

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ МЕТОДОМ TIG
АЛЮМОМАТРИЧОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМГ2-TiC**

Луц Альфия Расимовна

кандидат технических наук,

доцент кафедры «Металловедение, порошковая

металлургия, наноматериалы»,

Самарский государственный технический университет

Самара, Россия

E-mail: alya_luts@mail.ru

Шерина Юлия Владимировна

аспирант кафедры «Металловедение, порошковая

металлургия, наноматериалы»,

Самарский государственный технический университет

Самара, Россия

E-mail: cullenbella97@mail.ru

Предмет исследования: свариваемость композиционного сплава АМг2-TiC.

Цель исследования: матричный сплав АМг2 часто используется в сварных соединениях. Армирование высокодисперсной керамической фазой карбида титана приводит к повышению твердости и прочности сплава, в связи с этим необходимо изучить, как ведет себя композиционный материал в процессе и после сварки.

Методы и объекты исследования: объектом исследования является композиционный сплав АМг2-TiC, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Микроструктурный анализ проведен на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 6390A. Элементный состав определялся методом микрорентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM 6390A с приставкой Jeol JED-2200. Твердость образцов была определена на твердомере ЗИП ТК=2М по методу Бринелля по ГОСТ 9012-59. Испытания на свариваемость проведены методом аргонно-дуговой сварки с применением сварочного инвентора марки Everlast Power TIG 210 EXT и присадочных материалов, наиболее близко соответствующих химическому составу матричного сплава.

Основные результаты: в данной работе показана возможность сварки композиционного материала методом TiG. Свариваемость композита оценена как удовлетворительная. Высокодисперсные частицы армирующей фазы не дислоцируют из зоны основного металла в зону сварного шва. Твердость композиционного материала после проведения аргонно-дуговой сварки не падает, а остается на прежнем уровне. Пористость в зоне сварного шва композита меньше, чем в зоне сварного шва матричного сплава.

Ключевые слова: алюминий, карбид титана, аргонно-дуговая сварка, композиционный материал.

STUDY OF THE TIG WELDABILITY OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITE MATERIAL AMG2-TiC

Alfiya R. Luts

*Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of
Metal Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials,
Samara State Technical University
Samara, Russia
E-mail: alya_luts@mail.ru*

Yuliya V. Sherina

*Graduate Student of the Department of Metal Science,
Powder Metallurgy, Nanomaterials,
Samara State Technical University
Samara, Russia
E-mail: cullenbella97@mail.ru*

Subject of research: Weldability of the composite alloy AMG2-TiC.

Purpose of research: Matrix alloy AMG2 is often used in welded joints. Reinforcement with a highly dispersed ceramic phase of titanium carbide leads to an increase in the hardness and strength of the alloy; therefore, it is necessary to study how the composite material behaves during and after welding.

Methods and objects of research: The object of study is the AMG2-TiC composite alloy obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis. Microstructural analysis was carried out on a Jeol JSM 6390A scanning electron microscope. The elemental composition was determined by X-ray microanalysis on a Jeol JSM 6390A scanning electron microscope with a Jeol JED-2200 attachment. The hardness of the samples was determined on a hardness tester ZIP TK=2M using the Brinell method according to GOST 9012-59. Weldability tests were carried out by argon-arc welding using an Everlast Power TIG 210 EXT welding inventory and filler materials that most closely match the chemical composition of the matrix alloy.

Main results of research: This paper shows the possibility of welding a composite material using the TiG method. The weldability of the composite was rated as satisfactory. Highly dispersed particles of the reinforcing phase do not dislocate from the area of the base metal to the area of the weld. The hardness of the composite material after argon-arc welding does not fall, but remains at the same level. The porosity in the weld zone of the composite is less than in the weld zone of the matrix alloy.

Keywords: Aluminium, titanium carbide, argon arc welding, composite material.

Введение

Благодаря своим положительным свойствам алюмоматричные композиционные материалы активно применяются в промышленности, и, таким образом, являются основным направлением исследований. Главным сдерживающим фактором в настоящее время является их трудная обрабатываемость. Следовательно, необходим поиск подходящих процессов соединения, которые позволят целенаправленно и точно использовать АМКМ и минимизировать усилия по обработке.

