ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.715:539.531

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ AI-Cu-Mn, ПОЛУЧЕННЫХ ДУГОВОЙ СВАРКОЙ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРУЮЩИХ ФЛЮСОВ

© 2020 г. Е. Ахмади^{*a*,} *, А. Р. Эбрахими^{*b*}, А. Хусейн-заде^{*c*}

^аФакультет металлургии и материаловедения, Научно-технологический университет Ирана, Тегеран, Иран ^bГорно-металлургический факультет, Технологический университет им. Амира Кабира, Тегеран, Иран ^cМатериаловедческий факультет, Сехендский технологический университет, Тебриз, Иран *e-mail: e.ahmadiii@gmail.com Поступила в редакцию 24.10.2018 г. После доработки 26.12.2018 г.

Принята к публикации 04.12.2019 г.

Влияние активирующих флюсов трех типов (SiO₂, TiO₂ и MoO₃) в процессе дуговой сварки (ДС) по технологии, предусматривающей использование вольфрамового электрода в среде инертного газа (TIG технологии), на глубину проплавления, морфологию и механические свойства сварного шва было изучено по результатам исследования сварного соединения листов жаропрочного сплава системы Al–Cu–Mn (сплав 2219). Экспериментальные результаты показали, что благодаря применению активирующих флюсов было достигнуто заметное увеличение глубины проплавления сварного шва. Среди всех использованных в данном исследовании активирующих флюсов, наибольшая глубина проплавления была достигнута в результате применения SiO₂ флюса. Анализ микроструктуры показал, что использование оксидных флюсов способствует переходу от структуры столбчатых зерен в зоне сплавления к равноосной зернной структуре. Также установлено, что сварные соединения, полученные A–TIG-методом ДС (с применением активирующих флюсов), обладали наилучшими механическими свойствами, включая твердость и предел прочности при растяжении, в сравнении с теми, что были зафиксированы в результате использования традиционной TIG-технологии ДС без флюса.

Ключевые слова: алюминиевый сплав 2219, активирующий флюс, глубина проплавления, TIG-технология дуговой сварки

DOI: 10.31857/S0015323020050022

1. ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевый сплав 2219 имеет широкую сферу применения, в частности, в отраслях аэрокосмической индустрии с целью повышения КПД двигательных установок ракетоносителей, благодаря таким свойствам как высокая удельная прочность, сопротивление ползучести, хорошая коррозионная стойкость, приемлемые значения ударной вязкости, а также свойства при криогенных температурах [1]. Вместе с тем, несмотря на свои отличные характеристики, алюминиевый сплав 2219 отличается неудовлетворительной прочностью сварного соединения. Потеря прочности сварных соединений может быть вызвана растворением частиц упрочняющих фаз, а также огрублением зеренной структуры при электродуговой сварке [2]. Для того чтобы расширить сферу применений указанного сплава именно в производстве сложных конструкций необходима разработка технологий сварки, позволяющих получать соединения высокого качества. Дуговая сварка (ДС) с вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG) и применением активирующих (А) флюсов, известная как A-TIG-сварочная технология, является одной из наиболее замечательных методик получения сварных соединений, которая привлекла в последнее лесятилетие повышенное внимание производителей. Эта методика была разработана в Институте электросварки им. Е. Патона с целью преодоления недостатков, свойственных традиционной сварочной TIG-технологии C-TIG, а именно, небольшая глубина проплавления за один проход, низкая производительность и непостоянство параметров сварных швов от сварки к сварке. При сварке по A-TIG-технологии, на поверхность, подлежащую ДС, наносят тонкий слой активирующего флюса, что обеспечивает увеличение глубины проплавления и величины отношения глубины к ширине сварного шва по меньшей мере в 2-3 раза в сравнении с результатами C-TIG-технологии, за счет сужения дуги и обратной конвекции Марангони [3]. Ряд исследовательских групп изучили результаты дуговой сварки по A-TIGметодике на примере нержавеющей стали, сплава железа с углеродом, алюминиевого сплава, титанового сплава, магниевого сплава, а также суперсплава на основе никеля. Авторы работы [4] исследовали влияние TiO₂ флюса на ДС, осуществленную по TIG-методике, на примере нержавеющих сталей различных марок и обнаружили значительное увеличение отношения "глубина-ширина", характерного для профиля сварного шва. Авторы работы [5] испробовали различные активирующие флюсы, включая SiO₂, TiO₂, Cr₂O₃, MoO₃, a также СиО при сварке разнородных материалов – пластин толщиной 8 мм из сталей марок Р91 (аналог 10Х9МФБ) и Р22 (аналог 12Х2М). Согласно отчету, за один проход полное проплавление пластин достигалось в случаях применения флюсов МоО₃, TiO_2 , а также Cr_2O_3 . Авторы работы [6] показали, что использование смеси TiO₂ и CaF₂ активирующих флюсов при ДС магниевого сплава марки AZ31 привело не только к увеличению глубины проплавления, но также и к снижению пористости и количества трещин, возникающих при затвердевании, в зоне сплавления. Более того, авторы [7] изучали влияние флюсов SiO₂ и TiO₂ на глубину проплавления сплава Инконель 718 и отметили значительное увеличение глубины проплавления и отношения "глубина-ширина". Кроме того, авторы [8] установили, что компоненты смеси оксидных флюсов способствовали улучшению сопротивления Инконеля 718 горячему растрескиванию. Авторы [9] изучали Се₂О₃ и La₂O₃ в качестве активирующих флюсов при ДС образцов сплава Ti-6Al-4V и наблюдали более глубокую степень проплавления материала и повышение предела прочности сварного шва при применении La₂O₃ флюса. Авторы работ [10] и [11] задокументировали, что добавка фторидов в качестве активирующего агента в процессе ДС 2219 алюминиевого сплава по ТІG методике привела к улучшению механических свойств материала сварного шва и устранению в нем пористости. Кроме того, авторы работы [12] использовали SiO₂ флюс при ДС сплава 2219 и обнаружили, что сварные швы, полученные с применением А-ТІG-технологии, оказались подвержены ликвационному растрескиванию, они предложили метод TIG сварки с ограниченным нанесением активирующего флюса (FBTIG). Результаты всех исследований ДС с применением активирующих

