

УДК 621.791.754

© Иванов В.П.¹, Лаврик В.П.², Лаврова Е.В.³**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОД УГЛОМ К ОБРАЗУЮЩЕЙ**

Проведены исследования формирования валика при наплавке ленточным электродом в зависимости от угла поворота ленты относительно вектора скорости наплавки. Изучалось влияние изменения угла поворота ленточного электрода на равномерность формирования линии сплавления с основным металлом. Определен допустимый диапазон значений угла поворота ленты, обеспечивающий качество и работоспособность износостойкого слоя, а также отсутствие дефектов формирования. Анализ характеристик износа и трещиностойкости наплавленного слоя показал, что изменение расположения ленточного электрода позволяет повысить трещиностойкость наплавленного слоя при высоком качестве его формирования и практически неизменной износостойкости.

Ключевые слова: ленточный электрод, наплавка под углом к образующей, трещиностойкость, наплавленный слой.

Іванов В.П., Лаврик В.П., Лаврова О.В. Розробка технології наплавлення стрічковим електродом циліндричних виробів під кутом до твірної. Проведено дослідження формування валика при напавленні стрічковим електродом в залежності від кута повороту стрічки щодо вектора швидкості наплавлення. Вивчався вплив зміни кута повороту стрічкового електрода на рівномірність формування лінії сплавлення з основним металом. Визначено допустимий діапазон значень кута повороту стрічки, що забезпечує якість і працездатність зносостійкого шару, а також відсутність дефектів формування. Аналіз характеристик зносу і тріщиностійкості наплавленого шару показав, що зміна розташування стрічкового електрода дозволяє підвищити тріщиностійкість наплавленого шару при високій якості його формування і практично незмінній зносостійкості.

Ключові слова: стрічковий электрод, наплавлення під кутом до твірної, тріщиностійкість, наплавлений шар.

V.P. Ivanov, V.P. Lavrik, O.V. Lavrova. Cylindrical articles surfacing with a strip electrode at an angle to the generatrix. The use of the strip electrode when surfacing is made along a variable path leads to a change in the melting process and the formation of a weld bead, due to the absence, in contrast to the wire electrode, of the axial symmetry of the strip cross section. In the layered surfacing of mill rolls with the rollers being at an angle to the generatrix, there may be such defects as undercuts and slagging along the edges of the seam, that worsen the quality and performance of the wear resistant layer. According to the results of the metallographic analysis of the sections, it has been established that these defects in the seam at the cross-over of the rolls during the layer-by-layer surfacing are not remelted by the arc and it leads to slag inclusions in the zone. There is an asymmetry in the formation of the weld pool, which is associated with the peculiarities of the liquid metal flow during its melting. Thus, a decrease in the minimum deviation angle of the strip electrode location with respect to the deposition rate vector leads to a decrease in the crack resistance of the working surface. Investigations of the weld bead formation during deposition by a strip electrode as a function

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, ivanov_v_p@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ « Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, lavrik_v_p@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ « Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, lavrova_o_v@pstu.edu

of the angle of the strip rotation with respect to the deposition rate vector have been performed. The influence of the change in the angle of rotation of the strip electrode on the uniformity of the fusion line with the parent metal formation was studied. The allowable range of strip angle values has been determined, which ensures the quality and operability of the wear-resistant layer, as well as the absence of formation defects. Analysis of the wear characteristics and fracture toughness of the deposited layer showed that a change in the location of the strip electrode makes it possible to increase the fracture toughness of the welded layer with high quality of its formation and practically unchanged wear resistance.

Keywords: *strip electrode, surfacing at an angle to the generatrix, fracture toughness, deposited layer.*

Постановка проблеми. При наплавке по традиционной технологии, параллельными швами или по винтовой линии, неоднородность литой структуры и свойств наплавленного металла резко проявляется в зонах перекрытия смежных валиков. Кроме того, структурные изменения, происходящие в зоне термического влияния предыдущего валика при наложении последующего, приводят к появлению «провалов» механических свойств, «избирательному» износу, а также снижению работы зарождения трещины. В дальнейшем их развитие в зонах перекрытия валиков приводит к образованию магистральных трещин, проникающих глубоко в тело изделия и снижающих его ресурс (рис. 1).

