

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСОВ ТОКА НА АКТИВАЦИЮ СВАРИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛАСТИН ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ (СТАЛЬ 20 + МЕДЬ М1)

Л. И. МАРКАШОВА¹, Н. А. ОНАЦКАЯ², Л. Ю. ДЕМИДЕНКО²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Ин-т импульсных процессов и технологий НАН Украины. 54018, г. Николаев, просп. Октябрьский, 43-А.
E-mail: iipt@iipt.com.ua

Представлены результаты разработки технологического процесса сварки пластин разнородных металлов сталь 20 + медь М1 в условиях пропускания импульсов тока большой плотности. В качестве активации сварочных процессов использован генератор импульсных токов ГИТ-50, разработанный в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины. С использованием комплексного метода исследований установлено, что на контактной поверхности взаимодействия, имеющей макроскопические размеры, протекают различные стадии процесса образования сварного соединения, что обусловлено неоднородностью реальных поверхностей твердых тел даже при высоком классе их обработки. Результаты исследования тонкой структуры стальной поверхности свидетельствуют о том, что обработка импульсами большой плотности предварительно сжатых пластин приводит к значительной активности дислокационных преобразований, существенно влияющих на развитие третьей стадии процесса сварки в твердом состоянии, т.е. стадии объемного взаимодействия. Библиогр. 7, рис. 2.

Ключевые слова: сварные соединения, разнородные материалы, импульсы тока большой плотности, зона контакта, электронная микроскопия, дислокационная структура, активация контактной поверхности

В различных изделиях современной техники в последнее время широко используются биметаллические соединения, т.е. соединения, состоящие из разнородных по своим свойствам металлов и сплавов [1, 2]. Это позволяет наиболее полно использовать специфические свойства каждого из них, а также снижать расход дорогих и дефицитных металлов и получать изделия с высокими эксплуатационными свойствами. А поскольку большинство сочетаний разнородных металлов и сплавов характеризуется существенными различиями физико-химических свойств, то понятно, что такого типа различия будут приводить и к значительным затруднениям при получении их качественных сварных соединений, особенно в условиях сварки плавлением. Поэтому для выполнения такого типа разнородных соединений используют различные способы сварки давлением.

Необходимым условием образования сварного соединения для любых способов сварки давлением является пластическая деформация свариваемых материалов [3, 4]. Однако в некоторых случаях процессы пластической деформации оказываются заторможенными ввиду высокого сопротивления соответствующего материала деформированию. Тогда применяют специальные методы, интенсифицирующие дальнейшее течение деформации. Одним из таких методов, нашедшим при-

менение в промышленности, является воздействие на деформируемый металл импульсным током большой ($\sim 10^9$ А/м²) плотности [5]. Ранее нами было получено подтверждение активирующего действия импульсов тока на пластическую деформацию предварительно сжатых пластин однородных материалов (таких как сталь 20 + сталь 20) под действием импульсов тока большой плотности при сварке давлением [6]. Однако в настоящее время в научно-технической литературе отсутствует информация о процессах, происходящих в приконтактных зонах металла соединяемых пластин из разнородных материалов при таком воздействии.

Цель настоящей работы: исследование влияния импульсов тока большой плотности на процессы, способствующие активации контактных поверхностей разнородных металлов сталь 20 + медь М1 при их соединении в твердом состоянии.

Материалы и методика проведения исследований. В качестве модельных образцов использовали пластины размером 170×12×2,5 мм, причем зона сварки, равная длине $l \approx 22$ мм, выбиралась посередине образца.

Подготовка контактной поверхности медной пластины заключалась в ее шлифовании до высоты гребешков (выступов шероховатости) от ~ 8 до ~ 10 мкм. Высота гребешков поверхности бо-

лее жесткой стальной пластины после полирования — от ~ 2 до ~ 3 мкм. Различие по высоте рельефа свариваемых поверхностей обусловлено тем, что при сварке разнородных материалов образование физического контакта происходит, как правило, в результате микропластической деформации более мягкого материала [4]. После очистки поверхностей обеих пластин (обезжиривание ацетоном) пластическую деформацию микровыступов контактных поверхностей осуществляли в специальном устройстве до давления 50 МПа, затем по стальной пластине вдоль зоны контакта пропустили импульсный ток плотностью от 10^9 до 10^{10} А/м² при длительности импульсов $\tau \geq 2 \cdot 10^{-4}$ с [7].

