содержанием $Al_2O_3$ , % (объемн.):		
2	163	124,25
4	212	121,95
6	132	133,90

Низкие показатели предела прочности при растяжении для образца, содержащего 6 % (объемн.)  $Al_2O_3$ , и твердости для образца, содержащего 4 % (объемн.)  $Al_2O_3$ , можно объяснить, во-первых, малой выборкой испытаний (статистической погрешностью); во-вторых, неоднородностью распределения частиц в матричном сплаве.

В работе [20] использовали алюминиевый сплав А356 (аналог сплава АК7пч) и МКМ на его основе, армированный золой, для анализа поршня методом конечных элементов в программе Ansys. Характеристики алюминиевого сплава А356, а также МКМ на его основе с армирующим компонентом в виде просеянной и непросеянной золы указаны в табл. 7. Коэффициент Пуассона для всех образцов составил 0,33.

Таблица 7

**Свойства алюминиевого сплава А356 и металлического композиционного материала (МКМ) на его основе, армированного просеянной (п) и непросеянной (нп) золой [20]**

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Деформация, мм
Сплав А356	2,676	71	165	0,041770
МКМ на основе сплава А356 с содержанием золы, % (объемн.):				
6 (п)	2,64	72	194	0,041190
12 (п)	2,591	76	145	0,014007
12 (нп)	2,602	74	142	0,039022

Статический структурный анализ поршня выполняли при следующих граничных условиях: поверхность отверстия под поршневой палец фиксировали, а на днище поршня давили с усилием 10 МПа. На рис. 13 показаны результаты расчета общей деформации.

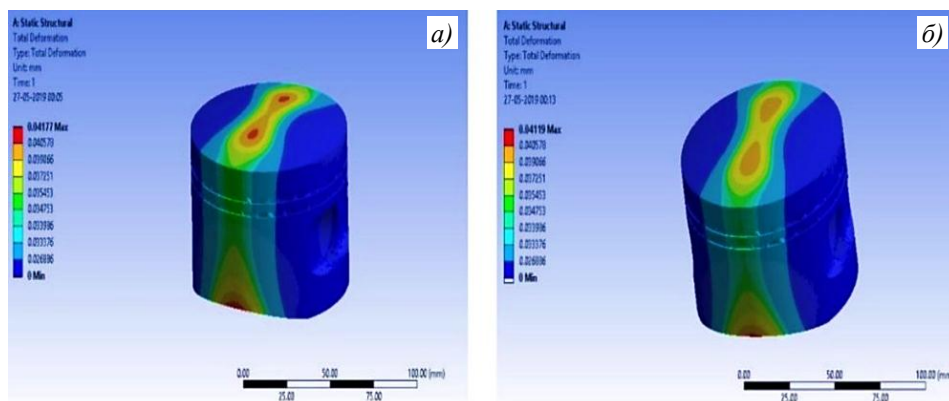


Рис. 13. Общая деформация поршня из сплава А356 (а) и металлического композиционного материала на его основе, содержащего 6 % (объемн.) просеянной золы (б), при нагрузке на днище 10 МПа [20]

Отмечено уменьшение деформации с увеличением объемной доли золы в композиционном материале. При этом для непросеянной золы значение деформации больше, чем для просеянной, что обуславливается наличием более крупных частиц и неравномерностью распределения золы в объеме матричного сплава А356.

Научно-исследовательские работы по изготовлению заготовок поршней из МКМ на основе алюминиевого сплава системы Al–Cu–Mg–Si, армированного тугоплавкими частицами SiC, проведены в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. В отличие от описанных способов, заготовки поршней изготавливали из композиционных гранул, полученных в результате механического легирования, путем горячей изотермической штамповки. Такая технология позволяет устранить такие проблемы при изготовлении поршней, как пористость и неравномерное распределение армирующего компонента в матричном сплаве.

Заготовку поршня изготавливают за один технологический цикл штамповки, получая полностью оформленную внутреннюю полость поршня с приливами и маслоъемными углублениями. Такой подход позволяет повысить коэффициент использования материала, уменьшить продолжительность окончательной механической обработки и тем самым снизить себестоимость изделия. Вид заготовки после штамповки показан на рис. 14.

