

УДК 669.7.017

Е. П. Шалунов, И. В. Архипов

**ПОРОШКОВЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ  
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ  
И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

*Розроблено порошковий композиційний матеріал на основі алюмінію, що складається з 95% (мас.) дисперсно-зміщеного композиційного матеріалу  $Al10Mg2C2Al_2O_3$ , 3,5% (мас.) порошку алюмінію марки АСД і 1,5% (мас.) вуглецю у вигляді графіту. Матеріал має високу міцність при температурі 350 °С і підвищену зносостійкість. При його отриманні використовується метод реакційного механічного легування в атриторах.*

***Ключові слова:** алюміній, порошковий матеріал, реакційне механічне легування, атритор, міцність, зносостійкість.*

**Введение**

Динамично развивающаяся техника во многих случаях требует использования материалов, одновременно обладающих как малым удельным весом, так и высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах, а также хорошей износостойкостью.

В настоящее время уже имеются алюминиевые материалы, способные эксплуатироваться при повышенных температурах. Например, дисперсно-упрочненный композиционный материал системы Al–C–O с 4% (мас.) углерода [1, 2], относящийся по параметрам его тонкой структуры к классу объемных наноструктурных материалов [3], предназначен для эксплуатации при температурах до 350 °С включительно. При его изготовлении используется технология, основанная на симбиозе метода реакционного механического легирования в атриторах [4] и приемов и методов порошковой и гранульной металлургии.

Этот объемный наноструктурный материал обладает следующими свойствами при 20 °С / 350 °С:

- предел прочности при растяжении, не менее, МПа.....520/210;
- относительное удлинение, не менее, %.....4,0/3,7;
- твердость по Виккерсу, не менее, МПа.....1500/760;
- удельная прочность,  $10^{-3}$  МПа · м<sup>3</sup>/кг.....189/77.

При указанной выше удельной прочности данный материал может считаться потенциальной альтернативой таким сталям, как 12X18H9T

---

© Шалунов Евгений Петрович, канд.техн.наук, профессор, директор научно-образовательного та інноваційного комплексу високих технологій, нових матеріалів, ресурсо- та енергозбереження (НОІК) Федеральної державної бюджетної освітньої установи вищої професійної освіти “Чуваський державний університет ім. І. М. Ульянова”; Архипов Иван Владимирович — аспірант кафедри технології металів і ливарного виробництва того ж університету.

( $79 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг при 20 °С и  $72 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг при 350 °С), 15X18H12C4ТЮ ( $94 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг при 20°С и  $77 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг при 350 °С), титановым сплавам ОТЧ-1 (соответственно,  $166 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг и  $80 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг), ВТ5Л ( $179 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг и  $80 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг), жаропрочным алюминиевым сплавам Д19 ( $156 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг и  $67 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг), АК4-1Т1 ( $150 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг и  $56 \cdot 10^{-3}$  МПа  $\cdot$  м<sup>3</sup>/кг) и др.

Несмотря на то, что в этом материале изначально содержалось 4% (мас.) углерода, в конечном составе углерод отсутствует, так как он в результате механохимического синтеза образовал с алюминием карбид алюминия  $Al_4C_3$ , частицами (дисперсоидами) которого и была упрочнена алюминиевая матрица.

В то же время известен [5] эффект снижения износа материалов за счет добавления в зону их контакта твердой смазки. Например, известен большой класс различных антифрикционных самосмазывающихся подшипников скольжения и направляющих на основе бронзы или алюминиевых сплавов, получаемых методом порошковой металлургии, в структуре которых есть свободный графит, который выступает в роли твердой смазки в зоне контакта, что значительно продлевает срок службы таких подшипников и направляющих.

Данный способ повышения износостойкости и антифрикционных свойств можно применить и для изделий из объемных наноструктурных материалов на основе алюминия ввиду того, что при их производстве также применяются методы порошковой и гранульной металлургии, и в их структуре тоже можно получить графит в свободной форме. Очевидно, что этого можно добиться, если графит, предназначенный для выполнения им роли сухой смазки, вводить в уже полученные в атриторе гранулы и, по-возможности, равномерно распределить его между ними.

