

**ПРИМЕНЕНИЕ НАНОПОРОШКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**Г. Г. Крушенко<sup>1\*</sup>, В. П. Назаров<sup>2</sup>, М. В. Резанова<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

\*E-mail: genry@icm.krasn.ru

*Известно, что с увеличением степени измельчения структурных составляющих сплавов повышаются механические свойства получаемых из них изделий. Отмечается, что достаточно большое количество деталей, комплектующих изделия машиностроения, производится с помощью литейного производства, в связи с присутствием этому способу преимуществами по сравнению с другими технологиями изготовления деталей, наиболее значимое из которых – относительная простота технологии, тем не менее позволяющая получать сложные по конфигурации детали, которые практически невозможно изготовить другими способами, при одновременном обеспечении требуемых технической документацией характеристик. К таким деталям, в частности, относятся литые детали, которые входят в состав узлов, механизмов и машин транспортного машиностроения. При этом в этой отрасли, особенно в аэрокосмическом машиностроении, большое распространение получили алюминиевые литейные сплавы. При изготовлении литых деталей одним из основных способов повышения качества является модифицирование, суть которого заключается во введении в жидкий металл веществ, которые служат либо центрами кристаллизации, либо блокируют рост формирующихся кристаллических образований. К настоящему времени «измельчающие» возможности применяющихся средств модифицирования достигли своего предела. И в последние годы для этой цели находят применение более эффективные модификаторы в виде нанопорошков тугоплавких высокопрочных химических соединений (нитриды, карбиды, оксиды, бориды и др.), применение которых приводит к существенному повышению механических свойств литых изделий. Приводятся примеры применения наномодифицирования при изготовлении из алюминиевых сплавов литых деталей транспортных средств, а также использования нанопорошков при сварке, процессы которой практически идентичны с литейными.*

*Ключевые слова: транспортное машиностроение, литейное производство, сварка, модифицирование, нанопорошки.*

**THE USE OF THE NANOPOWDER TECHNOLOGY  
IN THE MANUFACTURE OF ALUMINUM ALLOYS PARTS VEHICLES**G. G. Krushenko<sup>1\*</sup>, V. P. Nazarov<sup>2</sup>, M. V. Rezanova<sup>2</sup><sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS  
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

\*E-mail: genry@icm.krasn.ru

*It is known that with increasing fineness of the structural components of the alloys the mechanical properties of the obtained products are increased. It is noted that a sufficiently large parts, components engineering products, produced by the foundry, due to inherent in this method advantages compared with other technologies for the manufacturing of parts, the most significant of which is the relative simplicity of the technology, however, allows to obtain a complex configuration details, which are almost impossible to produce by other methods, while ensuring the required technical documentation characteristics. These details, in particular, are cast parts, which are parts of the components, mechanisms and machinery transport machinery. However, in this industry, especially in aerospace engineering, widespread aluminum die casting alloys has received. In the manufacture of cast parts one of the main ways of improving quality is a modification, the essence of which consists in the introduction into the molten metal substances, which serve either as crystallization centers, or block the growth of emerging crystalline formations. To date, the "chopping" the possibilities of applying the means of modification, has reached its limit. And in recent years for this*

purpose there are more effective modifiers in the form of nanopowders of refractory high-strength chemical compounds (nitrides, carbides, oxides, borides, and others), the application of which leads to a significant enhancement of the mechanical properties of molded products. The paper presents examples of the application of nanopowders in the manufacture of aluminum alloys castings vehicles, as well as their use during welding, a process which is almost identical with the casting.

*Keywords: transport engineering, foundry, welding, modification, nanopowders.*

**Введение.** Многочисленными исследованиями установлено, что с увеличением степени измельчения структурных составляющих сплавов повышаются механические свойства получаемых из них изделий. Такое поведение поликристаллических металлов в большом диапазоне структурных составляющих хорошо описывается классическим соотношением Холл-Петча (Hall-Patch dependence) [1; 2]:

$$H_v(\sigma_T) = H_0(\sigma_0) + \frac{k}{\sqrt{D}},$$

где  $H_v$  – твердость материала;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $H_0$  – твердость тела зерна;  $\sigma_0$  – внутреннее напряжение, препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна;  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $D$  – размер зерна.

Из приведенной формулы видно, что при уменьшении размера зерна  $D$  происходит рост прочности материала.

Следует при этом отметить, что достаточно большое количество деталей, комплектующих изделия машиностроения, производится с помощью литейного производства, в связи с присущими этому способу преимуществами по сравнению с другими технологиями изготовления деталей, наиболее значимое из которых – относительная простота технологии, тем не менее позволяющая получать сложные по конфигурации детали, которые практически невозможно изготовить другими способами, при одновременном обеспечении требуемых технической документацией характеристик [3]. К таким деталям, в частности, относятся литые детали, которые входят в состав узлов, механизмов и машин транспортного машиностроения.

**Литейные сплавы системы Al–Si.** При этом в данной отрасли, особенно в аэрокосмическом машиностроении, большое распространение получили алюминиевые литейные сплавы системы Al–Si (силу-

мины) доэвтектического и эвтектического состава, легированные различными добавками, назначение которых заключается в обеспечении предусмотренных технической документацией механических свойств и, как результат, требуемых эксплуатационных характеристик литых деталей.

