

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

4. Шигаев Т. Г. Приемы модулирования сварочного тока и устройства для их осуществления (обзор) / Т. Г. Шигаев // Автоматическая сварка. – 1983. – № 8. – С. 51–55.

5. Коваленко В. С. Металлографические реактивы : справочник / В. С. Коваленко. – М. : Металлургия, 1973. – 112 с.

6. Пустовойт С. В. Наукові основи та технічні засоби підвищення продуктивності імпульсного ручного дугового зварювання : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Пустовойт. – К. : ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2006. – 18 с.

УДК 621.791.927.5

**В.П. Иванов**, канд. техн. наук

**Е.В. Лаврова**, канд. техн. наук

**Н.А. Солидор**, канд. техн. наук

**Ф.В. Моргай**, аспирант

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО СЛОЯ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ С УПРАВЛЯЕМЫМ МЕХАНИЧЕСКИМ ПЕРЕНОСОМ

**В.П. Иванов**, канд. техн. наук

**О.В. Лаврова**, канд. техн. наук

**Н.А. Солидор**, канд. техн. наук

**Ф.В. Моргай**, аспирант

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ КОРОЗІЙНОСТІЙКОГО ШАРУ СТРІЧКОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ З КЕРОВАНИМ МЕХАНІЧНИМ ПЕРЕНОСЕННЯМ

**Vitaliy Ivanov**, PhD in Technical Sciences

**Yelena Lavrova**, PhD in Technical Sciences

**Nataliya Solidor**, PhD in Technical Sciences

**Fedor Morgay**, PhD student

SHEI "Priazovskiy State Technical University", Mariupol, Ukraine

### STUDY OF ELECTRIC ARC OVERLAYING PROCESS OF CORROSION- RESISTANT LAYER BY STRIP ELECTRODES WITH A CONTROLLED MECHANICAL TRANSFER

*Разработана технология наплавки коррозионностойкого слоя ленточным электродом с принудительным механическим переносом электродного металла, позволяющая обеспечить повышения качества наплавленной поверхности и стабилизацию зоны проплавления основного металла. Исследованы макро- и микроструктуры, а также характер изменения микротвердости наплавленного малоуглеродистого и коррозионностойкого металла.*

**Ключевые слова:** ленточный электрод, управляемый перенос электродного металла, микроструктура, коррозионностойкий слой, микротвердость, электродуговая наплавка.

*Розроблено технологію наплавлення корозійностійкого шару стрічковим електродом з примусовим механічним перенесенням електродного металу, що дозволяє забезпечити підвищення якості наплавленої поверхні і стабілізацію зони проплавлення основного металу. Досліджено макро- і микроструктури, а також характер зміни микротвердості наплавленого малоуглеводного і корозійностійкого металу.*

**Ключові слова:** стрічковий електрод, кероване перенесення електродного металу, микроструктура, корозійностійкий шар, микротвердість, електродугове наплавлення.

*Was developed the technology for overlaying of corrosion-resistant layer by the strip electrode with forced mechanical transfer of electrode metal, which allows to improve the overlaid surface quality and the area penetration zone stabilization of the base metal. The macro- and microstructure, as well as the behavior of the microhardness of the mild and corrosion-resistant deposited metal were investigated.*

**Key words:** strip electrode, controlled transfer of electrode metal, microstructure, corrosion-resistant layer, microhardness, electric arc overlaying.

**Постановка проблемы.** Преимущества технологии наплавки под флюсом ленточным электродом дают основания считать ее одним из наиболее оптимальных способов в области изготовления, восстановления и упрочнения деталей оборудования энергетического и химического машиностроения.

В отличие от наплавки проволочным электродом, процесс наплавки под флюсом лентой более чувствителен к выбору: оптимальных параметров режима (ток и скорость наплавки, напряжение на дуге, вылет); наплавочных материалов, особенно флюса (его плотность, вязкость, электропроводность) и характера его распределения по ширине сварочной ванны; к воздействию магнитного поля (эффект «магнитного дутья»); к расположению наплавляемой поверхности относительно горизонта; угла наклона ВАХ источника питания и т. д.