Для придания объемному наноструктурному материалу системы Al–C–O еще большей твердости и прочности следует его долегировать магнием. В работах [6–8] показано, что с увеличением содержания магния в алюминии возрастает твердость материала и при 10% (мас.) Mg она достигает  $HV_{50/30} = 1170$  МПа. При этом материал обладает пределом прочности при растяжении 515 МПа при относительном удлинении 12%. Дополнительное легирование этого материала углеродом приводит к дополнительному повышению твердости, но из-за высокой степени легирования магнием не весь углерод переходит в связанное состояние с образованием карбида алюминия, что ухудшает свойства материала. Поэтому содержание углерода в материалах системы Al–Mg–C–O с 10% (мас.) Mg не должно быть выше 2% (мас.) [6–8]. Однако, при таком количестве углерода объем упрочняющих частиц  $Al_4C_3$  не обеспечивает высокую износостойкость материала. Увеличить суммарное содержание упрочняющих частиц в таком случае можно за счет дополнительного введения в материал уже готовых частиц  $Al_2O_3$ . Эти частицы, будучи инертными по отношению к матричному материалу, не влияют на полноту твердофазных реакций между алюминием и углеродом.

При снижении содержания Mg в материале до 5% (мас.) имеется возможность повышения содержания углерода до 6% (мас.) [7, 8].

Таким образом, для получения порошкового композиционного материала на основе алюминия с высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах, хорошими износостойкостью и антифрикционными свойствами необходимо:

– во-первых, долегировать материал системы Al–C–O магнием в количестве 5% (мас.) и 10% (мас.) при содержании углерода, соответственно, 6 и 2%

(мас.); во втором случае в исходную порошковую смесь следует также добавить мелкодисперсный порошок  $Al_2O_3$ ;

– во-вторых, в полученные в атриторе гранулы добавить порошок графита в различном объеме и тщательно его распределить между гранулами;

– в-третьих, полученные гранульные композиции подвергнуть дальнейшему термомеханическому переделу в требуемые полуфабрикаты.

### **Химический состав, свойства и структура исследуемых материалов**

Гранулы исследуемых материалов изготавливали в атриторе с емкостью рабочей камеры 15 л при вращении его ротора со скоростью 600 об/мин.

В качестве исходных материалов использовали:

- пудра алюминиевая марки ПП-1 по ГОСТ 5592-91;
- порошок алюминий-магний марки АМД-50М по ТУ 48-5-176-98;
- углерод технический (сажа) марки К354 по ГОСТ 7885-87;
- графит чешуйчатый серебристый;
- окись алюминия  $Al_2O_3$  (фракции менее 2 мкм).

Из указанных выше порошков изготавливали исходные порошковые смеси:

– Al-5% (мас.) Mg-6% (мас.) C(сажа) условным обозначением  $Al_5Mg_6C$ ;

– Al-10% (мас.) Mg-2% (мас.) C(сажа) — 2% (мас.)  $Al_2O_3$  условным обозначением  $Al_{10}Mg_2C_2Al_2O_3$ .

Обработку порошковых смесей вели в атриторе в присутствии воздуха в его рабочей камере. Длительность обработки первой порошковой смеси составляла 90 мин, второй — 60 мин. Средний размер гранул, полученных из композиции  $Al_5Mg_6C$ , составлял 0,109 мм, из композиции  $Al_{10}Mg_2C_2Al_2O_3$  — 0,362 мм.

Для дальнейших исследований были подготовлены две группы композиций следующих составов:

- Al 5Mg 6C + Al + Гр;
- Al 10Mg 2C 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Al + Гр.

Во всех составах содержание графита поддерживали постоянным и равным 1,5% (мас.), что соответствует оптимальному содержанию графита в алюминий-графитных композициях для аналогичных целей [9]. Порошок алюминия марки АСД в этих композициях использовали в качестве связки, способствующей лучшему схватыванию гранул между собой. Содержание порошка АСД варьировали в следующих пределах: 0, 3,5, 8,5, 10, 13,5% (мас.) для каждого состава гранул. Соответственно менялось и содержание гранулята в композициях. Таким образом, были подготовлены и исследованы девять композиций с условным обозначением АМГр-1...АМГр-2.

Полученные вышеуказанным способом композиции компактировали в брикеты диаметром 25 мм при комнатной температуре и подвергались термомеханическому переделу, завершающемуся горячей экструзией с коэффициентом вытяжки  $\mu = 17$ . Таким образом были получены прутки диаметром 6,5 мм, которые далее использовались для изучения структуры и определения механических свойств материалов. Химические составы и механические свойства прутков приведены в таблице 1.

