

XIII Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021
карбідних виділень, що забезпечує високу ізотропність властивостей та надає
низку технологічних і економічних переваг.

Література:

1. J. Hirsch. (2019). Aluminium in innovative light weight car design / Light weight Vehicle Structure Conference, 24th - 25th April 2019, Munich, Germany.
2. D. Raabe, C. C. Tasan, H. Springer, and M. Bausch. (2015). From High-Entropy Alloys to High-Entropy Steels Steel research Int. 10, 1127-1138. <https://doi.org/10.1002/srin.201500133>
3. G. Frommeyer, U. Brux. Microstructure and mechanical properties of High-strength Fe-Mn-Al-C light-weight TRIPLEX Steels, Steel Res. Int. 2006, 77, 627.

**Сергиенко Р.А.¹, Щерецкий А.А.¹, Науменко М.И.¹,
Лукашук А.И.², Верховлюк А.М.¹
(¹ФТИМС НАН України; ²КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)
**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА
МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО
АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В96Ц (7050)
E-mail: rsruslan17@gmail.com****

При производстве непрерывнолитых слитков из высокопрочного алюминиевого сплава В96ц (аналог сплава 7050 по европейскому стандарту EN 573-3:2009) [1] существуют определенные трудности, которые ведут к возврату значительного количества сплава на повторный переплав. Часто наблюдается пониженный уровень и значительный разброс механических свойств готовых изделий. Поэтому разработка эффективного способа модифицирования позволит повысить качество изделий со стабильными механическими характеристиками, а также уменьшить количество горячих трещин при литье слитков из сплава В96ц и уменьшить их растрескивание при пресовании.

Для разработки эффективного способа модифицирования сплава В96ц были приготовлены и исследованы модифицирующие лигатуры следующих составов (мас. %): Al-3%Ti; Al-3%TiC; Al-4,5%TiC, Al-3%WC, Al-3%TiO₂, Al-5%Ti-1%B; Al-2%Ti-0,5%C. Лигатуры (за исключением лигатур промышленного изготовления Al-5%Ti-1%B; Al-2%Ti-0,5%C и лигатуры Al-3%Ti) были приготовлены в виде прутков с помощью экструзии из смеси порошков алюминия (с размером частиц 50 мкм) и наночастиц карбида титана TiC (50 нм и 200 нм), карбида вольфрама WC (100 нм), оксида титана TiO₂ (50 нм). Лигатуры в разном количестве (1, 2, 5 кг на тонну расплава) вводились в расплав при температуре 740 °C перед заливкой образцов в чугунные и стальные формы по отдельности или в определенных комбинациях (Al-5%Ti-1%B + Al-3%TiC; Al-5%Ti-1%B + Al-3%TiO₂; Al-5%Ti-1%B + Al-3%Ti; Al-2%Ti-0,5%C + Al-3%Ti; Al-3%TiC + Al-3%Ti). Температура заливки металла в формы была 720 °C.

Как показали наши исследования, промышленные лигатуры Al-5%Ti-1%B и Al-2%Ti-0,5%C активно измельчают зерно сплава В96ц. В зависимости от количества вводимого модификатора, размер зерна сплава уменьшался в 5-10 раз по сравнению с немодифицированными образцами (рис. 1, а). Лигатуры Al-3%TiC, Al-4,5%TiC с размером частиц карбида титана 50 нм и 200 нм, соответственно, проявили слабое модифицирующее действие, так как зерно сплава измельчалось меньше, чем в 2 раза. Введение в расплав лигатуры Al-3%WC с размером наночастиц 100 нм не привело к измельчению зерна сплава, а наоборот даже к его укрупнению (рис. 1, а). Макро- и микроструктуры исходного и модифицированных образцов представлены на рис. 2 (а, б) и 2 (в, г, д, е, ж, з, и, к), соответственно. На микрофотографиях красными линиями выделены границы отдельных зерен.

