

Библиографические ссылки

1. Бискуб К. Н., Писарев А. И. Математическая модель охлаждения технологических газов плавильных электропечей // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2010. Вып. 6 (113). С. 81–86. (Сер. 6. Информатика, телекоммуникации, управление.)
2. А. с. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610292. Прогнозирующая система управления процессом охлаждения технологических газов плавильной электропечи (версия 2.0) / Бискуб К.Н. ; дата рег. 12.10.2010.
3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М. : Мир, 1985. С. 213–245.

References

1. Biscub K. N., Pisarev A. I. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb GPU*, no. 6. Computer science, telecommunications, management, 2010, vol. 6 (113), pp. 81–86.
2. Certificate of state. registration of the computer № 2011610292, registered in the Registry of the computer programs 12.10.2010. *Prognozirujushhaja sistema upravlenija processom ohlazhdenija tehnologicheskikh gazov plavil'noj jelektropechi* (Predictive process control system cooling process gases melting furnaces) (version 2.0), Biskub K. N.
3. Gill F., Murrey U., Rite M. *Prakticheskaja optimizacija* (Practical Optimization). Moscow, Mir, 1985, pp. 213–245.

© Бискуб К. Н., 2013

УДК 621.791

**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ
ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗЛОЖНИЦ ИЗ ХРОМОВОЙ БРОНЗЫ
ДЛЯ ВЫПЛАВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ТИТАНА**

В. В. Богданов¹, Ю. Г. Новосельцев², С. А. Готовко^{1,2}

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibniitm@yandex.ru

²Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26. E-mail: gefest_61@mail.ru

Тангенциальный ввод в плазмотрон бинарной плазмообразующей инертной смеси газов положительно влияет на сварочный процесс по ряду параметров, но вихревое состояние плазменной дуги при этом вызывает подсос воздуха, что ведет к окислению металла и его хрупкости. При плазменной сварке изложниц из хромовой бронзы БрХ08 во избежание охрупчивания металла шва необходимо содержание в нем хрома в пределах 0,8...1,2 %. Это обеспечивается применением присадка порошковой проволоки, где 22 % Cr и 2 % Ti.

Ключевые слова: плазменная сварка, хромовая бронза, изложница кристаллизатора, горячие трещины, эвтектика, порошковая проволока.

**METALLURGICAL FEATURES OF PLASMA WELDING
OF THICK-WALLED MOLDS MADE OF CHROMIUM BRONZE
FOR SMELTING LARGE TITANIUM INGOTS**

V. V. Bogdanov¹, Yu. G. Novoselcev², S. A. Gotovko^{1,2}

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarsky Rabochy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibniitm@yandex.ru

²Siberian Federal University
26 Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: gefest_61@mail.ru

Tangential entry of binary plasma-formed inert gas mixture into plasmotron positively influences on the welding process for a number of parameters, but the vortex state of the plasma arc event causes air inflow, resulting in oxidation of the metal and its fragility. To avoid embrittlement of the metal welded by plasma welding of chromium bronze molds BrH08, the content of chromium in the range 0,8...1,2 % is required. This is provided by the use of the additive powder wire with 22 % Cr and 2 % Ti.

Keywords: plasma welding, chrome bronze, mold of the crystallizer, hot cracks, eutectic, cored wire.

При плазменной сварке конструкций из толстолистовой хромовой бронзы типа БрХ08 значительное влияние на свойства металла сварного шва оказывает содержание в нем хрома. Он находится в конструкционном материале в пределах 0,8...1,2 %, т. е. изначально его участие в металлургических процессах в сварочной ванне обусловлено проектом.

Для стабилизации плазменной сварочной дуги, газовой защиты сопла плазмотрона и эффективной теплопередачи от дуги к сварочной ванне (основному металлу) используется тангенциальный ввод плазмообразующей инертной смеси газов аргон-гелий. Поэтому возникает вихревое состояние плазменного потока, в котором более тяжелый и холодный аргон уходит на периферию струи, а теплоноситель гелий концентрируется по ее оси [1].