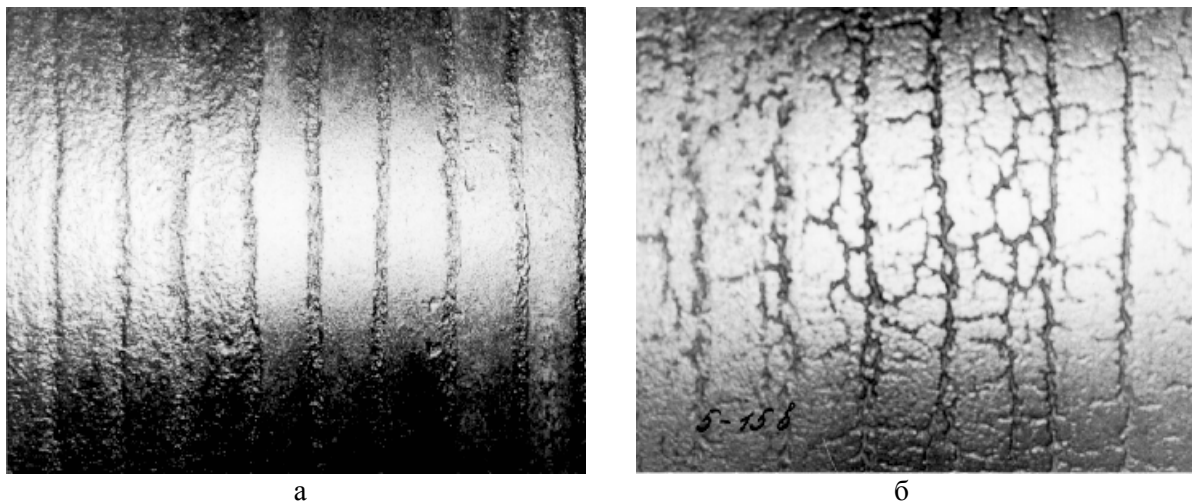


Рис. 1 – Неравномерный износ металла при наплавке по винтовой линии: а) – зарождение кольцевых трещин; б) – развитие трещин вглубь изделия

С целью устранения неоднородности свойств наплавленного слоя разработаны специализированные технологии с управлением траекторией движения электрода, позволяющие не только автоматизировать процесс наплавки, но и устранить многие дефекты, являющиеся причиной зарождения трещин, а также значительно снизить расход электродного металла [1, 2]. При этом наплаваемая поверхность может быть сформирована не прямолинейными параллельными валиками, а, например, зигзагообразными, перекрещивающимися в одном или смежных слоях, зигзаго-, дугообразными и т. п. Использование ленточного электрода при наплавке по изменяемой траектории приводит к изменению процесса расплавления и формирования наплавленного валика ввиду отсутствия, в отличие от проволочного электрода, осевой симметрии поперечного сечения ленты. Эти особенности необходимо учитывать при разработке конструкции наплавленного слоя и вносить изменения в технологию наплавки.

Анализ последних исследований и публикаций. В случае наплавки цилиндрических изделий ленточным электродом с дополнительными перемещениями по второй координате вектор скорости наплавки V_H (рис. 2) расположен под определенным углом к образующей (φ), который может изменяться от 90° до 0° (от поперечного до продольного расположения ленты)

в зависимости от соотношения скорости вращения изделия V_Y и скорости перемещения электрода V_X . Поскольку процесс наплавки ленточным электродом под углом к образующей может быть осуществлен при различном расположении ленты относительно вектора скорости наплавки, значение угла поворота ленточного электрода является важным технологическим параметром, определяющим и качество формирования, и рабочие характеристики наплавленного слоя.