Согласно стандарту, в составе сплава В96ц присутствует цирконий в пределах 0,08-0,15 мас. %, который вводят для предотвращения рекристаллизации структуры слитков при их термической обработке. Цирконий существенно снижает модифицирующий эффект лигатуры Al-5%Ti-1%B, так как

цирконий образует с бором соединение ZrB_2 и блокирует модифицирующее действие частиц TiB_2 . Совместное введение титана в количестве больше, чем 0,04 мас. % с лигатурой $Al-5\%Ti-1\%B$ существенно уменьшает вредное действие циркония и повышает модифицирующий эффект. Введение в расплав лигатуры $Al-3\%TiC$ (2 кг на тонну расплава) с добавкой титана (0,12; 0,2 мас. %), также как и промышленные лигатуры, эффективно измельчало зерно образцов из сплава В96ц (рис. 1, а, б), так как титан сам по себе активно уменьшает размеры зерна алюминиевых сплавов (рис. 2, и, к) [2].

Лигатура $Al-2\%Ti-0,5\%C$, также как и модификатор $Al-5\%Ti-1\%B$ способна значительно измельчать зерно сплава В96ц (рис. 1, а, б, рис. 2, ж, з), а присутствие циркония в сплаве на нее не влияет. Модифицирующими частицами выступает карбид титана (TiC), но при температуре расплава выше $730\text{ }^\circ\text{C}$ карбид титана взаимодействует с расплавом алюминия с образованием карбида алюминия и его модифицирующее действие резко падает. Поэтому желательно вводить эту лигатуру в расплав при температуре не выше $710-720\text{ }^\circ\text{C}$.

Исследовали влияние времени выдержки расплава (1, 5, 10, 20 мин) после модифицирования расплава промышленной лигатурой $Al-5\%Ti-1\%B$. Проводили два эксперимента – в первом эксперименте сплав не содержал цирконий, во втором эксперименте количество циркония было около 0,19 мас. % (рис. 3, а). При выдержке расплава больше 10 минут при температуре $740\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается заметное уменьшение модифицирующей эффективности лигатуры $Al-5\%Ti-1\%B$. Сам по себе цирконий может измельчать зерно сплава В96ц, но значительно менее эффективно, чем промышленный модификатор $Al-5\%Ti-1\%B$.

