



## УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ

Чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**, **А. А. КАЙДАЛОВ**, д-р техн. наук, **Д. П. НОВИКОВА**, канд. техн. наук,  
**И. Л. БОГАЙЧУК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**М. КЕСНЕРС**, инж. («Aplis», г. Рига, Латвия)

Рассмотрены вопросы воздействия ультразвуковых упругих колебаний на материалы. Предложена обработка свариваемого изделия ультразвуковыми колебаниями в широкой полосе частот. Установлена возможность формирования в результате такой обработки более мелкозернистой структуры как в металле сварного шва, так и в зоне термического влияния при дуговой сварке углеродистой стали обыкновенного качества СтЗсп.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, воздействие ультразвуковых колебаний, кристаллизация, сварной шов, зона термического влияния, остаточные напряжения, структура металла

Сварные соединения обычно характеризуются крупнозернистой структурой металла шва, образующейся при сравнительно медленном остывании сварочной ванны, и наличием остаточных напряжений, создающих опасность коробления и трещинообразования. Цель работы состоит в исследовании структуры металла сварного соединения, подвергнувшегося воздействию широкополосных ультразвуковых колебаний в процессе образования шва. Известно, что чем больше образуется центров кристаллизации в расплаве и чем меньше линейная скорость роста кристаллов, тем более мелкозернистой будет структура металла. Процесс кристаллизации зависит от температурного поля, а также воздействия знакопеременного давления, обусловленного распространением в расплаве упругой акустической волны звукового и ультразвукового диапазона. Согласно традиционным представлениям, слабые поля ультразвукового воздействия не должны заметно влиять на вязкость и другие кинетические свойства жидкости. Если энергия поля в расчете на атом на несколько порядков меньше тепловой энергии  $kT$  (где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура), то оно не окажет заметного воздействия на элементарные акты процессов переноса. Очевидно такие поля не влияют на вязкость газов и простых жидкостей, но в зернистых структурах они могут влиять на перемещения границ зерен. При ультразвуковой обработке расплава происходит измельчение или разрушение, а также деформация структурных образований жидкости. Кроме того, изменяются основные физико-химические свойства расплавов металлов: вязкость, по-

верхностное натяжение на границе расплав — твердая фаза, распределение температуры, диффузионные и дегазационные процессы, капиллярный эффект. Твердый металл получается более мелкозернистым, если расплав был «озвучен» перед кристаллизацией.

К настоящему времени в лабораториях проведено большое количество работ [1–4], в которых выявлены эффекты воздействия упругих колебаний на вещество, однако их практическое использование тормозится отсутствием высокоэффективного оборудования и методов контроля акустических параметров при введении колебаний в изделие. Пока неясен механизм разрушения ультразвуковыми волнами объектов структуры в расплаве или «квазимолекул» соединений типа  $FeSi$ , вследствие чего многие технологические процессы ультразвукового воздействия остаются еще недостаточно разработанными. В промышленном масштабе сейчас используют лишь ультразвуковую очистку, резку и сварку.

При обработке сварочной ванны мощными (плотность мощности более  $1 \text{ Вт/см}^2$ ) упругими механическими колебаниями звукового и ультразвукового диапазона расплав обычно «озвучивается» на одной фиксированной частоте через присадочную проволоку специальным инструментом или с помощью вибрации изделия. Для снижения остаточных напряжений сварная конструкция после сварки может подвергаться обработке упругими колебаниями.

В отдельных случаях частоту упругих колебаний («озвучивания»), применяемых для обработки сварных конструкций, выбирают равной одной из резонансных частот этой конструкции, однако чаще применяют частоты, далекие от резонанса. В то же время резонанс обеспечивает большую амплитуду колебаний при малой затрате пот-

ребляемой энергии, что очень важно для крупногабаритных изделий. В зависимости от свойств «озвучиваемого» металла энергия, необходимая для возбуждения колебаний определенной величины при резонансе и вне его, может отличаться на несколько порядков. Эту разность характеризует добротность  $Q$  колебательной системы, которая показывает во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вне резонанса при одинаковой возбуждающей мощности. Для разных металлов добротность имеет разные значения. Стали в среднем имеют  $Q = 8000$ , сплавы титана 21000, медь 6300, латунь 13000, сплавы алюминия 10000.