Согласно ГОСТ 1583–93 «Сплавы алюминиевые литейные» [4] алюминиево-кремниевые сплавы относятся к сплавам I группы, основой которых является алюминий, а вторым компонентом – кремний при его содержании от 4,5–6,5 мас. % (сплав АК5М7) до 11,0–13,5 мас. % (сплав АК13), при содержании магния от 0,1–0,2 мас. % (сплав АК13) до 0,1–0,5 мас. % (сплав АК10Су). В состав некоторых из них дополнительно входит марганец – от 0,01–0,5 мас. % (сплав АК13) до 0,3–0,6 мас. % (сплав АК10Су), в состав других входит титан – от 0,15 мас. % (сплав АК9пч) до 0,08–0,15 мас. % (сплав АК7пч). Кроме того, в состав сплава АК10Су входит 0,1–0,25 мас. % сурьмы, а в сплавы АК9пч, АК8л, АК7 и АК7пч – 0,15–0,4 мас. % бериллия. В зависимости от вида легирующих добавок, способа литья и режима термической обработки для указанных сплавов имеет место достаточно широкий разброс прочностных (временное сопротивление разрушению  $\sigma_b$ : от 150 до 210 МПа; твердость по Бринеллю НВ – от 50 до 90 единиц) и пластических (относительное удлинение  $\delta$  – от 0,5 до 6,0 %) характеристик (табл. 1), что позволяет выбрать нужную марку сплава в зависимости от того, в каких условиях будет работать изготавливаемая из него литая деталь. При этом важными характеристиками сплавов являются литейные свойства сплавов [5], такие как жидкотекучесть (воспроизводимость полости формы затвердевшим металлом), склонность к газопоглощению и трещинообразованию и др., а также обрабатываемость резанием [6].

Таблица 1

Механические свойства литейных сплавов системы Al–Si [4]

Сплав	Временное сопротивление разрушению $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Твердость по Бринеллю НВ, единиц
АК12	150–160	1,0–4,0	50,0
АК13	180	1,5	60,0
АК9	160–250	0,5–1,5	60,0–90,0
АК9с	150–240	1,5–3,5	50,0–70,0
АК9ч	150–240	1,5–3,0	50,0–70,0
АК9пч	160–270	2,0–4,0	50,0–70,0
АК8л	180–340	1,0–6,0	70,0–90,0
АК7	130–200	0,5–1,0	60,0–75,0
АК7ч	140–300	1,0–5,0	45,0–70,0
АК10Су	170	1,0	70,0
АК5М2	120–210	0,5–2,0	65,0–75,0

При изготовлении литых деталей основными технологическими факторами, определяющими их качество, являются термовременные режимы плавки, которые должны обеспечивать максимальную гомогенизацию жидкого металла (разрушение тугоплавких интерметаллидов, повышение однородности распределения компонентов), и такие виды обработки жидкого металла, как рафинирование (дегазация – удаление газов) и модифицирование (введение в жидкий металл дополнительных центров кристаллизации). В настоящей работе акцент сделан на описание результатов применения модифицирования сплавов нанопорошками при производстве литых деталей, используемых в транспортных средствах.

**Модифицирование.** При получении литых деталей особенно важное значение придается такому виду обработки расплава, как модифицирование [7–9], суть которого заключается во введении в жидкий металл небольших количеств веществ, которые служат либо центрами кристаллизации, либо блокируют рост формирующихся кристаллических образований. В ряде случаев в результате имеют место оба процесса в такой последовательности: зарождение центров кристаллизации → блокирование роста кристаллов. Применяется значительное количество веществ и способов выполнения этого процесса, но суть их всех заключается во введении в жидкий металл частиц, служащих по первому механизму – либо самостоятельными центрами кристаллизации («прямое» гетерогенное зародышеобразование), либо образующих таковые в результате взаимодействия с расплавом, а по второму механизму – блокирующих рост возникающих в затвердевающем расплаве кристаллических образований. В результате модифицирования измельчается либо макрозерно, либо структурные составляющие на микроуровне (возможно и сочетание обоих процессов), включая изменение геометрии выделений интерметаллических фаз с иглообразной, вызывающей возникновение концентрации напряжений и развитие трещин, на глобулярную или близкую к ней, что предотвращает опасность возникновения трещин. Результатом модифицирования металлических композиций является улучшение технологических свойств на стадии получения литых изделий, а также увеличение прочностных и пластических характеристик готовых изделий.