Поэтому одной из проблем обеспечения качества наплавленного слоя при использовании ленточного электрода является управление процессом переноса электродного металла с торца ленточного электрода в ванну. Разработка оборудования и технологии, обеспечивающих управление процессом переноса, является насущной задачей совершенствования технологии электродуговой наплавки.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Проблеме переноса электродного металла при электродуговой сварке и наплавке посвящено большое количество исследований.

Для повышения эффективности процесса наплавки, а также для стабилизации условий горения дуги на торце ленты, проплавления основного металла и снижения влияния «магнитного дутья» на формирование валика предложен способ наплавки несколькими электродами с изменением соотношения токов в электродах [1; 2], позволяющий регулировать уровень шлаковой ванны у каждого из электродов, управлять характером оплавления их торцов и поступлением электродного металла в сварочную ванну, формой и глубиной проплавления, а также долей участия основного металла.

Также предложен ряд способов, основная цель которых – увеличить тепловложение и объем расплавленного электродного металла в краевых зонах валика. Это достигается либо использованием комбинированного электрода (введением дополнительного электродного материала в виде проволоки или узкой ленты на боковых участках сварочной ванны), либо отбортовкой одной или двух кромок ленты, т. е. ее профилированием [3]. Использование составного ленточного электрода позволяет управлять тепло- и массопереносом по ширине сварочной ванны, характером процесса наплавки (соотношением дугового и шлакового процессов), условиями и производительностью плавления электродного и основного металла.

Управление переносом электродного металла также возможно за счет изменения сил поверхностного натяжения [3]. Этому вопросу посвящены работы В.И. Дятлова, А.А. Ерохина, А.Г. Потапьевского, В.В. Фролова, Н.Г. Дюргерова и др.

Как известно, сила поверхностного натяжения зависит от длины границы раздела фаз и коэффициента поверхностного натяжения. В этом случае, чем меньше значение  $\sigma_{\text{пл}}$ , тем мельче капли жидкости и вероятнее переход к мелкокапельному или струйному переносу металла. Однако для такого способа управления переносом электродного металла потребуются дополнительные затраты на материалы (введение активаторов и т. п.) и соответствующие изменения к основному металлу.

Повышение качества наплавляемых изделий за счет управления формированием валика при дуговой наплавке ленточным электродом. В ряде работ предложено повысить качество наплавленных изделий за счет использования управляющих магнитных полей [4].

Достаточно широкое распространение получил импульсно-дуговой процесс сварки, суть которого заключалась в использовании алгоритмов управления источником сварочного тока и процессом переноса электродного металла [5]. Поэтому в последнее вре-

мя большое внимание уделяется дуговой механизированной сварке с импульсным воздействием на процесс за счет импульсов тока от специальных источников (импульсно-дуговой процесс) или применения импульсной подачи электрода.

Импульсный характер подачи электрода оказывает существенное влияние на ток дугового процесса и, как следствие, скорость плавления электродной проволоки, вызывая их колебания.

Импульсная подача электрода позволяет существенно расширить диапазон значений рабочих токов и напряжения дуги, в том числе при наплавке с короткими замыканиями дугового промежутка. Частота коротких замыканий может быть увеличена в 3–5 раз по сравнению с непрерывной подачей электрода. Управляемый перенос электродного металла снижает в 1,8–2 раза его потери на угар.

Существующие механические устройства, устанавливаемые на подающих механизмах, несовершенны и не позволяют увеличить частоту импульсов подачи более 10 Гц [5]. Еще меньшую частоту импульсов может обеспечить периодическое изменение частоты вращения двигателя механизма подачи электрода. Весьма большую частоту импульсов подачи электрода (до 50 Гц) обеспечивают безредукторные механизмы с электромагнитным вибратором [6], однако они еще недостаточно надежны.

