

УДК 669.2/.8

DOI 10.17073/0021-3438-2015-3-49-55

СТРУКТУРА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРШНЕВОГО СПЛАВА АК12ММгН, ПОЛУЧАЕМОГО НА РАЗНОЙ ШИХТЕ

© 2015 г. А.А. Колонаков, А.В. Кухаренко, В.Б. Деев, А.А. Абатурова

ОАО «РУСАЛ Новокузнецк», г. Новокузнецк

ООО «РУСАЛ ИТЦ», г. Новокузнецк

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

Статья поступила в редакцию 25.09.14 г., доработана 04.11.14 г., подписана в печать 30.12.14 г.

Рассмотрены основные требования к качеству алюминиевых сплавов поршневой группы. Проведен анализ качества первичного и вторичного сплава АК12ММгН, полученного в условиях разных российских производителей, с использованием данных, предоставленных предприятиями, взаимодействующими с компанией «РУСАЛ» в вопросах получения этого сплава. Рассмотрены и обоснованы основные пути оптимизации химического состава сплава АК12ММгН, реализованные в условиях ОАО «РУСАЛ Новокузнецк», и показано, что на основе сплава АК12ММгН можно изготавливать другие поршневые сплавы с требуемым уровнем эксплуатационных свойств. Выявлено, что качество сплава АК12ММгН, полученного на основе вторичных материалов, при определенных технологических условиях не уступает качеству этого сплава, полученного на основе первичных материалов. Указывается, что при получении вторичных поршневых сплавов следует уделять внимание их обязательному модифицированию в жидком состоянии (например, фосфором) с целью приближения микроструктуры и уровня свойств в литом состоянии к сплавам, полученным на основе первичного алюминия. Приведены рекомендации для предприятий, позволяющие получить сплав АК12ММгН с требуемыми структурой и химическим составом.

Ключевые слова: поршень, заэвтектические силумины, надежность двигателя, химический состав, концентрация кремния, модифицирование, микроструктура.

Main requirements to the quality of aluminum alloys of the piston group are considered. The quality of the primary and secondary AK12MMgN alloy fabricated in conditions of various Russian producers is analyzed using the data presented by enterprises interacting with RUSAL Company in questions of manufacturing this alloy. The main ways to optimize the chemical composition of the AK12MMgN alloy implemented in conditions of OAO RUSAL Novokuznetsk are considered and substantiated and it is shown that other piston alloys with the required level of operational properties can be fabricated based on the AK12MMgN alloy. It is revealed that the quality of the AK12MMgN alloy produced based on secondary materials under definite manufacturing conditions is not worse than the quality of this alloy produced based on primary materials. It is noted that when obtaining secondary piston alloys, the attention should be paid to their obligatory modification in the liquid state (for example, by phosphorus) in order to approach the microstructure and level of properties in the cast state to alloys produced based on primary aluminum. Recommendation for enterprises, which allow one to produce the AK12MMgN alloy with the required structure and chemical composition, are presented.

Keywords: piston, hypereutectic silumins, engine reliability, silicon concentration, modifying, microstructure

Введение

Известно, что поршень является наиболее ответственной деталью в двигателе современного автомо-

биля. В настоящее время в России для изготовления поршней применяют заэвтектические силумины

Колонаков А.А. — директор по литейному производству ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» (654000, г. Новокузнецк, пр. Феррославный, 7). E-mail: Andrey.Kukharensko@rusal.com.

Кухаренко А.В. — нач. отдела литья литейного центра ООО «РУСАЛ ИТЦ» (654000, г. Новокузнецк, пр. Феррославный, 7). E-mail: Andrey.Kukharensko@rusal.com.

Деев В.Б. — докт. техн. наук, гл. науч. сотр. Инжинирингового центра «Литейные технологии и материалы», профессор кафедры технологии литейных процессов «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: deev.vb@mail.ru.

Абатурова А.А. — ст. препод. кафедры управления качеством и сертификации СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). E-mail: smfil@mail.ru.