К настоящему времени «измельчающие» возможности применяющихся средств модифицирования, которые сводятся к введению в жидкий металл модификаторов в виде лигатур (промежуточный сплав, состоящий из основы – компонента, идентичного основному компоненту модифицируемого сплава + модифицирующая добавка), достигли своего предела. И в последние годы для этой цели находят применение более эффективные модификаторы в виде нанопорошков (НП) тугоплавких высокопрочных химических соединений (нитриды, карбиды, оксиды, бориды и др.) [10–12]. Нанопорошки представляют собой кристаллические или аморфные образования с размерами частиц, не превышающими 100 нм (1 нм =  $10^{-9}$  м), которые обладают уникальными физико-химическими и механическими свойствами, существенно отличаю-

щимися от свойств материалов того же химического состава в массивном состоянии, и эти свойства могут в определенной степени передаваться получаемым из них или с их участием изделиям. Причина уникальности свойств НП заключается в том, что количество атомов в их поверхностном слое и в объеме оказывается соизмеримым [13; 14]. Ввиду того, что атомы на поверхности наночастиц имеют соседей только с одной стороны, их равновесие нарушается и происходит структурная релаксация, которая приводит к смещению межатомного расстояния в слое толщиной в 2–3 нм. Поэтому поверхностные слои наночастиц оказываются растянутыми, а внутренние сжатыми, так как избыточное лапласовское давление [15] на них ( $P = 2\gamma/r$ , где  $\gamma$  – поверхностное натяжение;  $r$  – радиус наночастицы) достигает сотен килобар, что приводит к существенному искажению кристаллической решетки и, как результат, к тому, что это влияет на энергию активации большинства процессов, в которых они участвуют, меняя их привычный ход и последовательность [13; 16], что оказывает влияние на характеристики изделий, изготавливаемых с их применением.

Основателем нанотехнологического направления можно считать известного физика, лауреата Нобелевской премии Р. Фейнмана, который в 1959 г. в своей знаменитой лекции, известной под названием «Там внизу еще много места» (There's plenty of room at the bottom) [17] указал на возможные значительные перспективы конструирования в масштабе атомов и молекул, которые могут быть достигнуты в результате получения материалов и устройств в атомно-молекулярном масштабе, и отметил, что для управления свойствами этих малых наноструктур, необходимо будет создать новый класс миниатюрного инструментария.

Впервые дал определение термину «нанотехнология» Н. Танигучи из Токийского университета в докладе, сделанном в 1974 г. на конференции Японского общества точного машиностроения о грядущем переходе к обработке с ультравысокой точностью [18] как технологии, обеспечивающей достижение чрезвычайно высокой точности и ультратонких размеров – порядка 1 нм. Дословно он дал такое определение термину «нанотехнология»: «Нанотехнология в основном заключается в разделении, объединении и деформации материалов размером в один атом или одну молекулу».

Однако при этом по данным [19] исторический приоритет в получении и использовании ультрадисперсных систем (или наносистем) принадлежит России. Именно в России (СССР) еще в 1950-е гг. на предприятиях атомной промышленности впервые в мире были получены ультрадисперсные порошки металлов с размером частиц около 100 нм, которые были успешно применены при изготовлении мембран для установок диффузионного разделения изотопов урана. А в 1960-е гг. в Институте химической физики АН СССР был разработан левитационный способ (испарение с последующей конденсацией) получения ультрадисперсных порошков. В 1970-е гг. с помощью методов электрического взрыва проводников и плазмохимического синтеза ассортимент ультрадисперсных

порошков был существенно расширен, и в эти же годы появились открытые публикации о различных способах получения и о необычных свойствах малых частиц. В 1980-е гг. был разработан химико-металлургический метод получения ультрадисперсных порошков. Выход нескольких монографий и большого числа научных статей в конце 1970-х – начале 1980-х гг. сформировал в СССР новое научно-техническое направление – ультрадисперсные системы.

**Способ введения нанопорошков в жидкий металл.** Опыт показал, что существующие способы введения в металлические расплавы порошкообразных добавок, размеры частиц которых находятся в микрометровом диапазоне, не могут быть приняты при использовании НП вследствие их особых свойств по сравнению с более крупными порошками. Так, частицы НП легко «слипаются», их окисление начинается при сравнительно низких температурах, и, что особенно важно для выполнения роли центров кристаллизации, они плохо смачиваются жидким металлом, что снижает вероятность их зародышеобразующей возможности. Несмотря на высокую плотность (от  $1380 \text{ кг/м}^3$  – TaN до  $2510 \text{ кг/м}^3$  –  $\text{V}_4\text{C}$ ), НП легко образуют в воздухе пылевидную взвесь, при определенных условиях самовозгорающуюся и даже взрывоопасную. Все это делает практически невозможным прямое введение НП в расплавы. В связи с этим был разработан принципиально новый способ введения НП в жидкий металл [20; 21], который предотвращает прямой контакт частиц НП с атмосферой и при этом обеспечивает их дозированное введение в жидкий металл.

Суть разработанного способа заключается в следующем. В тонкостенный алюминиевый контейнер засыпали нанопорошок и частицы алюминия или алюминиевых деформируемых сплавов либо в виде гранул размером 1,5–3,0 мм, получаемых из сплавов Д1 или Д16 методом центробежной разливки, либо в виде крупки первичной марки АКП (ТУ 48-5-38-78) с размерами частиц в диапазоне 0,02–0,04 мм, получаемой из алюминия марки А5 методом распыления, либо «сечки» – частиц алюминия диаметром 2,0 мм, высотой 1,5–2,0 мм, получаемых нарезанием алюминиевой проволоки. Отверстие в контейнере закрывали алюминиевой крышкой и производили ее завальцовку. После чего этот контейнер либо помещали в контейнер гидравлического пресса и с усилием прессования 100–120 тс со скоростью 3,5 см/с производили прессование прутков диаметром от 5 до 9,5 мм. Содержание НП в прутках находилось в пределах 1,5–2,7 мас. %. Полученные прутки служили носителем модификатора – при их введении в расплав алюминиевая матрица расплавлялась, и частицы НП оказывались в объеме жидкого металла, минуя контакт с атмосферой.