Таблиця 1

## Химический состав и прочностные свойства исследуемых материалов

№ п/п	Композиция и содержание в ней компонентов, % (мас.)	Условное обозначение	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ , МПа	Твердость HV <sub>50/30</sub> , МПа
Al5Mg6C + Al + Гр (АМГр-1)				
1	Al5Mg6C (85%) + Al (13,5%) + Гр (1,5%)	АМГр-1-1	551/596	1498
2	Al5Mg6C (88,5%) + Al (10%) + Гр (1,5%)	АМГр-1-2	498/516	2013
3	Al5Mg6C (90%) + Al (8,5%) + Гр (1,5%)	АМГр-1-3	409/446	2078
4	Al5Mg6C (95%) + Al (3,5%) + Гр (1,5%)	АМГр-1-4	328/345	2351
5	Al5Mg6C (98,5%) + Al (0%) + Гр (1,5%)	АМГр-1-5	500/522	2092
Al10Mg2C2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al + Гр (АМГр-2)				
6	Al10Mg2C2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (85%) + Al (13,5) + Гр (1,5%)	АМГр-2-1	472/479	1179
7	Al10Mg2C2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90%) + Al (8,5) + Гр (1,5%)	АМГр-2-2	540/545	1492
8	Al10Mg2C2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (95%) + Al (3,5) + Гр (1,5%)	АМГр-2-3	522/570	1665
9	Al10Mg2C2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (98,5%) + Al (0%) + Гр (1,5%)	АМГр-2-4	548/577	1507

Примечание: в числителе — нижнее значение предела прочности; в знаменателе — верхнее значение предела прочности.

Графическое изображение зависимости предела прочности и твердости от массового содержания порошка АСД в композициях приведено на рис. 1. Из анализа рис. 1 следует, что для всех материалов групп обеих композиций (АМГр-1 и АМГр-2) графики зависимости твердости от содержания порошка АСД имеют похожий характер, с наличием на них максимума твердости, соответствующего содержанию этого порошка 3,5% (мас.) (материалы АМГр-1-4 и АМГр-2-3). Этому же значению содержания порошка алюминия АСД соответствует и максимум на графике зависимости предела прочности при растяжении от содержания алюминиевого порошка АСД в материалах композиций АМГр-2. В частности, максимум прочности соответствует все тому же материалу этой группы с условным обозначением АМГр-2-3. Очевидно, что данный материал, обладая максимальными значениями твердости и предела прочности, должен быть подвергнут дальнейшим исследованиям и испытаниям.

Что же касается изменения предела прочности от содержания порошка АСД в материалах группы композиций АМГр-1, то здесь наблюдается необычная картина: с увеличением твердости во всем диапазоне содержания порошка АСД предел прочности уменьшается, и наоборот. Поэтому для дальнейших исследований и испытаний следует выбрать сразу несколько

материалов этой группы с содержанием в них порошка алюминия АСД в количестве 8,5% (мас.) и 10% (мас.)

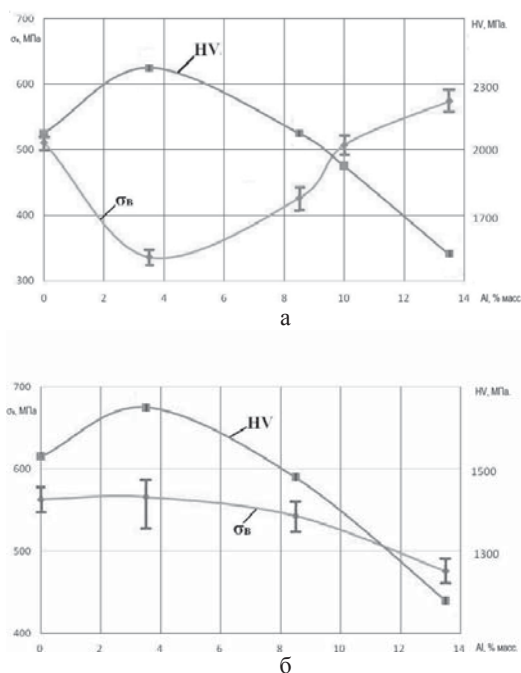


Рис. 1. Зависимость предела прочности и твердости от массового содержания алюминиевого порошка АСД в композициях на основе гранул композиционного материала: а — Al5Mg6C + Al(АСД) + Gr; б — Al10Mg2C2Al2O3 + Al(АСД) + Gr

Для проведения сравнительных испытаний на износостойкость были выбраны, как отмечалось выше, следующие материалы:

- АМгГр-1-2: Al5Mg6C (88,5%) + Al(10%) + Gr (1,5%);
- АМгГр-1-3: Al5Mg6C (90%) + Al (8,5%) + Gr (1,5%);
- АМгГр-2-3: Al10Mg2C2Al2O3 (95%) + Al (3,5) + Gr (1,5%),
- а также для сравнения:
- А14С: объемный наноструктурный материал системы Al–C–O с 4% (мас.) С;
- Д16: алюминиевый сплав твердостью по Виккерсу 1200–1250 МПа, используемый в деталях типа “Ролик” текстильных машин;
- АСЧ-1: антифрикционный серый чугун твердостью  $\approx 2000$  МПа.

