

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НАНОПУЧКОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИГ. Г. Крушенко^{1,2*}, О. А. Платонов², С. Н. Решетникова², Г. Г. Киселев³¹Институт вычислительного моделирования СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31³Ракетные войска стратегического назначения

Российская Федерация, 119160, Московская область, г. Власиха

*E-mail: o.platonov@mail.ru

При изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов используются разные способы и средства выполнения неразъемных соединений, включая и сварку. Физическая сущность изготовления металлоизделий с применением сварки заключается в получении неразъемного соединения в результате расплавления и совместной кристаллизации материалов сварочного электрода и соединяемых деталей. Недостатком такого способа сборки является структура сварного шва, которая оказывается более крупной, чем структура соединяемого металла, что приводит к снижению механических свойств изделия в зоне сварки. По итогам исследований была установлена возможность измельчения структуры сварного шва и повышения механических свойств сварного изделия типа оболочки, сваренной из листов деформируемого алюминий-магниевого сплава АМг6 с применением в качестве модификаторов нанопорошков химических соединений. Нанопорошки химических соединений представляют собой сверхмелкозернистые кристаллические или аморфные образования с размерами частиц, не превышающими 100 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), которые обладают уникальными физико-химическими свойствами и механическими характеристиками, существенно отличающимися от таковых для материалов того же химического состава в массивном состоянии. В результате выполненной в производственных условиях работы была установлена возможность измельчения структуры сварного шва и повышения механических свойств сварного изделия типа оболочки, сваренной из листов деформируемого алюминий-магниевого сплава АМг6 с применением в качестве модификаторов нанопорошков химических соединений нитрида бора BN, гексаборида лантана LaB₆ и карбонитрида титана TiCN.

Ключевые слова: алюминий-магний сплавы, сварка, наномодифицирование.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 925–931

FABRICATION AND WELDING OF ALUMINUM ALLOYS BY NANOPACKAGING ELECTRODESG. G. Krushenko^{1,2*}, O. A. Platonov², S. N. Reshetnikova², G. G. Kiselev³¹Institute of Computational Modelling SB RAS

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

³Strategic rocket forces

Vlasikha, Moscow region, 119160, Russian Federation

*E-mail: o.platonov@mail.ru

In the manufacture of structures made of aluminum alloys, there are different ways and means of carrying out permanent joints, including welding. The physical essence of the manufacture of metal products by welding consists in obtaining permanent connections as a result of melting and crystallization of the material of the welding electrode and the parts to be joined. The disadvantage of this method of Assembly is that the structure of the weld which is larger than the structure of the connected metal, which leads to lower mechanical properties in the weld zone. According to the results of the research there was a possibility of grinding the structure of the weld and improve the mechanical properties of the weldment type of a shell, welded from sheets of wrought aluminum-magnesium alloy AMg6 with the application as modifiers of nanopowders of chemical compounds. Nanopowders of chemical compounds represent superslow crystalline or amorphous formation with particle sizes not exceeding 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), which possess unique physical and chemical properties and mechanical characteristics that are significantly different from those for materials of the same chemical composition in a solid state. As a result, the work performed in a production environment there was the possibility of grinding the structure of the weld and improve the mechanical properties of the weldment type of a shell,

welded from sheets of wrought aluminum-magnesium alloy AMg6 with the application as modifiers of nanopowders of chemical compounds of boron nitride BN, lanthanum hexaboride LaB6 and titanium carbonitride TiCN.

Keywords: aluminium alloys, welding of system hardening.

Введение. При изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов используются разные способы и средства выполнения неразъемных соединений, включая и сварку [1; 2].

Физическая сущность изготовления металлоизделий с применением сварки заключается в получении неразъемного соединения в результате расплавления и совместной кристаллизации материалов сварочного электрода и соединяемых деталей. Недостатком такого способа сборки является тот факт, что при этом структура сварного шва оказывается более крупной, чем структура соединяемого металла, кстати, структура которого в зоне влияния нагрева тоже укрупняется, а это приводит к снижению механических свойств изделия в зоне сварки. В качестве примера на рис. 1 приведена структура узла сварки изделия из листового алюминиево-магниевого сплава АМг5 [3] и из стали 10ХСНД [4], на которых видна значительно более крупная структура сварного шва, по сравнению со свариваемым материалом.