Исследования процессов активации соединяемых поверхностей при сварке сжатых пластин разнородных материалов с использованием импульсов тока большой плотности проведены с применением комплекса аналитических методов анализа физических процессов, протекающих в зоне контакта свариваемых поверхностей. Для изучения особенностей изменений дислокационной структуры в приповерхностных слоях металла в зоне контакта применили метод просвечивающей микродифракционной электронной микроскопии установкой JEM-200 CX фирмы «JEOL», Япония. При этом образцы для исследования подготавливали методами специального утонения ионизированными пучками аргона, что позволяет получать реальную картину характера распределения плотности дислокаций, дислокационных конфигураций и особенностей формирования различного типа субструктуры в локальных зонах свариваемых металлов. При этом в качестве объекта исследований служили темплеты стальной пластины, вырезанные из центральной части контактной зоны, где была зафиксирована максимальная площадь смятия рельефа поверхности. Эталоном служила пластина из стали 20 в исходном состоянии. При сварке давлением разнородных металлов, имеющих неодинакое сопротивление деформации, процесс схватывания лимитируется активацией контактной поверхности более твердого металла [4], поэтому особенности изменения дислокационной структуры в приповерхностных слоях деформированного металла после отмеченного выше технологического воздействия исследовали в зоне контакта со стороны указанного типа металла, а именно стали 20.

Результаты эксперимента. Исследования тонкой структуры приповерхностных слоев пластины из стали 20 в исходном состоянии показали, что анализируемая структура характеризуется общей минимальной объемной плотностью дислокаций ρ , составляющей от $\sim 10^8$ до $\sim 2 \cdot 10^9$ см⁻²; сравнительно равномерной структурой межзеренных

границ; стабильными размерами порядка от 0,65 до 1 мкм (рис. 1, а) субструктурных элементов (субзерен и ячеек), а также четко направленными цементитными пластинами без признаков деформации (рис. 1, б).

После обработки сжатых пластин импульсами тока структура приповерхностных слоев пластин из стали 20 приобретает явные признаки деформации, а именно:

- вдоль исследуемой поверхности зафиксирована достаточно высокая плотность дислокаций от $\sim 10^{10}$ до $\sim 10^{11}$ см⁻², которая выше плотности дислокаций поверхности металла в исходном состоянии почти на два порядка;

- структура отдельных зерен в значительной степени фрагментируется с формированием четко выраженных границ фрагментов (на рис. 2, а зафиксированы внутризеренные фрагменты размерами от $\sim 1,2$ до $\sim 1,5$ мкм);

- происходит дробление (разрушение) цементитных пластин — подобный эффект, как правило, имеет место после холодной обработки металла (рис. 2, б);

- четко проявляются детали структуры зон смятия гребешков рельефа, которые представляют собой слоистое строение, включающее систему полос сдвига (деформации) (рис. 2, в), формирующиеся в результате осадки выступов шероховатости в процессе деформирования. Появление полос сдвига (искривление полос скольжения) различной ширины от 2 до 4 мкм обуславливается особенностями конфигураций дислокаций — их скоплением в соседних полосах скольжения. Зафиксированная длина полос сдвига $\gg 8$ мкм;

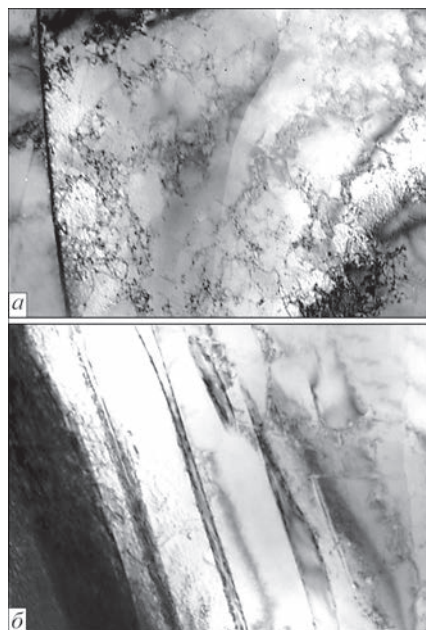


Рис. 1. Дислокационная структура приповерхностных слоев пластины из стали 20 в исходном состоянии: а — ненапряженная межзеренная граница и ячеистая структура ($\times 20000$); б — недеформированные цементитные пластины ($\times 30000$)