Из указанных выше алюминиевых материалов были изготовлены методом горячей закрытой осадки цилиндрические образцы диаметром 73 мм и высотой 40 мм. Из полученных таким способом цилиндрических образцов методом механообработки изготавливались кольцевые образцы для проведения испытаний на износостойкость. Также аналогичные кольца были изготовлены из антифрикционного серого чугуна АСЧ-1 и алюминиево-го сплава Д16.

Испытания на износостойкость проводились по схеме «штифт-кольцо» на стенде. Штифтами служили отлитые из капролона ПА-6 твердостью 1230 МПа штыри. За основной критерий оценки износа трущейся пары был выбран совместный износ  $\Delta$  обоих контртел.

Однако для получения более достоверной картины определялся также весовой износ штифта:

$$\Delta m = (m_1 - m_2) / \tau \text{ [г/ч]},$$

где  $m_1$  — масса штифта до испытаний, г;  $m_2$  — масса штифта после испытаний, г;  $\tau$  — время испытаний, ч.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний на износ пары «штифт–кольцо» (удельное давление на площадке контакта — 5 кгс/см<sup>2</sup>, скорость скольжения образцов — 2,3 м/с)

№ п/п	Материал штифта	Обозначение материала кольца	Твердость кольца HV, МПа	Совместный износ пары, мм/ч	Износ штифта, г/ч
1	Капролон ПА-6	АСЧ-1	2000	0,0125	–
2	Капролон ПА-6	А1С	1515	0,0120	0,0025
3	Капролон ПА-6	Д16	1200	0,0340	0,0020
4	Капролон ПА-6	АМГр-1-2	2013	0,0175	0,0067
5	Капролон ПА-6	АМГр-1-3	2078	0,0160	0,0054
6	Капролон ПА-6	АМГр-2-3	1665	0,0096	0,0025

На рис. 2 приведены графики зависимости размерного совместного износа трущихся пар от времени испытаний.

Проведенные испытания показали, что наименьший совместный износ (0,0096 мм/ч) пары «штифт-кольцо» наблюдается у пары, где для изготовления кольца использовали материал АМГр-2-3. Износ данного материала меньше на 25% износа объемного наноструктурного материала системы А1-С-О с 4% (мас.) углерода (А14С).

Анализ значений весового износа капролоновых штифтов показал, что они оказались наименее изношенными при работе в паре с кольцами из материалов АМГр-2-3 и А14С. Наибольший износ — у штифтов, работающих в паре с кольцами из материалов АМГр-1-2 и АМГр-2-2.

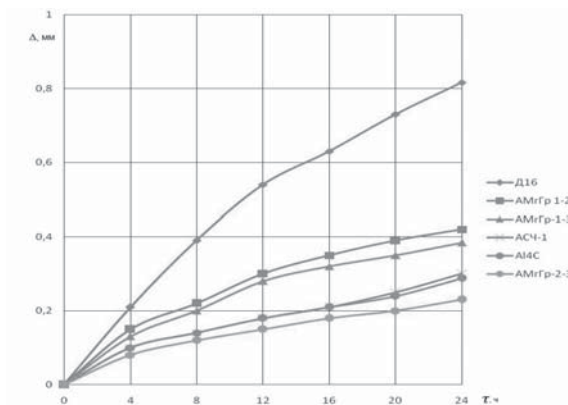


Рис. 2. Графики зависимости износа пары «штифт–кольцо» от времени испытаний

Испытания показали, что наиболее подходящим является материал АМГр-2-3 —  $Al_{10}Mg_2C_2Al_2O_3$  (95% (мас.)) + Al (3,5 (мас.)) + Gr (1,5% (мас.)), — имеющий почти в 3 раза меньший удельный вес, чем антифрикционный чугун АСЧ-1, и обеспечивающий в 3,5 раза меньший износ контактирующей пары, чем алюминиевый сплав Д16. Этот же материал превосходит материал системы Al-C-O с 4% (мас.) углерода по данному показателю в 1,25 раза.