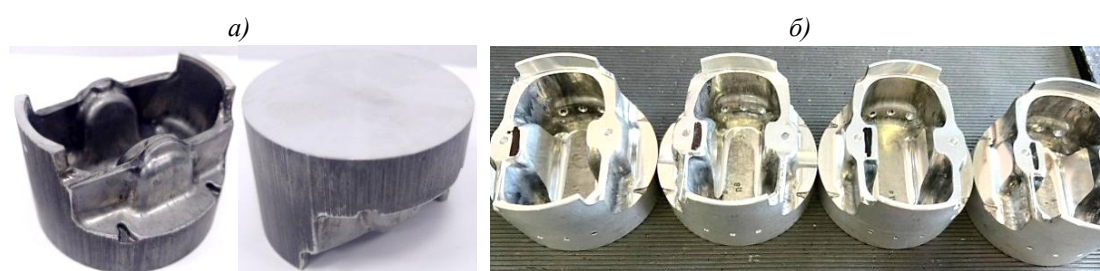


Рис. 14. Заготовки поршней из металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава системы Al–Cu–Mg–Si, армированного тугоплавкими частицами SiC, после штамповки (а) и перед чистовой обработкой (б)

Для исследования внутренней структуры выбрали зону, в которой меняется форма сечения, и зоны, где заготовка испытывает наибольшее и наименьшее усилие прессования (рис. 15).

На рис. 16 показана внутренняя структура зоны окончания прилива под поршневой палец, на которой видны линии течения металла при штамповке. Вдоль границы

«заготовка–пуансон» хорошо видно, что зерна имеют более вытянутую форму, чем в глубине детали. На рис. 17 представлена рентгеновская компьютерная томограмма, на которой видно, что внутренняя структура в разных сечениях однородная, без пор, скоплений армирующего компонента и твердых включений.



Рис. 15. Образцы для исследования микроструктуры

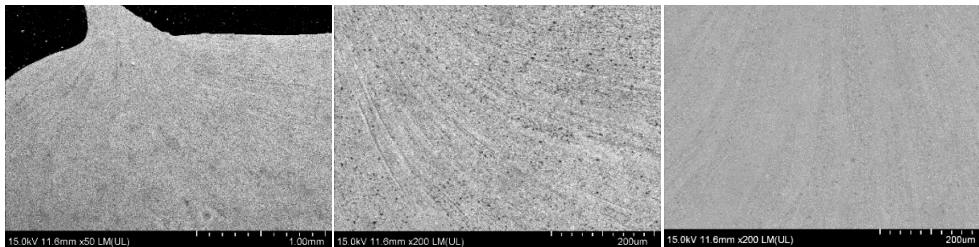


Рис. 16. Микроструктуры образцов из поршня из металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава системы Al–Cu–Mg–Si, армированного тугоплавкими частицами SiC

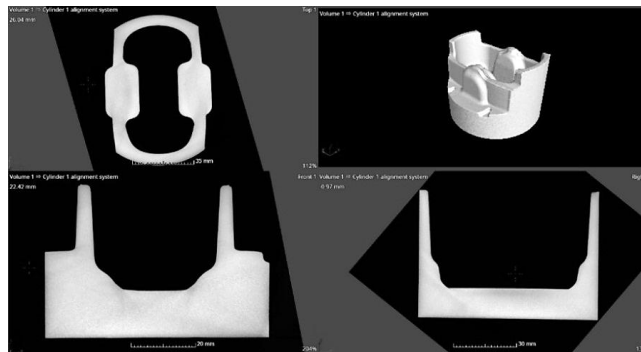


Рис. 17. Рентгеновская компьютерная томограмма заготовки поршня из металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава системы Al–Cu–Mg–Si, армированного тугоплавкими частицами SiC

### Заключения

Представлены результаты исследований применимости МКМ в ДВС, в частности для проектирования и изготовления поршней. Конструкция поршня постоянно совершенствуется, а требования к материалу для его изготовления повышаются. Основными требованиями к поршню являются небольшие значения ТКЛР, высокие уровни прочности и размерной стабильности, поэтому исследователи по-прежнему проводят научные изыскания и опытно-конструкторские работы в поисках наилучшего сочетания характеристик материала. Во всех работах теоретически и практически подтверждено преимущество применения МКМ для поршня ДВС за счет повышенной прочности, твердости, небольших значений ТКЛР и массы.