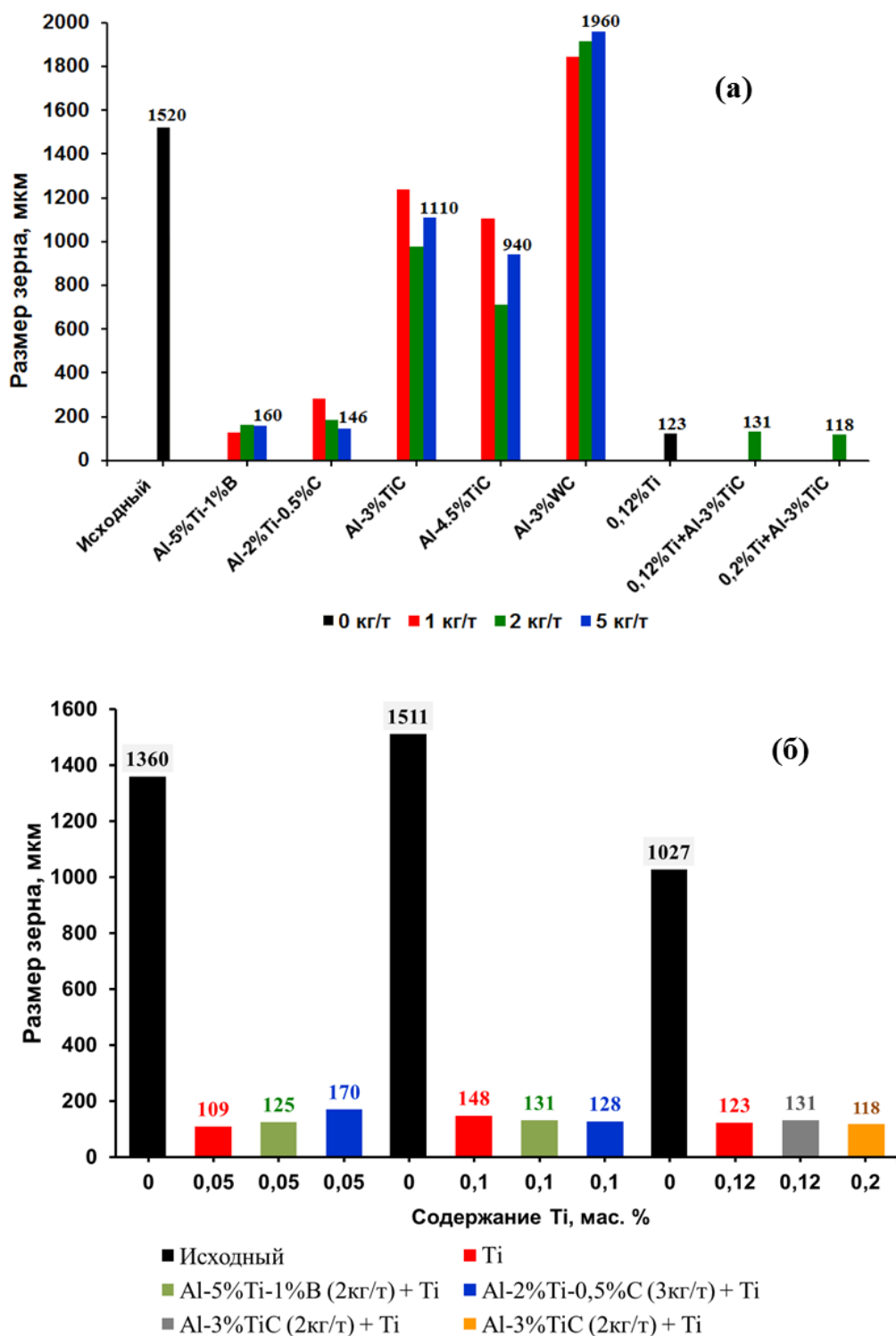


Рис. 1. Влияние количества модифицирующих лигатур отдельно (а) и в комбинации с титаном (б) на размер зерна в образцах диаметром $\varnothing 18$ мм из сплава В96ц

