



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКЛОННОСТИ К ГОРЯЧЕМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

П. КАХ, Е. ХИЛЬТУНЕН, Дж. МАРТИКАИНЕН

(Лаб. сварочной технологии и лазерной обработки, Лаппеэнрантский технол. ун-т, Финляндия)

Рассмотрено влияние способа сварки (GTAW и GMAW), состава присадочного металла и температуры предварительного подогрева на склонность швов к образованию горячих трещин при сварке алюминиевых сплавов 6005 и 6082.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, вольфрамовый электрод, защитный газ, металлический электрод, горячее растрескивание, присадочные металлы, предварительный подогрев, сплав 6005, сплав 6082, количество подводимого тепла

Алюминиевые сплавы, известные сочетанием таких свойств, как легкость, прочность, высокая ударная вязкость, способность выдерживать экстремальные температуры, коррозионная стойкость и гибкость при штамповке и хорошие характеристики повторной обработки, широко применяют в транспортном, химическом машиностроении, авиастроении, производстве строительных конструкций. Типичные применения термообработываемых деформируемых сплавов 6005 и 6028 — это сварные конструкции и архитектура. Сплавы на основе алюминия можно успешно сваривать дуговой сваркой, не опасаясь появления проблем, связанных с растрескиванием или при их незначительном проявлении. Факторами, существенно влияющими на возможность горячего растрескивания в алюминиевых сварных конструкциях, являются: определенный химический состав основного металла, тип легирования присадочного металла и конструктивные особенности соединения. Сплавы серии бxxx имеют склонность к растрескиванию, если состав основного металла близок к составу присадочного металла. При дуговой сварке возможность растрескивания этих сплавов уменьшается с помощью разбавления основного металла дополнительно магнием (использование присадочных металлов системы Al-Mg серии 5xxx) или кремнием (использование присадочных металлов системы Al-Si серии 4xxx). Наиболее подходящим и успешным методом для предотвращения растрескивания в основных металлах серии бxxx является использование соответствующего присадочного металла, добавляемого во время сварки [1–10].

Основные причины горячего растрескивания сплавов системы Al-Mg-Si при сварке рассмотрены в работах [4–13]. Для исключения или минимизации эффекта растрескивания рекомендуют использовать соответствующие присадочные сплавы [5–10]. Путем сравнения присадочных металлов 5356 с 5 % Mg и 4043 с 5 % Si определяли влияние состава основного металла на горячее растрескивание. Установлено, что шов, выполненный с присадочным металлом 4043, менее склонен к горячему растрескиванию, чем такой же, выполненный с присадочным металлом 5356 из-за узкого температурного интервала кристаллизации и пониженной эвтектической температуры металла шва, что позволяет основному металлу затвердевать первым (рис. 1). Сплав 4043 легко анодируется после сварки, образуя темный металл шва и хорошо видимый шов, что объясняется присутствием определенного количества кремния в составе. Таким образом, при использовании любого из двух сплавов значительных отличий в твердости не наблюдается. В образцах, сваренных присадочным металлом 4043, ЗТВ в среднем на 2 мм шире, чем в образцах, сваренных присадочным металлом 5356 с помощью дуговой сварки

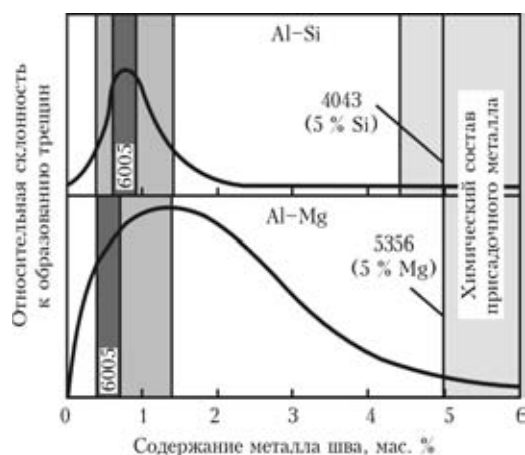


Рис. 1. Влияние химического состава на склонность к образованию трещин в бинарных сплавах систем Al-Si и Al-Mg [14]