В работе [7] описывается, что армирующая фаза, содержащаяся в матрице композита, не подвергается влиянию процесса соединения. Результаты испытаний не показывают ни транспорта, ни механического измельчения частиц карбида кремния. Доказано, что качество соединения получаемого материала, а также стабильность процесса зависят от задания пере-

менных параметров процесса. Так как композит размягчается в результате отжига, связанного с процессом сварки и материалом, большая часть образцов сварного шва выходит из строя за пределами зоны соединения. Со стороны неармированного алюминиевого сплава продемонстрировано отсутствие такого температурного разупрочнения.

Соединение сваркой плавлением остается главной проблемой композитов. Основными проблемами при сварке плавлением алюминиевых сплавов являются снижение механических свойств, вызванное изменением микроструктуры [1], и кристаллизационное растрескивание, вызванное высокой чувствительностью к горячему растрескиванию [2] под действием сварочных термических циклов, что является критическим фактором, приводящим к плохой свариваемости.

Одним из наиболее эффективных методов ликвидации горячих трещин является достижение перехода от столбчатых зерен к равноосным в процессе сварочного затвердевания [3]. Добавление наночастиц [4] является эффективным методом для получения тонкой равноосной зернистой структуры и устранения горячих трещин в алюминиевых сплавах [5,6]. Считается, что наночастицы TiC служат отличным гетерогенным зародышеобразователем и эффективной упрочняющей фазой.

В работе [8] была изготовлена нанообработанная присадочная проволока путем добавления наночастиц TiC в сплав Al-Mg-Mn и успешно произведена сварка сплавов AA2024, AA5083, AA6061, AA7075 методом дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде защитного газа (GTAW). Микроструктура зон сварки во всех зонах имела равноосные зерна диаметром менее 50 мкм, горячих трещин в сварных соединениях не наблюдалось.

Результаты и обсуждение

Для исследования были выбраны сплав АМг2 (ГОСТ 4784-97), порошок титана ТПП-7 (ТУ1715-449-05785388), порошок углерода П-701 (ГОСТ 7585-86), присадочная проволока 5356 (ГОСТ Р53689-2009 ИСО 544:2003). Заготовки перед сваркой обезжиривали ацетоном, затем поверхности стыка подвергали шлифовке. Угол основного металла при проведении эксперимента составляет 65° (рисунок 1), а метод сварки представляет собой газовую дуговую сварку вольфрамовым электродом (TIG) с использованием сварочного аппарата Everlast PowerTIG 210EXT. В качестве защитного газа используется Ar чистотой 99,999%. Сварочный ток составляет около 70 А, а скорость подачи газа 14 л/мин. После сварки образцы охлаждаются естественным образом, а затем зоны сварки подвергаются неразрушающему контролю. Образцы для измерения твердости также вырезаются из свариваемых пластин в поперечном направлении. Твердость полученных экспериментальных образцов определяли на твердомере ТШ-2М по ГОСТ 9012-59 (рисунок 2). Изготовление металлографических шлифов проводили на шлифовально-полировальной машине ПОЛИЛАБ П12МА с приставкой для работы в автоматическом режиме. Для выявления микроструктуры проводили травление образцов раствором 50% HF+50% HNO₃ в течение 10-15 сек. Металлографический анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A. Фазовый состав анализировался методом рентгенофазового анализа (РФА). Съемка рентгеновских спектров – на автоматизированном дифрактометре марки ARL X'trA (Thermo Scientific) с использованием Cu-излучения при непрерывном сканировании в интервале углов 2θ от 20 до 80 град со скоростью 2 град/мин. Анализ дифрактограмм проводился с использованием программы «HighScore Plus».