разных марок. Вопросами повышения качества поршневых сплавов занимались многие исследователи [1–15]. К поршню предъявляют следующие требования: легкость, прочность, способность выдерживать значительные механические нагрузки и тепловые удары, высокая износостойкость рабочих поверхностей, низкое трение при минимально возможном зазоре в цилиндре.

Также важным критерием является надежность двигателя и составляющих его частей. Если раньше ресурс двигателя до проведения капитального ремонта составлял около 100 тыс. км, то сегодня он возрос до 250 тыс. км, причем конструкторы двигателей ставят задачи по его увеличению до 300 тыс. км и выше. Для обеспечения этих условий необходимо разрабатывать новые сплавы поршневой группы.

Зарубежные технологи успешно справляются с возрастающими требованиями автомобильной промышленности. Поршневые сплавы марок FM B2 и FM S2N на сегодняшний день прекрасно отвечают поставленным задачам. Поршни, изготовленные из этих сплавов, по своим характеристикам на порядок выше отечественных, произведенных из разработанных еще в 70-е годы XX в. сплавов марок АК12М2МгН, АК12ММгН или АК10М2Н. Зарубежные аналоги меньше по размеру, легче, прочнее, выдерживают гораздо большие механические и тепловые нагрузки, обладают очень высокой износостойкостью. По своей себестоимости они дороже, поскольку при их получении применяется модифицирование ванадием, цирконием и фосфором. Но это является вполне оправданным.

Стандартный поршень двигателя российского автомобиля ВАЗ, отлитый из сплава марки АК10М2Н, имеет массу около 400 г. Для осуществления тех же функций поршень, выполненный из сплава FM B2, обладает почти в 2 раза меньшей массой, при этом его служебная эксплуатация будет в 2–3 раза дольше. В основном это связано с тем, что зарубежные производители алюминиевых сплавов ужесточают требования к их химическому составу, уменьшают интервалы варьирования концентраций основных элементов и снижают содержание вредных примесей. Для примера, в сплаве FM B2 концентрации элементов варьируются следующим образом: кремний — от 12,2 до 12,6 %; цинк — до 0,10 %; суммарная доля кальция, натрия, стронция и лития должна быть не больше 0,0020 % (а каждый из них в отдельности не может превышать 0,0005 %).

Анализ структуры и химического состава сплава АК12ММгН

Согласно ГОСТ 1583-93 в сплаве марки АК12ММгН содержание кремния может составлять от 11 до 13 %, цинка — до 0,2 %, а концентрации Ca, Li, Sr и Na вообще не учитываются, хотя негативное воздействие последних (при неконтролируемом их содержании) на структуру доказано.

С учетом вышеперечисленного российские конструкторы двигателей начали улучшать качество сплавов, используемых для изготовления деталей двигателей. Так, в ОАО «АВТОВАЗ» (г. Тольятти) последнее время в качестве материала для поршней испытывают стандартный сплав АК10М2Н, модифицированный натрием. Было решено поднять в этом сплаве верхнюю границу содержания кремния, что должно увеличить усталостную прочность сплава и снизить термический коэффициент линейного расширения.

Технологи ОАО «УМЗ» (г. Ульяновск) и ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» (производящих различные сплавы для российского автопрома) также начали работать над улучшением эксплуатационных свойств поршневого сплава АК12ММгН. В отличие от АК10М2Н, он имеет более широкий интервал концентраций основных элементов и значительно большее содержание примесей, поэтому на первоначальном этапе планируется уменьшить диапазон изменения содержания кремния и модифицировать сплав разными компонентами для выявления их оптимальных концентраций.

На рис. 1, а представлена микроструктура сплава АК12ММгН с химическим составом в соответствии с ГОСТ 1583-93, приготовленного в ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» с использованием первичного алюминия марки А7, кристаллического кремния Кр 2, чушкового магния Мг90 и никеля (по ГОСТ 849-97) марки Н-1 или Н-2. Основной структурной составляющей сплава являются дендриты алюминиевого твердого раствора и тонко модифицированная эвтектика Si + (Al). Медно-никелевая фаза CuNiAl, образующая с алюминием эвтектику, встречается в виде пластин.