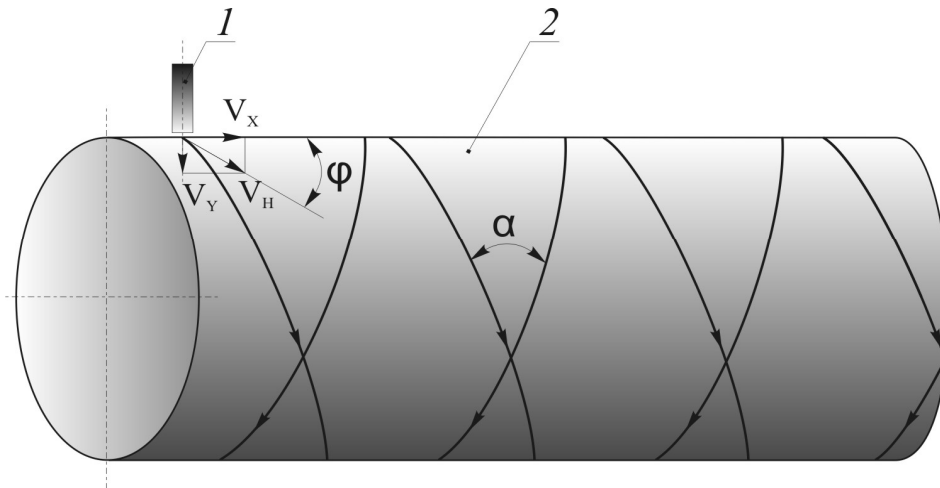


Рис. 2 – Схема наплавки ленточным электродом под углом к образующей: 1 – ленточный электрод; 2 – тело вращения

Известны работы, посвященные исследованиям влияния угла поворота ленты на качественные и триботехнические характеристики слоя, наплаваемого как на плоские изделия [3], так и на поверхности вращения [4, 5]. Несмотря на установленные в данных работах зависимости, отсутствуют четкие критерии выбора оптимального соотношения скоростей V_Y и V_X и, соответственно, угла поворота ленты для обеспечения необходимой конфигурации наплавленного слоя.

Цель статьи – исследование влияния угла поворота ленточного электрода относительно вектора скорости наплавки а также параметров сечения ленты на процесс формирования наплавленного слоя и его эксплуатационные характеристики.

Изложение основного материала. Для выяснения условий качественного формирования валика и зоны сплавления при изменении угла поворота ленточного электрода от вектора скорости наплавки была проведена серия экспериментов. Наплавку осуществляли на пластины из стали Ст3 ленточными электродами из стали 08кп сечением $40 \times 1,0$ мм под флюсом АН-60. Режим наплавки, ток – $I = 650-750$ А, напряжение – $U = 30...32$ В, скорость наплавки – $V_n = 2,8 \cdot 10^{-3}$ м/с, вылет ленты – 50 мм, полярность обратная. С помощью металлографического анализа микро- и макрошлифов наплавленного слоя исследовали переходную зону и зону сплавления, оценивали качество внешнего формирования валика.

На рис. 3 представлены снимки внешнего формирования валиков при изменении угла расположения ленты от 90° до 55° . Дальнейшее уменьшение угла положения ленты приводит к резкому ухудшению качества наплавленного валика: увеличивается количество подрезов и зашлаковок, валик в поперечном сечении становится асимметричным. При поперечном расположении ленты формируется валик с плавным переходом от основного металла к наплавленному, без подрезов и шлаковых включений. По мере отклонения ленты от поперечного расположения ($\varphi = 90^\circ$) изменяется фронт плавления основного металла.

Наблюдается асимметрия формирования сварочной ванны, связанная с особенностями течения жидкого металла при ее плавении. При $\varphi < 60^\circ$ жидкий металл смещается в большей мере на один из краев ванны. С этой стороны формируется валик без дефектов с плавным переходом от основного металла к наплавленному. Отток жидкого металла с другого края сварочной ванны приводит к образованию подрезов и зашлаковок (рис. 3, г). Угол перехода от основного металла к наплавленному уменьшается до $\theta = 130^\circ-135^\circ$ (рис. 4).