флюсов свидетельствуют об увеличении глубины проплавления материала и об улучшении механических свойств сварных швов, полученных с привлечением A-TIG-технологии. Вместе с тем, попрежнему имеется огромный разрыв между фундаментальными лабораторными экспериментами по A-TIG-методике ДС и ее применением в промышленности. Поэтому для преодоления этого разрыва необходимы дальнейшие исследования по применению активирующих флюсов. В данной работе проведено изучение влияния трех типов активирующих флюсов, а именно, SiO₂, TiO₂ и СаО, на свариваемость материалов, на микроструктуру и механические свойства TIG сварных соединений алюминиевого сплава 2219 в сравнении с результатами, полученными в рамках традиционной C-TIG-методики.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пластины алюминиевого сплава 2219 размерами $150 \times 150 \times 8$ мм для ДС экспериментов были приготовлены в отожженном состоянии. На первом этапе перед сваркой для очистки поверхности пластин от нежелательных примесей был использован ацетон. В качестве активирующих флюсов было взято три типа оксидных порошков (SiO₂, TiO₂ и MoO₃); они были растворены в спирте для образования пастообразного раствора и затем нанесены на поверхность заготовок. На втором этапе, "автогенным образом" был создан валик сварного шва (СШ), наплавленный на плоской поверхности сварного соединения в результате электродуговой сварки по TIG-методике по схеме DCEN (постоянный ток с соединением прямой полярности). Параметры ДС: электрод из W – 2% ThO₂, диаметр электрода – 3.2 мм, угол конуса при вершине электрода – 60°, сварочный ток – 120 А, скорость сваривания – 100 мм/мин, длина электрической дуги – 3 мм, расход защитного газа (чистый аргон) – 12 дм³/мин. После сварки были проведены измерения геометрии СШ и анализ микроструктуры в поперечном сечении. перпендикулярном направлению сварки. Образцы для оптической металлографии (OM) были изготовлены из материала СШ посредством резки, шлифовки, полировки и травления в реагенте Келлера (состава: 10 мл HF + 15 мл HCl + 25 мл HNO₃ + + 50 мл H₂O). Для аттестации микроструктуры образцов использовался оптический микроскоп. Анализ на наличие кислорода проводился на аппарате марки LECO TC-436. Для оценки механических характеристик сварных соединений были проведены измерения твердости по Виккерсу и испытания на растяжение. Испытания на растяжение производили на образцах малого размера в соответствии со Стандартом Е8, предписанным ASTM. Измерения твердости проводили на попе-



Рис. 1. Структура сварных швов, полученных TIG-методом с применением или в отсутствие активирующего флюса (*D* и *W* глубина и ширина сварного шва соответственно).