На рис. 1, б показана микроструктура приготовленного в аналогичных условиях сплава на основе АК12ММгН (был уменьшен интервал изменения концентрации кремния с одновременным увеличением его верхнего предела до 12,4 %), но модифицированного натрием, который вводили в расплав в виде

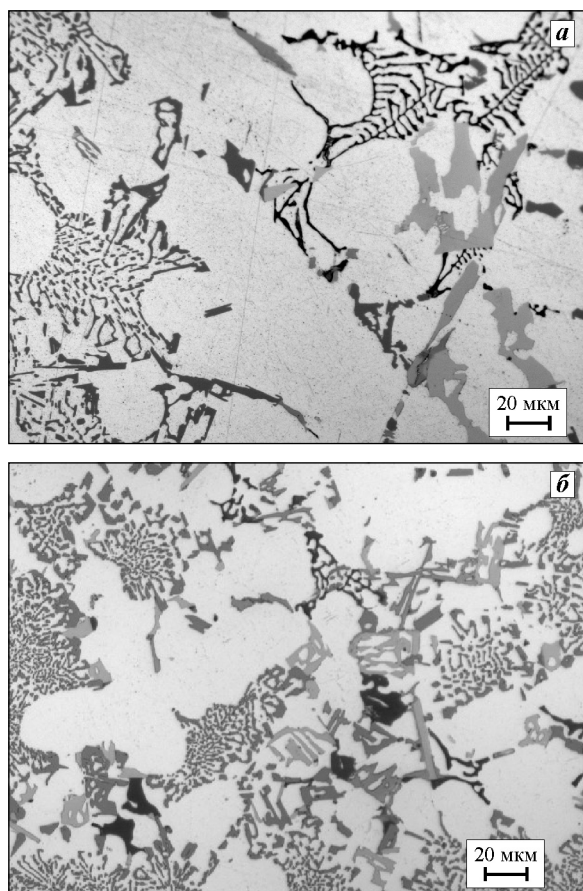


Рис. 1. Микроструктура сплава АК12ММгН (×500)

а — химический состав согласно ГОСТ 1583-93

б — модифицирование натрием

кальцинированной соды из расчета 30 кг соды на 1 т расплава. Видно, что микроструктура сплава содержит большое количество частиц первичного кремния, что характерно для заэвтектических силуминов.

По своим характеристикам сплав, полученный на основе АК12ММгН (с увеличением верхнего предела по кремнию), имеет повышенную усталостную прочность, особенно при температуре 350 °С и выше. При этом большее содержание кремния способствовало увеличению устойчивости к износу и задирам. Новый сплав по своим характеристикам полностью соответствует требованиям, предъявляемым к современным поршневым сплавам.

Представляет интерес также сплав АК12М2МгН с содержанием меди от 2,0 до 2,5 %, который в настоящее время выпускается в ОАО «РУСАЛ Новокузнецк». Для этого сплава соблюдаются жесткие требования к содержанию примесей щелочно-земельных элементов (Ca, Na, Li, Sr) — не более 0,0010 %. Балл пористости сплава не должен быть выше 2.

В настоящее время специалистами ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» продолжаются комплексные исследования в направлении повышения качества поршневых сплавов.

Получение поршневых сплавов на основе вторичного сырья

Все вышерассмотренное относится к поршневым алюминиевым сплавам, полученным на основе первичного алюминия, однако, как показывает отечественный и зарубежный опыт, наиболее эффективным направлением для экономии затрат при производстве автомобилей является широкое использование алюминиевого лома. Так, на производство 1 т алюминиевых сплавов из вторичного сырья затрачивается электроэнергия в десятки раз, а сырья — в 2,4 раза меньше, чем на производство 1 т сплавов из первичного алюминия. При этом себестоимость производства такого сплава снижается в 1,5 раза. Именно эти преимущества привели к тому, что в развитых странах доля литейных сплавов, выплавляемых с применением алюминиевого лома, достигает 80—85 % от общего объема их производства.