В то время как поперечные колебания создают инерционные силы, приводящие к увеличению ширины шва и повышенному разбрызгиванию расплавленного металла, при осевых изменениях скорости движения электрода влияние инерционных сил на поведение капли имеет иной характер.

При электродуговой наплавке ленточным электродом для регулирования теплоемкости переноса с торца ленточного электрода в сварочную ванну перспективным является использование принудительного механического переноса жидкого металла с торца ленточного электрода с помощью эксцентрикового механизма [7].

**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы.** Исследования свойств наплавленного слоя при механическом переносе проводилось, в основном, для малоуглеродистых низколегированных ленточных электродов, близких по составу основным материалам [7; 8]. В случае использования материалов лент, обладающих отличающимися теплофизическими свойствами, составом и структурой, параметры переноса электродного металла могут существенно варьироваться. Поскольку к оборудованию энергетического и химического машиностроения предъявляются повышенные требования по обеспечению требуемых уровней надежности и работоспособности, при использовании наплавки ленточными электродами подобные изменения могут влиять на качественные характеристики наплавленного слоя. Влияние параметров принудительного переноса на процесс наплавки аустенитным ленточным электродом на малоуглеродистый материал ранее не было исследовано.

**Цель статьи.** Главная цель этой работы состоит в исследовании влияния процесса наплавки с регулируемым принудительным механическим переносом электродного металла при наплавке под флюсом аустенитным ленточным электродом для разработки усовершенствованной технологии изготовления и восстановления деталей химического и энергетического машиностроения, таких как заготовки трубных решеток, детали запорной арматуры котлы и сосуды с внутренним коррозионностойким слоем и т. п.

**Изложение основного материала.** С использованием разработанного оборудования для импульсной подачи ленточного электрода [8] проведены исследования по определению влияния параметров процесса наплавки с колебаниями торца на структуру и свойства наплавленного на малоуглеродистую сталь аустенитного слоя.

После проведения наплавки (без колебаний и с колебаниями частотой 30, 50 и 70 Гц соответственно), были проведены металлографические исследования.

Качество формирования швов оценивалось в соответствии с ГОСТ 25616-83 путем внешнего осмотра. Металлографические исследования проводились на микроскопах МИМ-8, «Neophot-21» при увеличениях от  $\times 100$  до  $\times 2000$ .

Определение микротвердости определялось на приборе ПТМ-3 согласно ГОСТ 9450-76 путем вдавливания в отполированную поверхность образца алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  под нагрузкой 100 г.

Анализ рассматриваемых образцов позволил определить, что в зависимости от амплитуды принудительных колебаний слои наплавки варьируются по толщине. Макроструктура образцов позволяет сделать вывод о снижении неравномерности линии проплавления при увеличении частоты до  $50 \text{ с}^{-1}$ . При дальнейшем увеличении частоты разброс значений глубины проплавления вдоль линии сплавления имел тенденцию к некоторому увеличению. При этом наиболее равномерное проплавление имеет образец с частотой колебания электрода  $50 \text{ с}^{-1}$ , который характеризуется симметричной зоной термического влияния и отсутствием несплошностей, а основа имеет гомогенную мелкозернистую макроструктуру. Это подтверждается измерением микротвердости рассматриваемых образцов (рис. 1).