**Наномодифицирование сплавов системы Al–Si.** Применение НП для модифицирования изученных промышленных сплавов при литье в кокиль показало, что все их виды приводят к росту механических свойств. Так, в результате введения в жидкий сплав АК12 после модифицирования тройным модификатором: а) НП карбида ванадия VC повышает  $\sigma_b$  по срав-

нению с модифицированием стандартным тройным модификатором (25 % NaF + 62,5 % NaCl + 12,5 % KCl) до 228 МПа (на 3,2 %),  $\delta$  – до 12,9 % (в 4,4 раза); б) смесь НП 25 % BN + 75 %  $\text{V}_4\text{C}$  повышает  $\sigma_b$  до 231 МПа (на 4,5 %),  $\delta$  – до 13,5 % (в 4,7 раза). Модифицирование сплава АК9ч НП карбонитрида титана TiCN дает  $\sigma_b = 246$  МПа,  $\delta = 11,0$  %, а НП карбида бора  $\text{V}_4\text{C}$  –  $\sigma_b = 235$  МПа,  $\delta = 12,8$  % (по ГОСТ требуется  $\sigma_b \geq 235$  МПа,  $\delta \geq 3,0$  %). На сплаве АК7ч введение после тройного модификатора: а) НП карбида ванадия VC дает  $\sigma_b = 234$  МПа,  $\delta = 14,5$  %; б) НП карбида бора  $\text{V}_4\text{C}$  соответственно – 194 МПа и 9,8 %; в) смесь 25 % НП VC и 75 %  $\text{V}_4\text{C}$  – 280 МПа и 13,8 % (по ГОСТ –  $\sigma_b \geq 210$  МПа,  $\delta \geq 2,0$  %). На сплаве АЛ11 при модифицировании тройным модификатором  $\sigma_b = 227$  МПа,  $\delta = 2,9$  %, а дополнительное введение НП TiCN повышает эти характеристики соответственно до 284 МПа (на 2,5 %) и до 4,1 % (в 1,4 раза) при требуемых ГОСТ  $\sigma_b \geq 210$  МПа и  $\delta \geq 1,0$  %. При работе со сплавом АК7 при модифицировании тройным модификатором  $\sigma_b = 205$  МПа,  $\delta = 3,6$  %, а в результате дополнительного введения НП VCN  $\sigma_b$  возрастает до 217 МПа (на 5,6 %), а  $\delta$  – до 6,8 % (в 1,9 раза), НП сфенциркона (смесь окислов  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ) – соответственно до 246 МПа (на 19,3 %) и до 5,8 % (в 1,6 раза). В другой серии исследований, когда модифицирование сплава АК7 производили известным модификатором – фторцирконатом калия  $\text{K}_2\text{ZrF}_6$ ,  $\sigma_b$  составило 246 МПа,  $\delta = 17,1$  %, а дополнительное введение: а) лигатуры Al–Ti и НП TiCN повышает эти характеристики соответственно до 256 МПа (на 4,1 %) и до 25,3 % (в 1,5 раза); б) НП  $\text{V}_4\text{C}$  – соответственно до 264 МПа (на 7,3 %) и до 22,5 % (в 1,3 раза). По ГОСТ требуется  $\sigma_b \geq 160$  МПа и  $\delta \geq 0,5$  %.

**Наномодифицирование сплавов системы Al–Si при литье детали типа «корпус агрегата».** При литье детали типа «корпус агрегата», представляющей собой сложную фасонную отливку с чистой массой 5,8 кг, сплав АК12 готовили по одному варианту по серийной технологии с модифицированием стандартным тройным натрийсодержащим модификатором (50 % NaCl, 30 % NaF, 10 %  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), по другому варианту сплав модифицировали 0,8–0,9 % тройного модификатора (меньше стандартного количества в 1,6–1,9 раза), затем в него дополнительно вводили 0,05–0,08 % НП карбида бора  $\text{V}_4\text{C}$ . Анализ результатов испытаний механических свойств вырезанных из отливок образцов показал, что в результате дополнительного введения НП  $\text{V}_4\text{C}$  повышается  $\sigma_b$  по сравнению с обычной технологией с 221 до 231 МПа (на 4,3 %), твердость HB – в 1,8 раза (с 61,7 до 62,8 МПа) и  $\delta$  – с 2,9 до 10,5 % (в 3,6 раза). Микроструктура в обоих случаях, хотя и являлась типичной для хорошо модифицированного силумина, в котором эвтектика представляет собой конгломерат тонко измельченных фаз, однако если при обработке расплава только тройным модификатором средняя длина ветвей первого порядка дендритов  $\alpha$ -твердого раствора составляет около 90 мкм, то при комплексном, двойном модифицировании они уменьшились до около 35 мкм (меньше в 2,57 раза), а количество дендритов на одной и той же