Однако вихревое состояние плазменной дуги наряду с положительными эффектами обеспечивает подсос воздуха в сварочную ванну, что приводит к окислению легирующего элемента, образованию оксида Cr_2O_3 и обеднению сварного соединения хромом. Вследствие этого в металле шва остается порядка 0,2...0,3 % хрома, и он попадает в зону максимальной хрупкости (рис. 1).

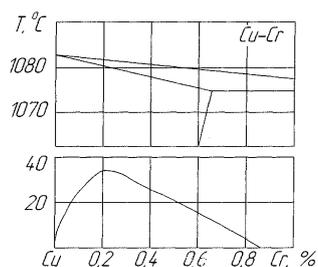


Рис. 1. Горячеломкость сплавов системы Cu-Cr [2; 3]

В сформированном наплавленном металле образуются горячие микротрещины, не обнаруживаемые при рентгеноконтроле и капиллярном (цветном) методе испытаний. Они развиваются и проявляются в про-

цессе дальнейших технологических операций, сопровождаемых деформациями и нагревом изделия (рис. 2).

Особенно эффективно проявляется охрупчивание меди при термодиффузии эвтектики ($Cu+Cu_2O$) в процессе плазменной сварки кислородосодержащей меди МЗ (рис. 3).

Трещины имеют межкристаллитный характер с окисленной поверхностью. В этом случае в проблеме разрушения следует рассматривать два направления [2; 3]:

1. Образование кристаллизационных трещин на конечных стадиях затвердевания, когда в междендритных пространствах находится жидкая фаза – легкоплавкая эвтектика $Cu+Cu_2O$, ослабляющая связи между зернами при деформационных усадочных напряжениях, т. е. трещины располагаются в обогащенных межкристаллитных пространствах. Об этом же свидетельствуют работы ИЭС им. Патона [4; 5].

2. Межкристаллитные разрушения (горячие трещины) ниже температур солидуса, когда сварной шов является одновременно твердым раствором с небольшой микрохимической неоднородностью – локальными скоплениями несовершенств кристаллической решетки. Вероятно, хрупкое разрушение сварных швов обусловлено данной неоднородностью и родственно иным видам высокотемпературного межкристаллитного разрушения в твердом состоянии, например, ползучести.

Таким образом, горячие трещины могут быть двух типов – кристаллизационные и подсолидусные.

Запас технологической прочности при сварке (стойкость против образования горячих трещин) зависит от соотношения трех характеристик: температурного интервала хрупкости (ТИХ), деформационной способности в этом интервале и интенсивности нарастания упруго-пластической деформации по мере снижения температуры (темпа деформации). Величина ТИХ определяется химическим составом сплава, дендритной ликвацией, размером и формой кристаллитов, скоростями охлаждения и деформации. Ее можно оценить ориентировочно по диаграмме состояния с учетом неравномерности кристаллизации и влияния примесей.



Рис. 2. Микротрещины в металле шва при плазменной сварке БрХ08 ($\times 300$). Содержание хрома при сварке экспериментального образца менее 0,10 %

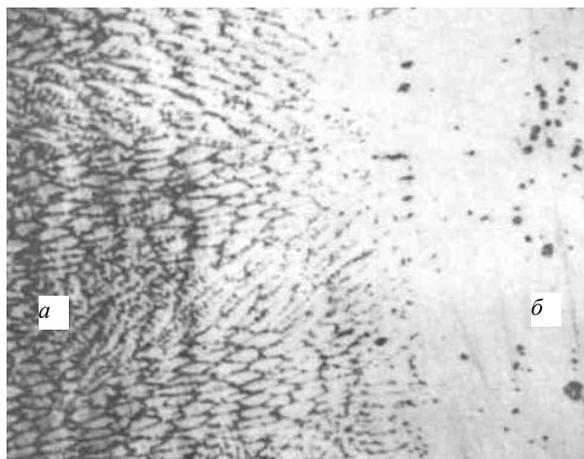


Рис. 3. Термодиффузия эвтектики ($\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$) в сторону зоны нагрева меди М3 мощной плазменной дугой (экспериментальный образец):
a – скопление эвтектики $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ в з.т.в.; *б* – осветленная (очищенная) от эвтектики зона основного металла