Самым применяемым способом изготовления металломатричных композиционных материалов является литье с перемешиванием из-за доступности и простоты технологии, а также возможности масштабирования производства. В отличие от порошковых технологий, главным недостатком данного способа является неравномерность распределения упрочняющих частиц в объеме матричного сплава.

Наиболее перспективным способом получения высоких механических характеристик МКМ для поршней является механическое легирование благодаря ряду преимуществ: равномерное распределение армирующих частиц; возможность получения фракций композиционных порошков с меньшим размером частиц, чем у исходного порошка матричного сплава.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ имеет технологические возможности для производства МКМ для поршней и заготовок поршней из МКМ на основе алюминиевых сплавов с требуемым уровнем механических и теплофизических характеристик.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

#### Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // *Вестник Российской академии наук*. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Ходыкин Л.Г., Няфкин А.Н., Косолапов Д.В., Жабин А.Н. Лазерная сварка металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного тугоплавкими частицами SiC (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 12 (118). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.
6. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
7. Косолапов Д.В., Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Няфкин А.Н., Гололобов А.В. Исследование структуры и свойств дисперсноупрочненного МКМ на основе алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-58-67.
8. Шавнев А.А., Неруш С.В., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В., Медведев П.Н. Исследование структуры металлического композиционного материала системы Al–Si–Mg–SiC, полученного с использованием механического легирования // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. № 1. С. 17–25. DOI: 10.17073/1997-308X-2022-1-17-25.
9. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
10. Абрамова М.Г. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов при испытаниях на станциях континентального и морского типа // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65.

11. Jinsheng M., Liwei S., Yongxiang H. Application of Composite Materials in Engine // *Materials Science: Advanced Composite Materials*. 2017. Vol. 1. P. 1–9. DOI: 10.18063/msacm.v1i1.499.
12. Anilkumar H.C., Hebbar H.S., Ravishankar K.S. Mechanical properties Of SiC Reinforced Aluminium Alloy Composites // *IJMME*. 2011. Vol. 6. Is. 1. P. 41–45.
13. Falsafia J., Rosochowska M., Jadhava P., Tricker D. Lower cost automotive piston from 2124/SiC/25p metal-matrix composite // *SAE International Journal of Engines*. 2017. Vol. 10. No. 4. P. 1984–1992. DOI: 10.4271/2017-01-1048.
14. Житнюк С.В., Медведев П.Н. Исследование микроструктуры и фазового состава металлического композиционного материала системы Al–Si–Mg, модифицированного частицами карбида кремния путем механического легирования. Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2023. № 1 (119). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-97-106.
15. Dolata-Grosz A., Dyzia M., Śleziona J., Wieczorek J. Composites applied for pistons // *Archives of foundry engineering*. 2007. Vol. 7. Is. 1. P. 37–40.
16. Dhanesh C., Anand T., Venkatesan J. Analysis of Bronze Hybrid Composite for Spark Ignition Engine Piston // *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 4. P. 967.
17. Ishizuka K., Kusakai K., Imai N. Development of metal matrix composite piston // *Honda R&D Technical Review F1 Special (The Third Era Activities)*. 2009. P. 246–247. URL: <https://www.hondarandd.jp/summary.php?sid=23&lang=en> (дата обращения: 18.08.2024).
18. Jankowski A., Kowalski M. Design of a new alloy for internal combustion engines pistons // *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*. Albufeira, 2017. P. 11–15.
19. Haitham M.I. Al-Zuhairi, Iqbal Alshalal. Enhancement of Mechanical Properties of Aluminum Piston Alloy Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Material // 6th International engineering conference «Sustainable Technology and Development». Erbil, 2020. P. 196–200. DOI: 10.1109/IEC49899.2020.9122921.
20. Kumar M., Padmanabhan G., Kottara A.A., Shankar K.V. Analysis of aluminium metal matrix composite piston for automobile applications // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2273. P. 050049. DOI: 10.1063/5.0024235.

#### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
3. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 18, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Khodykin L.G., Nyafkin A.N., Kosolapov D.V., Zhabin A.N. Laser welding of metal composite materials based on aluminium alloy reinforced with refractory particles SiC (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.
6. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 18, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
7. Kosolapov D.V., Shavnev A.A., Kurbatkina E.I., Nyafkin A.N., Gololobov A.V. Study on structure and properties of dispersion hardened MMC based on aluminium alloy of Al–Mg–Si system. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-58-67.

8. Shavnev A.A., Nerush S.V., Kurbatkina E.I., Kosolapov D.V., Medvedev P.N. Study of the structure of a metallic composite material of the Al–Si–Mg–SiC system obtained using mechanical alloying. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2022, no. 1, pp. 17–25. DOI: 10.17073/1997-308X-2022-1-17-25.
9. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
10. Abramova M.G. Full-scale accelerated tests of aluminum alloys at continental and marine type stations. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65.
11. Jinsheng M., Liwei S., Yongxiang H. Application of Composite Materials in Engine. *Materials Science: Advanced Composite Materials*, 2017, vol. 1, pp. 1–9. DOI: 10.18063/msacm.v1i1.499.
12. Anilkumar H.C., Hebbar H.S., Ravishankar K.S. Mechanical properties Of SiC Reinforced Aluminium Alloy Composites. *IJMME*, 2011, vol. 6, is. 1, pp. 41–45.
13. Falsafia J., Rosochowska M., Jadhava P., Tricker D. Lower cost automotive piston from 2124/SiC/25p metal-matrix composite. *SAE International Journal of Engines*, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 1984–1992. DOI: 10.4271/2017-01-1048.
14. Zhitnyuk S.V., Medvedev P.N. Investigation of microstructure and phase composition of the metallic composite material Al–Si–Mg system modified by silicon carbide particles by mechanical alloying. Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-97-106.
15. Dolata-Grosz A., Dyzia M., Śleziona J., Wieczorek J. Composites applied for pistons. *Archives of foundry engineering*, 2007, vol. 7, is. 1, pp. 37–40.
16. Dhanesh C., Anand T., Venkatesan J. Analysis of Bronze Hybrid Composite for Spark Ignition Engine Piston. *FME Transactions*, 2020, vol. 48, no. 4, p. 967.
17. Ishizuka K., Kusakai K., Imai N. Development of metal matrix composite piston. *Honda R&D Technical Review F1 Special (The Third Era Activities)*, 2009, pp. 246–247. Available at: <https://www.hondarandd.jp/summary.php?sid=23&lang=en> (accessed: August 18, 2024).
18. Jankowski A., Kowalski M. Design of a new alloy for internal combustion engines pistons. *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*. Albufeira, 2017, pp. 11–15.
19. Haitham M.I. Al-Zuhairi, Iqbal Alshalal. Enhancement of Mechanical Properties of Aluminum Piston Alloy Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Material. *6th International engineering conference «Sustainable Technology and Development»*. Erbil, 2020, pp. 196–200. DOI: 10.1109/IEC49899.2020.9122921.
20. Kumar M., Padmanabhan G., Kottara A.A., Shankar K.V. Analysis of aluminium metal matrix composite piston for automobile applications. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2273, p. 050049. DOI: 10.1063/5.0024235.

#### Информация об авторах

**Косолапов Дмитрий Викторович**, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ходыкин Леонид Геннадьевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Няфкин Андрей Николаевич**, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ходыкин Дмитрий Леонидович**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Dmitry V. Kosolapov**, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Leonid G. Khodykin**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Andrey N. Nyafkin**, Head of Production Area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Dmitry L. Khodykin**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; получена после доработки 10.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.04.2025.  
The article was submitted 10.09.2024; received in revised from 10.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 22.04.2025.