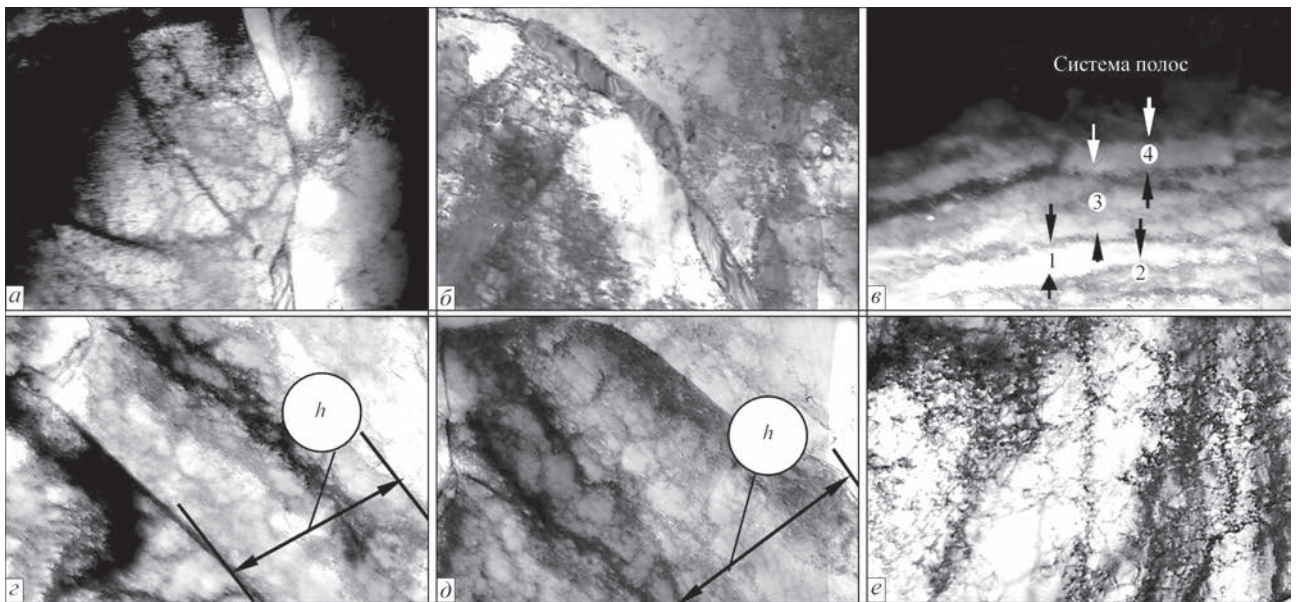


Рис. 2. Дислокационная структура приповерхностных слоев пластины из стали 20 после технологического воздействия: *a* — фрагментация зерна ($\times 15000$); *b* — раздробленная цементитная пластина ($\times 15000$); *в* — система полос сдвига *h* 1–4 ($\times 10000$); *г* — формирование блоков в полосе сдвига ($\times 10000$); *д* — фрагментация структуры с образованием клубково-ячеистой структуры в полосе сдвига; *е* — структура слоев сдвига при смятии гребня шероховатости ($\times 20000$)

– внутри отдельных полос сдвига также наблюдается фрагментация структуры, связанная с активно протекающими (параллельно с процессами пластической деформации) процессами релаксации. На рис. 2, *г* релаксация проявляется в виде формирования блоков (почти совершенных областей с дискретной взаимной разориентировкой) размерами от 0,6 до 1,2 мкм в полосе сдвига *h* от 3,3 до 3,5 мкм. На рис. 2, *д* представлена фрагментация структуры в полосе сдвига размером от 1 до 3,7 мкм, сопровождающаяся образованием клубково-ячеистых структур с плотностью дислокаций $\approx 8,6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$.

Следует отметить, что кроме системы полос сдвига в структуре смятых гребешков шероховатости наблюдаются также впадины различной глубины, для которых характерна и более низкая плотность дислокаций, соответствующая по величине плотности дислокаций в недеформированном металле. Эти зоны являются областями, где физический контакт еще не образовался, в результате чего в соответствующих участках соединения остаются поры, дальнейшее зарастание которых возможно диффузионным путем при последующем нагреве. На рис. 2, *е* показана структура слоев сдвига при смятии гребня шероховатости, где структура впадины шероховатости (светлая область — потенциальные поры) представляет собой субзерна с размерами $d_c \sim 0,75 \text{ мкм}$ и ячейки размерами $d_{\text{яч}}$ от 0,13 до 0,2 мкм с минимальной плотностью дислокаций. В зоне же деформации гребня шероховатости (темная область — зоны деформации) зафиксирована весьма высокая плотность дислокаций — примерно 10^{11} см^{-2} .