При этом следует отметить, что в многочисленных работах однозначно установлено, что металлоизделия с мелкокристаллической структурой обладают более высокими механическими свойствами по сравнению с крупнокристаллической. Такая особенность металлов хорошо описывается классическим соотношением Холла-Петча (Hall-Petch dependence) [5; 6]:

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

где H_v – твердость материала; σ_T – предел текучести; H_0 – твердость тела зерна; σ_0 – внутреннее напряжение, препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна; k – коэффициент пропорциональности; D – размер зерна. Из приведенной формулы видно, что с уменьшением размера зерна происходит увеличение прочности материала.

Модифицирование сплавов. В то же время из опыта производства литых изделий известно, что с целью измельчения их структуры применяется так называемое

модифицирование [7], суть которого заключается во введении в жидкий металл веществ, либо служащих центрами кристаллизации, либо блокирующих рост формирующихся кристаллов путем ограничения подхода к ним однородного материала из окружающей металлической жидкости. В ряде случаев оба процесса идут либо одновременно, либо в такой последовательности: зарождение центров кристаллизации → блокирование роста кристаллов.

В этой связи следует дать пояснения относительно приведенной на рис. 1 структуры алюминиево-магниевого сплава АМг5, который относится к деформируемым, листовая продукция из которого производится путем прокатки слитков, отливаемых полупрерывным способом. При этом с целью измельчения структуры слитков при подготовке расплава к литью в него с помощью алюминиево-титановой лигатуры (промежуточные сплавы, состоящие из элементной основы сплава и модифицирующей добавки) вводят титан (в пределах 0,02–0,1 %), который образует в жидком металле мелкодисперсные интерметаллические соединения $TiAl_3$, служащие центрами кристаллизации [7]. Кроме того, структура дополнительно измельчается при прокатке слитка в лист в результате многократной деформации. И тем не менее, сварка приводит к укрупнению структуры, что и сказывается отрицательно на качестве сварного изделия.

Существует достаточно большое количество средств и способов модифицирования, в основном, как указывалось выше, путем введения модифицирующих добавок в жидкий металл лигатурами (сплав, состоящий из основы готовящегося сплава и модифицирующей добавки). Однако возможности таких средств модифицирования практически достигли своих пределов, и в последние годы находят применение новый способ модифицирования – путем введения в жидкий металл нанопорошков (НП) химических соединений, который защищен десятками патентов, начиная с 1981 г. [8] по настоящее время [9].

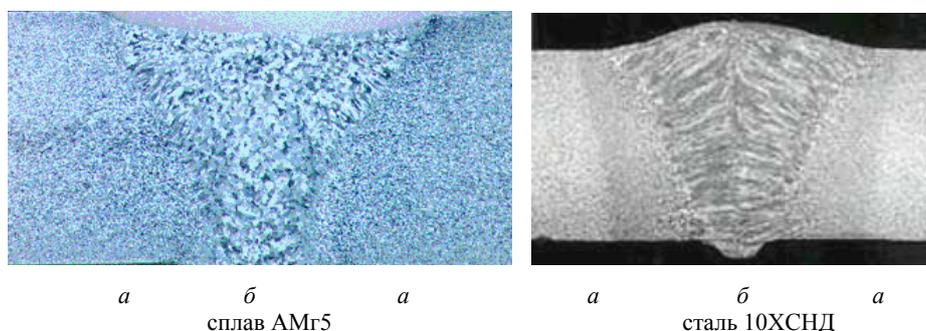


Рис. 1. Структура узла сварки сплава АМг5 и стали 10ХСНД:
а – основного материала; б – сварной шов

Fig. 1. The node structure welding of AMg5 alloy and steel 10KHSND:
a – main material; b – weld

