



ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЙ НИКЕЛЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Л. И. МАРКАШОВА, д-р техн. наук, В. В. АРСЕНЮК, канд. техн. наук, В. Г. ПЕТУШКОВ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Украины Г. М. ГРИГОРЕНКО (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выполнены исследования, позволившие выявить связь энергетических параметров соударения и качества соединений при сварке взрывом. Установлено, что формирование конечной структуры контактной зоны соединений, от которой зависит их прочность и пластичность, в основном определяется взаимным влиянием двух конкурирующих механизмов — деформационного упрочнения и релаксации (возврата). Даны рекомендации по выбору режимов сварки, обеспечивающих оптимальный энергетический баланс при протекании процессов упрочнения и релаксации структуры.

Ключевые слова: сварка взрывом, никель, пластическая деформация, тонкая структура, механические свойства, контактная зона, температурный режим, оптимизация

Служебные характеристики соединений, полученных сваркой взрывом, во многом определяются структурным состоянием металла, формирующегося на их поверхности, которое в свою очередь зависит от режима соударения. В настоящее время имеется несколько критериев, на основании которых можно априори назначать оптимальные параметры соударения [1–5]. Одним из них является энергетический критерий, который сводится к анализу баланса кинетической энергии метаемой взрывом пластины. При этом установлено, что равнопрочное соединение образуется в случае, когда для каждого из свариваемых металлов собственно на сварку затрачивается энергия пластической деформации W_2 не ниже критической [3], характерной для каждого конкретного сочетания металлов. Этот подход позволяет оценить влияние толщины свариваемых пластин на значения W_2 и соответственно на структурное состояние металла зоны соединения. Недостатком указанного способа является то, что можно определять лишь интегральные энергетические характеристики процесса. В связи с этим надежная оценка баланса энергетических затрат при сварке взрывом, а следовательно, и прогнозирование структурного состояния металла без дополнительной экспериментальной корректировки зачастую невозможно. С учетом таких параметров, как высокие давление, температура и скорость деформации определить динамическую прочность материала, температуру его плавления и другие физико-механические характеристики весьма сложно [6, 7].

Настоящая работа расширяет существующее представление о возможных путях оптимизации режимов сварки взрывом на базе исследования влияния параметров соударения на динамику структуры контактной зоны. В качестве модельного материала выбран никель технической чистоты марки НП-2. Благодаря наличию ГЦК-решетки он претерпевает пластическое деформирование сразу в широком спектре кристаллографических систем скольжения. Это позволяет получить эксперимен-

тальный материал при сварке в широком диапазоне режимов соударения без дефектов деформационного происхождения (трещин, расслоений и т. п.).

Были проведены четыре серии экспериментов, выполненных на разных режимах соударения (таблица). Сварку осуществляли по угловой схеме. Для предотвращения влияния усредненной единичной массы на закономерность образования соединений метаемой и основной пластин их толщину (соответственно 3 и 8 мм) во всех опытах оставляли неизменной. По данным работы [3], минимально допустимое (критическое) значение W_2 в этом случае составляет приблизительно 1,2 МДж/м². Сохраняя постоянную скорость метания ($v_0 \cong 730$ м/с), значения скорости точки контакта v_k и W_2 варьировали путем изменения начального (установочного) угла α (таблица). В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использовали гексоген, отличающийся стабильными и хорошо воспроизводимыми параметрами детонации. Высоту заряда ВВ выбирали одинаковой. Значения W_2 в зависимости от кинематических параметров соударения находили из следующего выражения [3]:

$$W_2 = \frac{m_{\text{ср}} v_0^2}{2} \left[1 - \left(\frac{v_k}{c_0} \right)^2 \right],$$

где $m_{\text{ср}}$ — усредненная единичная масса свариваемых пластин; c_0 — скорость звука в металле.