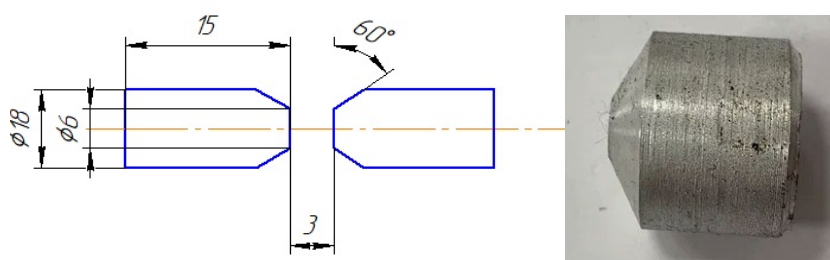


Рисунок 1 – Образцы для проведения TIG сварки

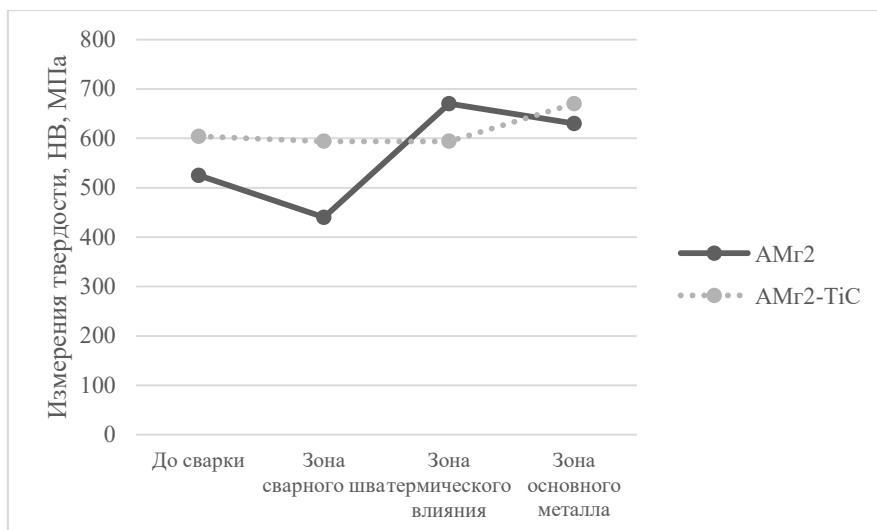


Рисунок 2 – Измерение твердости сварных образцов

Таким образом, значения твердости сварного образца АМг2-ТiС более стабильны, чем у матричного сплава АМг2. Также в зоне основного металла у композита наблюдаются наиболее высокие значения твердости, что объясняется присутствием частиц армирующей карбидной фазы.

Проанализируем микроструктуры образцов полученные на оптическом микроскопе при различном увеличении в разных зонах (рисунок 3-4).

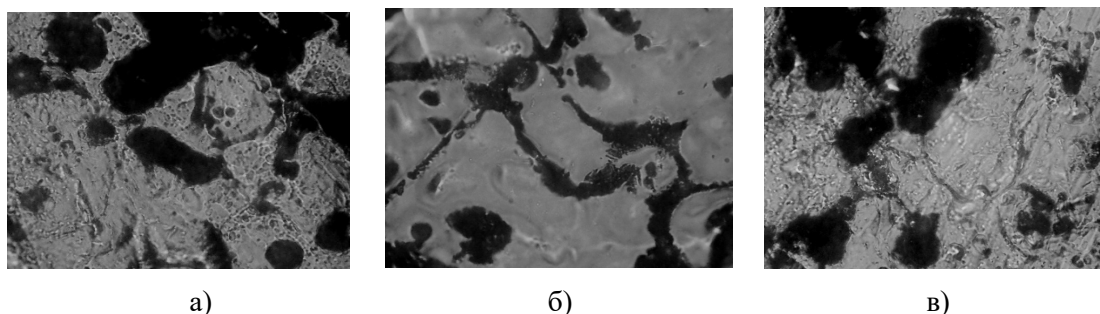
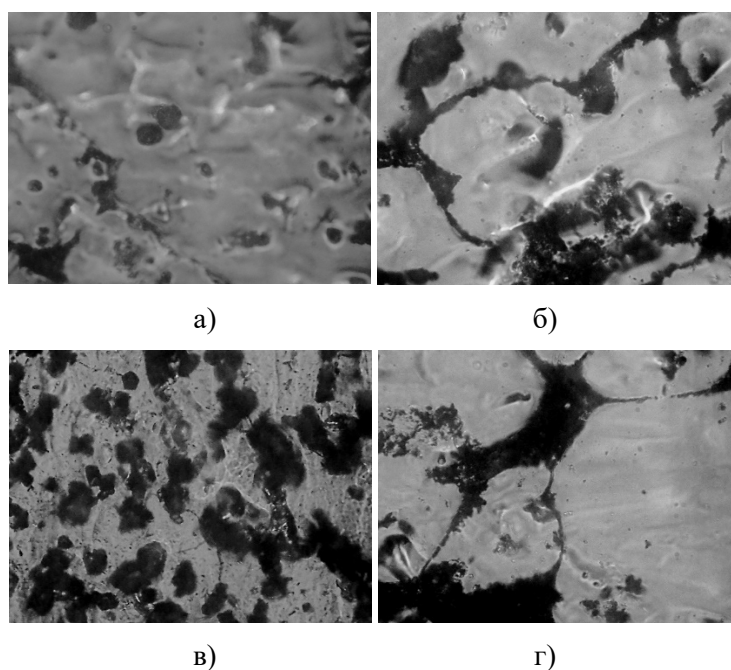
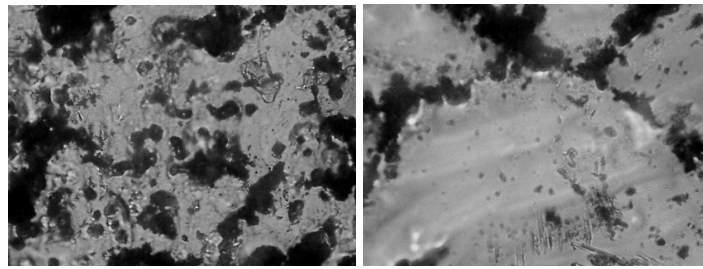