При повышенных температурах добротность существенно ниже, при остывании она повышается. Но даже при повышенных температурах значение  $Q$  составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч в зависимости от свойств металла. При изменении температуры и кристаллической структуры меняется и резонансная частота. Чтобы добиться постоянной амплитуды обработки необходимо, чтобы частота обработки следовала изменению резонансной частоты. Конструкция (деталь) достаточно сложной формы имеет множество резонансов с разными частотами. Обычно детали состоят из ряда взаимно соединенных элементарных геометрических фигур, в которых возникают различные типы упругих колебаний (рис. 1). Кроме основных типов, возможны также крутильные колебания, колебания высших гармоник и др. В деталях сложной конфигурации эти колебания будут происходить одновременно, их параметры могут меняться в зависимости от состояния детали и внешних условий как по частоте, так и по амплитуде. При возбуждении упругих колебаний только на одной из этих частот (даже если четко следовать всем изменениям резонанса) колебания детали будут происходить только в одном направлении. Влияние на процессы, происходящие в детали, будет ограничено, не все ее части будут подвергаться обработке. Все процессы в этих частях будут происходить спонтанно и конечный результат ультразвуковой обработки не будет прогнозируем.

Таким образом, чтобы обработать все части свариваемой детали одинаково, необходимо возбуждать упругие колебания в широком частотном спектре. В идеале, по-видимому, надо создавать «белый шум» с бесконечным частотным спектром.

При широкополосной ультразвуковой обработке свариваемой детали во всех ее частях будут возбуждаться упругие резонансные колебания, которые каждая отдельная часть детали передает в сварочную ванну. В последней возникает колебательный процесс с широким частотным спектром. Параметры этого процесса все время будут меняться, так как в результате последовательной

сварки отдельных частей меняется конфигурация жесткой конструкции, что вызывает изменение резонансных частот. В ванне в таком случае не образуются застойные зоны высокого давления и разрежения, ведущие к неравномерности процесса кристаллизации. Будет происходить «перемешивание» частотного спектра в ванне, что создает условия для равномерной кристаллизации расплава и образования мелкокристаллической структуры металла сварного шва. В металле ЗТВ вокруг сварочной ванны происходят те же структурные преобразования, и в условиях «озвучивания» при остывании там также должно происходить образование мелкозернистой структуры металла.

Экспериментальные исследования проводили в условиях дуговой сварки пластин размером 125×298×6 мм из стали СтЗсп. Для сварки использовали электроды Oerlikon Special (тип E382B12H10 по EN499). Шов № 1 выполняли электродом диаметром 2,5 мм с силой сварочного тока 50...55 А, шов № 2 — электродом диаметром 3,25 мм с силой тока 75...80 А. Каждый шов длиной 50 мм сваривали в два прохода и потом, во избежание влияния последующих манипуляций, сваренный участок образца отрубали. Шов № 1 сваривали без ультразвуковой обработки и сваренный участок отрубили после полного остывания на воздухе. Швы № 2, 3 были получены с воздействием широкополосных ультразвуковых колебаний от специально разработанного генератора (рис. 2). Ультразвуковую обработку прерывали на время зачистки шва после первого прохода и продолжали затем до полного остывания сварного образца на воздухе. Потребляемая генератором колебаний мощность не