Нанопорошки химических соединений. Нанопорошки химических соединений представляют собой сверхмелкозернистые кристаллические или аморфные образования с размерами частиц, не превышающими 100 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), которые обладают уникальными физико-химическими свойствами и механическими характеристиками, существенно отличающимися от таковых для материалов того же химического состава в массивном состоянии. Причина уникальности свойств НП заключается в том, что количество атомов в их поверхностном слое и в объеме оказывается соизмеримым [10]. Вследствие малых размеров и высокой реакционной способности НП и возникла идея их введения в металлические расплавы в качестве модификаторов. Однако существующие способы введения в металлические расплавы порошкообразных добавок не могли 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, они выполняют роль центров кристаллизации – плохо смачиваются жидким металлом, что является основанием для начала формирования кристаллов. Кроме того, несмотря на высокую плотность (от 1380 кг/м^3 – TaN до 2510 кг/м^3 – V_4C), НП легко образуют в воздухе пылевидную взвесь, при определенных условиях самовозгорающуюся и даже взрывоопасную. Все это делает практически невозможным прямое введение НП в расплавы, поэтому был разработан принципиально новый способ их введения, блокирующий перечисленные выше негативные явления.

Изготовление наномодифицирующих прутков.

С этой целью в тонкостенный алюминиевый контейнер ($\varnothing 165 \text{ мм}$, $h = 235 \text{ мм}$, толщина стенки 2 мм) засыпали плакированные нанопорошком 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. Затем отверстие в контейнере закрывали алюминиевой крышкой, производили ее завальцовку, подвергали контейнер вращению в установке с эксцентричными осями. После чего его помещали в контейнер гидравлического пресса и с усилием прессования 100–120 тс со скоростью 3,5 см/с прессовали прутки диаметром от 5 до 9,5 мм, особенностью которых оказалось их волокнистое внутреннее строение при тонкой оболочке (десять доли мм) (рис. 2).

Волокнистое строение прутка объясняется тем, что из-за нахождения частиц НП на поверхности частиц алюминия в процессе экструзии они деформировались изолированно друг от друга, что подтверждается результатами микроскопического изучения поверхности как плакированных частиц алюминия, так и волокон. Оказалось, что волокна полностью покрыты прочно внедрившимися в их поверхность частицами НП. Это наблюдение свидетельствует, во-первых, о большом количестве частиц НП в прутках и, во-вторых, об их достаточно равномерном распределении в объеме, что, в-третьих, гарантирует получение равномерно измельченной структуры в объеме литой детали. В прутках $\varnothing 9,5 \text{ мм}$ насчитывалось от 1100 до 1200 волокон с площадью сечения в пределах 0,005–0,075 мм^2 . Расчет показал, что длина таких волокон в зависимости от размера частиц алюминия находилась в интервале 400–3200 мм. От размеров прессуемых частиц алюминия, т. е. от площади их поверхности, зависит содержание НП в объеме прутка, и чем частицы меньше, тем суммарная площадь находящихся в объеме контейнера частиц алюминия больше, и, следовательно, в прутке будет содержаться больше НП. Результаты взвешивания показали, что 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. Количество любого из НП, вводимого в любые исследуемые сплавы, не превышало 0,05 %, а в отдельных случаях – всего до тысячных долей процента. Расход прутка при этом составляет 20–25 кг на 1 т металла.