Рисунок 3 – Микроструктуры сварного образца АМг2 (увеличение 50 мкм):
а) зона сварного шва; б) зона термического влияния; в) зона основного металла



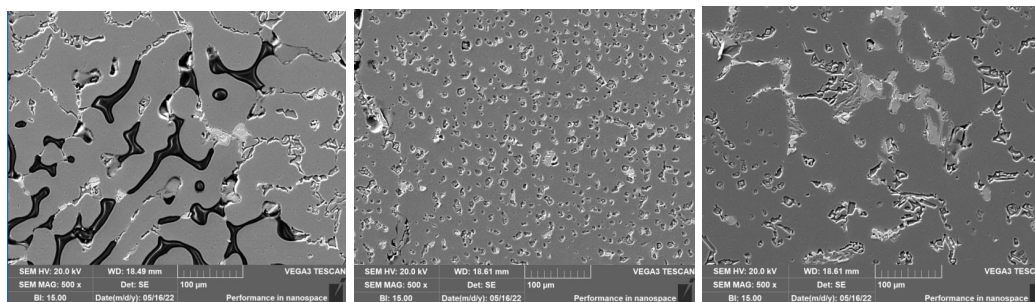


д)

е)

Рисунок 4 – Микроструктуры сварного образца АМг2-TiC (увеличение 50 мкм):
зона сварного шва (а, б); зона термического влияния (в, г); зона основного металла (д, е)

Для определения природы черных пятен в образцах необходимо провести микроструктурный анализ на электронном микроскопе (рисунок 5–6), а также спектральный (таблица 1) и рентгенофазовый анализ (рисунок 7–8).

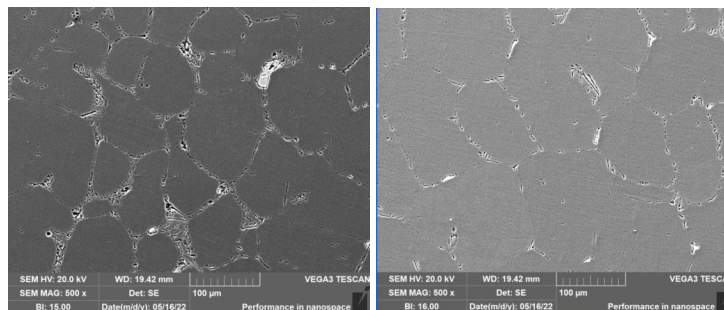


а)

б)

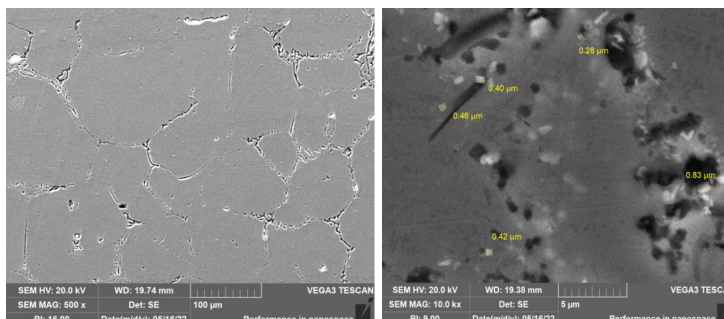
в)

