



КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОГО МЕДНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu–Al₂O₃

В. С. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. И. ШВЕЦ, П. Н. ЧВЕРТКО, Г. Н. ГОРДАНЫ, кандидаты техн. наук, **А. Г. САХАЦКИЙ, И. П. РЕМЕНЯК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен технологический процесс контактной стыковой сварки дисперсно-упрочненного медного сплава AL-25 (С 15725) с принудительным формированием. Приведены данные металлографического и микрорентгеноспектрального анализа микроструктуры, результаты механических испытаний сварных соединений.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, усилие осадки, время сварки, дисперсно-упрочненный медный сплав, рекристаллизация, грат, микроструктура

Одним из важных требований, предъявляемых к современным конструкционным материалам, является сохранение их работоспособности при температурах, близких к температуре плавления.

Упрочнение сплавов с применением термомеханической обработки реализуется при температурах, не превышающих $(0,3...0,4)T_{пл}$. Возможности комплексного легирования в сочетании с термообработкой шире. В некоторых случаях удается поднять рабочие температуры сплавов до $(0,7...0,8)T_{пл}$.

Композиционные материалы, в частности дисперсно-упрочненные сплавы (ДУС), имеют жаропрочность более высокого уровня. Упрочнение таких сплавов достигается введением в матрицу стабильных дисперсных (1...20 нм) тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов и др.), не взаимодействующих с матрицей вплоть до температуры плавления. Упрочняющие частицы активно влияют на формирование субструктуры сплавов и стабилизацию ее в условиях эксплуатации. ДУС сохраняют длительную работоспособность при температурах $(0,9...0,95)T_{пл}$.

Повышение жаропрочности медных сплавов дисперсионным упрочнением, в отличие от легирования, практически не ухудшает электро- и теплопроводность, т. е. основные характеристики, определяющие область их применения [1]. Решающее значение это имеет для материала обмоток роторов электродвигателей, трубчатых теплообменников, деталей электровакуумных приборов, электроконтакторов и др., работающих при повышенных температурах.

Дисперсно-упрочненная медь широко применяется в сварочной технике при изготовлении электродов для точечной и роликовой сварки, мундштуков для автоматов и полуавтоматов для сварки в защитных газах. Срок службы этих изделий увеличивается в 5...10 раз по сравнению с традиционными медными.

Основной проблемой при соединении ДУС различными способами сварки плавлением является то, что при переходе основного металла в жидкое

состояние нарушается упорядоченное распределение упрочняющих частиц. Образующиеся в результате этого микронеоднородности существенно снижают прочностные характеристики соединений [2, 3].

Контактная стыковая сварка с принудительным формированием соединения является одним из немногих способов, который позволяет соединять практически все известные металлы и сплавы, обеспечивая высокую стабильность и качество соединений [4].

Нами рассмотрена возможность использования контактной стыковой сварки сопротивлением для получения соединений из меди, дисперсно-упрочненной оксидом алюминия (Al₂O₃). В экспериментах использован сплав AL-25 (С 15725) следующего содержания (согласно ASTM/AWS), мас. %: 99,39...99,5 Cu, 0,45...0,55 Al₂O₃, до 0,01 Fe, до 0,01 Pb, до 0,4[O]. Соединяли прутки диаметром 16 мм. Исследована микроструктура (рис. 1, 4), химическая неоднородность, распределение микротвердости и прочностные характеристики полученных сварных соединений.

Металлографические исследования и микрорентгеноспектральный анализ проведен с использованием оптического микроскопа «Neophot-32», ретрового электронного микроскопа JSM-840, микроскопа-микроанализатора Т-200 и микророзонда MS-50 фирмы «Самеса». Микротвердость измеряли на микротвердомере фирмы «Лесо». Отпечатки делали с нагрузкой 0,1 Н и временем выдержки 15 с. Рас-