Качество полученных соединений определяли по степени гомогенности металла непосредственно на границе контакта. Изучение структурных особенностей металла в этой области проводили с помощью методов оптической, трансмиссионной и микродифракционной электронной микроскопии. Тонкие фольги просматривали на электронном мик-

Технологические параметры режима сварки взрывом

Режимы сварки	α , град	γ^* , град	v_k , м/с	W_2 , МДж/м ²
I	3	10	4290	2,2
II	5	12	3570	3,2
III	15	22	1980	4,7
IV	20	27	1630	4,9

* γ — динамический угол соударения.

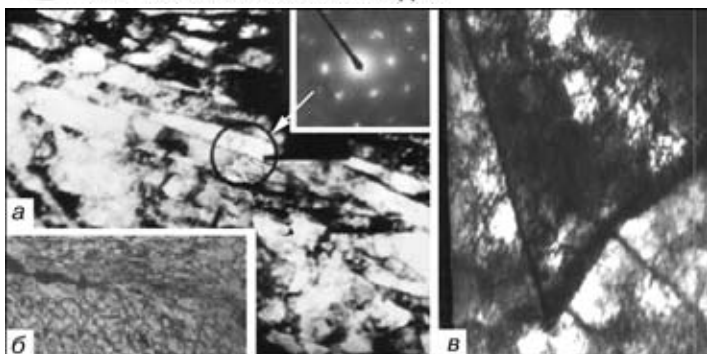


Рис. 1. Структура соединения никель–никель, выполненного сваркой взрывом при $\alpha = 3^\circ$: *a* — тонкая структура зоны сварки ($\times 15000$) с микродифракционной картиной рефлексов в радиальном направлении; *b* — общий вид зоны сварки ($\times 500$); *в* — пример формирующихся фрагментов с прямолинейными границами «ножевого» типа ($\times 20000$)

роскопе JEM-200СХ при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Установлено, что микроструктуры соединений, полученные на I и II режимах (см. таблицу), практически идентичны и характеризуются повышенным числом участков микронепровара (рис. 1). Наличие таких участков обычно вызывает уменьшение электрохимической гомогенности, что в свою очередь обуславливает снижение коррозионной стойкости контактной границы. Субструктура этих соединений неоднородна по размерам и ориентации зерен. Для нее характерно наличие внутри ячеек и в области субзеренных границ дислокаций весьма высокой объемной плотности (приблизительно $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) (рис. 1, *a*). Наблюдается также формирование четких границ «ножевого» типа с высокими углами разориентировки, составляющими около $11 \dots 12^\circ$ (рис. 1, *в*).

Наряду с равноосными ячейками образуются отдельные субструктурные элементы протяженной формы — полосы деформации, интерпретируемые как электронно-микроскопический эквивалент оптически наблюдаемых полос сдвига [8]. Согласно работе [9], различие в ресурсах пластичности сопряженных микрообъемов металла (с совершенной равноосной и полосовой структурами), а также релаксация значительного количества упругой энергии, накопленной в субграницах полосовых структур, мо-

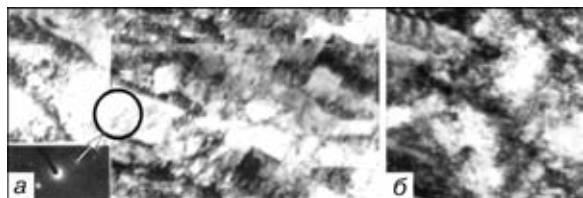


Рис. 2. Тонкая структура металла зоны сварки никеля (*a*, $\times 15000$) и отдельных ее участков (*b*, $\times 20000$), полученная сваркой взрывом при $\alpha = 15^\circ$ (стрелкой показан участок, с которого была снята микродифракционная картина рефлексов)



Рис. 3. Тонкая структура зоны сварки никеля (*a*), полученная сваркой взрывом при $\alpha = 20^\circ$, и соответствующая микродифракционная картина рефлексов (*b*), $\times 15000$

гут привести к разрушению соединения при его нагружении. В связи с перечисленными выше причинами I и II режимы не могут быть рекомендованы для практического применения. Повышение энергии пластической деформации при использовании III режима вызвало понижение объемной плотности дислокаций примерно на порядок (рис. 2). В этом случае так же, как и при сварке на I и II режимах, наблюдается формирование в зоне сварки направленных полосовых структур, однако перераспределение дефектов кристаллической решетки внутри полос приводит к образованию более равноосных ячеек. При этом разориентировки ячеек внутри полос и смежных полосовых образований между собой невелики — в пределах малоугловых разориентировок (приблизительно до 2°).