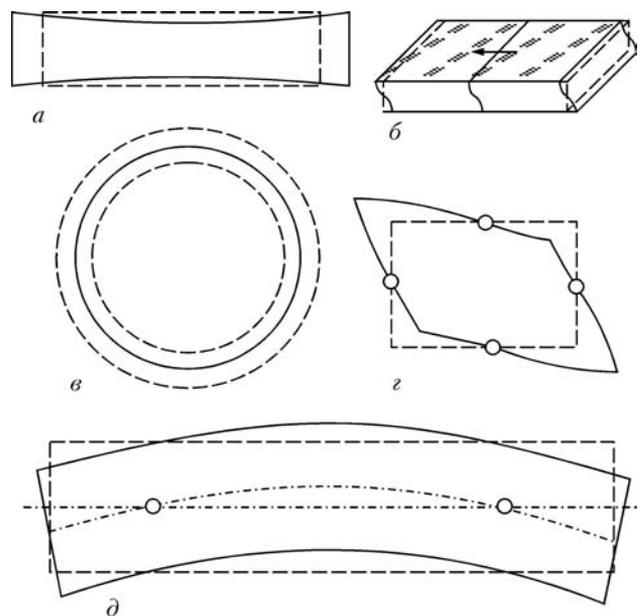


Рис. 1. Схемы основных типов резонансных упругих колебаний: *a* — продольные колебания стержня; *b* — колебания сдвига по толщине пластины; *v* — радиальные колебания диска; *z* — колебания сдвига по контуру; *d* — колебания изгиба по длине и ширине



Рис. 2. Внешний вид генератора широкополосных звуковых и ультразвуковых колебаний для обработки свариваемых изделий

превышала 300 Вт, диапазон возбуждаемых частот составлял 40 Гц...40 кГц. При обработке шва № 2 амплитуда колебаний в диапазоне 40 Гц...20 кГц была выше, чем в диапазоне 20...40 кГц. При обработке шва № 3, наоборот, амплитуда колебаний была выше в диапазоне 20...40 кГц. Колебания вводили путем контакта ультразвуковой головки с плоской лицевой поверхностью свариваемых пластин на расстоянии около 60 мм от плоскости симметрии сварного шва.

Было проведено металлографическое исследование влияния широкополосной звуковой и ультразвуковой обработки на структуру и свойства сварных соединений. Шлифы для исследований изготавливали по стандартной методике с применением алмазных паст. Структуру выявляли химическим травлением образцов в нитале, исследования проводили на оптическом микроскопе «Неофот-32». Замеры микротвердости осуществляли микротвердомером М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 500 г. Балл зерна определяли путем визуального сравнения с эталонами шкал по ГОСТ 5639–82.

Макроструктурный анализ показал, что в сварных соединениях отсутствовали дефекты типа трещин, пор, непроваров и т. п. Выявлено, что в исходном после сварки состоянии (швы № 1) ширина литых кристаллитов в центральной части шва больше, чем в обработанных ультразвуком в процессе сварки соединениях (швы № 2 и 3) и составляет соответственно 220, 150 и 100 мкм (рис. 3). В корневой части литого металла шва также отмечено измельчение зеренной структуры при воздействии ультразвуковых колебаний.

В микроструктуре металла швов (центральная часть) присутствуют бейнит, перлит и полигональный феррит, располагающийся по границам литых аустенитных зерен. При воздействии ультразвуковых колебаний на кристаллизующийся металл ширина пластин феррита существенно уменьшается — от 20...30 (исходное состояние после сварки) до 10...20 и 6...10 мкм. Микротвердость на этом участке соединения в исходном состоянии равна HV 1580...1650 МПа. Микротвердость металла швов № 2 и 3 возрастает до значений 1650...1810 и 1720...1980 МПа соответственно, что можно объяснить уменьшением доли