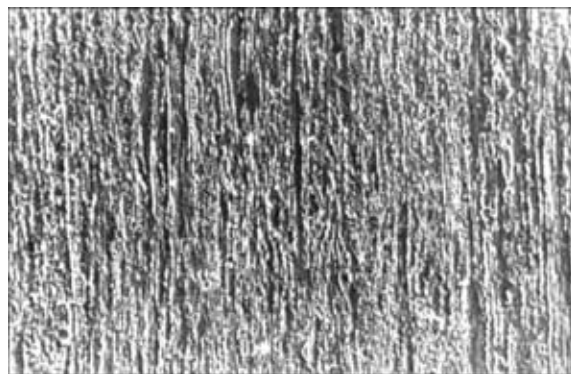


Рис. 1. Микроструктура сплава AL-25 (С 15725) в состоянии поставки, X500

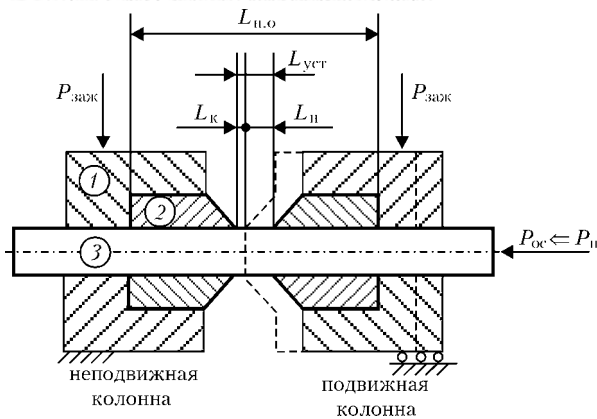


Рис. 2. Схема контактной стыковой сварки с принудительным формированием соединения: 1 — прижимы; 2 — формирующее устройство; 3 — соединяемые изделия; --- — конечное положение подвижной колонны (остальные обозначения см. в тексте)

стояние между отпечатками 10 мкм. Перед началом исследований образцы подвергали механической полировке и ионно-вакуумному травлению. Сварку опытных образцов проводили на лабораторной стыкосварочной машине мощностью 100 кВ·А. Использование традиционной технологической схемы контактной стыковой сварки сопротивлением не позволило получить сварные соединения требуемого качества.

Положительный результат был достигнут при использовании технологической схемы сварки с принудительным формированием соединения и увеличенным «тепловым» вылетом, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона [5–7]. Данная технологическая схема (рис. 2) предусматривает применение специальной технологической оснастки, снабженной жаростойкими электро- и теплоизолированными формирующими элементами. В ис-

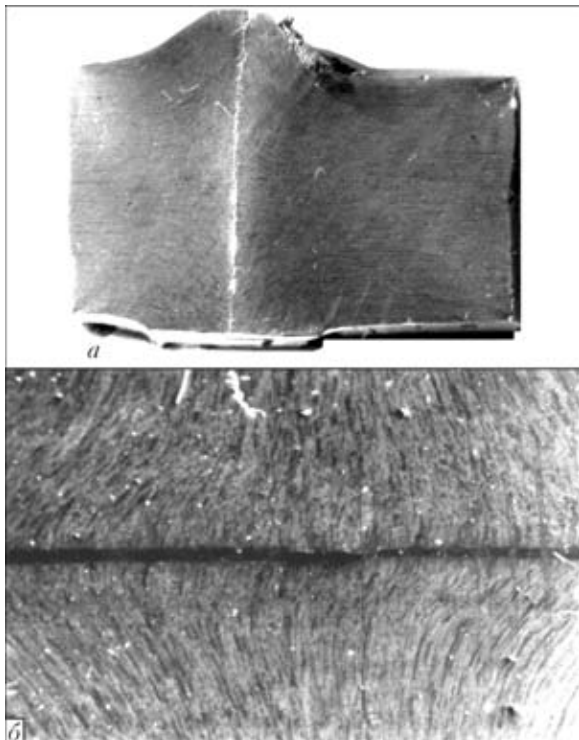


Рис. 3. Общий вид (а) и макроструктура сварного соединения (б) сплава AL-25 (С 15725), $\times 20$