Рисунок 5 – Микроструктуры сварного образца сплава АМг2:
а) зона сварного шва; б) зона термического влияния; в) зона основного металла



а)

б)



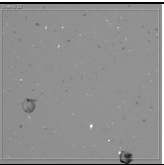
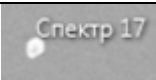
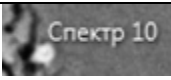
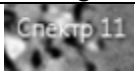

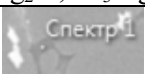
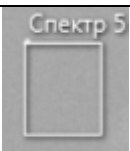
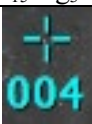


в)

г)

Рисунок 6 – Микроструктуры сварного образца композита АМг2-TiC:
а) зона сварного шва; б) зона термического влияния; в) зона основного металла;
г) карбидные включения в зоне основного металла

Анализируя микроструктуры, полученные на электронном микроскопе, очевидно, что в композиционном материале АМг2-TiC дефектов в виде пор, трещин и непроваров не присутствует, в отличие от сварного образца сплава АМг2.

Таблица 1 – Спектральный анализ композита АМг2-TiC

АМг2-TiC					
	012	017	010	011	012
O	-	-	-	-	-
Mg	0,37	-	-	0,77	5,77
Al	96,51	86,05	67,96	44,36	67,86
Si	3,12	9,24	2,3	16,73	11,05
Cu	-	0,46	-	-	-
Fe	-	1,02	-	-	-
Mn	-	3,22	-	-	-
C	-	-	0,55	5,5	4,77
Ti	-	-	29,19	10,94	10,94
	Al	Al ₁₅ (FeMn) ₃ Si ₂	TiC, Al	TiC, Al ₁₅ Mg ₃ Si ₂	TiC, Al ₁₅ Mg ₃ Si ₂
					
АМг2					
	001	005	004	005	010
O	17,91	-	-	6,1	4,21
Mg	48,85	0,57	4,43	-	-
Al	4,58	97,38	93,16	51,45	95,79
Si	27,75	1,13	2,41	12,71	-
Cu	-	0,92	-	-	-
Fe	-	-	-	27,89	-
Zn	-	-	-	-	-
	Mg ₂ Si, Al ₃ Mg ₂	Al	Al ₁₅ Mg ₃ Si ₂	Al ₈ Fe ₂ Si	Al
					

По результатам спектрального анализа подтверждается присутствие карбидной фазы в зоне основного металла образца АМг2-TiC, а также факт того, что армирующая фаза не дислоцируется в зону шва в процессе сварки. Также присутствует фаза Al₁₅(FeMn)₃Si₂ имеющая скелетообразное строение и приводящая к снижению механических свойств.

Результат рентгенографии показывает, что несовершенства (поры и т.п.) были оценены как уровень С в соответствии с международным стандартом ISO 10042. Таким образом, в сплаве АМг2 наибольшее количество структурных несовершенств располагается в области сварного шва (рисунок 7). В композиционном материале структурных несовершенств меньше, а их наибольшее скопление наблюдается также в зоне сварного шва (рисунок 8).