площади шлифа оказалось в 1,7 раза больше, чем при модифицировании тройным модификатором – соответственно 1084 и 638. Было установлено также и существенное отличие в характере макроструктуры. Так, если при модифицировании тройным модификатором структура характеризуется столбчатым строением, то в результате дополнительного введения в расплав НП В<sub>4</sub>С формируется однородная измельченная структура. Очевидно, повышение механических свойств сплава при модифицировании НП В<sub>4</sub>С следует связать с измельчением его микро- и макроструктуры. Высокие свойства ( $\sigma_b = 204$  МПа,  $\delta = 5,2$  %, НВ = 592,5 МПа) были получены также при модифицировании только В<sub>4</sub>С. Гидроиспытания механически обработанных деталей на герметичность показали, что при их литье из модифицированного НП сплава снижается склонность к трещинообразованию, что выражается в повышении давления, при котором на деталях появляется течь или возникают трещины.

**Наномодифицирование Al–Si сплава при литье детали типа «обтекатель».** Объектом исследования послужила деталь транспортного средства типа «обтекатель», имеющая форму пустотелого конуса ( $\varnothing 533$  мм,  $h = 850$  мм; черновая масса 25 кг, чистовая – 14,5 кг) со сложной конфигурацией внутренней стенки, к механическим свойствам которой предъявляются повышенные требования в связи с тем, что эти детали работают в экстремальных высоконагруженных условиях. Деталь получали литьем в кокиль из специального алюминий-кремниевый сплав (8,0–10,0 мас. % Si), легированного медью (1,4–1,9 мас. %) и магнием (0,35–0,65 мас. %) с добавкой до 0,50 мас. % НП нитрида бора BN, содержащегося в прутке. Внутренняя поверхность отливки оформлялась с помощью песчаного стержня, внутри которого располагалась литниково-питающая система. Из одной плавки заливали по три детали и одновременно заливали в кокиль по три пробы-свидетеля, из которых впоследствии после термообработки в одной садке с деталями вырезали образцы для испытания механических свойств.

Специфика изготовления детали заключалась в применении нестандартного режима термической обработки, который состоял:

– из двухступенчатой закалки: нагрев до  $(505 \pm 5)$  °С, выдержка 2 ч; последующий нагрев до  $(525 \pm 5)$  °С, выдержка 8 ч; охлаждение 15 мин в проточной воде; при этом длительность переноса из закалочной печи в емкость с водой не должна превышать 30 с;

– старения: нагрев до  $(160 \pm 5)$  °С, выдержка не менее 6 ч; охлаждение на воздухе; в результате старения должны быть получена твердость сплава в пределах 110–117 ед. по Бринеллю.

Такие жесткие требования к режиму термообработки связаны с необходимостью быстрого фиксирования происходящих при нагреве изменений фазового состава сплава, которые создают упрочняющий эффект.

Результаты испытания механических свойств образцов, изготовленных из проб-свидетелей, показали, что в результате модифицирования сплава НП нитрида титана TiN также установлено повышение механических свойств отливок (табл. 2).

**Наномодифицирование сплава АК7 при литье детали типа «удлинитель картера».** НП были опробованы на моторостроительном заводе при литье в кокиль детали типа «удлинитель картера» коробки передач автомобиля. С целью повышения уровня механических свойств этой детали была разработана композиция [22] на основе сплава АК9ч с добавкой до 2,3–2,5 % меди. Механические свойства образцов, вырезанных из деталей, отлитых из рафинированного и модифицированного тройным модификатором сплава, составили:  $\sigma_b = 205$  МПа,  $\delta = 1,5$  %, НВ = 73,7 МПа, при модифицировании НП карбида кремния SiC после рафинирования они возросли соответственно до 245 МПа (на 16,3 %), до 4,0 % (в 2,7 раза) и до 79,7 МПа (на 7,5 %), НП В<sub>4</sub>С – соответственно до 225 МПа (на 8,9 %), до 1,7 % (в 1,1 раза) и до 80,3 МПа (на 8,2 %) и НП карбонитрида ванадия VCN – соответственно до 235 МПа (на 12,8 %), до 2,0 % (в 1,3 раза) и до 84,1 МПа (на 12,4 %).

**Оптимизация дозирования НП.** С применением метода математического планирования эксперимента была проведена работа по установлению оптимального количества НП (на примере НП карбонитрида титана TiCN), необходимого для получения максимальных механических свойств отливок из сплава АЛ9 при литье в сырую песчаную форму, что само по себе отрицательно влияет на механические свойства. Отлитые детали термообработывали по режиму Т4. В результате крутого восхождения по поверхности отклика максимальные механические свойства  $\sigma_b = 226$  МПа и  $\delta = 5,9$  % были получены при расходе всего 0,004 мас. % НП TiCN, что превышает эти характеристики ( $\sigma_b = 182,5$  МПа и  $\delta = 5,2$  %) для сплава, модифицированного стандартным универсальным флюсом (50 % NaCl, 30 % NaF, 10 % Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) соответственно на 23,8 % и на 13 %.