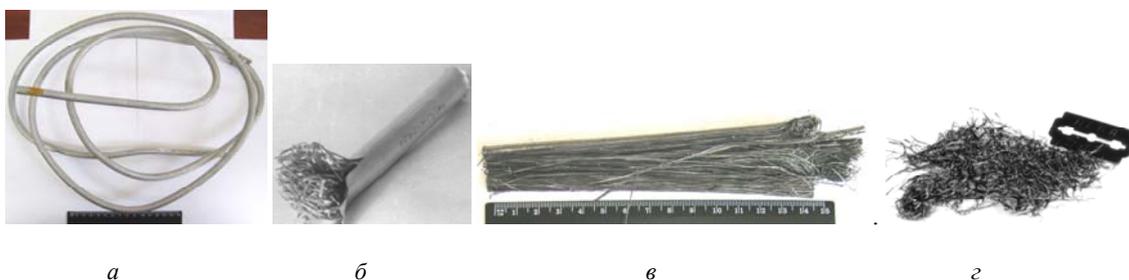


Рис. 2. Отпрессованные прутки:
 а – $\varnothing 9,5 \text{ мм}$, $L = 4,0 \text{ м}$ (черная полоска в нижней части рисунка – линейка длиной 160 мм);
 б, в – фрагменты прутка со вспоротой оболочкой; г – извлеченные из прутка волокна

Fig. 2. The pressed bars:
 а – $\varnothing 9.5 \text{ mm}$, $L = 4.0 \text{ m}$ (black strip at the bottom – line of length 160 mm);
 б, с – fragments of the rod to rip the shell; d – extracted from the rod fiber

Наномодифицирование сплавов. В качестве модификаторов алюминиевых литейных и деформируемых сплавов, чугуна и стали опробовано более 20-ти химических соединений, включая AlN , Al_2O_3 , B_4C , BN , $\text{Cr}_3\text{C}_{1,6}\text{N}_{0,4}$, HfN , HfB_2 , LaB_6 , SiC , Si_3N_4 , TaN , $\text{Ti}_x\text{C}_y\text{N}_z$, $\text{Ti}_x\text{C}_y\text{N}_z\text{O}_i$, TiN , TiO_2 , VC , $\text{V}_x\text{C}_y\text{N}_z$, $\text{V}_{0,75}\text{N}_{0,25}$, а также смеси ($\text{AlN} + \text{TiN}$), ($\text{BN} + \text{B}_4\text{C}$), ($\text{SiC} + \text{B}_4\text{C}$). Эти соединения относятся к промежуточным фазам, характерной особенностью которых является высокая степень устойчивости, неметаллический характер и высокая температура плавления (в диапазоне 2273–3273 К).

В результате введения НП B_4C , SiC , $\text{Ti}_x\text{C}_y\text{N}_z$, TaN , смеси ($\text{B}_4\text{C} + \text{BN}$) в алюминиевые литейные сплавы АК7, АК12, АК9ч, АК7ч, АК7Ц9 и др., измельчается макро- и микроструктура, что приводит к увеличению σ_b отливок на 2,5–19,3 % и δ – в 1,5–7,3 раза. В результате введения НП B_4C в сплавы АК7ч и АМ5 при получении из них деталей жидкой штамповкой повышается удлинение δ – соответственно на 50 и 19 % при сохранении уровня σ_b . При введении НП SiC , B_4C , BN , LaB_6 , TaN , $\text{Ti}_x\text{C}_y\text{N}_z$, TiCN , TiN , TiO_2 , $\text{V}_x\text{C}_y\text{N}_z$, смеси $\text{AlN} + \text{BN}$, смеси $\text{HfN} + \text{HfB}_2$ в алюминиевые деформируемые сплавы при литье полунепрерывным способом слитков \varnothing 190 мм из сплава Д16, \varnothing 300, 420 и 500 мм из сплава АМг6, \varnothing 480 мм из сплава Д1 происходит измельчение зерна в 1,7–20 раз, что приводит к повышению механических свойств отпрессованных из них профилей различного сечения: σ_b – на 2,5–8,8 %; $\sigma_{0,2}$ – на 2,0–16,1 %; δ – на 11,8–31,0 % [11–14].

Наномодифицирование сварного шва. Исходя из идентичности механизмов кристаллизации литых деталей и сварного шва, было решено опробовать сварку описанными выше прутками, прессование которых производилось по той же технологии, но с дополнительным введением в прессуемую композицию флюса АН–А4 (57,0 % KCl ; 28,0 % BaF_2 ; 7,5 % LiF ; 7,5 % AlF_3) [15].