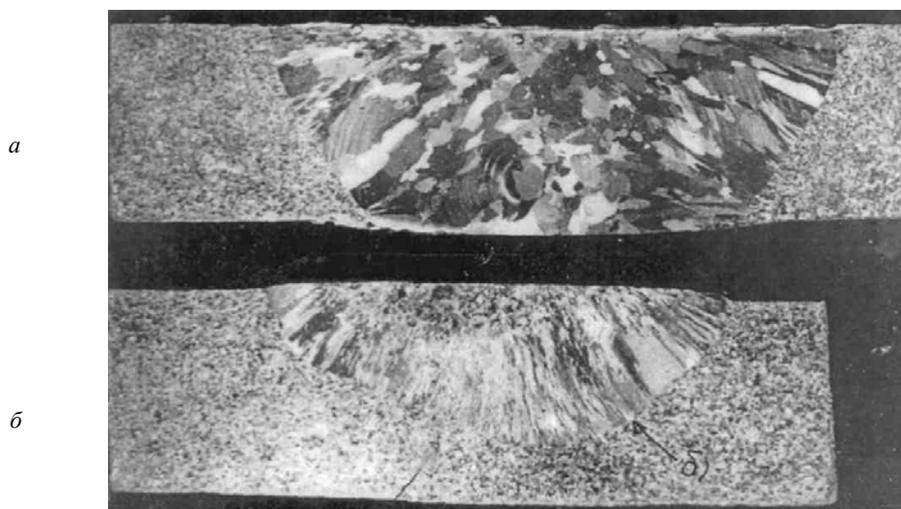


Рис. 4. Модификационное воздействие хрома при плазменной сварке меди и ее сплавов на экспериментальном образце:
a – содержание хрома 0,2 %; *б* – содержание хрома 1,2 %

Пластичность сплава в ТИХ зависит от соотношения объемов твердой и жидкой фаз, размеров и форм кристаллитов и характера распределения жидкой фазы, химической и соответствующей структурной микронеоднородности, скорости деформации. Темп деформации определяется термическим коэффициентом линейного сокращения, жесткостью сварного соединения, характером распределения температуры (определяющим степень концентрации деформаций), а также формоизменением свариваемых изделий.

Очевидно, что для увеличения стойкости швов против образования трещин необходимо уменьшить ТИХ, пропорциональному эффективному интервалу кристаллизации. Согласно диаграмме $\text{Cu}-\text{Cr}$ (см. рис. 1), это достигается увеличением содержания хрома в металле шва, и, вследствие этого, повышением пластичности сплава в температурном интервале хрупкости. Хром в виде примеси в меди является элементом, снижающим склонность швов к трещи-

нам, а также модификатором, уменьшающим размеры зерен [4–6] (рис. 4).

Медь и ее сплавы активно поглощают кислород и водород, что резко ухудшает качество металла шва, особенно с образованием пористости при выделении растворенного в меди водорода в процессе охлаждения (рис. 5). Это предъявляет особые требования к качеству подготовки основного металла и присадочной проволоки с целью их обезвоживания.

В то же время отмечено, что поры при сварке меди образуются только в присутствии в металле шва водорода и кислорода одновременно. Учитывая высокую склонность хрома к окислению, делаем вывод, что повышение его содержания в сварном соединении исключает появление пор. Следует отметить хорошую растворимость хрома в меди в твердом состоянии, достигающую при эвтектической температуре $1\ 076,6\text{ }^\circ\text{C}$ максимума 0,73 %. С понижением температуры растворимость резко уменьшается, и при $400\text{ }^\circ\text{C}$ становится равной 0,02 % (см. таблицу).