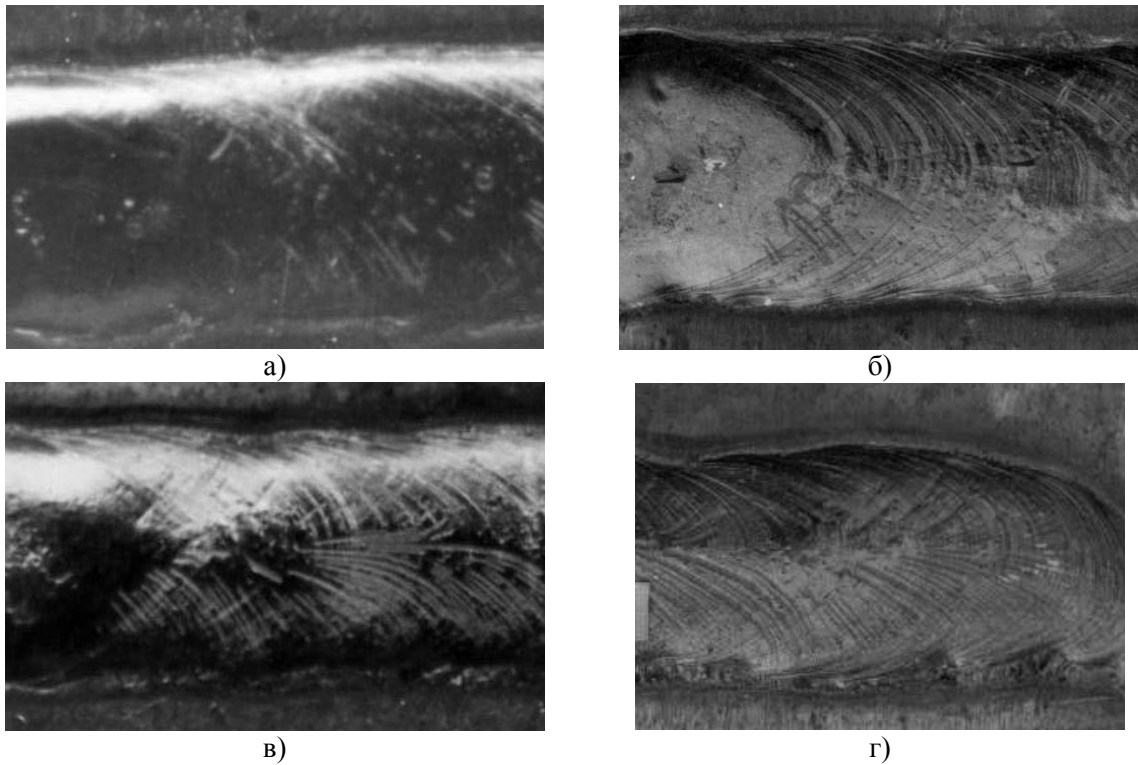


Рис. 3 – Характер формирования валиков в зависимости от угла расположения ленты: а) – $\varphi = 90^\circ$; б) – $\varphi = 75^\circ$; в) – $\varphi = 60^\circ$, г) – $\varphi = 55^\circ$

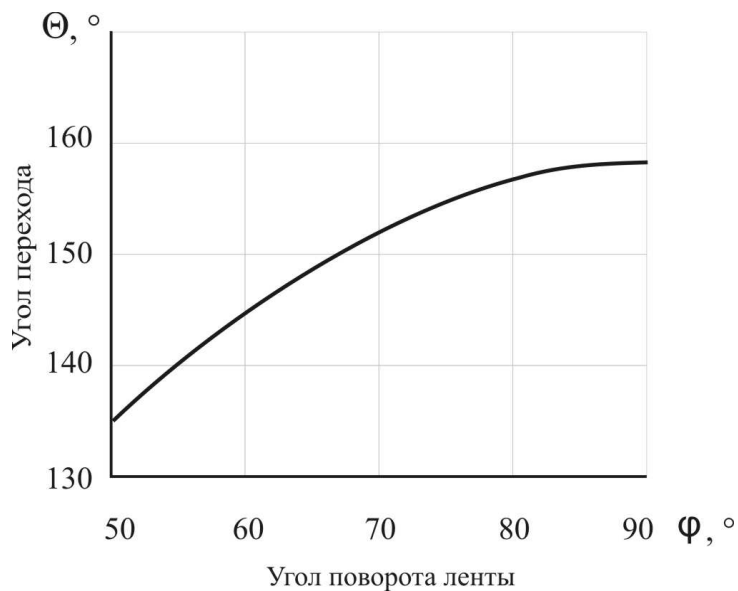


Рис. 4 – Зависимость плавности перехода от основного металла к наплавленному (Θ) от угла поворота ленточного электрода φ

Изменение угла поворота ленточного электрода сказывается на равномерности формирования зоны сплавления. При изменении φ от 90° до 75° линия сплавления равномерная по всей ширине шва, глубина проплавления составляет около 1,0 мм. При дальнейшем уменьшении угла поворота глубина проплавления растет в связи с увеличением удельного тепловложения (рис. 5).

При наплавке ленточным электродом с углом поворота меньше 60° по отношению к вектору скорости наплавки возрастает неравномерность формирования зоны сплавления: минимальное проплавление (0,3-0,5 мм) наблюдается по краям шва, а максимальное – в центре (1,8-2 мм). Сле-

дует отметить, что при наплавке ленточным электродом с изменением угла поперечного расположения от 90° до 55° шлаковых включений в зоне сплавления не обнаружено.