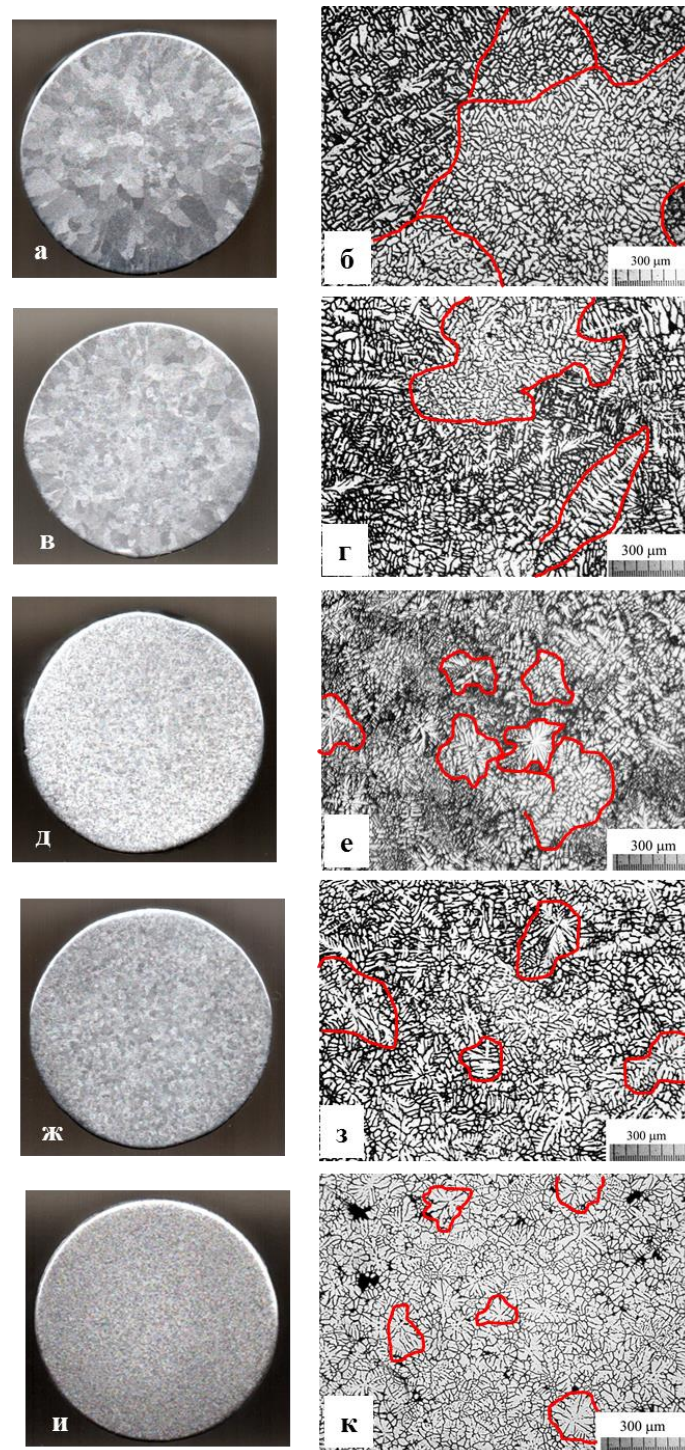


Рис. 2. Макро- и микроструктура образцов из сплава В96ц, модифицированных разными лигатурами в количестве 2 кг на тонну расплава: исходный немодифицированный образец – (а, б); Al-3%TiC (50 нм) – (в, г); Al-5%Ti-1%B – (д, е); Al-2%Ti-0,5%C – (ж, з); 0,1% Ti (лигатура Al-3%Ti) – (и, к)

Размер зерна в немодифицированном без циркония образце был около 1300 мкм, а добавка циркония (0,19 мас. %) уменьшила размер зерна в два

раза, т. е. до 680 мкм (рис. 3, а), в то время как лигатура Al-5%Ti-1%B измельчила зерно почти в 8 раз.

При комплексном модифицировании в расплавы одновременно вводили два типа модификаторов: промышленную лигатуру Al-5%Ti-1%B, которая способствует образованию центров кристаллизации, и лигатуру, которая содержит элементы, блокирующие рост зерна. Так стронций в количестве 0,05 мас. % блокирует рост зерна за счет повышения поверхностного натяжения на границе зерно – расплав, а наноразмерный карбид титана или оксид титана (из лигатур Al-3%TiC и Al-3%TiO₂) механически блокирует рост зерна, находясь на межфазной границе (рис. 3, б). Как показали эксперименты, комплексное модифицирование измельчило зерно в 2,5-3 раза, а лигатура алюминий-титан-бор (Al-5%Ti-1%B) без добавок уменьшила зерно в 3,5-4,5 раза по сравнению с немодифицированным образцом. Можно сделать вывод, что добавки поверхностно-активного стронция и наночастиц TiC, TiO₂ не оказали значительного модифицирующего эффекта.

Таким образом при испытаниях было установлено, что лигатуры Al-5%Ti-1%B и Al-2%Ti-0,5%C активно измельчают зерно сплава, а введение титана в количестве больше, чем 0,04 мас. % уменьшает вредное действие циркония. Комплексное модифицирование не оказало значительного измельчающего эффекта. На действующих металлургических предприятиях, где производятся непрерывнолитые слитки из высокопрочных алюминиевых сплавов, на первом этапе в плавильную печь рекомендуется вводить титан в пределах 0,04-0,06 мас. %, а на втором этапе следует вводить в расплав модифицирующую лигатуру в количестве 2 кг на тонну сплава после рафинирования и фильтрования ближе к кристаллизатору, при этом температура расплава в месте ввода модификатора не должна превышать 720 °С.