Таблица 2

**Влияние модифицирования сплава нанопорошком нитрида титана TiN на механические свойства детали типа «обтекатель»**

Технология приготовления сплава	Механические свойства			
	Временное сопротивление разрушению $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Твердость НВ единиц
	Величина/прирост, %	Величина/прирост, %	Величина/прирост, %	Величина/прирост, %
Стандартная	≥ 350	≥ 240	≥ 5,0	113,5
Модифицирование НП TiN	360/2,86	255,5/6,5	6,0/20,0	116,0/2,2

Применение НП для модифицирования выявило большое их преимущество перед обычными видами модифицирования: если при общепринятом их способе, которое производится введением в сплав лигатур, требуется вводить до 0,15–0,20 мас. % инокулирующего компонента (Ti, Zr, В и др.), то для получения аналогичного и даже более высокого эффекта измельчения структуры литого изделия требуется не более 0,05 мас. % НП. С применением метода математического планирования эксперимента была проведена работа по установлению оптимального количества НП (на примере TiCN), необходимого для получения максимальных механических свойств отливок из сплава АК7ч при литье в сырую песчаную форму. Отлитые детали термообработывали по режиму Т4. В результате крутого восхождения по поверхности отклика максимальные механические свойства  $\sigma_b = 226$  МПа и  $\delta = 5,9$  % были получены при расходе 0,004 мас. % НП TiCN, что превышает эти характеристики ( $\sigma_b = 182,5$  МПа и  $\delta = 5,2$  %) для сплава, модифицированного стандартным тройным модификатором (состав приведен выше):  $\sigma_b$  на 23,8 % и  $\delta$  на 13,4 % (при 0,003 % TiCN  $\sigma_b = 221$  МПа,  $\delta = 5,5$  %; при 0,005 % TiCN – соответственно 211 МПа и 5,4 %).

В процессе проведения работы, выполненной в производственных условиях на реальных литых изделиях, было установлено, что независимо от химического состава НП (было опробовано более 20-ти видов), их кристаллической системы и класса, элементов симметрии, пространственной группы, структурного типа, периода решетки, плотности, температуры плавления и других характеристик, все они обладали близким модифицирующим эффектом.

**Жидкая штамповка.** Положительное воздействие НП было установлено также и при изготовлении ответственных деталей транспортного средства из сплава АК7ч массой 2,5 кг методом жидкой штамповки при удельном давлении  $491 \cdot 10^6$  МПа. Результаты испытаний механических свойств показали, что по сравнению со стандартной технологией подготовки расплава и данными для сплава, модифицированного НП  $V_4C$ ,  $\sigma_b$  возросло на 6,3 % (с 245 до 261,5 МПа), а  $\delta$  – в 2,1 раза (с 4,9 до 10,1 %), твердость осталась на прежнем уровне – 62,0 единиц НВ. По ГОСТ требуется  $\sigma_b \geq 210$  МПа;  $\delta \geq 2,0$  %; НВ  $\geq 60,0$ .

**Сварка.** Имея в виду тот факт, что процесс формирования кристаллической структуры литых изделий и сварного шва управляется одним и тем же механизмом, было опробовано применение модифицирующего прутка в качестве сварочного электрода [23].

Следует при этом отметить, что работа была поставлена в связи с тем, что при изготовлении объемных сварных конструкций изделия ответственного назначения из листов алюминиевого деформируемого сплава АМг6 с использованием присадочной проволоки, изготовленной из этого же сплава, не всегда обеспечивалась требуемая прочность сварного соединения. Причиной этого оказался тот факт, что металл сварного шва отличался от металла листа более крупным зерном  $\alpha$ -твердого раствора и более крупными выделениями  $\beta$ -фазы ( $Al_3Mg_2$ ) по их границам.

При сварке объемной конструкции из листа сплава АМг6 применяли прутки-электрод диаметром 9,5 мм, содержащий порядка 2,0 % НП BN или  $LaB_6$ , или TiCN, изготовленный по той же технологии, что и модифицирующий прутки.

Сварку производили с помощью автоматической установки в среде аргона по слою флюса АН-АЧ. Качество шва по требованиям приемочной документации оценивали по величине  $\sigma_b$  при испытании вырезанных из сваренной конструкции плоских образцов с размерами  $15 \times 50$  мм.

Результаты испытаний показали, что  $\sigma_b$  металла в области сварочного шва при сварке прутком, содержащим BN, составляло 333 МПа,  $LaB_6$  – 338 МПа и TiCN – 345 МПа. Эти значения оказались, соответственно, выше на 4,1, 5,6 и 7,8 %, чем имеют образцы из сплава АМг6 (320 МПа), сваренные по стандартной технологии электродом из этого же сплава.

Разработанный способ упрочнения сварочного шва можно считать не менее эффективным, чем исследованный в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН [24], при реализации которого проводили сварку разнородных металлов (Al–Ti, Ti–сталь) с помощью непрерывного  $CO_2$ -лазерного излучения с применением наноразмерных модифицирующих инокуляторов (размер частиц – до 20 мкм) виде порошков TiN и  $Y_2O_3$ , частицы которых плакировали хромом. Предварительно приготовленная суспензия, содержащая эти порошки, наносилась на поверхность свариваемых пластин толщиной 1–2 мм.