Таким образом, увеличение значений W_2 «смягчает» структуру контактной зоны в связи с исчезновением четкой направленности границ относительно деформирующего напряжения, что проявляется в виде «размытых» полосовых структур, фрагментации внутренних объемов полос, уменьшения объемной и приграничной плотности дислокаций. В результате структурное состояние зоны сварки существенно не отличается от структуры основного металла. Для соединений, полученных на IV режиме, характерно, с одной стороны, наличие равноосных центров рекристаллизации, с другой, существенное изменение тонкой структуры зоны сварки в сторону увеличения объемной доли полос деформации: ячеистая неравноосная структура, превалирующая при III режиме, с увеличением W_2 «вырождается» в тонкие удлиненные пакеты полосовых образований при резком снижении плотности дислокаций внутри полос. Таким образом, структура металла зоны сварки весьма существенно отличается от структуры основного металла, как по плотности дислокаций, так и по форме структурных элементов и углу их разориентировки (рис. 3).

Выявленные детали субструктуры границы контакта соединений, полученных на различных режимах сварки, позволили выявить характер деформационных процессов, происходящих в этой зоне. Высокая плотность дислокаций, нерегулярность структурных границ, нечеткая их ориентация, а также фрагментация субструктуры с формированием дисперсных и вытянутых ячеек в случае использования I и II режимов указывают на то, что роль термической активации в движении дислокаций незначительна. Фрагментация структуры, сопровождающаяся формированием значительно разориентированных границ, обусловлена, по всей вероятности, превалированием процессов деформации в ряду деформация–релаксация. Кроме того, характер структуры металла зоны сварки свидетельствует о том, что возможности релаксационных процессов в результате движения индивидуальных дислокаций (трансляционных форм пластической деформации) исчерпаны. Таким образом, в материале создается неоднородное напряженное состояние, обуславливающее релаксацию внутренних напряжений с помощью разворота

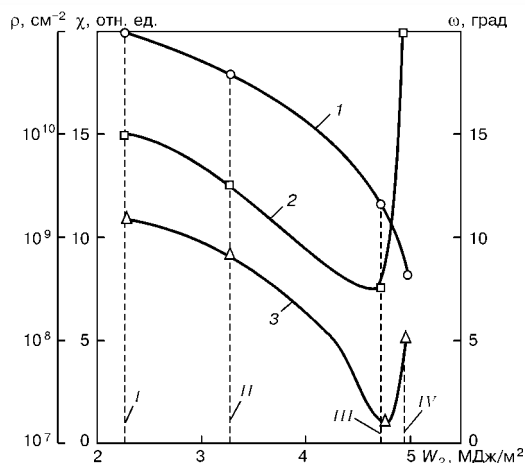


Рис. 4. Влияние энергии пластической деформации W_2 на тонкую структуру никеля на контактной границе: 1 — плотность дислокаций; 2 — коэффициент формы (отношение длины субзерна к его ширине) χ ; 3 — угол разориентировки субструктурных границ ω ; I–IV — режимы сварки (см. таблицу)

смежных микрообъемов. Структурным проявлением подобного механизма релаксации является активная фрагментация с формированием четко направленных высокоугловых «ножевых» границ. Образование наблюдаемых полосовых структур можно связать, по всей вероятности, с эффектом потери механической устойчивости и коллективными формами движения дефектов кристаллической решетки. Равноосная форма субзерен с небольшим углом разориентировки и нечеткое проявление полосовых структур в случае сварки на III режиме (см. рис. 2, б) свидетельствуют об увеличении влияния термоактивированных форм перераспределения дефектов кристаллической решетки, которые происходят в основном по механизму полигонизации. Образование структуры при резком снижении плотности дислокаций внутри полос в случае использования IV режима можно объяснить значительным превалированием процессов термической релаксации над процессами деформации (упрочнения) металла в зоне сварки. Таким образом, выявленные в результате проведенного анализа особенности пластического течения металла в контактной зоне свидетельствуют о том, что при сварке происходят два конкурирующих процесса — деформационное упрочнение и разупрочнение. Упрочнение, обусловленное высоким уровнем пластической деформации, характеризуется накоплением дефектов кристаллической решетки, фрагментацией структуры и т. п.

