

**СРАВНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ  
МЕХАНО-ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК  
ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ**

*А.С. СМИРНОВА<sup>1</sup>, И.В. ВЛАСОВ<sup>1</sup>, Р.В. СТАНКЕВИЧ<sup>2</sup>, А.В. ЯКОВЛЕВ<sup>2</sup>, Ю.И. ПОЧИВАЛОВ<sup>1</sup>,  
Д.В. ВАЛУЕВ<sup>3</sup>, С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>2</sup>Томский политехнический университет

<sup>3</sup>Юргинский технологический институт ТПУ

E-mail: roman3014@mail.ru

Сварка металлических материалов является одной из наиболее распространенных и изученных технологических операций. Однако для сварных соединений существует значительное количество проблем, связанных, например, с низкой усталостной долговечностью и ударной вязкостью материала сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Исходная структура основного металла, как правило сформированная в ходе многоступенчатой термообработки и/или контролируемой горячей прокатки под требуемые условия эксплуатации, деградирует в результате сильного и неоднородного (локализованного) нагрева в процессе сварки.

Одним из эффективных способов повышения механических (прежде всего, усталостных) свойств деталей машин является поверхностное пластическое деформирование. Пластическая деформация поверхностного слоя увеличивает твердость, снижает шероховатость, обуславливает формирование сжимающих напряжений, которые могут заметно повышать усталостную долговечность [1-3]. Простым и доступным методом поверхностного пластического деформирования является ультразвуковая обработка (УЗО). Однако она приводит к существенной модификации структуры лишь в небольшом по толщине поверхностном слое. В этом случае, при фрикционном и коррозионном износе поверхностного слоя, дальнейшее распространение усталостных трещины вглубь материала не будет сдерживаться, а разрушение детали будет происходить с прежней интенсивностью.

Развитием метода ультразвукового наноструктурирования поверхностных слоев является применение высокочастотного электрического поля, меняющего характер экранирования атомов электронным газом и их подвижность [2]. Это может существенным образом влиять на развитие процессов массопереноса. Таким образом, основанная на данном принципе импульсная механо-электрофизическая обработка (ИМЭО) реализуется за счет совмещения двух ключевых механизмов: а) формирования зон кривизны, что достигается приложением импульсного ударного воздействия, стимулирующего распространение упругих волн по всему объему (всей толщине) металла сварного шва; б) возбуждение кристаллической решетки за счет приложения высокочастотного импульсного электрического поля, стимулирующего распространение потоков деформационных дефектов на различных масштабных уровнях, и в результате, способствующих модификации структуры металла шва и ЗТВ далеко за пределами поверхностного слоя.

Выбор в качестве объекта исследования трубной стали 17Г1С обусловлен её широким спектром применения, в том числе для изготовления конструкций с помощью сварочных технологий. Данная сталь также активно применяется для изготовления труб газопроводов, что повышает актуальность вопроса увеличения срока службы неразъемных соединений. Так как ИМЭО основана на ультразвуковой ударной послесварочная обработке (УУПО), то в данной работе проведено сравнение этих двух способов воздействия.

Целью данного исследования было сравнение эффективности ультразвуковой ударной и импульсной механо-электрофизической обработок сварных соединений трубной стали 17Г1С на модификацию структуры и свойств.

В ходе проведенных исследований было выявлено, что сталь в состоянии поставки имеет феррито-перлитную структуру со слабо выраженной полосчатостью. В процессе формирования неразъемного соединения сварной шов стали 17Г1С приобретает дендритную

структуру с преимущественной ориентацией структурных элементов в направлении к центру шва, что обусловлено быстрым теплоотводом. Микротвёрдость сварного шва заметно превосходит таковую для основного металла. По мере удаления от шва происходит её снижение, и на расстоянии 15-20 мм от его центра значения микротвёрдости достигают минимального уровня ( $H_{\mu}=1.5\pm 0.12$  ГПа) (рис. 1а). На удалении 30 мм микротвёрдость постепенно возрастает до уровня, соответствующего материалу без шва ( $H_{\mu}=1.67\pm 0.03$  ГПа). Проводимые с поверхности УУПО и ИМЭО данной зоны не выявили признаков развития пластической деформации по поперечному сечению.

В ЗТВ после УУПО основное воздействие концентрируется в поверхностном слое, что выражается в интенсивной пластической деформации ферритных зёрен на глубину не более 100 мкм. Микроструктура образца после ИВЭО подобна таковой для стали после УУПО, однако визуально, следы развития пластической деформации как в поверхностном слое, так и в целом по поперечному сечению проявляются в меньшей степени. Это подтверждают более низкие значения микротвёрдости.

В сварном шве после УУПО микротвёрдость в поверхностном слое повысилась до  $H_{\mu}=4.25\pm 0.1$  ГПа; после ИМЭО чуть меньше - до  $H_{\mu}=4.0\pm 0.1$  ГПа (рис. 1,б кривые 2 и 3, соответственно). На глубине более 500 мкм значения микротвёрдости после обоих типов обработки снижаются до значений, соответствующих необработанному сварному шву (кривая 1). Аналогичная картина наблюдается и на расстоянии 17 мм от центра шва (рис. 1,в). При этом глубина модификации структуры после УУПО выше, поскольку микротвёрдость изменяется даже в сердцевине образца, чего не наблюдается в результате ИМЭО.

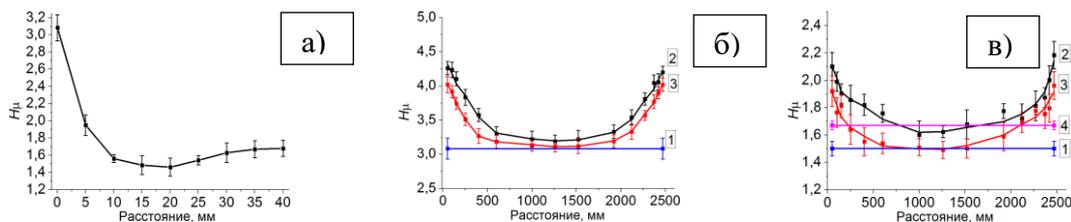


Рисунок 1 – Графики изменения микротвёрдости: (а) измерение от центра шва вдоль оси образца (в продольном направлении); измерение по поперечному сечению: (б) зона сварного шва; (в) ЗТВ - на удалении 17 мм от центра шва; 1) необработанный сварной шов; 2) шов после УУПО; 3) шов после ИМЭО; 4) сталь в состоянии поставки (без шва)

Таким образом, ИМЭО, в сравнении с УУПО, приводит к меньшему упрочнению и глубине проработки поверхностного слоя, однако добавление электрофизического воздействия может увеличить однородность его структуры и равномерность распределения внутренних напряжений. Этот аспект будет исследован в дальнейших работах при испытаниях на статическое, циклическое и ударное нагружения.

**Благодарность:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00679.

#### Список литературы

1. Панин В.Е., Панин А.В. Проблемы мезомеханики прочности и пластичности наноструктурных материалов // Изв. вузов, Физика. - 2004. – Т. 47, № 8. – С. 5–17.
2. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В., Почивалов Ю.И. Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий – эффективный способ упрочнения современных конструкционных и инструментальных материалов // ФММ. – 2007. – Т.104, № 6. – С. 1–11.
3. Власов И.В., Мухорьянов Р.Б. Исследование влияния ультразвуковой обработки на структуру и механические свойства стали 12Х1МФ // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: труды конференции. 2015. – С. 57–60.