В результате, структурные составляющие сварного шва измельчаются в 2–4 раза, а вместо игольчатодендритной формируется дисперсная равноосная структура, выравниваются механические характеристики, уменьшаются размер шва и зона термического влияния и, соответственно, повышаются механические свойства:  $\sigma_b$  – в 1,23–1,35 раза,  $\sigma_{0,2}$  – в 1,8–2,0 раза и  $\delta$  – в 2,0–4,9 раза.

Основным недостатком этого способа, в отличие от сварки электродом, является необходимость применения наносодержащей суспензии. Во-первых, для закрепления суспензии на свариваемых участках необходимо производить ее подсушку, во-вторых, не представляется возможным ее закрепление на поверхностях, лежащих в трех измерениях. Эти недостатки отсутствуют при сварке электродами, содержащими НП в своем объеме.

**Заключение.** Таким образом, приведенные в работе результаты применения нанопорошковых технологий при производстве деталей с использованием металлургических технологий, показали их высокую эффективность в качестве измельчающих структуру изделий агентов, что обеспечивает повышение уровня механических свойств литых и сварных изделий из алюминиевых сплавов.

#### Библиографические ссылки

1. Hall E. O. The deformation and Ageing of Mild Steel: III. Discussion of Results // Proceeding of the Physical Society. Section B. 1951. Vol. 64, № 9. P. 717–753.

2. Petch N. J. Cleavage Strength of Polycrystals // *J. Iron Steel Inst.* 1953. Vol. 174. P. 25–28.
3. Специальные способы литья / В. А. Ефимов [и др.] М. : Машиностроение, 1991. 436 с.
4. ГОСТ 1583–93. Сплавы алюминиевые литейные.
5. Корольков А. М. Литейные свойства металлов и сплавов. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1960. 196 с.
6. Скуратов Д. Л., Трусов В. Н. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Самара : Изд-во СГАУ, 2012. 196 с.
7. Модифицирование силуминов. Киев : АН УССР, 1970. 179 с.
8. Бондарев Б. И., Напалков В. И., Тарарышкин В. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М. : Metallurgiya, 1979. 224 с.
9. Лепинских Б. М., Телицын И. И. Физико-химические закономерности модифицирования железоуглеродистых расплавов. М. : Наука, 1986. 96 с.
10. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 344 с.
11. Крушенко Г. Г. Нанопорошки химических соединений – средство повышения качества металлоизделий и конструкционной прочности // Заводская лаборатория. 1999. Т. 65, № 11. С. 42–50.
12. Крушенко Г. Г. Применение нанопорошков химических соединений для улучшения качества металлоизделий // Технология машиностроения. 2002. № 3. С. 3–6.
13. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. М. : Атомиздат, 1977. 264 с.
14. Гусев А. И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и их соединениях // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 1. С. 55–83.
15. Сумм Б. Д. Основы коллоидной химии. М. : Академия, 2007. 240 с.
16. Зубов В. И. Об особенностях термодинамики ультрадисперсных систем // Физикохимия ультрадисперсных систем : материалы IV Всерос. конф. М. : МИФИ, 1998. С. 23–26.
17. Feynman R. P. There's plenty of room at the bottom // *Engineering and Science*. 1960. Vol. 23, № 2. P. 22–36.
18. Taniguchi N. On the Basic Concept of «NanoTechnology» // *Proceeding Intern. Conf. of Precision Engineering*. Tokyo, 1974. Part II. P. 18–23.
19. Ультрадисперсные порошки металлов / И. Арсентьева [и др.] // Национальная металлургия. 2002. № 4. С. 66–71.
20. А. с. 831840 СССР, А1 МПК<sup>5</sup> С 22 С 1/06. Способ модифицирования литейных алюминиевых сплавов эвтектического типа / Г. Г. Крушенко, Ю. М. Мухоманов, И. С. Ямских и др. Заявка № 2831160 от 17.10.1979 // Открытия. Изобретения. 1981. № 19.
21. А. с. 839680 СССР, А1 МПК<sup>5</sup> В 22 D 27/00. Способ модифицирования сплавов / Г. Г. Крушенко, М. Ф. Жуков, А. А. Корнилов и др. Заявка. № 2811874 от 03.09.1979 // Открытия. Изобретения. 1981. № 23.
22. Использование в шихте вторичного сплава АК7 при производстве автомобильных отливок из сплава АЛ4 / Крушенко Г. Г. [и др.] // Литейное производство. 1979. № 1. С. 30.
23. Пат. 2429958 Российская Федерация, С2 МПК В 23 К 35/40. Способ изготовления электродной проволоки для сварки алюминиевых сплавов / Крушенко Г. Г. Заявка № 2009131289/02 от 17.08.2009 // Открытия. Изобретения, № 27. 2011.
24. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик / Сибирское отделение Российской академии наук. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. С. 138–139.