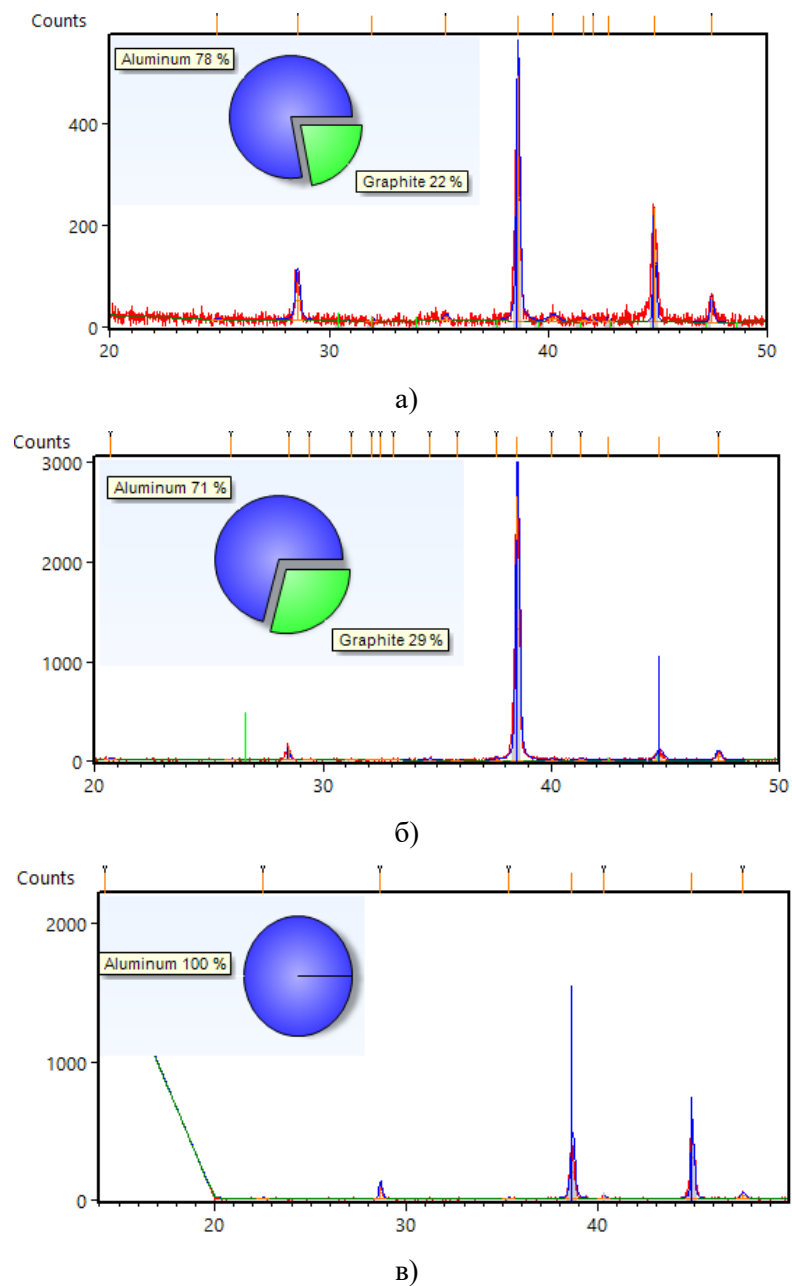


Рисунок 7 – Рентгенофазовый анализ сплава АМг2:
а) зона сварного шва; б) зона термического влияния; в) зона основного металла