Сравнение вторичных сплавов с их аналогами из первичных материалов показывает, что они уступают последним по качественным характеристикам из-за большего содержания в них вредных примесей, в первую очередь неметаллических включений, а также железа, магния, цинка, олова, свинца, кальция и натрия.

Почему же компании — производители автомобилей — используют в большом объеме именно вторичные сплавы, а не сплавы из первичного алюминия? Ответ достаточно прост и обусловлен тем, что иностранные специалисты разработали технологию производства деталей на основе переработки ломов, при которой происходит устранение всех возможных причин, ведущих к ухудшению качества отливок из вторичных сплавов, тем самым доводя их по качеству до уровня сплавов из первичного алюминия, сохраняя при этом их преимущество — низкую себестоимость.

Качество вторичных сплавов, получаемых на российских предприятиях, по сравнению с зарубежными производителями, оставляет желать лучшего. Рассмотрим для примера сплав марки АК12ММгН, выпускаемый на разных предприятиях России, предназначенный для производства поршней.

Таблица 1

Химический состав сплава АК12ММгН (согласно нормативной документации предприятия)

Предприятие	Доля основных компонентов, мас. %											
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Ti	Cr	Sn	Pb	Zn	Ca
ОАО «УМЗ»	11,5–12,0	1,1–1,4	1,1–1,35	1,0–1,3	0,35	0,2	–	–	–	–	–	0,04
ООО «ТД Дизель-МТС»	11,0–13,0	0,8–1,5	0,85–1,35	0,8–1,3	0,6	0,2	0,20	0,2	0,01	0,05	0,2	–

Таблица 2

Химический состав сплава АК12ММгН (фактические результаты)

Поставщик	Доля основных компонентов, мас. %											
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Ti	Gr	Sn	Pb	Zn	Ca
ООО «ТД КАМАЛКО»	11,3	1,35	1,09	1,28	0,51	0,122	0,045	0,018	0,020	0,040	0,152	0,015
Подольский 3-д цв. металлов	12,0	1,11	0,84	1,05	0,48	0,054	0,044	0,008	0,004	0,014	0,104	0,005

В ОАО «УМЗ» для производства двигателей используют вторичные сплавы АК6М2, АК12ММгН, АК9пч и АК9с (АК9). Основным поставщиком сплавов является ООО «ТД КАМАЛКО» (г. Красногорск, Московская обл.).

В ООО «ТД Дизель-МТС» (г. Ярославль) в производстве применяют вторичные сплавы АК7М2Мг, АК12ММгН, АК9, АК7 и АК21М3Н, поставляемые в основном Подольским заводом цветных металлов. По согласованию со специалистами ОАО «УМЗ» и ООО «ТД Дизель-МТС» в физической лаборатории ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» был проведен химический анализ образцов поршневого сплава АК12ММгН производства ООО «ТД КАМАЛКО» и Подольского завода цветных металлов. Для начала следует дать оценку химического состава сплава АК12ММгН, задаваемого этими предприятиями своим поставщикам (табл. 1).

Видно, что требования к химическому составу сплава АК12ММгН на этих заводах по основным элементам практически одинаковые. Однако в примесях наблюдается значительное различие. Так, в ОАО «УМЗ» ужесточены ограничения по железу и кальцию. В ООО «ТД Дизель-МТС» оговорены требования к сплаву по титану, цинку, свинцу, олову и хрому (согласно ГОСТ 1583-93).