Типичные химические составы алюминиевых сплавов и присадочных проволок, мас. %

Алюминиевые сплавы	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Прочие	Al
6005	0,6	0,21	0,12	0,15	0,54	0,028	0,01	0,15	Основа
6082	1,2	0,33	0,08	0,50	0,78	0,14	0,05	0,15	»
Проволоки	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	B	Al
4043	5,00	0,8	0,3	0,05	0,05	0,10	0,20	0,0008	Основа
5356	0,25	0,4	0,1	0,05...0,20	5,00	0,14	0,10	0,0008	»

вольфрамовым электродом в защитном газе (GTAW) и дуговой сварки металлическим электродом в защитном газе (GMAW).

Сварку GTAW и GMAW использовали для сравнения различного количества подводимого тепла, которое при импульсной GTAW в 4 раза выше, чем то же при импульсной GMAW. Некоторые образцы для испытания также предварительно подогрели для уменьшения растягивающих напряжений, а скорость охлаждения выбрали такой, чтобы эффект ликвационного растрескивания уменьшился. Ликвационное растрескивание возникает в зоне частичного расплавления шва, сразу возле зоны сплавления. Ликвация может появиться вдоль границы зерна или внутри. Ликвация на границе зерна делает зону частичного расплавления склонной к ликвационному растрескиванию [15, 16]. Горячее растрескивание — это процесс высокотемпературного растрескивания, который в основном зависит от того, как кристаллизуются системы металлического сплава.

Степень жесткости соединения также оказывает значительное влияние на ликвационное растрескивание. Чем она выше, тем выше возможность ликвационного растрескивания. Поскольку алюминиевые сплавы имеют высокое тепловое сжатие и если они не релаксированы перед кристаллизацией, в соединениях возникают большие растягивающие напряжения, что может приводить к разрушению вдоль ликвационных границ. Выбор основного металла, имеющего мелкозернистую структуру и менее склонного к ликвационному растрескиванию (например, металл, не содержащий низкоплавких примесей или сегрегаций), также может помочь в решении этой проблемы [9, 17].

**Экспериментальные методики.** Образцы из деформируемых алюминиевых сплавов 6005 и 6082 толщиной 10 мм испытывали на растрескивание с учетом различных критериев. Во-первых, присадочные металлы применяли для того, чтобы определить их влияние на растрескивание. Типичные химические составы сплавов на алюминиевой основе и присадочных проволок представлены в табл. 1. Изучено влияние различных способов сварки, предварительного подогрева и основного металла на горячее растрескивание.

Для всех экспериментов использовали механизированную частотой 90 Гц импульсную GTAW и GMAW с переносом металла с короткими замыканиями. Используются следующие сварочные параметры: температура воздуха приблизительно 20 °С, для оценки влияния предварительного нагрева некоторые образцы перед сваркой нагревали до температуры 120 °С. Использован сварочный ток 172, 210 и 352 А для обоих основных сплавов с и без предварительного подогрева, напряжение удерживали на уровне 17, 22 и 26 В соответственно. Скорость подачи проволоки и скорость сварки соответственно колебались от 2,8...10 мм/с и 0,34...13,5 м/мин. В обоих случаях в качестве защитного газа использовали чистый аргон (Ar + 0,03 % NO), расход которого составлял для GMAW 14 л/мин, для GTAW — 10 л/мин. Диаметр присадочной проволоки составлял 1,2 и 2,4 мм при GMAW и GTAW соответственно, а вылет электрода при GMAW — 15 мм. Способ с валиковой пробой использовали во всех случаях.