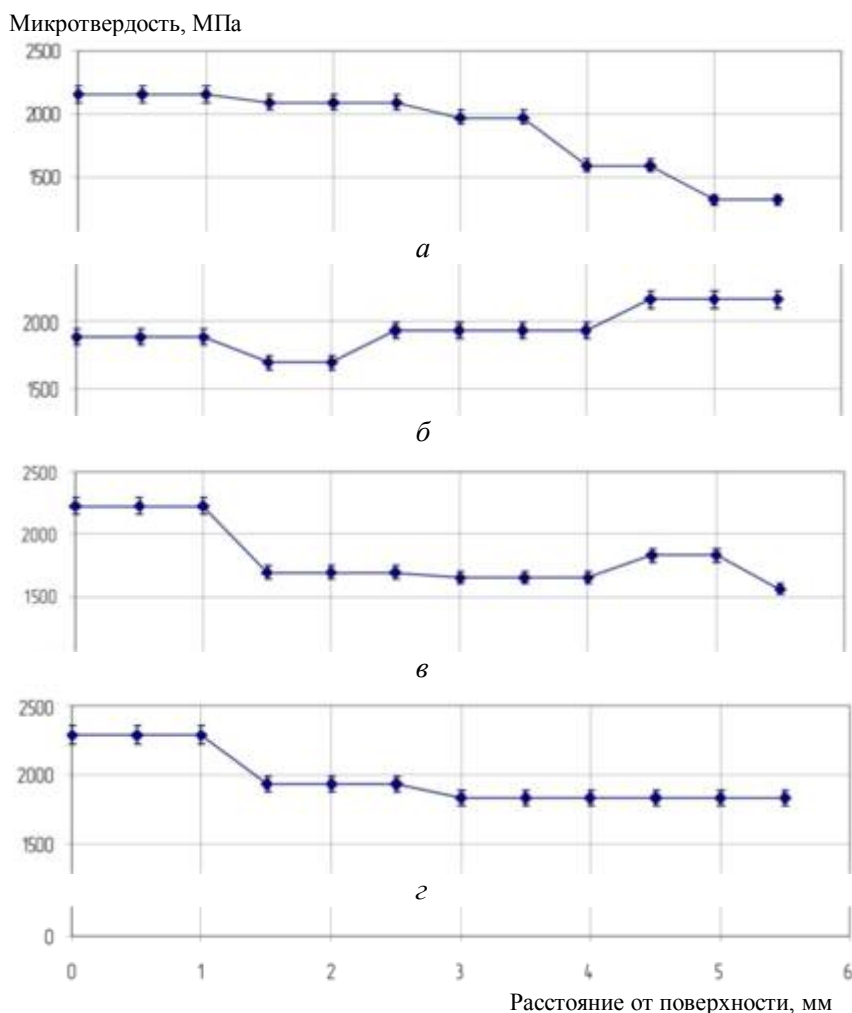


Рис. 1. Распределение микротвердости по глубине наплавленного металла НЛ-08А на ВСтЗпс: а – без принудительных колебаний; б – частота колебаний  $30 \text{ с}^{-1}$ ; в – частота колебаний  $70 \text{ с}^{-1}$ ; г – частота колебаний  $50 \text{ с}^{-1}$

Исследование микроструктуры образцов также свидетельствует о неоднородности наплавленного металла с принудительным переносом металла в интервале частот  $0-40$  и  $60-70 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2, а–г). Так, в образце 2, а в наплавленном металле структура

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

представляет собой феррито-перлитную смесь столбчатого строения. В зоне ЗТВ отмечается небольшой перегрев (балл зерна соответствует 4–5 номеру). Подкала не обнаружено. Переходного слоя в структуре не наблюдается. Основа имеет более дисперсную феррито-перлитную структуру с баллом зерна 7–8.

В образце 2, б наблюдается значительный перегрев, в результате чего формируются грубые кристаллиты феррита и балл зерна соответствует 3–4 номеру. В этом случае большая неоднородность структуры вызывает неравномерное изменение микротвердости по глубине наплавленного металла (рис. 1, б), что может привести к снижению эксплуатационных характеристик наплавленного металла с данными параметрами наплавки вследствие повышенной склонности металла к хрупкому разрушению.

Структура наплавленного металла образца 2, в представляет собой феррито-перлитную смесь, в которой феррит имеет игольчатое строение (типа видманштетта). Это может привести к повышению прочностных и снижению пластических свойств наплавленного металла.

Наиболее равномерную феррито-перлитную структуру, имеет образец 2, г, что позволяет рекомендовать данный режим с частотой колебания электрода  $50 \text{ с}^{-1}$  как оптимальный.