Почему же на этих двух предприятиях такое различное отношение к примесям других элементов? Связано это в основном с тем, что поставщики вторичного сплава АК12ММгН на указанные заводы просто не могут определять и контролировать в нем данные элементы, поэтому при составлении нормативных документов, в которых должен быть огово-

рен химический состав поставляемых сплавов, эти элементы специально опускаются. Но даже если на предприятиях и ставят ограничения по примесям, то за редким исключением они не сильно отличаются от ограничений согласно ГОСТ 1583-89.

Для сравнения, в поршневом сплаве FM S2N фирмы «Federal Mogul» (Германия), ограничения по примесям касаются 12 элементов (в российском сплаве — 8 элементов). Присутствуют в нем и качественные ограничения. Например, доля кальция, натрия, лития и стронция должна быть не более 5 ppm (0,0005 %), а суммарное их содержание — не превышать 0,0020 %. Специалисты заводов фирмы «Federal Mogul» прекрасно осведомлены об отрицательном воздействии этих элементов на жидкотекучесть литейных сплавов, поэтому своим поставщикам они и ставят такие жесткие условия по химическому составу.

Следует отметить, что российские поставщики не всегда выдерживают и более облегченные ограничения по химическому составу вторичного сплава АК12ММгН. В табл. 2 представлены результаты определения реального химического состава сплава АК12ММгН, поставляемого на вышеуказанные предприятия.

Сравнивая химический состав образца сплава АК12ММгН производства ООО «ТД КАМАЛКО» со спецификацией ОАО «УМЗ», видно, что он не выдержан по содержанию кремния (ниже допустимого на 0,2 %) и железа (выше на 0,16 %). Кальций находится в допуске, но его высокое содержание (0,015 %), по сравнению со сплавом FM S2N, естественно, отрицательно сказывается на жидкотекучести сплава.

Сплав АК12ММгН производства Подольского завода цветных металлов по химическому составу полностью соответствует требованиям ТУ ООО «ТД Дизель-МТС», но содержание кальция в этом сплаве также довольно высокое — 0,005 %.

По заключению специалистов физической лаборатории ОАО «РУСАЛ Новокузнецк», образцы вторичного сплава АК12ММгН, поставляемые на отечественные моторные заводы, оказались неоднородными. Представленный химический анализ этих сплавов является средним арифметическим значением из 12 параллельных определений, полученных в одинаковых условиях повторяемости. Соответственно, у технологов ОАО «УМЗ» и ООО «ТД Дизель-МТС» при производстве поршней из этих сплавов постоянно будут возникать различные проблемы, — так как от партии к партии качество сплавов неоднородное, то при производстве готовых изделий будут наблюдаться необъяснимые выбросы по браку, что, в принципе, происходит и сейчас.

Появление на российском рынке большого количества автомобилей иностранного производства, как мировых лидеров, так и различных других производителей, заставило специалистов российского автопрома постепенно начать ужесточение своих требований к химическому составу поставляемых сплавов.

Например, ОАО «АВТОВАЗ» для своего сплава АК6М2 установил пределы по кальцию до 0,002 %. Аналогичное ограничение сделали и технологи ОАО «КАМАЗ-Металлургия» (г. Набережные Челны) для сплава АК9пч.

Ознакомившись с материалами исследований получаемого сплава АК12ММгН, технологами ОАО «УМЗ» и ОАО «РУСАЛ Новокузнецк», с учетом ужесточенных ограничений по щелочно-земельным элементам (Ca, Na, Li, Sr) — до 0,0005 % (не более), был согласован новый химический состав сплава АК12ММгН, мас. %:

Si.....	11,5—12,5	Mn.....	0,20
Cu.....	1,1—1,4	Ti.....	0,20
Mg.....	1,10—1,35	Cr.....	0,2
Ni.....	1,0—1,3	Sn.....	0,01
Fe.....	0,35	Pb.....	0,05
		Zn.....	0,06

Кроме принятия более жестких ограничений по примесям было уделено внимание и основным компонентам. Было принято совместное решение об ис-

питании сплава АК12ММгН с повышенным содержанием кремния (что может позволить увеличить усталостную прочность сплава и снизить значение термического коэффициента линейного расширения изделия). В опытной партии содержание кремния было повышено от 12,0 до 12,5 %. Дополнительно в сплав ввели модификатор — фосфор. В немецком поршневом сплаве фосфор также является модификатором (содержание его оговорено от 0,0050 до 0,0120 %), в то время как в сплаве АК12ММгН модификатор вообще отсутствует.