Для очистки поверхности перед сваркой от оксидов, смазки и оставшихся частиц использовали щетку из нержавеющей стали. Это важно, поскольку шов из алюминия имеет склонность к пористости (из-за водорода) и образованию окалины (из-за кислорода). Материалы, подлежащие свар-

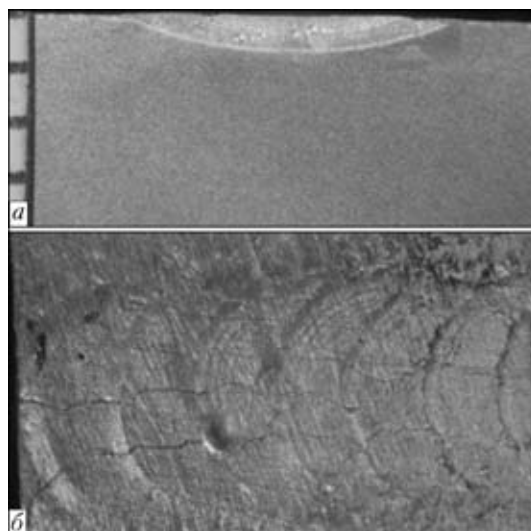


Рис. 2. Характерный пример горячего растрескивания в металле шва: а — шлиф поперечного сечения; б — вид сверху на образец

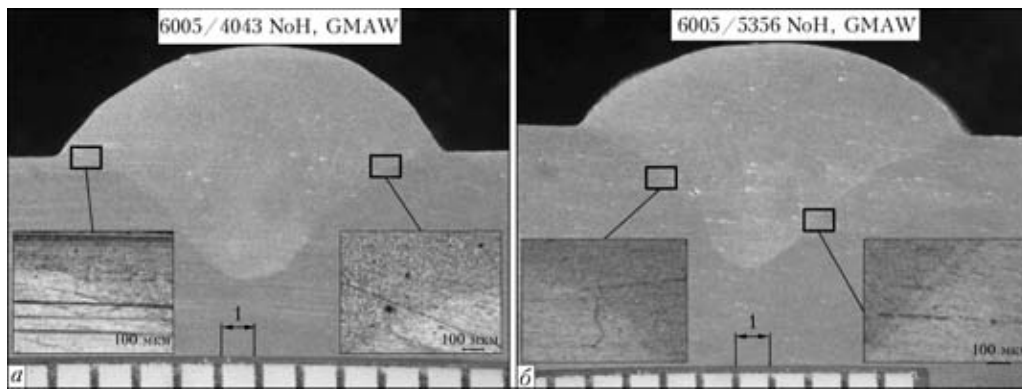


Рис. 3. Макрошлифы соединений сплава 6005, выполненных с использованием присадочного металла 4043 (а) и 5356 (б) способом GMAW, и микроструктуры с ликвационными трещинами (NoH — без предварительного подогрева)

ке, должны быть достаточно жесткими для предотвращения их сжимания без ограничения во время сварки. Такое условие вызывает появление горячего растрескивания при сварке, что дает возможность оценить склонность материалов к образованию трещин [18–20].

Для GTAW использовали новую установку компании «Fronius» Magic Wave 5000 Job G/F. Импульсный переменный ток машины можно отрегулировать и измерить. Для подачи проволоки использовали механизм ESAB CWF1. В случае с GMAW использовали сварочную машину с импульсным переменным током Pro GMA 530 Kempri. Полученные сварные швы вырезали, отполировали и протравили раствором 8 % HF и 12 % HCl в воде для изучения микроструктуры с помощью оптической микроскопии.

**Результаты и обсуждение.** Сделаны макро- и микрофотоснимки поперечного сечения шва и проведены испытания на твердость по Виккерсу (3 кг). Эксперимент с присадочным металлом, вы-

полненный для определения влияния присадочного металла на склонность к горячему растрескиванию, представлен на рис. 2. Если присадочный металл отсутствует, горячие трещины найдутся в шве и металле ЗТВ. Для GTAW использовали сплав 6005, ток  $I = 300$  А, скорость сварки  $v = 2,5$  мм/с. Присадочный металл и предварительный подогрев (20 °С) не применяли.

**Влияние присадочных металлов.** Влияние присадочных металлов на распространение трещин оценивали посредством простого наблюдения за интенсивностью распространения трещин в поперечном сечении шва, используя большое увеличение — 100. На рис. 3 приведены микроструктуры шва из сплава 6005, который был сварен с количеством подводимого тепла  $Q = 440$  и  $426$  Дж/мм и использованием присадочных металлов 5356 и 4043 соответственно. Открытые ликвационные трещины хорошо видны вдоль наружной кромки и корня шва.