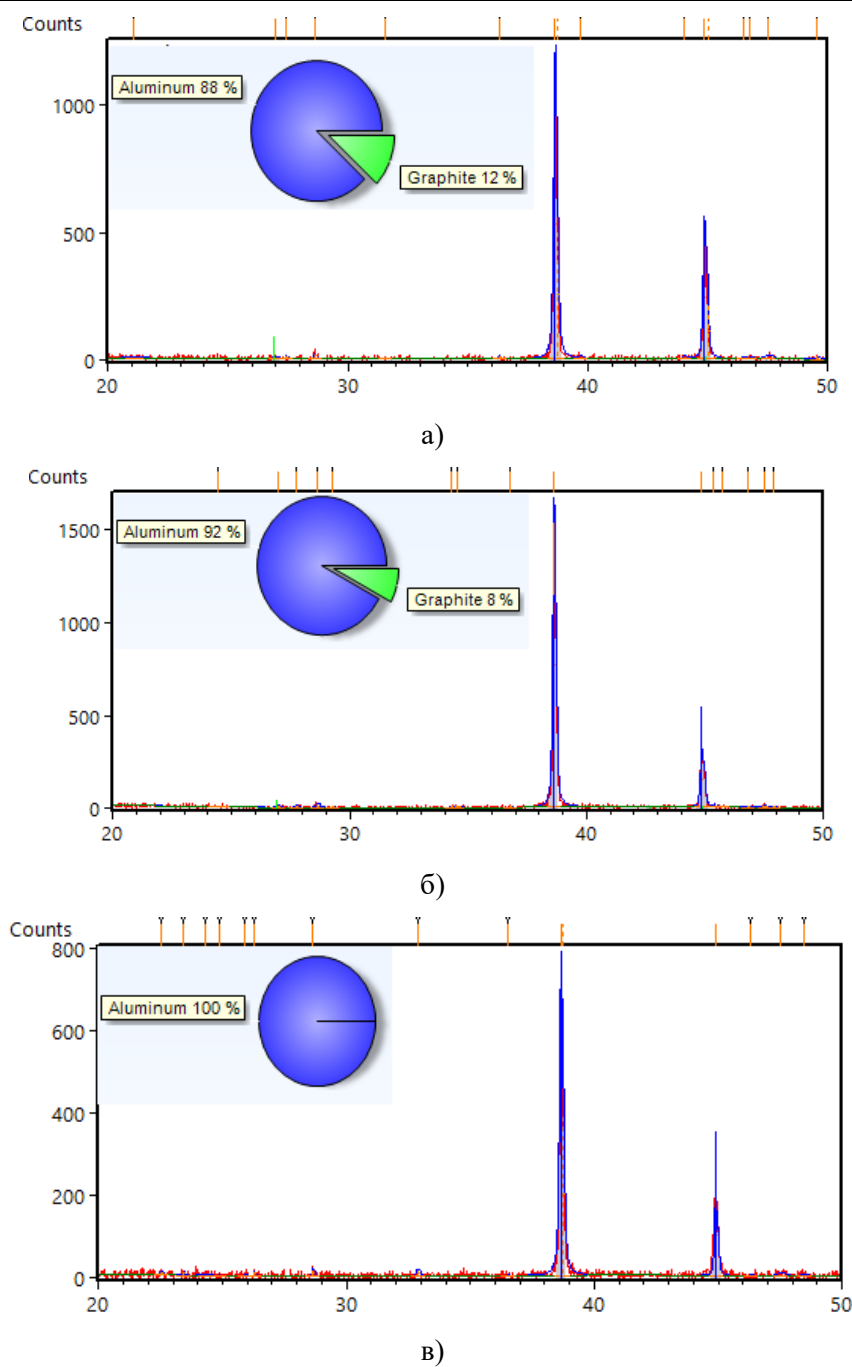


Рисунок 8 – Рентгенофазовый анализ АМг₂-TiC:
а) зона сварного шва; б) зона термического влияния; в) зона основного металла

Заключение и выводы

Анализируя проведенные исследования, можно сделать вывод об удовлетворительной свариваемости композита системы АМг₂-TiC, так как армирующая карбидная фаза сохраняется лишь в зоне основного металла, вследствие воздействия высоких температур образуется фаза снижающая механические свойства, присутствуют структурные несовершенства (поры, трещины, непровары и т. д.) приводящие также к уменьшению срока службы.

Литература

1. Degischer, H. P. Assessment of metal matrix composites for innovations”– intermediate report of a European thematic network / H. P. Degischer, P. Prader, C. San Marchi // *Composites Part A*. – 2001. Vol. 32 (8). – P. 1161–1166.
2. Denholm, M. Aluminium metal matrix composite rotors and drums-a future trend / M. Denholm // 2nd International Seminar on Automotive Braking: Recent developments and future trends. – Leeds, UK, 1998.
3. Dinaharan, I. Effect of friction stir welding on microstructure, mechanical and wear properties of AA6061/ZrB₂ *in situ* cast composites / I. Dinaharan, N. Murugan // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – Vol. 543. – P. 257–266.
4. Hayajneh, M. T. Artificial neural network modeling of the drilling process of self-lubricated aluminum/alumina/graphite hybrid composites synthesized by powder metallurgy technique / M. T. Hayajneh, A. M. Hassan, A. T. Mayyas // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 478 (1-2). – P. 559–565.
5. Heppner, E. Beitrag zum Verständnis des Bindemechanismus rotationsreibgeschweißter Verbindungen / E. Heppner, C. Rößler, E. Woschke // 22. Erfahrungsaustausch Reibschweißen. – SLV München, München, 2017.
6. Kalaiselvan, K. Characterization of friction stir welded boron carbide particulate reinforced AA6061 aluminum alloy stir cast composite / K. Kalaiselvan, I. Dinaharan, N. Murugan // *Materials and Design*. – 2014. Vol. 55. – P. 176–182.
7. Investigation of the friction weldability of an AlSi10MnMg-alloy reinforced with 30 Vol.-% silicon carbide particles with the adequate monolithic material / M. Winkler, C. Gawert, R. Bahr [et al.] // *Journal of Advanced Joining Processes*. – 2022. – Vol. 5. P. 2–3.
8. Microstructure and properties of 7075 aluminum alloy welding joint using different filler metals / S. Zhong, S. Han, J. Chen [et al.] // *Materials Today Communications*. – 2022. – Vol. 31. – P. 3–4.