## Наплавленная поверхность

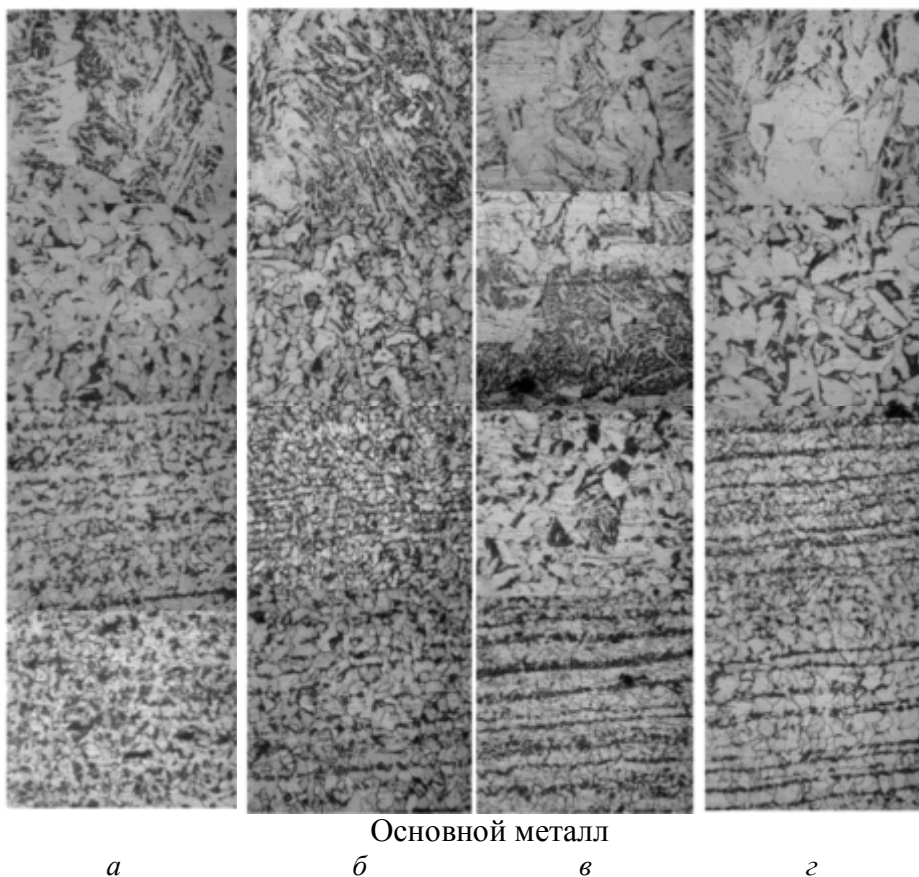


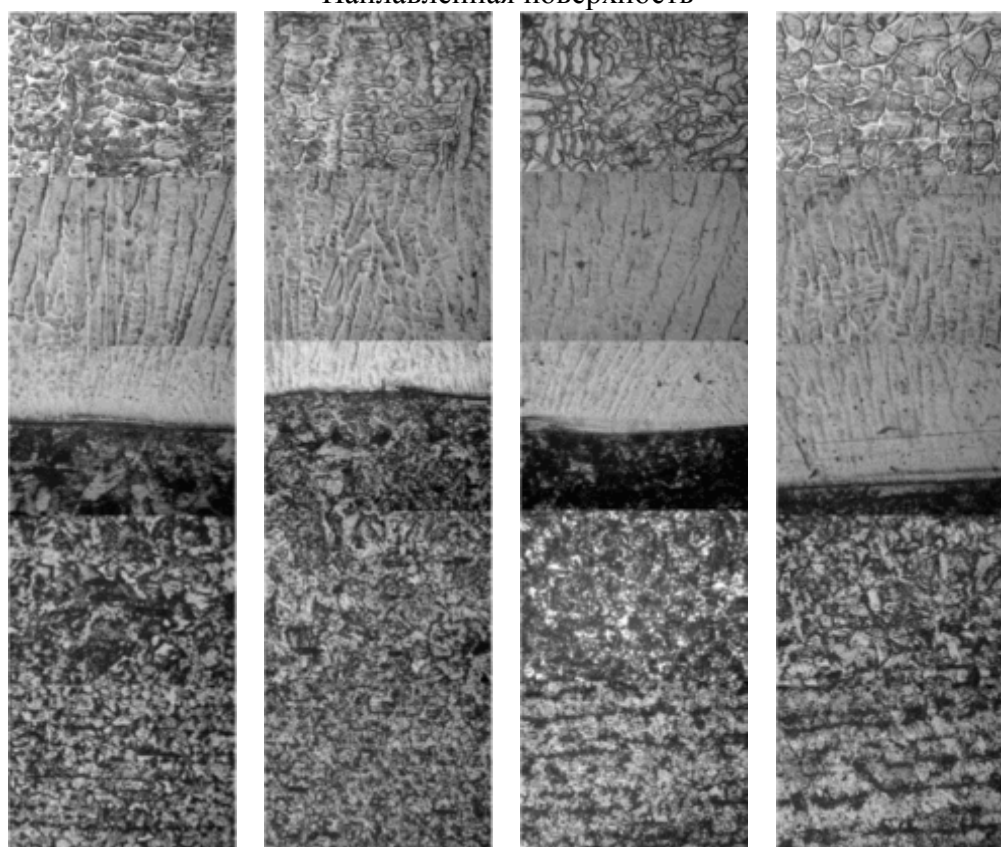
Рис. 2. Изменение микроструктуры по глубине наплавленного металла ЛН-08А на ВСт3пс,  $\times 100$ :  
 а – без принудительных колебаний; б – частота колебаний  $30 \text{ с}^{-1}$ ; в – частота колебаний  $70 \text{ с}^{-1}$ ;  
 г – частота колебаний  $50 \text{ с}^{-1}$

Анализ макроструктуры макрошлифов с наплавленным металлом ЛН-02Х25Н22АГ4М2 на ВСт3пс позволил определить, что амплитуда принудительных колебаний практически не влияет на толщину наплавленного металла. Структура всех образцов характеризуется равномерным проплавлением, симметричной ЗТВ и отсутствием несплошностей, а основа имеет гомогенную мелкозернистую макроструктуру.

Исследование микроструктуры образцов (рис. 3) свидетельствует о наличии карбидной сетки по границам аустенитных зерен и дендритной ликвации в слоях наплавки. Так, в первом слое наблюдается структура аустенита с отчетливо вытравившимися границами зерен и сеткой карбидов хрома, ближе к зоне сплавления увеличивается количество столбчатых кристаллитов аустенита и утончается карбидная сетка. В этом слое наплавки отчетливо видна дендритная ликвация: тело дендрита более темное, междендритные пространства – более светлые, что свидетельствует о разной химической активности при взаимодействии с реактивом для травления.

В зоне термического влияния во всех образцах наблюдаются крупное зерно, смешанная феррито-перлитная структура с отдельными участками видманштетта, что свидетельствует о сильном перегреве и склонности к хрупкому разрушению. В зоне основного металла – равномерная феррито-перлитная структура с вытянутыми строчками сульфидов, характерная для горячекатаного металла.

#### Наплавленная поверхность



#### Основной металл

а

б

в

г

Рис. 3. Изменение микроструктуры по глубине наплавленного металла ЛН-02Х25Н22АГ4М2 на ВСтЗпс,  $\times 100$ : а – без принудительных колебаний; б – частота колебаний  $30 \text{ с}^{-1}$ ; в – частота колебаний  $70 \text{ с}^{-1}$ ; г – частота колебаний  $50 \text{ с}^{-1}$

Замеры микротвердости (рис. 4) показали, что в состоянии после наплавки ее значения существенно варьируются, также наблюдается снижение микротвердости в местах сплавления слоев, что объясняется наличием химической неоднородности в наплавленном слое. Высокие значения микротвердости наплавленного металла объясняются присутствием большого количества упрочняющих фаз в аустенитной матрице (карбидов и карбонитридов).