Как видно из рис. 4, в целом распределение твердости одинаково в металле шва, ЗТВ и основном металле. Минимальные значения для GTAW и GMAW в обоих швах, используя присадочный металл 4043, составляют не более HV3–60. Если сплав 6082 сварить такими же присадочными проволоками, ситуация иная. Распределение твердости опускается ниже 60 и поднимается немного выше HV3–80. Следовательно, нет существенных отличий в твердости при использовании любого из двух присадочных металлов. Фактически у образцов, сваренных с помощью присадочного металла 4043, ЗТВ в среднем на 2 мм шире, чем то же, сваренное с помощью присадочного металла 5356 для обоих процессов GTAW и GMAW. Меньшее количество небольших трещин можно наблюдать в соединении, выполненном с помощью присадочного металла 4043 (см. рис. 4, а). Таким образом, присадочный металл 4043 предпочтительнее металла 5356 с точки зрения склонности к ликвационному растрескиванию при GTAW и GMAW сплава 6005.

**Влияние процесса сварки.** Зависимость интенсивности развития трещин от процесса GTAW или

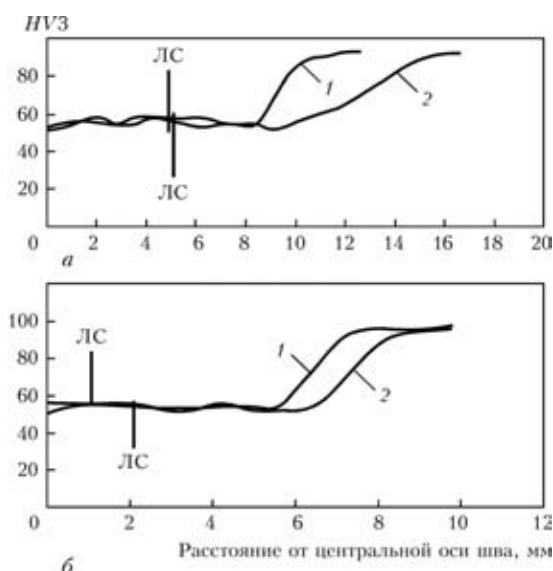


Рис. 4. Распределение твердости в поперечном сечении соединения сплава 6005, выполненного без предварительного подогрева с использованием присадочного металла 5356 (1) и 4043 (2) способом GTAW (а) и GMAW (б) (ЛС — линия сплавления)

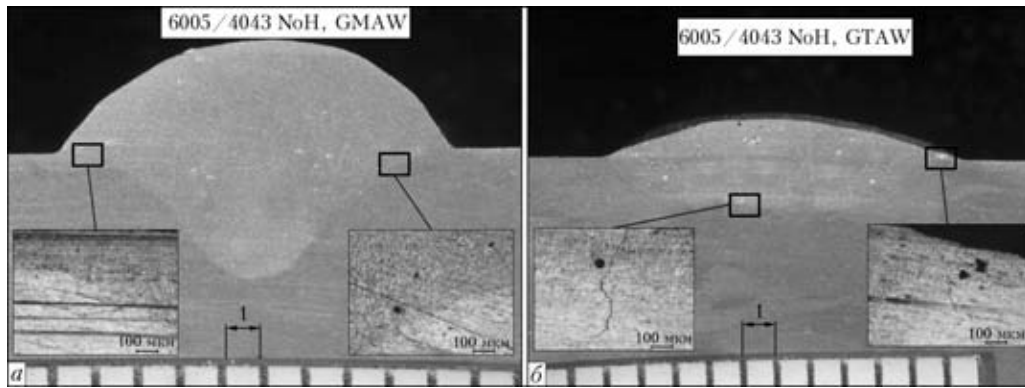


Рис. 5. Макрошлифы соединений сплава 6005, выполненных с использованием присадочного металла 4043 без предварительного подогрева способом GMAW (а) и GTAW (б)

GMAW можно определить, сравнив рис. 5, а ( $Q = 440$  Дж/мм) и рис. 5, б ( $Q = 1290$  Дж/мм). На рис. 5, а видны трещины и несколько небольших трещин, а на рис. 5, б — только одна большая трещина и незначительное количество небольших трещин, однако также могут присутствовать невидимые трещины. Соответственно в образцах, сваренных GTAW, трещин больше, чем у образцов, сваренных GMAW. Таким образом, образцы, сваренные GMAW, демонстрируют меньшее количество трещин и более высокие значения твердости при более узкой ЗТВ, чем выполненные способом GTAW (рис. 6).