С целью изучения влияния химического состава материала колец и микроструктуры на их механические свойства (твердость и износостойкость) были проведены металлографические исследования. Данные исследования проводили на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ-23 в светлом и темном полях. Перед этим образцы травили в 5%-ном водном растворе NaOH.

Микроструктуры некоторых исследуемых материалов колец приведены на рисунках 3 и 4.

Если рассмотреть микроструктуры исследуемых материалов по мере увеличения значений твердости по Виккерсу, то можно видеть, что границы гранул проявляются хуже, а распределение свободного графита становится более равномерным. Так в структуре материала АМГр-1-2 (рис. 3) хорошо видны границы гранул, а свободный графит распределен неравномерно и имеет достаточно большие размеры. В то же время в структуре материала АМГр-2-3 (рис. 4) границы гранул практически не видны, а свободный графит распределен равномерно в виде небольших прослоек.

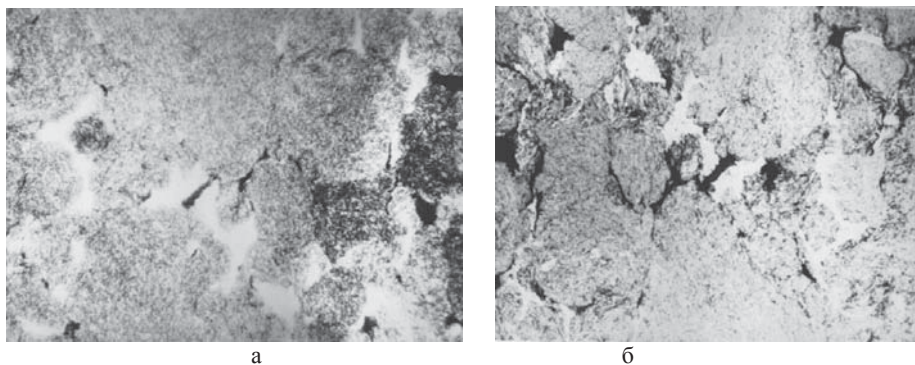


Рис. 3. Микроструктура кольца из материала АМГр-1-2 в светлом (а) и темном (б) полях ( $\times 300$ )

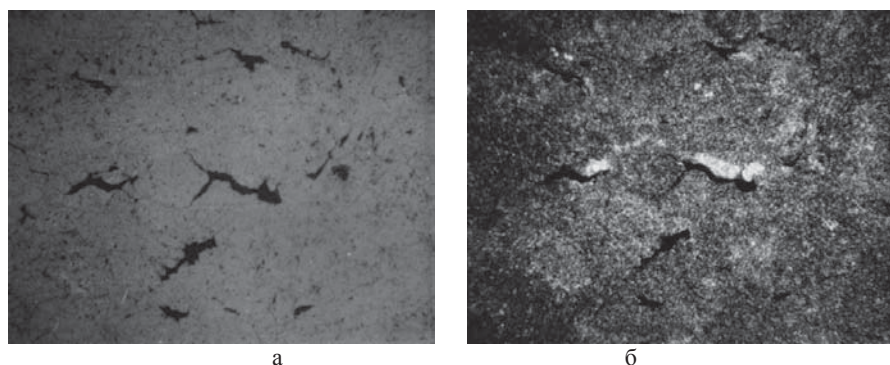


Рис. 4. Микроструктура кольца из материала АМГр-2-3 в светлом (а) и темном (б) полях ( $\times 300$ )

Таким образом, анализ микроструктуры исследуемых материалов показал, что для достижения высокой износостойкости необходимо, чтобы свободный графит был распределен достаточно равномерно и имел вид прослоек, что позволит ему в полной мере выполнять функцию твердой смазки. Это и было достигнуто в материале АМгГр-2-3 —  $Al_{10}Mg_2C_2Al_2O_3$  (95% (мас.)) + Al (3,5% (мас.)) + Гр (1,5% (мас.)).

Проведенные испытания цилиндрических образцов из данного материала на растяжение при разных температурах их нагрева позволили установить, что его предел прочности при температуре 350 °С составляет не менее 155 МПа (при исходном пределе прочности — не менее 520 МПа). Это позволяет отнести данный материал к жаропрочным материалам.