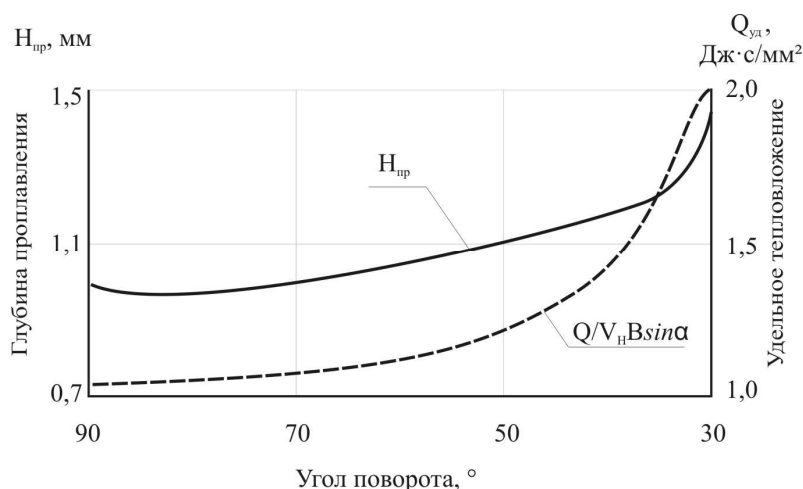


Рис. 5 – Изменение удельного тепловложения и глубины проплавления при повороте ленты относительно вектора скорости наплавки

При послойной наплавке прокатных валков с ориентацией валиков под углом к образующей возможно наличие таких дефектов формирования как подрезы и зашлаковки по краям шва, которые ухудшают качество и работоспособность износостойкого слоя. По результатам металлографического анализа шлифов установлено, что указанные дефекты формирования шва при пересечении валиков в процессе послойной наплавки не переплавляются дугой и приводят к появлению в зоне шлаковых включений.

Таким образом, исходя из качества формирования шва и зоны сплавления при выполнении наплавки валков с ориентацией валиков под углом к образующей, следует ограничить угол поворота ленточного электрода в пределах от 90° до 60°.

Для проведения исследований влияния размеров сечения ленты на особенности формирования наплавленного валика использовались ленточные электроды шириной 30-90 мм и толщиной 0,4-1,0 мм из стали марки 30ХГСА. Режим наплавки, $j = 20 \text{ А/мм}^2$; $U = 30-32 \text{ В}$; $V_H = 14-18 \text{ м/ч}$, флюс – АН60. Источник питания – выпрямитель ВСЖ-1600.

Анализ качества формирования валиков, характеристика износа и трещиностойкости наплавленного слоя при различном значении угла расположения ленточного электрода с изменением ширины ленты (при неизменной толщине) приведены в табл. 1, а при изменении толщины ленты (при неизменной ширине) – в табл. 2.

При значении угла расположения ленточного электрода по отношению к вектору скорости наплавки свыше 75° в процессе эксплуатации валика на его рабочей поверхности появляются трещины (количество трещин растет по мере увеличения угла φ вплоть до 90° – базовый вариант), которые в дальнейшем приведут к отколам и отслоениям. В этом случае изменяется ориентация зоны перекрытия валиков, где зарождаются трещины термоусталости и не удается обеспечить торможение трещины из-за снижения взаимного пересечения валиков, что приводит в дальнейшем к появлению кольцевых трещин.

Таким образом, повышение предельного угла отклонения расположения ленточного электрода по отношению к вектору скорости наплавки приводит к снижению трещиностойкости рабочей поверхности.

При уменьшении угла расположения ленточного электрода менее φ_{min} изменяется фронт плавления основного металла. Наблюдается асимметрия в течении металла и формировании сварочной ванны. Жидкий металл смещается в большей мере на один край ванны, что приводит к дефектам формирования как зоны сплавления (неравномерная по всей ширине шва линия, вплоть до образования несплавлений), так и валика (появляются подрезы и шлаковые включения на одном из краев шва).

