

8. Tarasov V.V., Lavrik P.F., Leshchinskii L.K. Shirokosloinaia naplavka v poperechnom magnitnom pole otkrytoi dugoi [Wide-layer surfacing in a transverse magnetic field by an open arc]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 1973, no. 1, pp. 73-74. (Rus.)
9. Razmyshliaev A.D. Upravlenie formirovaniem valika pri dugovoi naplavke lentochnym elektrodom [Management of the formation of the roller during arc surfacing with a tape electrode]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding*, 2000, no. 4, pp. 13-15. (Rus.)

Рецензент: В.М. Матвієнко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.02.2019

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181399

© Щетинин С.В.¹, Щетинина В.И.², Коваль А.В.³,
Никитенко П.В.⁴, Элсаед Халед⁵

ПОВЫШЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПЛАВКЕ НА НИЗКОЙ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ

Установлены закономерности влияния скорости наплавки и погонной энергии на термический цикл. Разработан способ высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, обеспечивающий сокращение термического цикла, снижение сварочных напряжений и измельчение микроструктуры, предотвращение образования трещин, повышение трещиностойкости и износостойкости.

Ключевые слова: термический цикл, трещины, сварочные напряжения, измельченные микроструктуры, высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии.

Щетинін С.В., Щетиніна В.І., Коваль О.В., Никитенко П.В., Елсаед Халед. Підвищення тріщиностійкості та зносостійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії. Опорні валки, які запобігають прогину і поломці робочих валків, працюють в умовах високих питомих тисків і виготовляються з високовуглецевої сталі, схильної до утворення гарячих і холодних тріщин. Тому підвищення тріщиностійкості і зносостійкості є важливою науково-технічною проблемою. Найбільш ефективно підвищення тріщиностійкості шляхом збільшення швидкості наплавлення, при підвищенні якої знижується погонна енергія. Швидкість наплавлення визначає тепловкладення і термічний цикл. З підвищенням швидкості наплавлення внаслідок зниження погонної енергії тепловкладення і максимальна температура зменшуються, швидкість нагріву і охолодження зростає. Пропорційно швидкості зварювання підвищується швидкість кристалізації і зменшується час існування зварювальної ванни в рідкому стані. В результаті зерна не встигають вирости, і забезпечується дрібнозерниста структура. Внаслідок зменшення тепловкладення знижуються зварювальні напруження. Подрібнення микроструктури і зниження зварювальних напружень підвищують тріщиностійкість наплавленого металу. При високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії зменшується тепловкладення і енергія, зі зниженням якої внаслідок зменшення міжатомної відстані і збільшення міжатомних сил зв'язків, збереження рівноваги і мінімуму енергії тріщиностійкість наплавленого металу підвищується. Мінімум

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ аспірант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ аспірант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁵ аспірант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

енергії – максимум якості. Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує зменшення тепловкладення в основний метал і термічного циклу, зниження зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, запобігання утворенню гарячих і холодних тріщин, підвищення тріщиностійкості і зносостійкості опорних валків.

Ключові слова: термічний цикл, тріщини, зварювальні напруги, здрібнення мікроструктури, високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії.