речном сечении сварного шва при нагрузке на индентор в 20 г с экспозицией 15 с. Для того чтобы обеспечить приемлемую точность результатов, все механические измерения проводились три раза с определением среднего результата. Эволюция морфологии поверхности разрушения в испытаниях на растяжение была изучена методами растровой электронной микроскопии (РЭМ).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние активирующего флюса на структуру сварного шва

Структура сварных швов, полученных по TIGметодике, при стандартных условиях ДС пластин алюминиевого сплава 2219 толщиной 8 мм, в присутствии и отсутствии флюса, показана на рис. 1. Очевидно, что использование активирующих флюсов обеспечивает существенное увеличение глубины проплавления и уменьшение ширины сварного шва, если проводить сравнение с результатами, полученными по традиционной С-TIG-методике дуговой сварки.

Более того, из рис. 1 очевидно, что применение SiO_2 флюса наиболее существенно увеличивает глубину проплавления. Также в значениях отношения "глубина—ширина" (аспектного соотношения) результаты при использовании SiO_2 , TiO_2 и MoO_3 составляют 0.89, 0.85 и 0.7 соответственно. Согласно данным предыдущих исследований, достижение более высоких значений аспектного соотношения во время ДС по TIG-методике является следствием увеличения плотности тока в электрической дуге. Авторы работы [13] показали, что это явление могло быть интенсифицировано при переходе к ДС по А–ТIG-методике. Испаряющиеся молекулы активирующего флюса, захватывая электроны во внешних областях столба электрической дуги, приводят к стягиванию плазменной дуги и, тем самым, к возрастанию плотности электрического тока в самой дуге.

Надо добавить, что результаты исследований авторов работы [14] свидетельствуют о том, что структура сварного шва очень чувствительна к направлению потока жидкого металла в создаваемом в процессе ДС сварочной ванне (СВ), который контролируется градиентом поверхностного натяжения $(d\gamma/dT)$ поперек CB. Различие в величине температуры, электрического потенциала и химическом составе по поверхности СВ приводит к возникновению градиента поверхностного натяжения. Этот градиент ведет к возникновению силы, названной по имени Марангони, под действием которой жидкость перемещается из области с низким поверхностным натяжением в область с большим поверхностным натяжением. При дуговой сварке по ТІG-методике без активационного флюса температурный коэффициент поверхностного натяжения становится отрица-



Рис. 2. Микроструктура СШ (а) в отсутствие и при наличии (б) MoO₃, (в) TiO₂ и (г) SiO₂ флюса. ОМ.

тельным ($d\gamma/dT < 0$). При этом, силы Марангони вызывают внешнее течение материала, развивающееся вдоль поверхности сварной ванны и берущее начало от ее центра к кромкам, что приводит к формированию широкого и мелкого сварного шва. Было доказано, что в присутствии определенного количества таких поверхностно активных элементов, как сера и кислород (~100-300 ррт), температурный коэффициент поверхностного натяжения меняет свой знак с отрицательного на положительный [15]. В настоящем исследовании, был произведен замер количества кислорода (источником которого являлся активирующий флюс) в металле, подвергавшемся воздействию дуговой сварки. Результаты показали, что содержание кислорода в таком металле составило 250, 210 и 160 ррт при использовании SiO₂, TiO₂ и MoO₃ флюсов, соответственно. Поэтому при ДС по TIG-методике с использованием SiO₂, TiO₂ и MoO₃ флюсов, кислород обнаруживал тенденцию к выделению из конкретного активирующего флюса по различным химическим реакциям (таким как $M_x O_y = M +$ $+ O_2, M_x O_y = M_x O_y + O_2 + O, M_x O_y = M + M_x O_y + O_2 + O_2$ + О₂ и т.п.), что влекло за собой изменение в знаке температурного коэффициента поверхностного натяжения с отрицательного на положительный

 $(d\gamma/dT > 0)$. Это, в свою очередь, приводило к возникновению обратного потока жидкого материала от краев к центру СВ. По этим причинам перенос теплоты в пределах СВ развивался беспрепятственно, что привело к формированию узкого и глубокого СШ.