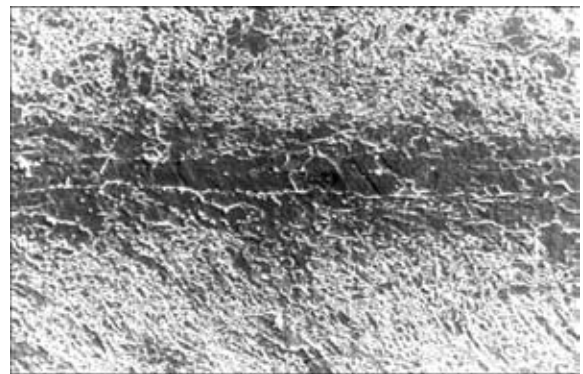


Рис. 4. Микроструктура соединения сплава AL-25 (С 15725), $\times 350$

ходном положении свариваемые образцы устанавливаются на некотором начальном расстоянии $L_{уст}$, включающем припуски на сварку, и зажимаются с усилием зажатия $P_{зж} = 2,5...3,0 P_{ос}$ (усилие сжатия при осадке). Затем соединяемые образцы сжимаются с небольшим усилием $P_{н}$ и включается сварочный ток.

Проходящий ток нагревает участок общего нагрева $L_{н.о}$, который в 6...10 раз больше $L_{уст}$. Наибольшее тепловыделение происходит в зоне контакта соединяемых поверхностей. При этом участки под формирующими элементами выступают в роли тепловых барьеров, обеспечивая быстрый и равномерный нагрев образцов. В процессе нагрева под действием усилия нагрева $P_{н}$ металл деформируется и подвижный зажим перемещается на величину $L_{н}$, после чего к образцам прикладывается более высокое усилие осадки $P_{ос}$, под воздействием которого происходит интенсивная пластическая деформация свариваемых образцов до положения $L_{к}$. Излишки перегретого металла выдав-

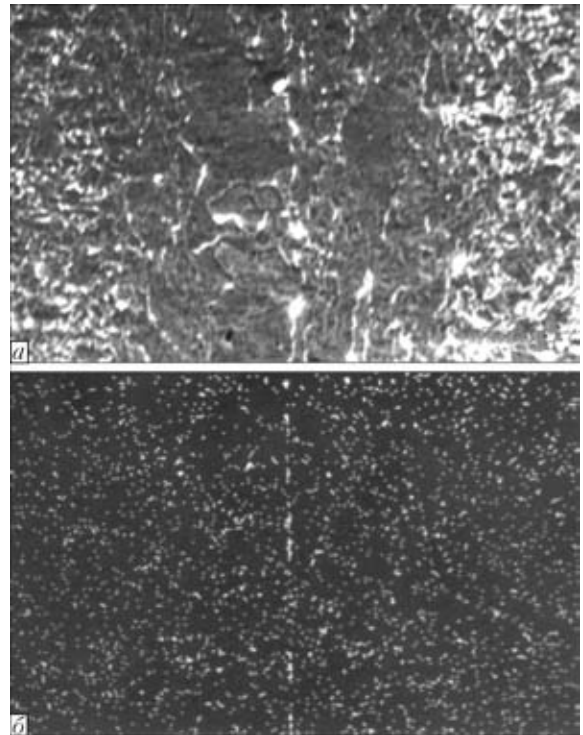


Рис. 5. Распределение алюминия в поперечном сечении сварного соединения сплава AL-25 (С 15725): а — микроструктура, $\times 400$; б — сканиграмма анализируемого участка

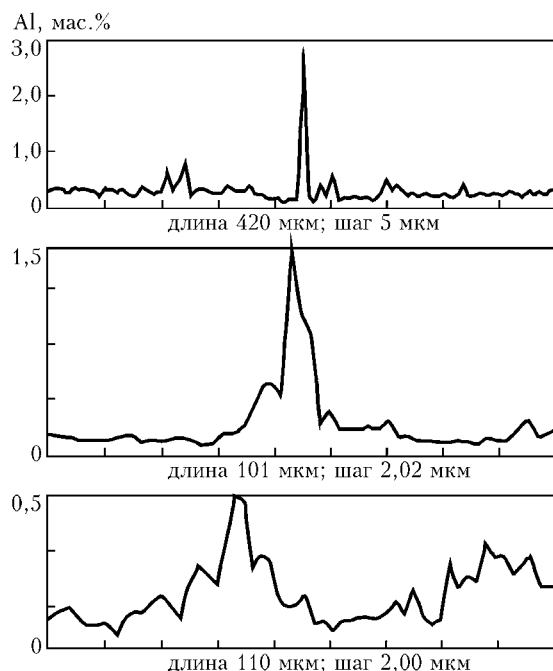


Рис. 6. Профилограммы распределения алюминия в поперечном сечении по линии контакта сварного соединения сплава AL-25 (С 15725)