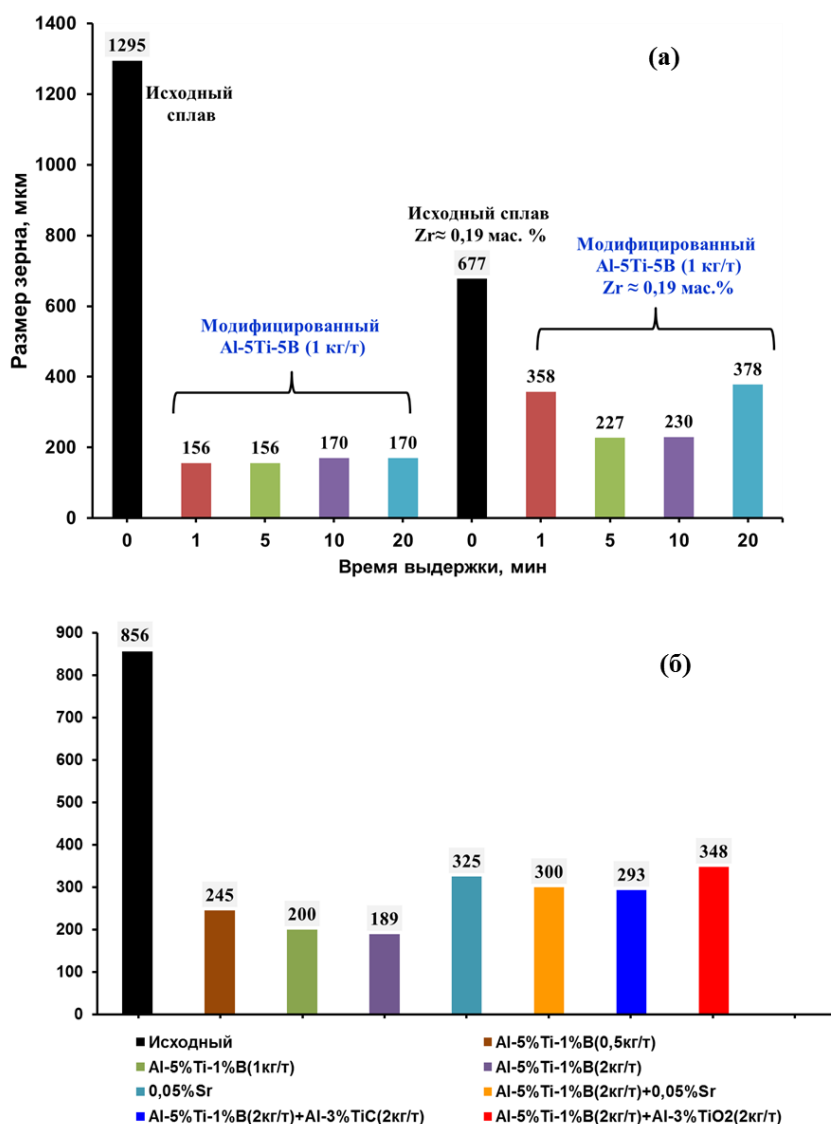


Рис. 3. Влияние времени выдержки сплава в жидком состоянии после модифицирования лигатурой Al-5%Ti-1%B (1 кг на тонну) и циркония на размер зерна (а); влияние разного количества вводимой лигатуры Al-5%Ti-1%B (0,5; 1 и 2 кг/т), комплексного модифицирования, и стронция на размер зерна в образцах диаметром \varnothing 46 мм из сплава В96ц (б)

Литература:

1. Европейский стандарт EN 573-3:2013. Алюминий и алюминиевые сплавы – Химический состав и форма обработанной давлением продукции – Часть 3: Химический состав и форма продукции.
2. Напалков, В. И. Модифицирование алюминиевых сплавов: монография / В. И. Напалков, С. В. Махов, А. В. Поздняков; под. ред. В. И. Напалкова. – Москва: Изд. Дом МИСиС, 2017. – 348 с. – ISBN 978-5-906846-49-5.