Испытания опытной партии АК12ММгН показали весьма удовлетворительные результаты. Повышенное содержание кремния было оставлено, но модифицирование фосфором (при промышленных поставках) отклонили по причине увеличения стоимости сплава. Лигатура Al—P производится в Германии и является дорогостоящей. Российская лигатура, фосфористая медь Cu—P10, к сожалению, не дает такие результаты, как лигатура Al—P, при этом ее ввод в сплав сопряжен с постоянным риском получения меди в расплаве выше требуемого предела. В настоящее время ведутся опытные работы по получению российской лигатуры Al—P, и, возможно, в скором времени на заводе будет реализовано опытное производство сплава АК12ММгН с применением лигатуры Al—P российского производства.

В физической лаборатории ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» был также выполнен сравнительный анализ микроструктур сплава АК12ММгН производства ООО «ТД КАМАЛКО» и Подольского завода цветных металлов (рис. 2). Он поставляется этими предприятиями в виде чушек массой до 7 кг. Основной структурной составляющей данного сплава являются дендриты алюминиевого твердого раствора и тонкодифференцированная эвтектика Si + (Al), что положительным образом сказывается на жидкотекучести сплава; α -фаза входит в состав дисперсной эвтектики. Однако в образцах обоих поставщиков присутствует междендритная пористость (на рис. 2 указана стрелками). Этот дефект может привести к образованию в готовых отливках рыхлот.

При большем увеличении (рис. 2, в и г) хорошо видна фаза FeNiAl₉ в виде грубых пластин (темного цвета). Это связано с повышенным содержанием железа в сплавах, приготовленных из алюминиевых ломов. Данная фаза будет отрицательно влиять на жидкотекучесть сплавов. Фаза CuNiAl₆ представлена в виде мелкой пластинчатой эвтектики.