Следует при этом отметить, что, если для изготовления подобных электродов, названных пучковыми, применялась достаточно сложная технология [16], которая заключалась в нарезании сварочной проволоки на мерные заготовки, вкладывании их в кондуктор, обжимании в нагретом состоянии до плотного прилегания, вставлении их в муфту, которая вместе с прутками нагревается до сварочной температуры, после чего сваривается с прутками проковкой, далее изготовленный пучковый электрод вынимается из кондуктора и окунается в обмазку, которая является элементом, связующим отдельные прутки в электрод, то технология изготовления сварочных прутков, содержащих НП, оказывается значительно проще, и заключается она практически в выполнении только двух операций: 1) в смешивании частиц алюминия с частицами НП и с флюсом; 2) в прессовании этой композиции в сварочную проволоку (пруток).

Следует отметить, что применение нанопорошковых материалов при сварке описано в нескольких работах. Так, в работе [17] представлены результаты использования НП серебра с размерами частиц 5 и 100 нм в качестве «вставного материала» (*using sil-*

ver nanoparticles as an insert material) при лазерной сварке листов из магниевых сплавов. При этом на листы предварительно наносили пасту, содержащую НП серебра, после чего их нагревали до 100 °С в течение 60 с с целью испарения пасты. Затем листы накладывали друг на друга сторонами, плакированными магниевыми наночастицами, и сканировали поверхность верхнего листа лазером, в результате чего частицы магниевых порошков расплавились, и при последующей кристаллизации магниевых расплава происходило прочное скрепление листов.

В другой работе [18] сварку разнородных металлов (Al-Ti , Ti-сталь) проводили с помощью непрерывного CO_2 -лазерного излучения с применением модифицирующих инокуляторов в виде порошков нитрида титана TiN и оксида иттрия Y_2O_3 (размер частиц – до 20 мкм), частицы которых плакировали хромом. При этом так же, как и в предыдущей работе, предварительно приготовленная суспензия, содержащая эти порошки, наносилась на поверхность свариваемых пластин толщиной 1–2 мм. В результате применения этого способа структурные составляющие сварного шва измельчаются в 2–4 раза, а вместо игольчато-дендритной формируется дисперсная равноосная структура, выравниваются механические характеристики, уменьшаются размер шва и зона термического влияния, и, соответственно, повышаются механические свойства: временное сопротивление разрушению σ_b – в 1,23–1,35 раза, предел текучести $\sigma_{0,2}$ – в 1,8–2,0 раза и относительное удлинение δ – в 2,0–4,9 раза. По-видимому, меньший эффект повышения механических свойств, чем в случае сварки электродом, содержащим нанопорошки (размер частиц – нанометры), связан со значительно большими размерами частиц (микронны) применяемых порошков. Существенным недостатком описанных способов сварки является необходимость использования пасты и суспензии в качестве «магазинов» хранения порошков с вытекающим из этого такого последствия, как сложность нанесения слоя именно такой толщины, которая обеспечит присутствие в сварочном шве требуемого количества порошка. Другой недостаток заключается в сложности закрепления пасты и суспензии на поверхностях, лежащих в трех измерениях. Эти недостатки отсутствуют при сварке электродами, содержащими НП.

Настоящая работа была выполнена в производственных условиях при изготовлении объемной конструкции из листового деформируемого алюминиево-магниевых сплавов АМг6 (5,8–6,8 % Mg ; 0,5–0,8 % Mn ; 0,02–0,1 % Ti ; 0,0002–0,005 % Be ; примеси – до 0,1 %; остальное – Al), близкого по составу к сплаву АМг5, в связи с тем, что при ее сварке с использованием присадочной проволоки, изготовленной из этого же сплава, не всегда обеспечивалась требуемая прочность сварного соединения. Как показало металлографическое исследование, причиной этого оказался тот факт, что металл сварного шва отличался от металла листа более крупными зернами α -твердого раствора и более крупными выделениями β -фазы (Al_3Mg_2) по их границам.