ливаются в грат, который удаляется ножами формирующего устройства сразу после отключения сварочного тока. Параметры сварки следующие: $P_n = 9,0 \dots 14,0$ МПа; $P_{oc} = 1100 \dots 1800$ МПа; вторичное напряжение холостого хода $U_{x.x} = 4 \dots 7$ В; $\tau_{св} = 5 \dots 10$ с.

Металлографические исследования показали, что формирование сварных соединений сопровождается значительной пластической деформацией (ширина зоны деформации около 10 мм) и практически полным удалением из соединения жидкой фазы (рис. 3). В зоне деформации сохраняется волоконная структура. Процессы рекристаллизации, как видно из анализа микроструктуры, развиваются в узком слое на контактной границе. Ширина этого слоя в пределах соединения нестабильна и достигает 200 мкм (рис. 4). По линии стыка наблюдается полоса вытянутых поперек направления осадки крупных зерен. По мере удаления от стыка размер зерен уменьшается и они приобретают равноосную форму. Необходимо отметить, что на контактной границе наряду с образованием общих зерен отмечено наличие единичных пор.

Исследование распределения микротвердости в соединении показало, что крупные зерна на контактной границе характеризуются минимальными значениями $HV 0,1-828 \dots 880$. В примыкающих зернах меньшего размера микротвердость возрастает и в области неукрупненных зерен достигает значений микротвердости основного металла $HV 0,1-1290$. Ширина зоны соединения с пониженной твердостью составляет 50... 80 мкм.

Исследование распределения в соединении частиц Al_2O_3 проводили по результатам микрорентгеноспектрального анализа распределения алюминия. Это допустимо, поскольку оксид алюминия в меди характеризуется высокой стабильностью.

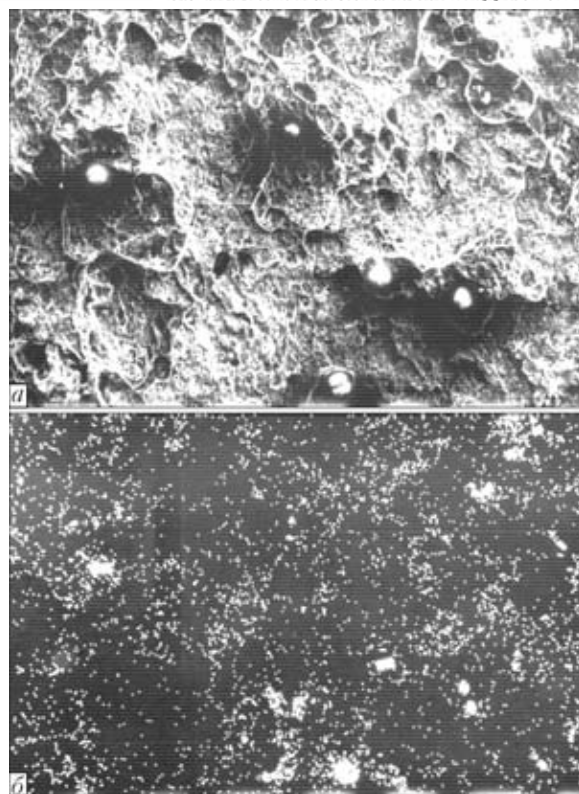


Рис. 7. Распределение алюминия на поверхности излома сварного соединения сплава AL-25 (С 15725), $\times 100$: а — фрактографическая картина анализируемого участка; б — сканиграмма

Согласно сканиграмме (рис. 5, б), позволяющей фиксировать перепад концентраций 2... 3 мас. %, распределение частиц Al_2O_3 в соединении однородно и не отличается от такового в основном металле. Участки локального повышения концентрации алюминия отмечены на контактной границе. При линейном сканировании через эти участки с чувствительностью менее 0,5 мас. % на кривых распределения алюминия зафиксированы пики при пересечении утолщенных границ зерен в зоне стыка (рис. 6). Концентрация алюминия возрастает до 1,5... 3 мас. %. Нарушение однородности распределения частиц Al_2O_3 незначительно и связано с неполным выдавливанием жидкой фазы при осадке.