3.2. Влияние активирующего флюса на микроструктуру

Из-за тесной взаимозависимости между микроструктурой и поведением материала при его эксплуатации, изучение микроструктуры сварных швов является основным источником важной информации, знание которой позволяет исследователям улучшать свойства сварных соединений.

На рис. 2 представлена микроструктура сварного шва алюминиевого сплава 2219, сформировавшаяся в условиях присутствия или отсутствия активирующего флюса. Из рис. 2 ясно, что ДС по А-ТІG-методике способствует переходу от роста столбчатых зерен к формированию равноосной зеренной структуры во время затвердевания материала. Это является следствием различия в характере подвода тепла в присутствии и отсутствие

активирующих флюсов. Сварочный ток и напряжение дуги напрямую влияют на характер подвода тепла. Расчет величины напряжения на дуге $(U_{\rm eff})$ при постоянном сварочном токе подтвердил экспериментальный факт, что величина U_{eff} возрастает в присутствии активирующего флюса (ср. данные рис. 3). Эти изменения связаны с влиянием флюсов на диаметр плазменного столба дуги. На рис. 3 четко видно, что диаметр столба дуги сокращается в присутствии TiO₂, SiO₂ и MoO₃ в сравнении со случаем ДС по традиционной С-ТІG-методике при тех же значениях тока. С другой стороны, хорошо известно, что морфология структуры. сформировавшейся при затвердевании в сварочной ванне, определяется величиной температурного градиента (G) и скоростью перемещения поверхности раздела твердой и жидкой фазы (R). Следовательно, когда величина отношения G/R уменьшается, структура фронта кристаллизации может изменяться с плоской на ячеистую, с последующим возникновением столбчатодендритной и равноосно-дендритной структур. Тем самым, поскольку параметр G обратно пропорционален количеству подводимого тепла, использование активирующего флюса индуцирует (посредством уменьшения величины отношения G/R) возникновение равноосной структуры [16].

Далее, легирующие элементы Ti, Si и Mo, которые были получены в результате распада TiO₂, SiO₂ и MoO₃ при повышенной температуре дуги, могут выступать в процессе затвердевания как агенты—измельчители зерна. Присутствие этих элементов в объеме CB приводит к возникновению высокой степени переохлаждения материала и образованию центров кристаллизации, что способствует формированию мелких зерен [17].

3.3. Влияние активирующего флюса на механические свойства

Одной из основных целей настоящей статьи было исследование влияния активирующего флюса на механические свойства сварного соединения сплава 2219, произведенного методом TIG. Сравнение экспериментальных результатов испытаний



Рис. 3. Влияние активирующего флюса на вид электрической дуги и величину напряжения на дуге.

на растяжение и измерения твердости сварных соединений, полученных в отсутствие и в присутствии активирующих флюсов, можно произвести, обратившись к табл. 1. Измерения микротвердости производились на поперечных сечениях сварных швов в направлении от металла шва к основному металлу. В каждой области сварного соединения (металл шва, зона термического влияния, основной металл) было исследовано, по меньшей мере, по 10 точек. В табл. 1 представлены средние значения. Результаты свидетельствуют, что основной металл имел твердость приблизительно 130 HV, тогда как твердость металла шва, а также твердость материала в зоне термического влияния (ЗТВ), независимо от "характера" сварочного процесса, была значительно ниже. Тем не менее сварные соединения, полученные в присутствии TiO₂, SiO₂ и MoO₃ активирующих флюсов, демонстрировали повышенные значения микротвердости в сравнении со сварными соединениями, полученными посредством ДС по ТІG-методике без использования активирующих флюсов. Это можно отнести на счет мелкозернистой структуры, формирующейся в процессе ДС по А-ТІG-методике.