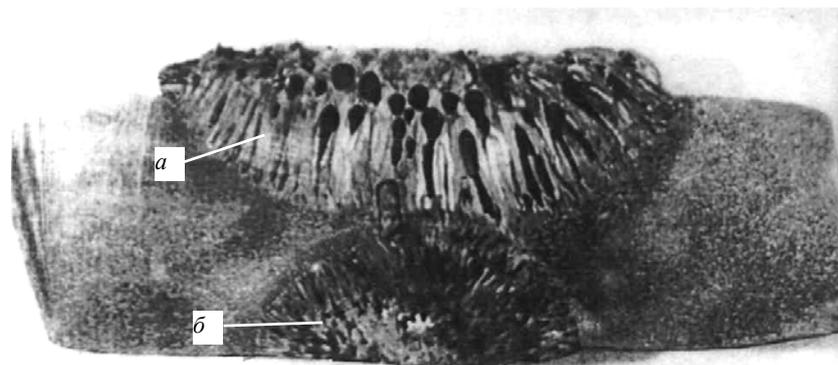


Рис. 5. Плазменная сварка меди М2 (экспериментальный образец, повышенное содержание влаги):
 а – присадок – проволока из меди М1 (пористость, 0 % Cr); б – присадок – порошковая проволока, где 22 % Cr и 2 % Ti

Растворимость хрома в меди в твердом состоянии в системе Cu+Cr

Температура, °С	Растворимость хрома, %		Температура, °С	Растворимость хрома, %	
	по массе	атомные		по массе	атомные
1076	0,73	0,89	910	0,22	0,27
1070	0,62	0,76	900	0,19	0,23
1050	0,60	0,73	840	0,10	0,12
1030	0,44	0,54	800	0,08	0,10
1000	0,40	0,49	700	0,08	0,10
980	0,39	0,48	600	0,07	0,09
950	0,25	0,31	400	0,02	0,024

Попытки введения в сварочную ванну самого активного раскислителя титана приводит при его неполном выгорании к резкому снижению электро- и теплопроводности металла шва, т. е. к снижению служебных характеристик изделия. В то же время дополнительное введение в металл шва хрома и повышение его содержания в сварном соединении незначительно влияет на электропроводность (рис. 6) и на теплопроводность изделия.

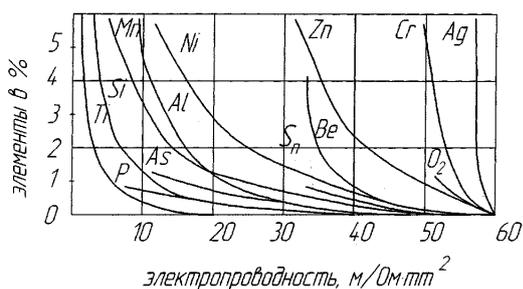


Рис. 6. Влияние элементов на электропроводность основного металла

Очевидно, что в процессе сварки изложниц из хромовой бронзы возникает основная технологическая проблема – сохранение содержания хрома или компенсация его выгорания. Дополнительная защита плазменной дуги от воздуха значительно усложняет и без того достаточно сложную конструкцию плазмотрона и не решает задачу защиты сварочной ванны, которая из-за высокой теплопроводности металла имеет большие размеры (более 90×160 мм). Увеличе-

ние расхода инертного газа с целью защиты расплавленного металла от воздуха вызывает выплескивание жидкой фазы. Поэтому сварка производится по слою бинарной смеси флюсов АН-26 и АФ-4А в соотношении 10:1, где первый защищает сварочную ванну, а второй смывает тугоплавкую окисную пленку Cr₂O₃.

Для решения задачи компенсации угара хрома авторами были проведены исследования его воздействия на пластичность металла шва и модифицирующего влияния на сварное соединение. В результате разработан присадочный материал на основе специальной порошковой проволоки с содержанием 22 % хрома и до 2 % титана, что позволило при введении его в сварочную ванну восстановить содержание в шве 0,8...1,0 % хрома. Титан выгорает полностью, раскисляя сварочную ванну. Это обеспечивает сохранность деформационной способности сваренных из хромовой бронзы изделий на уровне конструкционного материала [7]. Проволока либо просто накладывается вдоль стыка, либо подается в плазменную дугу (рис. 7), что позволяет получать прочное, пластичное и вакуумно-плотное сварное соединение при изготовлении крупногабаритных конструкций из хромовой бронзы типа БрХ08 (рис. 8).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При плазменной сварке изложниц кристаллизаторов из толстолистовой хромовой бронзы стабилизационная тангенциальная подача плазмообразующего газа в плазмотрон и, вследствие этого, вихревое состояние плазменной струи приводит к подосу воздуха в сварочную ванну, обедняя хромом металл шва и вводя его в состояние повышенной хрупкости.