Прочность соединений на разрыв составила 0,75... 0,80 прочности основного металла. Разрушение образцов происходит по шву при незначительной пластической деформации. Поверхность излома мелкокристаллическая.

Электронно-фрактографические исследования показали, что в микроструктуре поверхности излома при наличии элементов квазискола преобладает ямочный рельеф, характерный для вязкого разрушения (рис. 7). Это объясняется тем, что разрушение происходит по узкому слою рекристаллизованного металла.

Распределение алюминия по элементам структуры поверхности излома практически однородно. На некоторых участках в микроуглублениях встречаются включения размером до 20 мкм, обогащенные алюминием, которые не могут быть инициаторами разрушения.



Выводы

1. Агломерация частиц оксида алюминия в соединении сплава AL-25 (С 15725), полученного контактной стыковой сваркой, незначительна и носит локальный характер.

2. Прочность сварных соединений на статический разрыв составила 0,75... 0,80 прочности основного металла. Прочностные характеристики соединения определяются свойствами зоны рекристаллизованного металла.

3. Дальнейшие исследования по подготовке к сварке и послесварочной термообработке деталей могут обеспечить повышение механических свойств соединений.

4. Успешное использование контактной стыковой сварки для получения качественных соединений из дисперсно-упрочненных медных сплавов

The technology of flash-butt welding of dispersion-hardened copper alloy Al-25 (С 15725) with forced formation is considered. Data are given on the metallographic and X-ray microprobe analysis of the microstructure, as well as results of mechanical tests of welded joints.

потребуется разработки специализированного сварочного оборудования.

1. *Портной К. И., Бабич Б. Н.* Дисперсно-упрочненные материалы. — М.: Металлургия, 1974. — 200 с.
2. *McFayden A. A., Kapoor R. R., Eagar T. W.* Effect of second particles on direct brazing of alumina dispersion hardened cooper // *Welding Res. Suppl.* — 1990. — № 11. — P. 399.
3. *Ambroziak A., Lison R.* Welding and brazing material // *Welding and Cutting.* — 1992. — № 7. — P. 124–126.
4. *Кучук-Яценко С. И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
5. *А. с. 495174 СССР, МКИ 1323К 11/04.* Способ контактной стыковой сварки / Г. П. Сахацкий, В. К. Лебедев, Р. М. Широковский и др. — Оpubл. 15.12.75, Бюл. № 46.
6. *Сахацкий Г. П., Бутник А. П.* Контактная стыковая сварка меди высокой чистоты // *Автомат. сварка.* — 1970. — № 12. — С. 24–27.
7. *Сахацкий Г. П., Литвинчук М. Д., Шелест Н. А.* Технология и машина для стыковой сварки медных витков // *Там же.* — 1968. — № 6. — С. 58–60.

Поступила в редакцию 15.04.2004

Разработано в ИЭС

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПРАВКА СВАРНЫХ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Объемы термической правки по затратам квалифицированной ручной силы составляют 15...50 % суммарного объема затрат на сборку и сварку корпусных конструкций. Для решения этой проблемы в ИЭС им. Е.О.Патона разработана автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций с деформациями бухтиноватости. Создан автоматизированный комплекс (рисунок) на основе математического моделирования, в состав которого входит манипуляционный робот, системы измерения деформаций и микроплазменный источник нагрева.



Автоматизированная термическая правка позволяет исключить квалифицированный ручной труд, обеспечивает высокое качество поверхности листа сварной конструкции, повышает производительность процесса, снижает затраты энергии, улучшает экологические показатели.

Назначение: автоматизация тепловой правки деформаций бухтиноватости тонколистовых сварных конструкций. **Область применения:** судостроение и другие отрасли промышленности, производящие различные корпусные сварные конструкции.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11. ИЭС им. Е. О. Патона.
Тел.: (38044) 261 50 24; факс: (38044) 227 65 57; e-mail: d34@pwi.relc.com