Различие в значениях твердости у образцов, выполненных GTAW и GMAW, особенно заметно на примере сплава 6082 (в среднем оно составляет около  $HV3-90$  (рис. 6, в, з)). Наиболее малое различие в значениях твердости можно наблюдать в сплаве 6005, оно составляет около  $HV3-1,5$  (рис. 6, а, б). Ширина ЗТВ в соединениях, выполненных GTAW, на 4...5 мм больше, чем то

же в соединениях, сваренных GMAW из-за большего количества подводимого тепла.

**Влияние предварительного подогрева.** Предварительный нагрев способствует уменьшению горячего растрескивания благодаря сокращению напряжений при охлаждении, т. е. можно использовать меньшее количество подводимого тепла. Если рекомендовано, предварительный подогрев используют для подогрева всего основного металла или его части до желаемой температуры перед сваркой. Температура предварительного подогрева, как правило, указана в спецификации процесса сварки для используемого сплава, но обычно она колеблется в интервале  $110...140$  °С для большинства промышленных сплавов. Если конструкция небольшая, предварительный подогрев можно выполнять в печи, а если имеет большие размеры, может потребоваться набор нагревающих горелок, электрические ленточные или индукционные нагреватели. Основным преимуществом предварительного подогрева является более низкая скорость охлаждения в шве и ос-

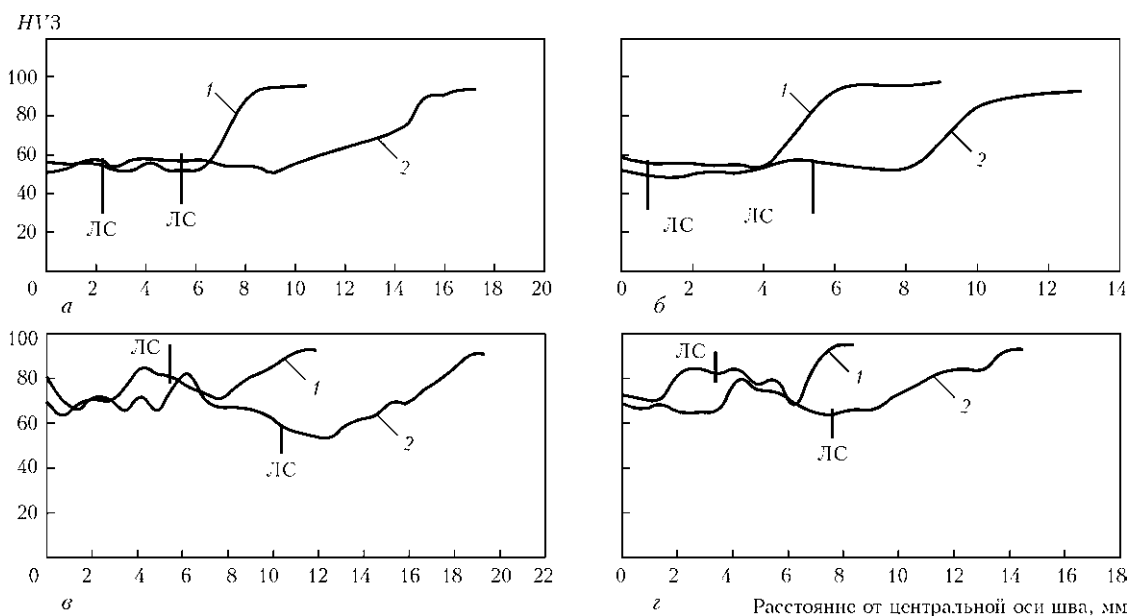


Рис. 6. Распределение твердости в поперечном сечении соединений сплава 6005 (а, б) и 6082 (в, з), выполненных без предварительного подогрева с использованием присадочного металла 4043 (а, в) и 5356 (в, з) способом GMAW (1) и GTAW (2)