2. Для обеспечения пластичности и плотности сварного соединения необходимо в процессе сварки гарантировать в металле шва содержание хрома в пределах 0,8...1,2 %.

3. Требуемое содержание хрома в металле шва при плазменной сварке изделий БрХ08 обеспечивается применением в качестве присадки порошковой проволоки, в составе которой имеется 22 % хрома и 2 % титана.

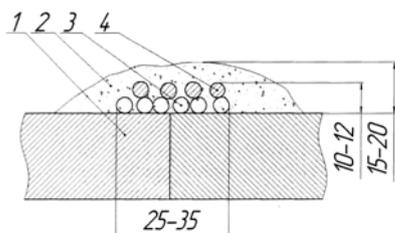


Рис. 7. Использование присадки в виде порошковой проволоки, где 22 % Cr и до 2 % Ti: 1 – основной металл БрХ08; 2 – смесь флюсов АН-26 и АФ-4А; 3 – присадочная проволока; 4 – проволока М1



Рис. 8. Изложница кристаллизатора для вакуумной электродуговой выплавки крупных слитков титана. Плазменная сварка, материал БрХ08 толщиной 40 мм

Библиографические ссылки

1. Новосельцев Ю. Г. Технологические особенности плазменной сварки крупногабаритных изделий из меди и ее сплавов : моногр. Красноярск : ИПК СФУ, 2008.

2. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. М. : Наука, 1966.

3. Абрамович В. Р., Демьянцевич В. П., Ефимов Л. А. Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. Л. : Машиностроение, 1988.

4. Илюшенко В. М., Аношин В. А., Бондаренко А. Н. Исследование влияния примесей и ряда легирующих элементов на образование трещин при сварке меди // Актуальные проблемы сварки цветных металлов : сб. докладов на I Всесоюз. конф. Киев : Наукова думка, 1980.

5. Илюшенко В. М., Аношин В. А. О влиянии примесей на склонность к образованию трещин при сварке меди // Актуальные проблемы сварки цветных металлов : сб. докладов на II Всесоюз. конф. Киев : Наукова думка, 1985.

6. Зенкова Э. К., Гликман Е. Э. Механизм образования горячих трещин при сварке сплавов // Сварочное производство. 1986. № 6.

7. Analysis of the conditions of efficient and stable operation of plasma in welding processes / Y. G. Novosel'cev et al. // Welding International. October. 2012.

References

1. Novoseltsev Yu. G. *Tekhnologicheskiye osobennosti plazmennoy svarki krupnogabaritnykh izdeliy iz medi i yeyo spлавov* (Technological features plasma welding of large products of copper and its alloys: monograph). Krasnoyarsk, IPK SFU, 2008.

2. Novikov I. I. *Goryachelomkost tsvetnykh metallov i сплавov* (Hot brittleness of nonferrous metals and alloys). Moscow, Nauka, 1966.

3. Abramovich V. R., Demyantsevich V. P., Yefimov L. A. *Svarka plavlением меди i сплавov na медной основе* (Fusion welding of copper and copper-based alloys). Leningrad, Mashinostroenie, 1988.

4. Ilyushenko V. M., Anoshin V. A., Bondarenko A. N. *Sb. докладов na I Vsesoyuznoy konferentsii "Aktualnyye problemy svarki tsvetnykh metallov"* (Sat. Reports on I-Union Conf. "Actual problems of welding nonferrous metals"). Kiev, Naukova Dumka, 1980.

5. Ilyushenko V. M., Anoshin V. A. *Sbornik докладov na II Vsesoyuznoy konferentsii "Aktualnyye problemy svarki tsvetnykh metallov"* (Proc. of the II All-Union Conf. "Actual problems of welding nonferrous metals"). Kiev, Naukova Dumka, 1985.

6. Zenkova E. K., Glikman E. E. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1986, № 6.

7. Novosel'cev Y. G., Vasilev-Polikin K. S., Krilov V. M., Tuf S. M. Analysis of the conditions of efficient and stable operation of plasma in welding processes. *Welding International*, October, 2012.

© Богданов В. В., Новосельцев Ю. Г., Готовко С. А., 2013