Таблица 1

Зависимость износостойкости от ширины ленты

№	Ширина ленты В*, мм	Расположение ленточного электрода и наплавленного валика		Параметры качества наплавленного слоя					Количество трещин на единицу площади**	Коэффициент износостойкости, К
				Количество дефектов**			Линия сплавления основного металла с наплавленным	Отделимость шлаковой корки		
		φ, °	α, °	Напльвы, подрезы, мм	Шлаковые включения, мм	Углубления между валиками, мм				
1	40	90	0	нет	нет	нет	равномерн.	удовлетв.	6	1,10
2	30	76	14	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	2	1,10
		75	15	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	нет	1,12
		65	25	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,14
		54	36	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,18
		53	37	2	5,5	1,6	неравном.	неудовл.	1	1,18
3	50	76	14	- \ -	- \ -	- \ -	равномерн.	удовлетв.	4	1,10
		75	15	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	нет	1,12
		70	20	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,13
		61	29	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,15
		60	30	3,5	7,0	2,0	неравном.	неудовл.	1	1,16
4	70	76	14	- \ -	- \ -	- \ -	равномерн.	удовлетв.	4	1,10
		75	15	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	нет	1,12
		70	20	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,13
		66	24	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,14
		65	25	5	9	2,5	неравном.	неудовл.	2	1,14
5	90	76	14	- \ -	- \ -	- \ -	равномерн.	удовлетв.	5	1,10
		75	15	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	нет	1,12
		72	18	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,13
		70	20	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,15
		69	21	5	10	3,2	неравном.	неудовл.	3	1,16

* – толщина ленты δ = 1,0 мм; ** – любой участок 400×400 мм.

Таблица 2

Зависимость износостойкости от толщины ленты

№	Толщина ленты δ*, мм	Расположение ленточного электрода и наплавленного валика		Параметры качества наплавленного слоя					Количество трещин на единицу площади**	Коэффициент износостойкости, К
				Количество дефектов**			Линия сплавления основного металла с наплавленным	Отделимость шлаковой корки		
		φ, °	α, °	Напльвы, подрезы, мм	Шлаковые включения, мм	Углубления между валиками, мм				
1	1,0	90	0	нет	нет	нет	равномерн.	удовлетв.	6	1,10
2	1,0	76	14	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1	1,10
		75	15	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	нет	1,12
		65	25	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,14
		58	32	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	- \ -	1,15
		57	33	4	8	4,5	неравном.	неудовл.	1	1,15

Продолжение таблицы 2

3	0,7	76	14	нет	нет	нет	равномерн.	удовлетв.	2	1,10
		75	15	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	нет	1,12
		70	20	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	1,14
		60	30	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	1,16
		59	31	3	10	4	неравном.	неудовл.	1	1,16
4	0,5	76	14	нет	нет	нет	равномерн.	удовлетв.	2	1,10
		75	15	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	нет	1,12
		70	20	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	1,13
		64	26	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	1,15
		63	27	3	11	2	неравном.	неудовл.	2	1,15
5	0,4	76	14	нет	нет	нет	равномерн.	удовлетв.	4	1,10
		75	15	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	нет	1,12
		70	20	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	1,13
		66	24	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	1,13
		65	25	- \\\ -	- \\\ -	- \\\ -	неравном.	неудовл.	3	1,14

* – ширина ленты В = 40 мм; ** – любой участок 400×400 мм.

С ростом ширины ленточного электрода увеличивается ширина сварочной ванны и объем жидкого металла. Изменение при этом угла расположения ленточного электрода по отношению к вектору скорости наплавки затрудняет равномерное растекание жидкого металла по всей ширине сварочной ванны и приводит к появлению подрезов по краям шва и увеличению углубления между валиками, в которых фиксируется шлак.

С уменьшением толщины ленточного электрода изменяется энергетическая характеристика дуги, что приводит к снижению глубины проплавления и увеличению вероятности несплавлений и шлаковых включений. Таким образом, с увеличением ширины и уменьшением толщины ленточного электрода сужается диапазон изменения угла расположения ленточного электрода по отношению к вектору скорости наплавки.

С помощью результатов исследований построена номограмма (рис. 6), позволяющая определить минимально возможный угол поворота ленточного электрода к вектору скорости наплавки, обеспечивающий качественное формирование наплавленного слоя. Например, при использовании ленты 0,8×35 мм, минимальный угол между плоскостью ленты и вектором скорости наплавки составляет 58°. При меньшем значении жидкий металл смещается на край ванны, что приводит к образованию подрезов и зашлаковок с противоположной стороны.