Габ	блица 1	. I	Леханические свойства сварных соединений	Й
-----	---------	-----	--	---

Образен	Твердость, HV			σ _{0.2} , МПа	$\sigma_{\rm B},{\rm M}\Pi$ а	δ, %
Образец	основной металл	металл шва	ЗТВ			
Основной металл	130	_	_	380	465	15
Без флюса (C-TIG)		90	96	211	243	9.1
МоО ₃ флюс		101	118	216	258	9.3
TiO ₂ флюс		118	121	258	349	11.2
SiO ₂ флюс		109	113	221	310	9.5
5102 \$100		109	115	221	510	,



Рис. 4. РЭМ-изображение поверхностей излома.

В табл. 1 также приведены значения предела текучести ($\sigma_{0,2}$), предела прочности при растяжении ($\sigma_{\rm B}$) и относительного удлинения (δ) основного металла и металла сварного соединения для случаев ДС в присутствии и отсутствии активирующих флюсов. Значение каждой из величин есть среднее из трех измерений. Из табл. 1 можно видеть, что основной металл (не подверженный прямому воздействию ДС) демонстрировал более высокую прочность и пластичность в сравнении с материалом сварного шва, полученным по схеме С-ТІС или А-ТІС. Далее, суммарные характеристики материала в испытаниях на растяжение показали, что применение активирующих флюсов улучшило прочностные свойства материала сварных швов в сравнении со случаем ДС по C-TIGметодике без применения флюсов. Среди активирующих флюсов, флюс TiO2 обеспечил самое большое увеличение значения $\sigma_{\rm B}$, причем его величина на 75% превысила значение σ_в для основного металла. Для флюса МоО3 указанное увеличение было самым незначительным. Микроструктура металла сварного шва вкупе с дефектами, привнесенными ДС, обеспечили улучшение механических свойств сварных соединений, полученных по А– TIG-методике. Отмечено, что равноосная зеренная структура, благодаря лучшему сопротивлению образованию и распространению трещин, снижает склонность материала к растрескиванию при затвердевании и, тем самым обеспечивает увеличение прочности сварного соединения. В дополнение, согласно литературным данным, в случае алюминиевого сплава 2219 использование активирующих флюсов в ДС по TIG методике предотвращает порообразование и увеличивает предел прочности при растяжении указанного материала [11, 18].

РЭМ-изображения поверхностей излома всех сварных соединений, испытавших разрушение по ЗТВ, представлены на рис. 4. Присутствие ямок свидетельствует о вязком разрушении сварных соединений, полученных ДС по ТІG-методике как в присутствии, так и в отсутствии флюса. Поверхность излома сварного образца, полученного с применением TiO₂ флюса, демонстрирует очень мелкую (по размеру) ямочную структуру, что предполагает улучшение механических свойств сварного



Рис. 5. ЭДС-анализ поверхности излома сварного соединения, полученного ДС по TIG-методике с применением МоО₃ флюса.

соединения. Напротив, применение MoO₃ флюса неблагоприятно сказалось на прочности при растяжении в области сварного шва.

На рис. 5 можно видеть частицы размером 2– 5 мкм, беспорядочно распределенные на поверхности разрушения сварного соединения, полученного ДС в присутствии MoO₃ флюса.

Основываясь на данных энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), включения главным образом представляли собой оксиды, содержащие в основном Мо и Аl. Эти включения с полями упругих искажений вокруг себя выступали в качестве потенциальных мест зарождения трещин, что в итоге привело к образованию трещин и пустот.

4. ВЫВОДЫ

Исследована эволюция микроструктуры и механические свойства сварных соединений алюминиевого сплава 2219, полученных дуговой сваркой по А-ТІG-методике. В результате можно сделать следующие выводы:

1. При использовании TiO₂, SiO₂ и MoO₃ в качестве активирующих флюсов при A–TIG-сварке алюминиевого сплава 2219 глубина проплавления и отношение глубины к ширине сварного шва увеличиваются. Наибольшее увеличение глубины проплавления было получено при использовании SiO₂ в качестве активирующего флюса.

2. В сравнении со случае традиционной С– ТІG-методики ДС при одной и той же величине сварочного тока, ТІG технология с применением активирующего флюса обеспечивает уменьшение диаметра плазменного столба дуги и рост напряжения на дуге. 3. Применение активирующих флюсов при сварке TIG методом благоприятствует переходу от структуры столбчатых зерен к равноосной зеренной структуре в материале сварного шва алюминиевого сплава 2219.