Анализ полученных результатов исследования тонкой структуры приповерхностных слоев стальной пластины после обработки предварительно сжатых пластин импульсами тока свидетельствует о том, что в результате технологического воздействия отдельные микроучастки (гребни шероховатости) являются зонами с высокой степенью деформации, для которых характерны дислокационные преобразования следующих типов:

- увеличение в этой области более чем на порядок значений плотности дислокаций, что свидетельствует о значительном увеличении уровня внутренних напряжений в локальной зоне деформации;

- отмечается неравномерность распределения плотности дислокаций в зоне локализации поверхностной деформации стали 20;

- формирование полос сдвига (деформации) в результате осадки гребешков шероховатости в процессе деформирования поверхностных слоев стали обусловлено нарастанием дислокационных скоплений в соседних плоскостях скольжения;

- значительная фрагментация структуры внутри полос деформации, сопровождающаяся образованием клубково-ячеистых структур, свидетельствует о резкой активации дислокационных взаимодействий и активном преобразовании тонкой структуры, что в итоге приводит к образованию на деформированной поверхности стали ступенек выхода дислокаций так называемых активных центров [4], приводящих к активации контактной поверхности.

Таким образом, на участках деформированной поверхности стали одновременно протекают

и процессы образования физического контакта, и формирование активных центров — зон схватывания в слоях деформации поверхностей, что и способствует образованию межатомных связей. Наряду с отмеченным существуют еще такие участки (впадины шероховатости — поры) на которых образование физического контакта не наблюдается.

Выводы

1. На контактной поверхности взаимодействия, имеющей макроскопические размеры, протекают различные стадии процесса образования сварного соединения, что обусловлено неоднородностью реальных поверхностей твердых тел даже при высоком классе их обработки. Поэтому разделение процесса сварки на отдельные стадии является справедливым только для микроскопических участков контактной поверхности.

2. Результаты исследования тонкой структуры стальной поверхности свидетельствуют о том, что обработка импульсами высокой плотности предварительно сжатых пластин приводит к значительным дислокационным преобразованиям, ко-

торые могут существенно повлиять на развитие третьей стадии процесса сварки в твердом состоянии, т.е. стадии объемного взаимодействия.

1. Миддельдорф К. Тенденция развития технологий соединения материалов / К. Миддельдорф, Д. фон Хофе. // Автоматическая сварка. — 2008. — № 11. — С. 39–47.
2. Reisgen U. Stahl-Aluminium-Mischverbindungen: Schweißen oder Löten? Die Kombination zweier etablierter Füge-technologien macht Unmögliches möglich / U. Reisgen, L. Stein, M. Steiners // Schweißen und Schneiden. — 2010. — 62, № 5. — С. 278–284.
3. Каракозов Э. С. Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. — М.: Металлургия, 1976. — 264 с.
4. Каракозов Э. С. Сварка металлов давлением / Э. С. Каракозов. — М.: Машиностроение, 1986. — 280 с.
5. Физические основы и технология обработки современных материалов: в 2 т. Т. 1. Теория, технология, структура и свойства / О. А. Троицкий, Ю. В. Баранов, Ю. С. Авраамов [и др.] — Москва–Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2004. — 590 с.
6. Онацкая Н. А. Влияние схем обработки импульсами тока на образование физического контакта при сварке давлением / Н. А. Онацкая, Л. Ю. Демиденко // Электронная обработка материалов. — 2010. — № 3. — С. 19–21.
7. Вовченко А. И. Интенсификация пластической деформации поверхностей металлов под действием импульсов тока при сварке давлением / А. И. Вовченко, Л. Ю. Демиденко, Н. А. Онацкая // Міжзвізвський збірник «Наукові нотатки». — 2011. — 32. — С. 63–68.

Поступила в редакцию 23.12.2015



Уральский
федеральный
университет
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

16 Международная научно-техническая конференция Сварка и родственные технологии

(в рамках форума «Сварка и Диагностика»)

22–23 ноября 2016 г.

г. Екатеринбург

РАЗДЕЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- ◆ Технологии сварки и родственных процессов
- ◆ Материалы для сварки, наплавки и напыления
- ◆ Оборудование для автоматизации и роботизации
 - ◆ Свойства сварных соединений и покрытий
- ◆ Моделирование и CAE-анализ сварочных процессов
 - ◆ Защита от вредных воздействий
 - ◆ Сертификация и стандартизация в сварке
- ◆ Экономические аспекты сварочного производства

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

Журналы: «Сварка и Диагностика», «Дефектоскопия», «Сварочное производство», «Порошковая металлургия и функциональные покрытия», «Автоматическая сварка».

Контакты: Бузорина Дарья Сергеевна: тел.: +7(343) 283-000-50, +7 953-604-9892

E-mail: weldingconf@gmail.com

Адрес: 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. М-326