В настоящей работе применяли электрод с волокнистым строением диаметром 8 мм, содержащий порядка 2,0 % НП нитрида бора BN или гексаборида лантана LaB₆, или карбонитрида титана TiCN и 2,0 % флюса АН-А4. Сварку производили с помощью автоматической установки в среде аргона. Фрагменты сварки листов АМг6 приведен на рис. 3.

Качество шва по требованиям приемочной документации оценивали по величине временного сопротивления разрушению σ_b при испытании вырезанных из сварной конструкции плоских образцов с размерами 15×50 мм. Результаты испытаний показали, что σ_b металла в области шва при сварке прутком, содержащим НП BN, составляет 333 МПа, НП LaB₆ – 338 МПа и НП 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 (см. таблицу).

Изучение микроструктуры сварного шва показало, что в его объеме какие-либо дефекты отсутствуют. При этом зерно в свариваемом листе вытянуто вдоль прокатки, а его размеры лежат в интервале ~ 0,3–0,4 мм. Зерно в сварном шве – мелкое, равноосное, его размеры составляют ~ 0,01–0,03 мм, что в среднем меньше, чем в основном металле в 17,5 раза. Интерметаллидные фазы оказались в раздробленном состоянии. Можно полагать, что повышение σ_b связано не только с измельчением структуры шва и с измельчением интерметаллидов, но и с дисперсионным упрочнением α -твердого раствора сплава тонкодисперсными частицами НП. Микротвердость основного металла и сварного шва одного уровня – 76,4–78,7 HV (среднее – 77,55 HV, или 73,5 HB), т. е. при сварке разупрочнение не происходит.

Очевидно, аналогичный эффект имеет место в результате введения в сварочную ванну диоксида титана TiO₂ с помощью металлохимической присадки МХП (рубленая сварочная проволока Ø 2 мм, смешанная с двуокисью титана TiO₂), что приводит к формированию такой структуры металла сварного шва, которая обеспечивает высокие показатели прочности, пластичности и вязкости [19].

Сварка электродом, содержащим НП карбонитрида титана TiCN, была успешно применена для заварки трещины в ступице массивного винта станции газоочистки цеха технологических котлов целлюлозно-бумажного комбината. Заварку производили в среде аргона. Было установлено, что в металле шва и в околошовной зоне трещины отсутствовали, тогда как при наплавке принятой по технологии алюминиевой проволокой этот дефект зачастую присутствует.

В следующей серии работ было установлено, что в результате предварительной механоактивации композиции, состоящей из частиц алюминия и НП, и последующего ее прессования содержание НП (на примере НП TiN) в прутке увеличивается до 7,7 мас. %, что в еще большей степени позволяет повысить скорость сварки при одновременном уменьшении расхода электродной проволоки.

Заключение. В результате выполненной в производственных условиях работы была установлена возможность измельчения структуры сварного шва и повышения механических свойств сварного изделия типа оболочки, сваренной из листов деформируемого алюминиево-магниевого сплава АМг6 с применением в качестве модификаторов нанопорошков химических соединений нитрида бора BN, гексаборида лантана LaB₆ и карбонитрида титана TiCN.



Рис. 3. Фрагменты сварки электродом, содержащим нанопорошок карбонитрида титана TiCN, листовой конструкции из листов сплава АМг6 толщиной: а – 5,0 мм; б – 8,0 мм

Fig. 3. Fragments of the sheet structures welding of sheets of alloy AMg6 thickness: a – 5.0 mm; b – 8.0 mm electrode containing nanopowder of titanium carbonitride TiCN

Влияние вида электродов на временное сопротивление разрушению металла в области сварного шва при сварке листового сплава АМг6

Временное сопротивление разрушению σ_b (МПа) металла в области сварного шва при сварке электродом			
Из сплава АМг6 без нанопорошка	Содержащим нанопорошок		
	BN	LaB ₆	TiCN
Величина	Величина/прирост, %	Величина/прирост, %	Величина/прирост, %
320	333/4,1	338/5,6	345/7,8