Исследования макро- и микроструктуры, а также характер изменения микротвердости наплавленного металла ЛН-02Х25Н22АГ4М2 позволяют сделать вывод о том, что

в рассматриваемом диапазоне частот принудительных колебаний оказывают аналогичное, хотя и менее выраженное по величине влияние на формирование высоколегированной аустенитной структуры.

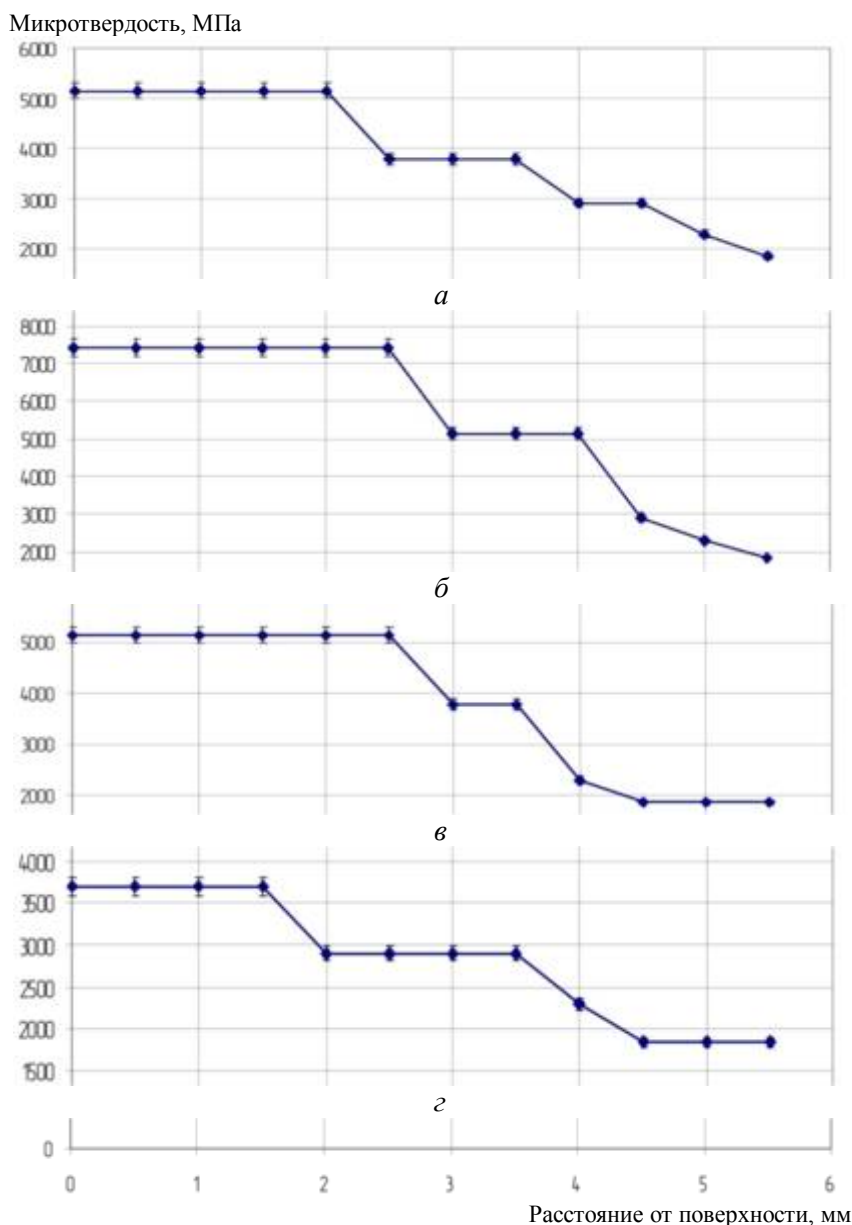


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине наплавленного металла ЛН-02Х25Н22АГ4М2 на ВСтЗпс: а – без принудительных колебаний; б – частота колебаний  $30 \text{ с}^{-1}$ ; в – частота колебаний  $70 \text{ с}^{-1}$ ; г – частота колебаний  $50 \text{ с}^{-1}$

Исследования макро- и микроструктуры, а также характер изменения микротвердости коррозионностойкого металла, наплавленного ленточным электродом ЛН-02Х25Н22АГ4М2 позволяют сделать вывод о том, что в изученном диапазоне частот использование принудительных колебаний торца ленты позволяет формирование высоколегированной аустенитной структуры.