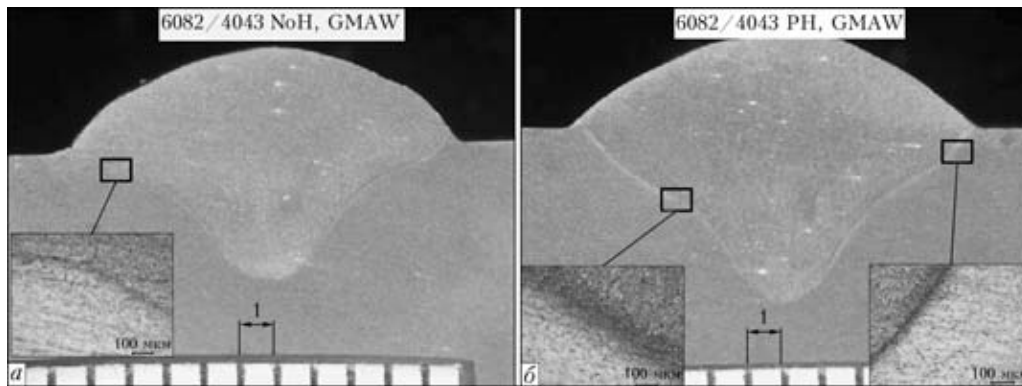


Рис. 7. Макрошлифы соединений сплава 6082, выполненных с использованием присадочного металла 4043 способом GMAW без (а) и с предварительным подогревом (PH) (б)

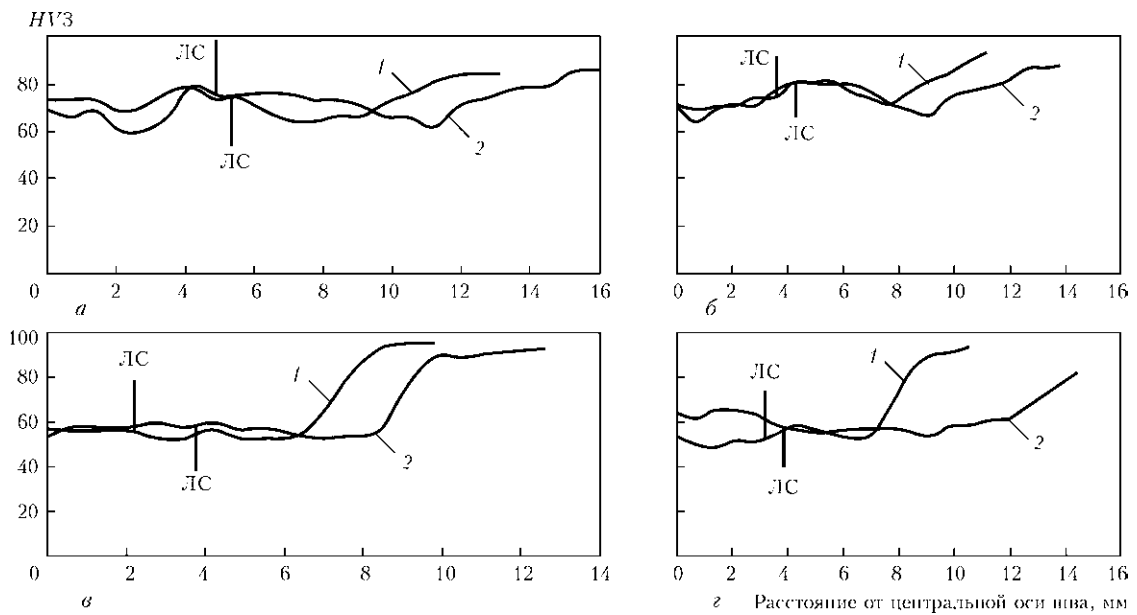


Рис. 8. Распределение твердости в поперечном сечении соединения сплава 6082 (а, б) и 6005 (в, г), выполненных с использованием присадочного металла 5356 (а, в) и 4043 (б, г) способом GTAW (а, в) и GMAW (б, г) без (1) и с предварительным подогревом (2)