Библиографические ссылки

1. Пат. 2357841 Российская Федерация, МПК С 2 В 23 К 9/23, В 23 К 9/16, В 23 К 33/00. Способ дуговой сварки в инертных газах стыковых соединений разнородных алюминиевых сплавов / Алексеев В. В., Овчинников В. В., Грушко О. Е., Гуреева М. А., Гириш Р. И. № 2006128314/02 от 03.08.2006, Бюл. № 16. 2009.
2. Hartman D. A., Davé V. R., Cola M. J. In-process quality assurance for aerospace welding // *Welding Journal*. 2009. Vol. 88. № 1. P. 28–31.
3. Паршин С. Г. Электродуговая сварка с применением активирующих флюсов. Самара : Самарский научный центр РАН, 2006. 380 с.
4. Исследование влияния режимов полуавтоматической сварки на выпрямителях типа ВД-506ДК металлопорошковой проволокой POWER BRIDGE 60M в смесях газов на механические и вязкопластические свойства наплавленного металла при сварке мостовых конструкций / М. В. Карасев [и др.] // *Сварка и диагностика*. 2009. № 1. С. 19–24.
5. 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.
6. Petch N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals // *Journal of Iron and Steel Institute*. 1953. Vol. 174. P. 25–28.
7. Бондарев Б. И., Напалков В. И., Тарарышкин В. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М. : Metallurgy, 1979. 224 с.
8. А. с. 831840 СССР, МПК⁵ А 1 С 22 С 1/06. Способ модифицирования литейных алюминиевых сплавов эвтектического типа / Г. Г. Крушенко, Ю. М. Мусохранов, И. С. Ямских, А. А. Корнилов, С. Г. Крушенко. № 2831160 от 17.10.1979, Бюл. № 19. 1981.
9. Пат. 2475334 Российская Федерация, МПК С 2 В 22 F 3/20, С 22 С 1/06, В 22 F 1/00, С 22 С 21/04. Способ получения модификатора для доэвтектических алюминиево-кремниевых сплавов / Крушенко Г. Г., Фильков М. Н. № 2011122498/02 от 02.06.2011, Бюл. № 5. 2013.
10. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. М. : Атомиздат, 1977. 264 с.
11. Измельчение структуры сплава Д16 при модифицировании прутками с ультрадисперсными порошками / Г. Г. Крушенко [и др.] // *Цветная металлургия*. 1991. № 4. С. 8–10.
12. Повышение механических свойств алюминиевых литейных сплавов с помощью ультрадисперсных порошков / Г. Г. Крушенко [и др.] // *Литейное производство*. 1991. № 4. С. 17–18.
13. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1995. 344 с.
14. Нанопорошковые технологии в машиностроении / В. В. Москвичев [и др.] ; Сибирский федеральный университет. Красноярск. 2013. 186 с.
15. Пат. 2429958 Российская Федерация, МПК С 2 В 23 К 35/40. Способ изготовления электродной проволоки для сварки алюминиевых сплавов / Крушенко Г. Г. ; № 2009131289/02 ; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27. 2011.

16. А. с. 87411 СССР, Класс 21h, 30.6. Способ изготовления пучковых электродов / Н. В. Бродович, А. В. Обухов. № 411121 ; опубл. 01.01.1950.

17. Ishak M., Maekawa K., Yamasaki K. The characteristic of laser welded magnesium alloy using silver nanoparticles as insert material // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 536. P.143–151.

18. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик / Сибирское отделение РАН. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. С. 138–139.

19. Болдырев А. М. Взаимодействие диоксида титана со сварочной ванной при автоматической сварке под флюсом стали 10ХСНД с металлохимической присадкой // *Сварочное производство*. 2014. № 9. С. 14–19.