Следует отметить, что поскольку данная наплавочная лента используется в качестве коррозионностойкого материала для наплавки трубных решеток теплообменных аппаратов и парогенераторов, наличие хромистой карбидной сетки в наплавленном слое недопустимо, в связи с чем рекомендуется проведение термической обработки после наплавки для гомогенизации аустенитной структуры, например, высокотемпературной

термоциклической обработки (ВТЦО), которая повышает химическую однородность в наплавленном слое, способствует измельчению структуры и снижению уровня внутренних напряжений в металле, за счет чего можно ожидать повышение комплекса механических и эксплуатационных свойств, а следовательно, долговечности изделий.

**Выводы.** Технология наплавки ленточным электродом под флюсом с принудительным механическим переносом обеспечивают стабильное горение дуги, возможность регулирования кинематических параметров переноса и эффективное управление формированием наплавленного слоя.

Проведены исследования влияния параметров принудительного переноса при наплавке малоуглеродистым и аустенитным ленточными электродами на формирование зоны проплавления и структуру наплавленного слоя.

Анализ макро-, микроструктуры и распределения микротвердости по глубине наплавленного металла при использовании ленточных электродов НЛ-08А и ЛН-02Х25Н22АГ4М2 позволяет заключить, что наплавка с принудительным переносом электродного металла при частоте колебаний 50 Гц обеспечивает наиболее равномерное формирование наплавленного валика, что позволяет рекомендовать данный режим для изготовления и восстановления деталей и узлов химического и энергетического машиностроения.

#### Список использованных источников

1. *Наплавка* деталей металлургического оборудования двумя ленточными электродами / В. П. Лаврик, Л. К. Лещинский, В. Н. Бурдюгов, В. И. Верник // *Металлург.* – 1990. – № 1. – С. 33.
2. *Лаврик В. П.* Повышение качества формирования валика и переходной зоны при наплавке электродными лентами / В. П. Лаврик, Л. К. Лещинский // *Новые процессы наплавки, свойства наплавленного металла и переходной зоны.* – К. : ИЭС Патона, 1984. – С. 14–20.
3. *Лебедев В. А.* Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла (обзор) / В. А. Лебедев // *Автоматическая сварка.* – 2010. – № 10. – С. 45–52.
4. *Лебедев В. А.* Зависимость между скоростями импульсной подачи проволоки и ее плавления при сварке с короткими замыканиями / В. А. Лебедев // *Автоматическая сварка.* – 2007. – № 4. – С. 19–22.
5. *Патон Б. Е.* Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев // *Сварочное производство.* – 2002. – № 2. – С. 24–31.
6. *Лебедев В. А.* Механизмы импульсной подачи электродной проволоки с регулированием параметров импульсов / В. А. Лебедев, В. Г. Пичак // *Автоматическая сварка.* – 2001. – № 5. – С. 31–37.
7. *Патент 44885 Україна.* МПК В23К 9/12 Спосіб широкошарового наплавлення під флюсом стрічковим електродом / Е. В. Лаврова, Б. И. Носовский ; ПГТУ. – № u 2008 10823 ; заявл. 01.09.2008 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.
8. *Патент на винахід №101288 Україна,* МПК (2013) В23К 9/12. Пристрій для наплавлення стрічковим електродом під флюсом / О. М. Серенко, О. В. Лаврова, В. П. Иванов, В. О. Серенко. – № 201205838 ; заявл. 14.05.12 ; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. – 4 с.