## References

1. Hall E. O. The deformation and Ageing of Mild Steel: III. Discussion of Results. *Proceeding of the Physical Society. Section B*. 1951, vol. 64, no. 9, p. 717–753.
2. Petch N. J. Cleavage Strength of Polycrystals. *J. Iron Steel Inst.*, 1953, vol. 174, p. 25–28.
3. Efimov V. A., Anisovich G. A., Babich V. N. et al. *Spetsial'nye sposoby lit'ya* [Special methods of casting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991, 436 p.
4. *GOST 1583–93. Splavy alyuminiyevye liteynye* [State Standard 1583-93. Aluminium casting alloys]. Moscow, Standartinform Publ., 1993.
5. Korol'kov A. M. *Liteynye svoystva metallov i splavov*. [Casting properties of metals and alloys]. Moscow, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR Publ., 1960, 196 p.
6. Skuratov D. L., Trusov V. N. *Obrabotka konstruksionnykh materialov. Protsessy rezaniya i rezhushchie instrumenty*. [Treatment of structural materials. The processes of cutting and cutting tools]. Samara, Izdatel'stvo SGAU Publ., 2012, 196 p.
7. *Modifitsirovanie siluminov*. [Modification of silumins]. Kiev, AN USSR Publ., 179 p.
8. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararyshkin V. I. *Modifitsirovanie alyuminiyevykh deformiruemyykh splavov*. [Modification of wrought aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 224 p.
9. Lepinskih B. M., Telicyn I. I. *Fiziko-khimicheskie zakonomernosti modifitsirovaniya zhelezo-uglerodistykh rasplavov*. [Physico-chemical principles of modification of iron-carbon melts]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 96 p.
10. Saburov V. P., Cherepanov A. N., Krushenko G. G. et al. *Plazmokhimicheskiy sintez ul'tradispersnykh poroshkov i ikh primeneniye dlya modifitsirovaniya metallov i splavov*. [Plasmachemical synthesis of ultradispersed powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, 344 p.
11. Krushenko G. G. [Nanopowders of chemical compounds is a means of improving the quality of metal and structural strength]. *Zavodskaya laboratoriya*. 1999, vol. 65, no. 11, p. 42–50 (In Russ.).
12. Krushenko G. G. [The use of nanopowders chemical compounds to improve the quality of metal

products]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2002, no. 3, p. 3–6 (In Russ.).

13. Morohov I. D., Trusov L. I., Chizhik S. P. *Ul'tradispersnye metallicheskie sredy* [Ultrafine metal environment]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 264 p.

14. Gusev A. I. [Effects of nanocrystalline state in a compact metals and their compounds]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1998, vol. 168, no. 1, p. 55–83 (In Russ.).

15. Summ B. D. *Osnovy kolloidnoy khimii*. [Foundations of colloid chemistry]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 240 p.

16. Zubov V. I. [About the features of the thermodynamics of ultradispersed systems. Physical chemistry of ultradispersed systems]. *Fizikokhimiya ul'tradispersnykh sistem: Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii*. [Materials of the IV all-Russian conference]. Moscow, MIFI Publ., 1998, p. 23–26 (In Russ.).

17. Feynman R. P. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*. 1960, vol. 23, no. 2, p. 22–36.

18. Taniguchi N. On the Basic Concept of "NanoTechnology". *Proceeding International Conference of Precision Engineering*. Tokyo, 1974, Part II, p. 18–23.

19. Arsent'eva I., Ushakov B., Zaharov N. et al. [Ultrafine powders of metals]. *Natsional'naya metallurgiya*. 2002, no. 4, p. 66–71 (In Russ.).

20. Krushenko G. G., Musokhranov Yu. M., Yamskikh I. S. et al. *Sposob modifitsirovaniya liteynykh*

*alyuminiyvykh splavov evtekticheskogo tipa* [The method of inoculation of cast aluminum alloys of eutectic type]. Patent SU, no. 831840, 1981.

21. Krushenko G. G., Zhukov M. F., Kornilov A. A. et al. *Sposob modifitsirovaniya splavov*. [The method of inoculation of alloys]. Patent SU, no. 839680, 1981.

22. Krushenko G. G., Ostapenko A. A., Fershtman I. A. et al. [Use in the charge of the secondary alloy AK7 in the production of automotive castings of alloy AL4]. *Liteynoe proizvodstvo*. 1979, no. 1, p. 30 (In Russ.).

23. Krushenko G. G. *Sposob izgotovleniya elektrodnoy provoloki dlya svarki alyuminiyvykh splavov*. [A method of manufacturing an electrode wire for welding of aluminium alloys]. Patent RF, no. 2429958, 2011.

24. *Vozdeystvie vysokokontsentririrovannykh potokov energii na materialy s tselyu izmeneniya ikh fiziko-khimicheskikh svoystv i uluchsheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik. Sibirskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk v 2007 godu*. [The impact of highly concentrated streams of energy to materials to change their physical-chemical properties and improved performance. Siberian branch of the Russian Academy of Sciences in 2007.]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SB RAS Publ., 2008, p. 138–139.

© Крушенко Г. Г., Назаров В. П., Резанова М. В., 2015