новном металле, что приводит к лучшей пластичности и большему сопротивлению к растрескиванию. В случае с жесткозакрепленными конструкциями и соединениями предварительный подогрев позволяет минимизировать усадочные напряжения в шве и прилегающем основном металле, кроме того, медленное охлаждение позволяет водороду диффундировать до того, как он

приведет к проблемам после затвердевания [21–23]. Аллюминиево-магниевые сплавы чувствительны к перегреву, что может привести к образованию ликвационного растрескивания в металле ЗТВ, т. е. предварительный подогрев нужно выполнять с особой осторожностью [12].

На рис. 7 приведены макрошлифы и микроструктуры образца шва, выполненного с исполь-

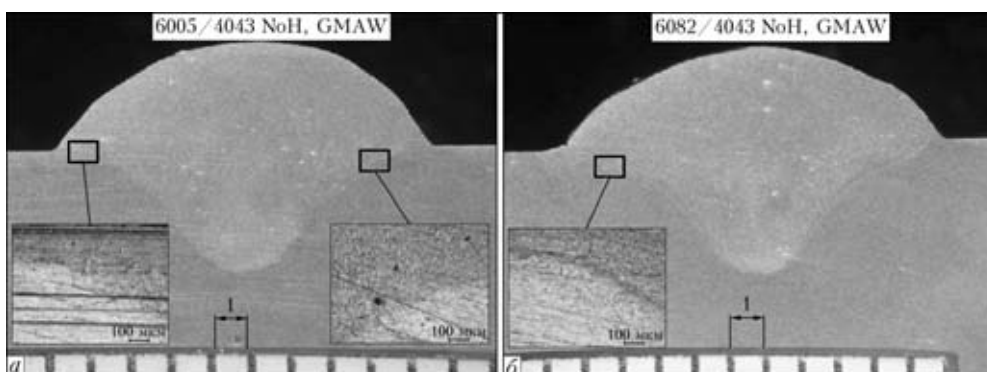


Рис. 9. Макрошлифы соединений сплава 6005 (а) и 6082 (б), выполненных с использованием присадочного металла 4043 без предварительного подогрева способом GMAW



зованием присадочного металла 4043 с помощью сварки GMAW с и без предварительного подогрева. При предварительном подогреве наблюдается более глубокое проплавление, чем без него. Уменьшение количества трещин благодаря предварительному нагреву ( $Q = 440$  Дж/мм) незначительно, как можно заметить при сравнении рис. 7, а и 7, б. Хотя в случае с образцом из стали 6005, выполненным GTAW с использованием присадочного металла 5356 и предварительным подогревом, размер трещин несколько сокращается, но их количество остается приблизительно таким же.

Распределение твердости на рис. 8 показывает, что различие между профилями твердости с и без предварительного нагрева не составляет более HV3–1,5, а ЗТВ в образцах с предварительным подогревом на 1...2 мм шире. При предварительном подогреве смягченная область увеличивается в результате повышения температуры.

Во всех случаях, если сравнивать потерю твердости и количество образовавшихся трещин, то без значительных различий в твердости интенсивность развития трещин меньше при использовании присадочной проволоки 4043, чем проволоки 5356 как при GMAW, так и при GTAW. Тем не менее влияние предварительного подогрева не демонстрирует никакого уменьшения количества трещин.

*Влияние основного металла.* Согласно эксперименту сплав 6082 менее склонен к ликвационному растрескиванию, чем сплав 6005 (рис. 9). Количество подводимого тепла  $Q = 440$  Дж/мм было одинаковым в обоих случаях.

## Выводы

1. Сплав 6082 менее склонен к ликвационному растрескиванию, чем сплав 6005.

2. Способ сварки оказывает влияние на склонность к растрескиванию. Так, при GMAW наблюдается меньшее количество ликвационных трещин при более узкой ЗТВ и большей твердости в этом участке, чем при способе GTAW.

3. Присадочные проволоки 4043 и 5356 обеспечивают стойкость против кристаллизационных трещин, хотя и не гарантируют возникновения ликвационного растрескивания.