S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, O.V. Koval, P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled. Crack and wear resistance increase at high-speed surfacing with low heat input. The support rolls, which prevent the work rolls from deflection and breakage, operate under high specific pressure conditions and are produced of high carbon steel, prone to hot and cold cracking formation. Therefore better crack and wear resistance increase is an important scientific and technical problem. The most effective way to improve crack resistance is surfacing speed increase at which the heat input decreases. The surfacing speed determines the heat input and thermal cycle. With the welding speed increase due to lower heat input and the maximum temperature decrease, the heating and cooling rates increase. The crystallization rate increases and the lifetime of the weld pool in the liquid state decreases in proportion to the welding speed. As a result, the grains do not have time to grow, and the fine-grained structure is provided. Due to the heat input decrease, welding stresses are reduced. The fine-grained structure and welding stresses reduction result in the weld metal crack resistance increase. In high-speed surfacing with low heat input and energy the decrease of energy results in the weld metal crack resistance increase owing to the interatomic distance decrease and the interatomic bond forces increase. The interatomic bonds nature is electromagnetic. Electrons rotating around a nucleus create microcurrents. The microcurrents of the contacting atoms direction coincides. Microcurrents create magnetic fields of opposite directions, which are mutually destroyed. As a result, electromagnetic compression pressure and interatomic bonds directed toward a smaller magnetic field. Minimum energy means maximum quality. The process of high-speed surfacing which provides less heat input to the base metal, the thermal cycle reduction, welding stresses decrease, fine-grained microstructure, the hot and cold cracking prevention, the crack and wear resistance increase of the support rolls has been developed.

Keywords: thermal cycle, cracks, welding stresses, microstructure, high-speed surfacing with low heat input.

Постановка проблеми. Опорные валки работают под высоким удельным давлением. Материал валков – сталь 90ХФ, которая склонна к образованию трещин. Решением этой проблемы является повышение износостойкости и трещиностойкости.

Анализ последних исследований и публикаций. Считается, что образование холодных трещин вызвано увеличением скорости охлаждения, что является следствием повышения скорости наплавки [1]. В противоположность этому мнению, Н.Н. Прохоров [1] считает, что образование холодных трещин значительно снизится при повышении скорости наплавки и снижении погонной энергии. Таким образом, мнения радикально противоположны [1-9] и закономерности воздействия скорости наплавки и погонной энергии на термический цикл и склонность к образованию трещин исследованы недостаточно.

Цель статьи – установить закономерность воздействия тепловложения и термических циклов на образование холодных и горячих трещин, разработать способ наплавки на высокой скорости с низкой погонной энергией, что обеспечит опорным валкам повышенную трещиностойкость и износостойкость.

Изложение основного материала. Трещины возникают, когда сварочные напряжения становятся больше предела прочности металла [3]. Поэтому для повышения трещиностойкости необходимо снижать сварочные напряжения и обеспечивать измельчение микроструктуры.

Основной металл находится в состоянии равновесия, которое характеризуется минимумом энергии. При нагревании дугой энергия основного металла возрастает, межатомное рас-

стояние увеличивается, межатомные силы связей уменьшаются. Возникают сварочные напряжения, и энергия металла повышается. Все системы стремятся к минимуму энергии. Согласно квантовой теории любая система с помощью излучения или другого способа всегда приходит в наименьшее или основное состояние с собственным значением энергии, равным E_0 [4]. Образование трещин является результатом стремления металла к минимуму энергии за счет разрыва межатомных сил связей под действием сварочных напряжений.

Наиболее эффективным способом снижения сварочных напряжений и повышения трещиностойкости является повышение скорости наплавки и снижение погонной энергии, что обеспечивает уменьшение тепловложения и энергии металла. Погонная энергия представляет собой отношение эффективной тепловой мощности дуги к скорости сварки.

Основной характеристикой тепловложения является термический цикл [5]. При приближении дуги металл нагревается, достигает максимальной температуры и при удалении дуги охлаждается. Термический цикл определяет структурные и фазовые превращения в металле [1, 2] и, как результат, трещиностойкость.

При повышении скорости сварки концентрируется тепловложение, изменяется процесс распространения тепла, расплавления и кристаллизации металла шва и околошовной зоны. С повышением скорости сварки возрастает скорость нагрева и охлаждения металла и максимальная температура нагрева. С повышением скорости нагрева и охлаждения увеличивается количество центров кристаллизации и измельчается микроструктура. В результате увеличения скорости нагрева и охлаждения уменьшается время пребывания ванны в жидком состоянии, что предотвращает рост зерна, обеспечивает измельчение микроструктуры и предотвращает образование трещин.

Высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии соответствует схеме – нагрев полубесконечного тела мощным быстродвижущимся постоянно действующим точечным источником тепла [5]. Термический цикл (рис. 1-3) определяется согласно уравнению:

$$T(r, t) = \frac{q_u}{2\pi\lambda t v} e^{-\frac{r^2}{4at}},$$

- где q_u – эффективная тепловая мощность дуги, кал/с;
 λ – коэффициент теплопроводности, кал/см·с·°C;
 a – коэффициент температуропроводности, см²/с;
 v – скорость наплавки;
 r – расстояние, см;
 t – время, с.

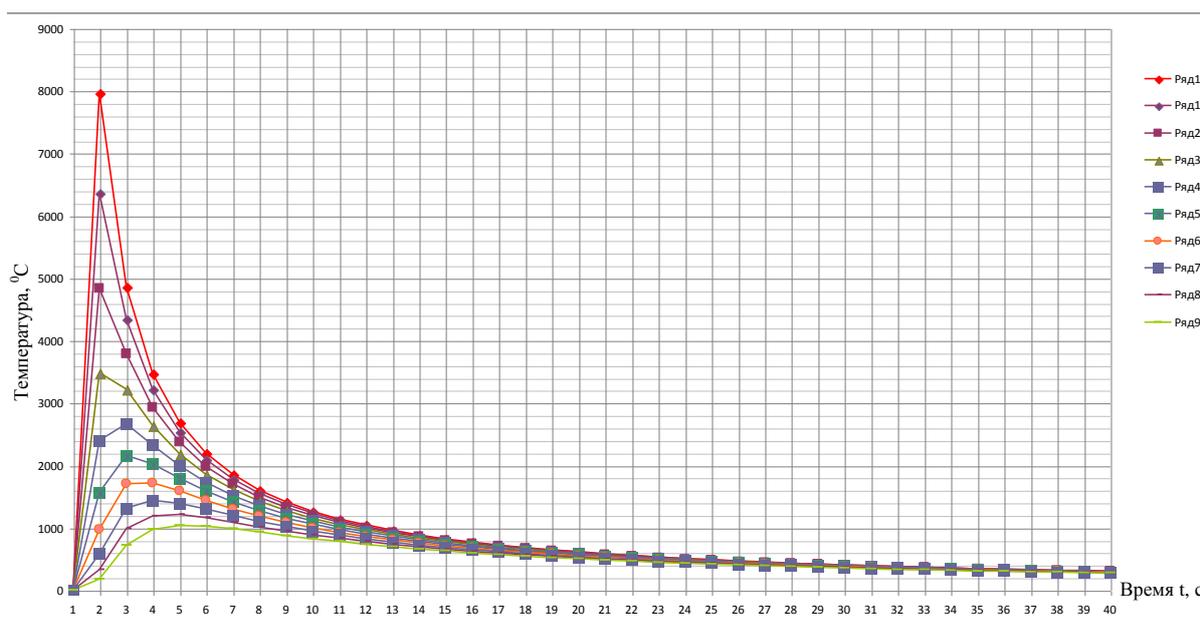


Рис. 1 – Термический цикл при скорости наплавки 25 м/ч

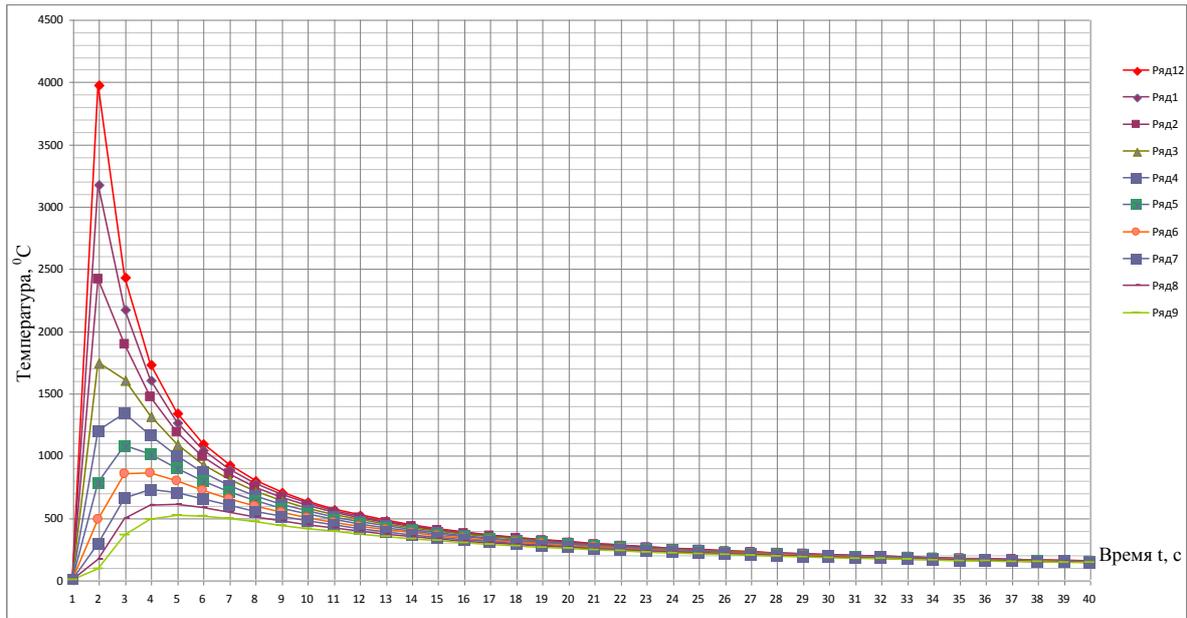


Рис. 2 – Термический цикл при скорости наплавки 50 м/ч

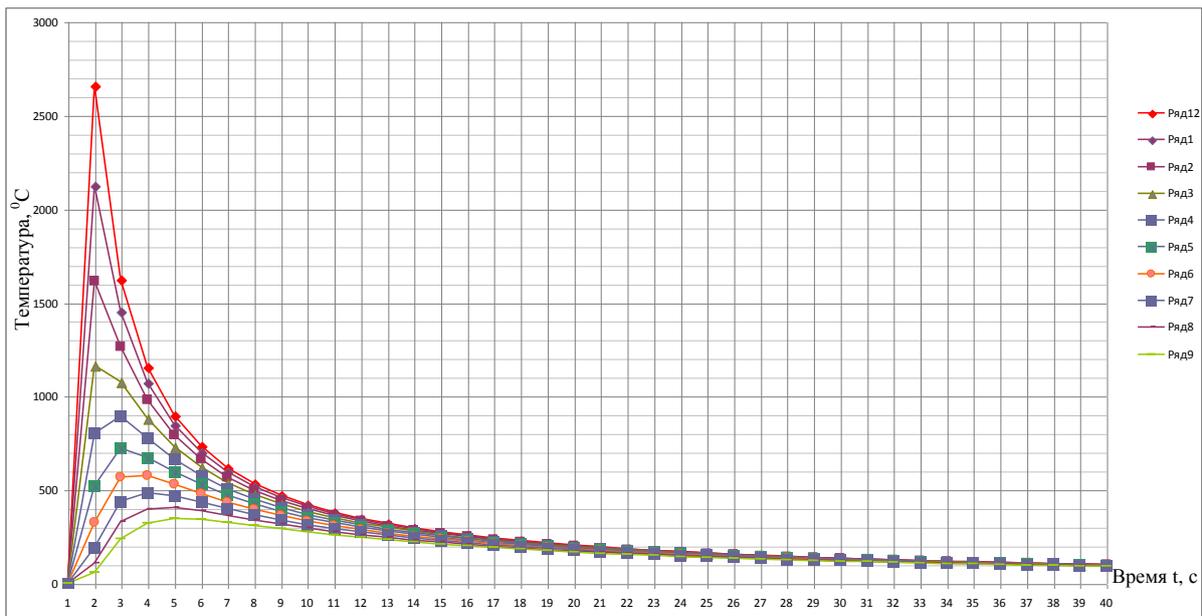


Рис. 3 – Термический цикл при скорости наплавки 75 м/ч

Расчет термических циклов производили на компьютере при наплавке в режиме: величина тока 800 А, напряжение на дуге 31 В и скорости наплавки 25 м/ч, 50 м/ч и 75 м/ч. При этом погонная энергия снижалась 3,3 МДж/м; 1,65 МДж/м и 1,1 МДж/м. Как установлено, с повышением скорости наплавки вследствие снижения погонной энергии пропорционально снижается максимальная температура, возрастает скорость нагрева и охлаждения.

Пропорционально скорости сварки $V_{СВ}$ возрастает скорость кристаллизации $V_{КР}$ жидкого металла $V_{КР} = V_{СВ} \cdot \cos\varphi$, что обеспечивает измельчение микроструктуры, увеличение площади контактов атомов, межатомных связей и повышение трещиностойкости опорных валков.