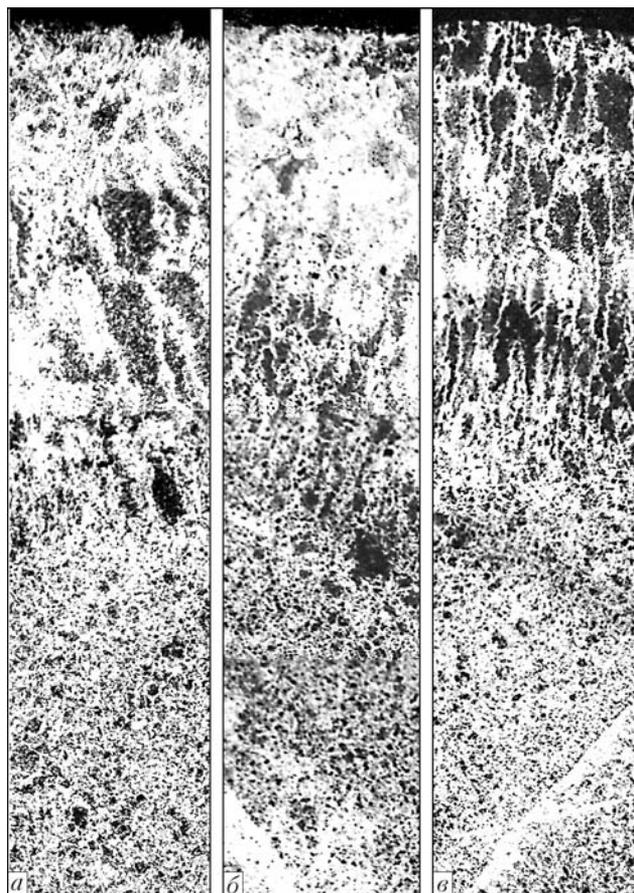


Рис. 3. Микроструктура металла центральной части соответственно сварного шва № 1–3 (а–в),  $\times 32$

полигонального феррита и увеличением количества бейнитной составляющей структуры.

Зеренная структура феррита, перлита и бейнита корневой части швов измельчается от исходного 6 до 7 и 8 баллов в швах № 2 и 3 соответственно (рис. 4). Микротвердость смеси зеренных структур в исходном состоянии равна 1720...1770 МПа. При воздействии ультразвука в корневой части металла шва микротвердость возрастает до 1790 у шва № 2 и 1840...1980 МПа у шва № 3, что также связано с уменьшением доли ферритной, перлитной составляющих структуры и увеличением выделения бейнита.

В металле ЗТВ соединений на участке перегрева присутствует структура смеси перлита, бейнита, выделений феррита по типу структуры Видманштетта и в виде тонких прожилок по границам зерен перлита и бейнита. Под воздействием ультразвуковых колебаний наблюдается измельчение

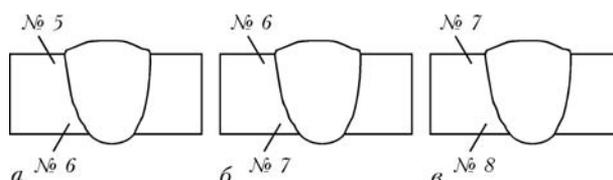


Рис. 4. Схема поперечного разреза сварных соединений и балл зерна в металле ЗТВ соответственно сварного шва № 1–3 (а–в)

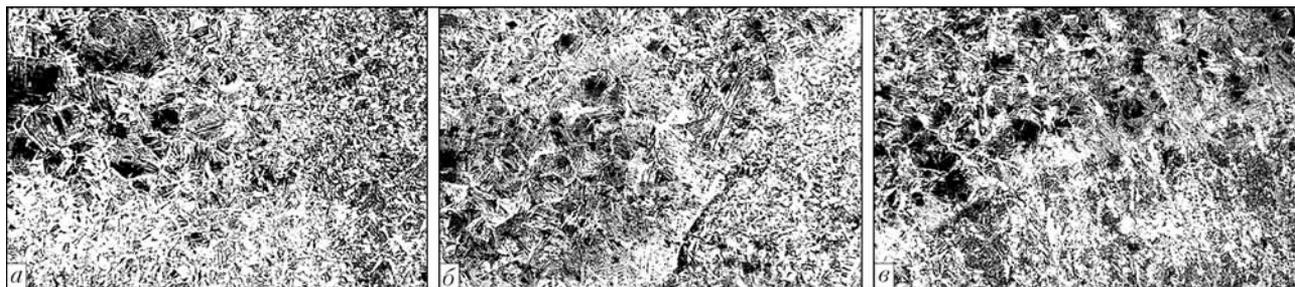


Рис. 5. Микроструктура металла ЗТВ центральной части сварных швов № 1–3 (а–в),  $\times 100$