References

1. Alexeev V. V., Ovchinnikov V. V., Grushko O. E., Gureeva M. A. *Sposob dugovoy svarki v inertnykh gazakh stykovykh soedineniy raznorodnykh alyuminiyevykh spлавov* [Method of arc welding in inert gases butt joints of dissimilar aluminum alloys]. Patent RF, No. 2006128314/02, 2009.
2. Hartman D. A., Davé V. R., Cola M. J. In-process quality assurance for aerospace welding. *Welding Journal*. 2009, Vol. 88, No. 1, P. 28–31.
3. Parshin S. G. *Elektrodugovaya svarka s primeneniem aktiviruyushchikh flyusov* [Arc welding with application of activating fluxes]. Samara, Samara scientific center of RAS Publ., 2006. 380 p
4. Karasev M. V., Rabotinsky D. N., Grebenchuk V. G. et al. Research of influence of modes of semi-automatic welding rectifiers type VD-506DK metal cored wire POWER BRIDGE 60M in mixtures of gases on the mechanical and visco-plastic properties of the weld metal in welding of bridge structures]. *Svarka I Diagnostika*. 2009, No. 1, P. 19–24 (In Russ.).
5. 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.
6. Petch N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals. *Journal of Iron and Steel Institute*. 1953, Vol. 174, P. 25–28.
7. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararyshkin V. I. *Modifitsirovanie alyuminiyevykh deformiruemyykh spлавov* [Modification of wrought aluminium alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979, 224 p.
8. Krysenko G. G., Musohranov J. M., Yamskih I. S., Kornilov A. A., Krushenko S. G. *Sposob modifitsirovaniya liteynykh alyuminiyevykh spлавov evtekticheskogo tipa* [Method of modification of cast aluminum alloys of eutectic type]. Patent RF, No. 2831160, 1981.
9. Kruchenko G. G., Filkov M. N. *Sposob polucheniya modifikatora dlya doevtekticheskikh alyuminiyevokremniyevykh spлавov* [A method of producing a modifier for doauthenticate aluminum-silicon alloys] Patent RF, No. 2475334, 2013.
10. Morokhov I. D., L. I. Trusov, Chizhik S. P. *Ul'tradispersnye metallicheskie sredy* [Ultrafine metal environment]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 264 p.

11. Krushenko G. G., Filkov M. N., Balashov B. A. et al. [Refinement of the structure of the D16 alloy in the case of modifying rods with ultrafine powders]. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1991, No. 4, P. 8–10 (In Russ.).
12. Krushenko G. G., Balashov B. A., Vasilenko Z. A. et al. [Improvement of mechanical properties of aluminum casting alloys with ultradispersed powders]. *Liteynoe proizvodstvo*. 1991, No. 4, P. 17–18 (In Russ.).
13. 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 ultradisperse powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Science. Siberian publishing firm of RAS, 1995, 344 p.
14. Moskvichev V. V., Krushenko G. G., Burov A. E. et al. *Nanoporoshkovye tekhnologii v mashinostroenii* [Nanopowder technology in mechanical engineering]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2013, 186 p.
15. Krushenko G. G. *Sposob izgotovleniya elektrodnoy provoloki dlya svarki alyuminiyevykh splavov* [A method of manufacturing the electrode wire for welding aluminum alloys]. Patent RF, No. 2429958, 2011.
16. Brodovich N. V., Obukhov A. V. *Sposob izgotovleniya puchkovykh elektrodov* [A method of manufacturing a beam-type electrodes]. Patent RF, No. 411121, 1950.
17. Ishak M., Maekawa K., Yamasaki K. The characteristic of laser welded magnesium alloy using silver nanoparticles as insert material. *Materials Science and Engineering*. A. 2012, Vol. 536, P. 143–151.
18. The impact of high-concentrated energy fluxes on materials to change their physical-chemical properties and improve the performance. SB RAS in 2007. Novosibirsk, Publishing house so ran, 2008, P. 138–139.
19. Boldyrev A. M. [Interaction of titanium dioxide with the welding bath during automatic submerged-arc welding of steel 10KHSND with metallogenically additive]. *Svarchnoe proizvodstvo*. 2014, No. 9, P. 14–19 (In Russ.).

© Крушенко Г. Г., Платонов О. А.,
Решетникова С. Н., Киселев Г. Г., 2017