4. Механические свойства сварных соединений значительно выше в случае использования А-ТІG-методики ДС, чем в случае ТІG технологии, не предполагающей использования активирующих флюсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Campbell F.C.* Light Weight Materials. ASM International, Materials Park, Ohio, 2012.
- Rao P.S., Sivadasan K.G., Balasubramanian P.K. Structure–property correlation on AA 2219 aluminum alloy weldments // Bulletin Mater. Sci. 1996. V. 19. P. 549–557.
- Ahmadi E., Ebrahimi A.R. Welding of 316L austenitic stainless steel with activated tungsten inert gas process // J. Mater. Eng. Performance. 2015. V. 24. P. 1065–1071.
- Tathgir S., Bhattacharya A., Bera T.K. Influence of Current and Shielding Gas in TiO₂ Flux Activated TIG Welding on Different Graded Steels // Mater. Manufactur. Proces. 2015. V. 30. P. 11–15.
- Kulkarni A., Dwivedi D.K., Vasudevan M. Study of mechanism, microstructure and mechanical properties of activated flux TIG welded P91 Steel-P22 steel dissimilar metal joint // Mater. Sci. Eng.: A. 2018. V. 731. P. 309–323.
- Li S.Z., Shen J., Cao Z.M., Wang L.Z. Effects of mix activated fluxes coating on microstructures and mechanical properties of tungsten inert gas welded AZ31 magnesium alloy joints // Sci. Techn. Welding & Joining. 2012. V. 17. P. 467–475.
- 7. Ramkumar K.D., Kumar B.M., Krishnan M.G., Dev S., Bhalodi A.J., Arivazhagan N., Narayanan S. Studies on the weldability, microstructure and mechanical proper-

ties of activated flux TIG weldments of Inconel 718 // Mater. Sci. Eng.: A. 2015. V. 639. P. 234–244.

- Lin H.L., Wu T.M. Effects of activating flux on weld bead geometry of Inconel 718 alloy TIG welds // Mater. Manufactur. Proces. 2012. V. 27. P. 1457–1461.
- Gao X., Dong J., Han X. Effect of RE₂O₃ (RE = La, Ce) fluxes on A-TIG welding of Ti-6Al-4V // The Intern. J. Advanc. Manufactur. Techn. 2017. V. 91. P. 1181–1188.
- Yin Y., Zhang D., Yu G., Wu W., Qu W. Porosity free direct current A-TIG welding of 2219 aluminum alloy // Trans. China Welding Institution. 2017. V. 38. P. 61–64.
- Li H., Zou J., Yao J., Peng H. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy // J. Alloys and Compounds. 2017. V. 727. P. 531–539.
- Babu A.V.S., Narayanan P.R., Narayana Murty S.V.S. Development of Flux Bounded Tungsten Inert Gas Welding Process to Join Aluminum Alloys // American J. Mechan. Industrial Eng. 2016. V. 1. № 3. P. 58–63.

- Howse D.S., Lucas W. Investigation into Arc Constriction by Active Fluxes for Tungsten Inert Gas Welding // Sci. Techn. Welding and Joining. 2000. V. 5. P. 189–193.
- Heiple C., Roper J. Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry // Welding J. 1982. V. 61. P. 97–108.
- Aidun D.K., Martin S.A. Effect of sulfur and oxygen on weld penetration of high-purity austenitic stainless steels // J. Mater. Eng. Performance. 1997. V. 6. P. 496–502.
- David S.A., Vitek J.M. Correlation between solidification parameters and weld microstructures // Intern. Mater. Rev. 1989. V. 34. P. 213–245.
- Delamore G.W., Smith R.W. The mechanism of grain refinement in dilute Al alloys // Metall. Trans. 1971. V. 2. P. 1733–1738.
- Koteswara Rao S.R., Madhusudhan Reddy G., Srinivasa Rao P., Kamaraj M., Prasad Rao K. Improving mechanical properties of 2219 aluminum alloy GTA welds by scandium addition // Sci. Techn. Welding and Joining. 2005. V. 10. P. 418–426.