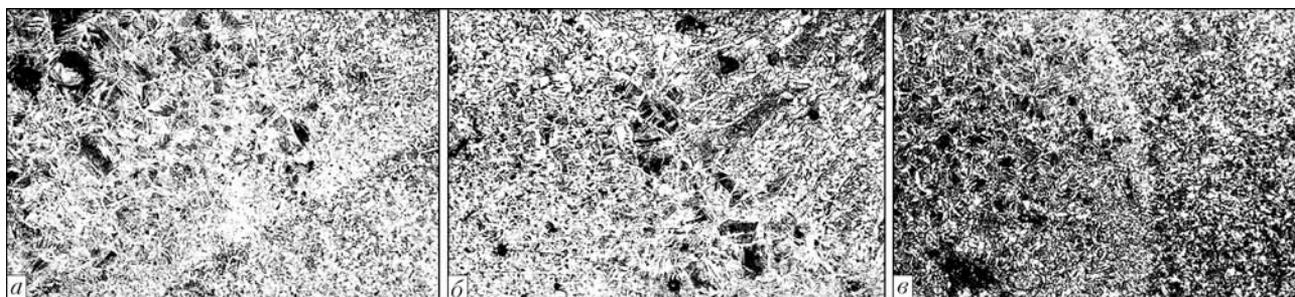


Рис. 6. Микроструктура металла ЗТВ корневой части сварных швов № 1–3 (а–в),  $\times 100$

структуры металла ЗТВ как на уровне центральной части шва по толщине сечения, так и на уровне корневой части шва (рис. 5 и 6).

Микротвердость металла ЗТВ для швов № 1–3 соответственно равна 1230...1450, 1250...1510 и 1610 МПа на уровне центральной и 1510...1650, 1510...1650 и 1790...1820 МПа на уровне корневой части швов.

Таким образом, широкополосная ультразвуковая обработка стали во время сварки плавлением приводит к улучшению структуры металла шва и ЗТВ. В металле шва уменьшается ширина литых кристаллов в центральной части, измельчаются равноосные зерна в корневой части и снижается толщина прослоек феррита. В металле ЗТВ структура металла также измельчается.

Разработанный способ широкополосной ультразвуковой обработки, возможно, может быть

применен не только при большинстве способах сварки плавлением, но и создании мелкокристаллической структуры металлических изделий при других видах металлообработки, при которых происходят фазовые превращения кристаллической структуры металла, например, при литье, закалке, наплавке, упрочнении поверхности, нанесении покрытий и др.

1. *Нерубай М. С.* Применение ультразвука при обработке жаропрочных и титановых сплавов // *Машиностроение*. — 1978. — № 8. — С. 21–23.
2. *Кравченко В. А., Нерубай М. С., Штриков Б. Л.* Суперфиниширование деталей подшипников с применением ультразвука // *Вестн. машиностроения*. — 1978. — № 10. — С. 67–70.
3. *Марков А. И.* Ультразвуковая обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1980. — 236 с.
4. *Азизбеян Л. А., Нерсиян Э. Ц., Оганесян Д. Г.* Повышение качества сварного шва методом ультразвуковой волновой обработки // *Науч. тр. АрмСХА. Сер. Технические науки*. — 1996. — Вып. 1. — С. 180–184.

Problems of ultrasonic elastic vibration influence on materials are discussed. Processing of a welded item by ultrasonic vibrations in a wide frequency band is proposed. Formation of a more fine-grain structure as a result of such processing is shown in the weld and HAZ in arc welding of ordinary carbon steel St3sp.

Поступила в редакцию 25.07.2006