На основании установленных закономерностей воздействия скорости наплавки на термический цикл разработан процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии, который обеспечивает снижение тепловложения и сварочных напряжений, измельчение микроструктуры, повышение трещиностойкости и износостойкости опорных валков.

Установленные закономерности влияния скорости наплавки и погонной энергии на термические циклы и разработанный способ наплавки на высокой скорости с низкой погонной энергией перспективны для наплавки роликов и валков.

Исследование этих процессов в будущем позволит обеспечить опорным валкам высокую трещиностойкость и износостойкость.

Выводы

1. Скорость наплавки определяет тепловложение и термический цикл. С повышением скорости наплавки вследствие снижения погонной энергии тепловложение и максимальная температура уменьшаются, скорость нагрева и охлаждения возрастают, что обеспечивает снижение сварочных напряжений, измельчение микроструктуры и повышение трещиностойкости.

2. Термический цикл определяет структурные и фазовые превращения в металле и, как результат, трещиностойкость.

3. При высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии уменьшается тепловложение и энергия, со снижением которой вследствие уменьшения межатомного расстояния и увеличения межатомных сил связей, сохранения равновесия и минимума энергии трещиностойкость наплавленного металла повышается.

4. Разработан способ наплавки на высокой скорости с низкой погонной энергией, который позволяет снизить тепловложение, термический цикл и сварочные напряжения, измельчить структуру, повысить трещиностойкость и износостойкость валков.