4. Предварительный подогрев не оказывает значительного влияния на возможность исключения ликвационных трещин.

*Работа была выполнена при поддержке Финской организации по субсидированию технологий*

*и инноваций (TEKES) по гранту MODUVA. Авторы благодарят Antti Kahkonen и Antti Heikkinen за предоставленные материалы.*

1. Adamowski J., Szkodo M. Friction stir welds of aluminum alloy AW6082-T6 // J. of Achievements in Mat. and Manufacturing Eng. — 2007. — 20. — P. 403–406.
2. Cross C. E., Boellinghaus T. The effect of restraint on weld solidification cracking in aluminum // Welding in the World. — 2006. — 50. — P. 51–54.
3. Mazzolani F. M. Aluminium alloy structures. — 2nd ed. — London: Chapman & Hall, 1995.
4. Gittos N. F., Scott M. H. Heat affected zone cracking of Al–Mg–Si alloys // Welding J. — 1981. — 60, № 6. — P. 95–103.
5. Kou S. Solidification and liquation cracking issues in welding // Welding J. of Minerals, Metals and Materials. — 2003. — 55, № 6. — P. 37–41.
6. Huang C., Kou S. Partially melted zone in aluminum welds — liquation mechanism and directional solidification // Suppl. to Welding J. — 2000. — № 5. — P. 113–120.
7. Huang C., Kou S. Liquation mechanisms in multicomponent aluminum alloys during welding // Welding J. — 2002. — № 10. — P. 211–222.
8. Huang C., Kou S. Liquation cracking in partial — penetration Al–Mg–Si welds // Ibid. — 2003. — № 8. — P. 184–193.
9. Huang C., Kou S. Liquation cracking in full penetration Al–Mg–Si welds // Ibid. — 2004. — № 4. — P. 111–121.
10. Cao G., Kou S. Predicting and reducing liquation-cracking susceptibility based on temperature  $V_s$  fraction solid // Ibid. — 2006. — № 1. — P. 9–18.
11. Hunziker O., Dye D., Reed R. C. On formation of a centerline grain boundary during fusion welding // Acta Materialia. — 2000. — 17(78). — P. 4191–4201.
12. Messler R. W. Jr. Principle of welding. — Wiley-Verlag GmbH & Co., KGaA, Weinheim, 2004.
13. Davis J. R. Jr. Aluminum and aluminum alloys. — ASM specialty hand book, 1994.
14. Grong O. Metallurgical modeling of welding. — 2nd ed., 1994.
15. Kou S. Welding metallurgy. — 2nd ed. — New York: John Wiley, 2003.
16. Ma T., Den Ouden G. // Int. J. for the Joining of Materials Denmark. — 1999. — 3(11). — P. 61–67.
17. Yeomans S. R. Successful welding of aluminium and its alloys // Australian Welding J. — 1990. — Fourth quarter.
18. Lincoln Electric. The procedure handbook of arc welding. — Lincoln Electric: Cleveland, 1994.
19. Rao K. P., Ramanaiah N., Viswanathan N. Partially melted zone cracking in AA6061 welds // Materials and Design. — 2008. — 29. — P. 179–186.
20. A study on the influence of clamping on welding distortion / T. Schenk, I. M. Richardson, M. Kraska, S. Ohnimus // Computational Materials Sci. — 2009. — 45. — P. 999–1005.
21. Akahter R., Ivanchev L., Burger H. P. Effect of pre/post T6 heat treatment on the mechanical properties of laser welded SSM cast A356 aluminum alloy // Materials Sci. and Eng. A. — 2007. — 447. — P. 192–196.
22. Funderburk S. What is preheat? // Engineering Services the Lincoln Electric Company. — Cleveland, 1998.
23. Lyndon B. J. Process specification for the heat treatment of aluminum alloys space center NASA. — Houston, 2006.

The effect of the welding method (GTAW and GMAW), composition of filler metal and preheating temperature on susceptibility of the welds to hot cracking in welding of aluminium alloys 6005 and 6082 is considered.

Поступила в редакцию 03.03.2011