Степень и механизмы разупрочнения определяются большей частью следующими уровнями температур в контактной зоне: сравнительно невысокие, явно недостаточные для сколько-нибудь существенного термического разупрочнения (I, II режимы); достаточные для развития релаксации по полигонизационному механизму и обеспечивающие равновесное состояние структуры контактной зоны (III

режим); довольно высокие, способствующие развитию таких термически активируемых процессов, как рекристаллизация (IV режим). При оптимизации режимов соударения с целью прогнозирования, например, усталостной прочности необходимо учитывать как процессы упрочнения, так и разупрочнения. По-видимому, оптимальным можно считать режим, обеспечивающий энергетический баланс между процессами упрочнения и релаксации внутренних напряжений.

Выводы

1. Разработаны приемы дозирования энергии, затрачиваемой на пластическое деформирование и ограничения температурного режима сварки.
2. Установлено, что времени сварки взрывом, исчисляемом микросекундами, достаточно для протекания термоактивированных процессов релаксации напряжений в контактной зоне, обеспечивающих устранение полосовых структур и тем самым улучшающих пластические свойства сварных соединений.
3. Оптимальный диапазон температурного режима сварки может быть установлен за счет дозирования энергии пластической деформации путем варьирования динамического угла соударения в процессе сварки при фиксированной скорости соударения. Последнее обеспечивает оптимальное соотношение скоростей протекания процессов упрочнения и релаксации структуры.

1. Дерibas А. А., Захаренко Н. Д. О поверхностных эффектах при косом соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 1974. — № 3. — С. 409–421.
2. Исследование процесса волнообразования при сварке взрывом / Н. Д. Бусалаев, М. И. Глазков, В. Р. Лозовская и др. // Технология производства сварных конструкций: Межвуз. темат. сб. науч. тр. — Куйбышев: Б. и., 1980. — С. 66–75.
3. Седых В. С., Соинов А. И. Расчет режимов сварки взрывом разнородных металлов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Сб. науч. тр. — Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1991. — С. 1–13.
4. Ядевич А. И. Исследование и разработка слоистых композиций на основе инструментальных сталей, изготовленных методом высокоскоростной деформации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 1980. — 20 с.
5. Explosion welding criteria / V. G. Petushkov, V. A. Simonov, V. S. Sedykh, Yu. I. Fadeenko / Ed. B. E. Paton. — Harwood: Harwood Acad. publ. 1995. — Vol. 3. — Pt. 4. — 127 p. — (Welding and Surfacing Reviews).
6. Степанов Г. В. Уругоупругое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. — Киев: Наук. думка, 1979. — 268 с.
7. Petushkov V. G., Fadeenko Yu. I. Welding stress relief by explosion treatment. — N.-Y.: Backbone publ. co., 1999. — 179 p.
8. Класен-Неклюдова М. В. Механическое двойникование кристаллов. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 120 с.
9. Рыбин В. В. Физическая модель явления потери механической устойчивости и образования шейки // Физика металлов и металловедение. — 1977. — 44, № 3. — С. 623–632.

Investigations were performed to reveal the interrelation between the energy parameters of collision and quality of joints in explosion welding. It was established that the formation of a final structure of the zone of welding, on which their strength and ductility depend, is determined mainly by mutual effect of two competing mechanisms, i.e. strain strengthening and relaxation (recovery). Recommendations are issued for selection of welding conditions providing optimum energy balance in the proceeding processes of strengthening and relaxation of structure.

Поступила в редакцию 19.02.2002