Анализ технологий изготовления сплавов поз-

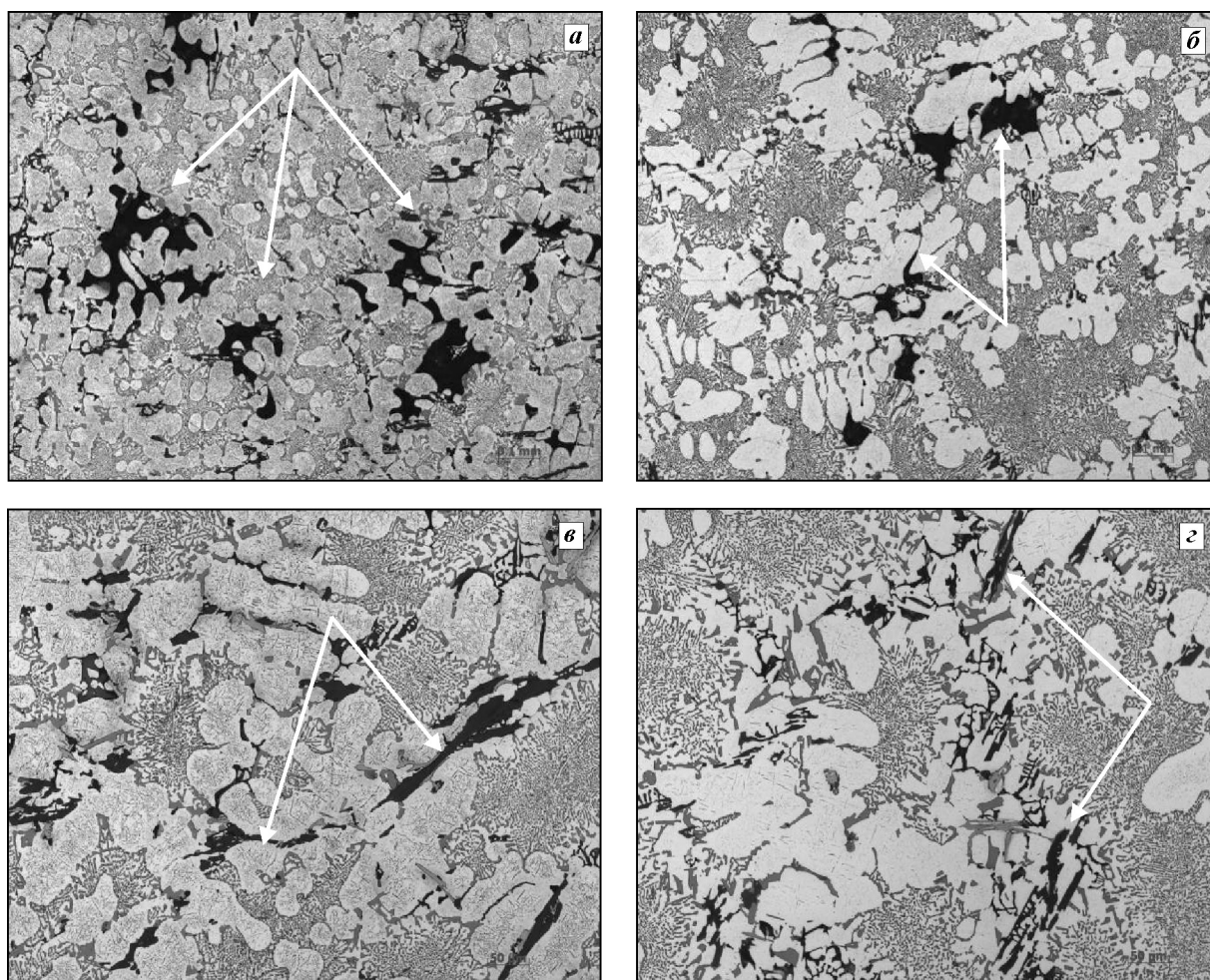


Рис. 2. Микроструктура образцов сплава АК12ММgН двух производителей

а, в — «ТД КАМАЛКО»; *б, г* — Подольский завод цветных металлов

Увеличение — 100 \times (*а, б*) и 200 \times (*в, г*)

волил выявить, что для обеспечения их более плотной структуры на предприятии-изготовителе перед разливкой готовый расплав необходимо подвергать дегазации аргоном или азотом с одновременной обработкой специальными флюсами с последующими отстаиванием и снятием шлака. Перед разливкой в чушки расплав сильно перегревать не следует, максимальная температура разливки — не более 700 °С. При разливке расплава в изложницы для ускорения процесса кристаллизации можно использовать воздушно-водяное охлаждение изложниц, что положительно скажется на структуре сплавов. Дополнительно при разливке необходимо осуществлять очистку расплава от неметаллических включений при помощи пенокерамических фильтров с размером пор не ниже 20 ppm.

На предприятии, где будут производиться рас-

плавление сплава и разливка в литейные формы, для снижения содержания железа в шихту можно добавлять от 10 до 20 % чушек готового сплава из первичного алюминия с низким содержанием железа.

На основании всего вышеизложенного можно заключить, что предприятие по переработке ломов и производству вторичных сплавов должно поставлять сплавы, не уступающие по качеству сплавам из первичного алюминия. Для этого на предприятии помимо обычных печей переплава должны быть линии по очистке алюминиевого лома от железных деталей, пресс для брикетирования стружки и мелких обрезков из алюминия, дегазационные и фильтрационные установки. Разливочные конвейеры должны быть оборудованы системами воздушно-водяного охлаждения чушек.