Список использованных источников:

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке : в 2 т. / Н.Н. Прохоров. – М. : Metallurgia, 1976. – 2 т. – (Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения).
2. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов. – М. : Наука, 1972. – 228 с.
3. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М. : Metallurgia, 1970. – 376 с.
4. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма / Р.М. Уайт. – М. : Мир, 1972. – 306 с.
5. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : ГНТИ, 1951. – 296 с.
6. Использование теории растущих тел при расчете напряженно-деформированного состояния деталей, изготавливаемых с применением аддитивных наплавочных технологий / И.К. Сенченков [и др.] // Автоматическая сварка. – 2016. – № 5-6. – С. 135-140. – Режим доступа: [DOI: 10.15407/as2016.06.21](https://doi.org/10.15407/as2016.06.21).
7. Оборудование и технологии антикоррозионной электрошлаковой наплавки двумя лентами / И.А. Рябцев [и др.] // Автоматическая сварка. – 2017. – № 8. – С. 55-60. – Режим доступа: [DOI: 10.15407/as2017.08.07](https://doi.org/10.15407/as2017.08.07).
8. Модернизация системы управления плазменно-порошковой наплавки установки А1756 / Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев, Ю.Н. Ланкин, В.Ф. Семикин, П.П. Осечков // Автоматическая сварка. – 2014. – № 12. – С.46-49.
9. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – Киев : Экотехнология, 2004. – 160 с.