### Выводы

Наиболее подходящим для применения является порошковый композиционный материал на основе порошкового алюминия, состоящий из 95% (мас.) дисперсно-упрочненного композиционного материала  $Al_{10}Mg_2C_2Al_2O_3$ , 3,5% (мас.) порошка алюминия и 1,5% (мас.) углерода в виде графита. Он имеет почти в 3 раза меньший удельный вес, чем антифрикционный чугун АСЧ-1, и обеспечивает в 3,5 раза меньший износ контактирующей пары, чем алюминиевый сплав Д16. Этот же материал превосходит объемный наноструктурный материал системы Al–C–O с 4% (мас.) углерода по данному показателю в 1,25 раза.

Для достижения высокой износостойкости необходимо, чтобы свободный графит в исследуемых материалах был распределен достаточно равномерно и имел вид прослоек. В этом случае свободный графит сможет в полной мере выполнять функцию твердой смазки. Именно такая структура и была реализована в указанном выше материале.

*Разработан порошковый композиционный материал на основе алюминия, состоящий из 95% (мас.) дисперсно-упрочненного композиционного материала  $Al_{10}Mg_2C_2Al_2O_3$ , 3,5% (мас.) порошка алюминия марки АСД и 1,5% (мас.) углерода в виде графита. Материал имеет высокую прочность при температуре 350 °С и обладает повышенной износостойкостью. При его получении используется метод реакционного механического легирования в атриторах.*

**Ключевые слова:** алюминий, порошковый материал, реакционное механическое легирование, атритор, прочность, износостойкость.

*Developed powder composite material on the basis of aluminium, consisting 95 wt. % of dispersion-strengthened composite material  $Al_{10}Mg_2C_2Al_2O_3$ , 3,5 wt. % of aluminium powder brand ASD and 1,5 wt. % of carbon in the form of graphite. It has a high strength at the temperature of 350 °C and has a high resistance to wear. When you receive it uses the method of the reactionary mechanical alloying in attritors.*

**Keywords:** aluminium, powder material, reactionary mechanical alloying, attritor, strength, durability.



1. *Schalunov E.* Einfluss der Herstellungsbedingungen auf die Eigenschaften von Al–Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>–Werkstoffen / E. Schalunov, M. Slesar, M. Besterici, H. Oppenheim, G. Jangg // Metall. – 1986, No. 6. – P. 601–606.
2. *Shalunov E.* Development and research of a nanostructured material from aluminium powder for orthopedy and traumatology / E. Shalunov, A. Matrosov, A. Karalin // Proc. Int. Powder Metall. Congress EURO PM, Mannheim, (Sept. 29 Oct.–I. Shrewsbury: EPMA, 2008). – 2008, Vol. 2. – P. 135–139.
3. *Портной К. И.* Дисперсно упрочненные материалы // К. И. Портной, Б. Н. Бабич. – М.: Металлургия, 1974. – 256 с.
4. *Шалунов Е. П.* Нанокompозиты: гранулированные композиционные материалы с механохимически синтезированными упрочняющими наночастицами / Е. П. Шалунов, А. Л. Матросов // Нанотехнологии-производству-2006: Третья междунар. научно-практ. конф. (Фрязино, 29–30 ноября 2006 г.). – М.: Янус-К, 2006. – С. 35–37.
5. *Царов Г. Л.* Свойства горячедеформированного антифрикционного алюминиево-графитового сплава / Г. Л. Царов, А. П. Чельшев, А. Т. Волоченко // Порошковая металлургия. – 1986, № 1. – С. 40–43.
6. *Шалунов Е. П.* Новые дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия для видеотехники / Е. Шалунов, Г. Янгг, К. Кёстенбергер // Охрана труда и прогрессивные технологические процессы в литейном производстве, порошковой металлургии и машиностроении: Тез. межреспубл. научно-практ. конф. (Чебоксары, 26–28 июня 1990 г.) – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1990. – 303 с.
7. *Данилов Н. В.* Технологические особенности изготовления горячепрессованных полуфабрикатов дисперсно-упрочненных композиционных материалов системы Al–Mg–C / Н. В. Данилов, А. Н. Квитко, А. И. Таланов // Там же. – 316 с.
8. *Данилов Н. В.* Пути повышения качества дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе алюминия / Н. В. Данилов, Н. А. Тарасов // Пути повышения качества и надежности деталей из порошковых материалов: Тез. докл. Межреспубл. научно-практ. конф. (Рубцовск, 27–30 мая 1991 г.) – Рубцовск: РПКТИ, 1991. – 45 с.
9. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы: пер. с нем., под ред. В. Шатта. – М.: Металлургия, 1983. – 356 с.