Лаборатория предприятия должна быть оснащена современным спектрометром, позволяющим быстро определять химический состав производимых сплавов, микроскопом, станками для подготовки проб для проведения как химического, так и микро- и макроструктурного анализов. При этом методики должны включать компьютерное и программное обеспечение, позволяющее оценивать разброс результатов определения химического состава сплавов в течение длительного времени.

И самое главное, на предприятии должны быть специалисты, умеющие рационально использовать это оборудование, технологи, разрабатывающие и поддерживающие на должном уровне технологическую цепочку производства сплавов, а также квалифицированный рабочий персонал.

Заключение

Рассмотрены основные аспекты, связанные с требованиями к качеству алюминиевых сплавов поршневой группы. В условиях ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» показано, что перспективен сплав АК12ММгН, на основе которого можно изготавливать другие поршневые сплавы с необходимым уровнем эксплуатационных свойств. Что касается вторичных поршневых сплавов, то следует уделять внимание их обязательному модифицированию (например, фосфором) с целью приближения их качества к сплавам, полученным на основе первичного алюминия.

Работа выполнена в рамках государственной работы «Организация проведения научных исследований» государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014–2016 гг. (задание № 2014/113).

Литература

1. Николаенко А.В., Калпин Ю.Г., Басюк Т.С. и др. Комплексный подход к созданию и организации производства поршней дизельных двигателей из быстрозакристаллизованных заэвтектических силуминов // Изв. ТулГУ. Техн. науки. 2013. Вып. 3, № 1. С. 603–617.
2. Белов Н.А., Авксентьева Н.Н. Анализ пятикомпонентных диаграмм состояния в области составов поршневых силуминов // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2005. № 4. С. 47–56.
3. Алов В.А., Епархин О.М., Ершова В.Ф., Буликова Е.В. Новый поршневой силумин с высокими прочностными, технологическими и эксплуатационными свойствами // Вестн. АПК Верхневолжья. 2010. № 1. С. 56–58.
4. Белов Н.А., Белов В.Д., Савченко С.В. и др. Поршневые силумины / Под общ. ред. Н.А. Белова. М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2011.
5. Прудников А.Н. Термическая обработка поршневых силуминов для снижения их линейного расширения и эксплуатационных параметров двигателя // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2004. № 4. С. 40–42.
6. Прудников А.Н. Разработка состава и исследование структуры и свойств поршневого деформируемого заэвтектического жаропрочного силумина // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2009. № 6. С. 25–29.
7. Прудников А.Н. Структура и свойства жаропрочного силуминового поршня с высоким содержанием кремния // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2009. № 8. С. 28–30.
8. Селиванов А.А. Влияние фосфора и церия на структуру силумина АК12ММгН и разработка технологии изготовления из него поршней для автомобильных двигателей: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2006.
9. Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Ружило А.А. Перспективы развития поршневых заэвтектических силуминов // Металлургия машиностроения. 2003. № 4. С. 16–18.
10. Афанасьев В.К., Прудников А.Н. Алюминиевый сплав с малым тепловым расширением // Металлургия машиностроения. 2005. № 4. С. 103–107.
11. Мезенцева А.И., Ганеев А.А., Никитин В.И. Выбор легирующих элементов при проектировании жаропрочных поршневых алюминиевых сплавов // Литейн. пр-во. 2014. № 6. С. 13–15.
12. Белов В.Д. Поршневые силумины // Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2005. Т. 1, № 9. С. 32–34.
13. Рябов И.В., Фоченков Б.А. Влияние структурной наследственности модифицирующей лигатуры на качество литой заготовки из поршневых заэвтектических силуминов // Технол. легких сплавов. 2009. № 1. С. 73–78.
14. Белов В.Д. Плавка и литье заэвтектических силуминов. М.: МИСиС, 2003.
15. Махов С.В., Попов Д.А. Модифицирование заэвтектических силуминов лигатурой Al–Cu–P и Al–Fe–P // Литейн. пр-во. 2011. № 10. С. 7–11.