References:

1. Prokhorov N.N. *Fizicheskie protsessy v metalle pri svarke: tom 2* [Physical processes in the metal during welding: vol. 2]. Moscow, Metallurgy Publ., 1976. 600 p. (Rus.)
2. Shorshorov M.H., Belov V.V. *Fazovye prevrashcheniia i izmeneniia svoistv stali pri svarke* [Phase transformations and changes in properties of the steel during welding]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 228 p. (Rus.)
3. Finkel V.M. *Fizika razrusheniia* [Destruction Physics]. Moscow, Metallurgy Publ., 1970. 376 p. (Rus.)
4. White R.M. *Kvantovaia teoriia magnetizma* [Quantum theory of magnetism]. Moscow, Mir Publ., 1972. 306 p. (Rus.)
5. Rykalin N.N. *Raschety teplovykh protsessov pri svarke* [Calculations of thermal processes during welding]. Moscow, GNTI Publ., 1951. 296 p. (Rus.)

6. Senchenkov I.K., Ryabtsev I.A., Turyk E., Chervinko O.P. Ispol'zovanie teorii rastushchikh tel pri raschete napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia detalei, izgotavlivaemykh s primeneniem additivnykh naplavochnykh tekhnologii [The use of the theory of growing bodies in calculating the stress-strain state of parts manufactured using additive surfacing technologies]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2016, no. 5-6, pp. 135-140. **Doi:10.15407/as2016.06.21.** (Rus.)
7. Ryabtsev I.A., Babinets A.A., Korzhik V.N., Siyko I.A., Chakan Yunen. Oborudovanie i tekhnologii antikorrozionnoi elektroshlakovoi naplavki dvumia lentami [Equipment and technologies for anti-corrosion electroslag surfacing with two tapes]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2017, no. 8, pp. 55-60. **doi:10.15407/as2017.08.07.** (Rus.)
8. Perepletchikov E.F., Ryabtsev I.A., Lankin Yu.N., Semikin V.F., Misfire P.P. Modernizatsiia sistemy upravleniia plazmenno-poroshkovoi naplavki ustanovki A 1756 [Modernization of the control system of plasma-powder surfacing of installation A1756]. *Avtomaticheskaia svarka – Automatic Welding*, 2014, no. 12, pp. 46-49. (Rus.)
9. Ryabtsev I.A. *Naplavka detalei mashin i mekhanizmov* [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kiev, Ecotechnology Publ., 2004. 160 p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самогугин
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 03.02.2019

УДК 621.791.92

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181401

© Иванов В.П.¹, Щербаков С.В.², Лещинский Л.К.³

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Предложена функциональная схема системы управления процессом электродуговой наплавки, состоящая из регулятора и блока управления шаговым двигателем. Показано, что в системе управления целесообразно использовать шаговые двигатели с энкодером положения вала. С помощью специализированной интерактивной среды проведено тестирование программного обеспечения для управления скоростью вращения двигателей с применением широтно-импульсной модуляции. На базе программируемого микроконтроллера разработана схема управления коллекторными двигателями постоянного тока типа СЛ. Установлено, что согласованное управление всеми приводами установки позволяет управлять процессом нанесения слоя сложной конфигурации и переменного химического состава. Это открывает новые возможности повышения эффективности модернизации существующих и перспективных наплавочных установок.

Ключевые слова: электродуговая наплавка, наплавочная установка, конфигурация наплавленного слоя, переменный химический состав, система управления, шаговый двигатель, широтно-импульсная модуляция, имитационная модель, интегрированная среда разработки, контроллер, персональный компьютер.

Іванов В.П., Щербаков С.В., Лещинський Л.К. Розробка системи автоматизованого управління процесу електродугового наплавлення з використанням широ-

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, matvivenkovn@gmail.com

³ д-р техн. наук, профессор, Бостон, США