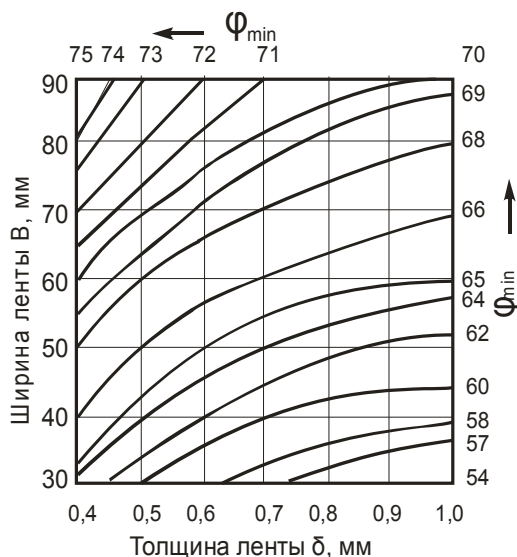


Рис. 6. – Номограмма для определения минимального угла поворота ленты относительно вектора наплавки

Анализ качества формирования валиков, характеристики износа и трещиностойкости наплавленного слоя при различном значении угла расположения ленточного электрода в широком диапазоне ширины и толщины ленты показывает, что изменение расположения ленточного электрода в процессе наплавки в оптимальных пределах позволяет повысить трещиностойкость наплавленного слоя при высоком качестве его формирования и практически неизменной износоустойчивости.

Выводы

В случае наплавки ленточным электродом с ориентацией валиков под углом к образующей необходимо обеспечить расчет оптимальных параметров технологии, учитывая величину угла поворота ленты относительно вектора скорости наплавки, поскольку от этого зависит удельное тепловложение, глубина проплавления, и, следовательно, качество формирования валика и трещиностойкость наплавленного металла.

Проведенные исследования позволили определить количественные соотношения между геометрическими характеристиками применяемых лент и оптимальными параметрами технологии наплавки ленточным электродом цилиндрических изделий под углом к образующей.

Список использованных источников:

1. Лещинский Л.К. Слоистые наплавленные и упрочненные композиции / Л.К. Лещинский, С.С. Самогугин. – Мариуполь : Новый мир. – 2005. – 392 с.
2. Гулаков С.В. Управление траекторией перемещения электрода при дуговой наплавке прокатных валков / С.В. Гулаков, В.П. Иванов, И.С. Псарёва // Вісник ДДМА : Зб. наук. пр. – Краматорск. – 2000. – С. 322-324.
3. Крутиховский В.Г. Автоматическая наплавка ленточным электродом с поперечными колебаниями / В.Г. Крутиховский // Сварочное производство. – 1972. – № 5. – С. 26-27.
4. Домбровский Ф.С. Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф.С. Домбровский, Л.К. Лещинский. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 1995. – 198 с.
5. Совершенствование технологии наплавки деталей металлургического оборудования / С.В. Гулаков [и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 10. – С. 54-57.

References:

1. Lechtchinski L.K., Samotugin S.S. *Sloistye naplavlennyye i uprochnennyye kompozitsii* [Layered welded and hardened compositions]. Mariupol, Novyi mir Pibl., 2005. 392 p. (Rus.)
2. Gulakov S.V., Ivanov V.P., Psaryova I.S. *Upravlenie traektoriei peremeshcheniia elektroda pri dugovoi naplavke prokatnykh valkov* [Control of the electrode movement trajectory during arc surfacing of mill rolls]. *Visnik Donbas'koï derzhavnoi mashinobudivnoi akademii – Herald DSMA. Series: Engineering*, 2000, pp. 322-324. (Rus.)
3. Krutihovskiy V.G. *Avtomaticheskaia naplavka lentochnym elektrodom s poperechnymi kolebaniami* [Automatic surfacing with a strip electrode with transverse vibrations]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1972, no. 5, pp. 26-27. (Rus.)
4. Dombrovsky F.S., Lechtchinski L.K. *Rabotosposobnost' naplavlennykh rolikov mashin nepreryvnogo lit'ia zagotovok* [Working capacity of surfaced SCCM rollers]. Kiev, Paton welding institute Publ., 1995. 198 p. (Rus.)
5. Gulakov S.V., Chigarev V.V., Ivanov V.P., Psareva I.S., Lavrentik O.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii naplavki detalei metallurgicheskogo oborudovaniia* [Improving of surfacing technology of details of the metallurgical equipment]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2004, no. 10, pp. 54-57. (Rus.)

Рецензент: В.И. Щетинина
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.03.2017