

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 12 З В А Р Ю В А Н Н Я 2019

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

Борис Євгенович Патон – Почесний член IEEE! 3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Позняков В.Д., Гайворонський О.А., Костін В.А., Берднікова О.М., Шмигельський С.В. Вплив термічного циклу наплавлення на механічні властивості та опір крихкому руйнуванню металу ЗТВ залізничної сталі М76 4

Бої У., Кривцун І.В. Процеси зварювання неплавким електродом з модуляцією зварювального струму (Огляд). Частина II. Ефекти дугового впливу на зварювальний метал 12

Максимов С.Ю., Сидорук В.С., Кражановський Д.М. Особливості дуги з імпульсним саморегулюванням процесу плавлення електрода при ручному дуговому зварюванні 25

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Кривцун І.В., Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Ло З., Ілляшенко Є.В. Гібридне лазерно-мікроплазмове зварювання нержавіючих сталей 33

Лобанов Л.М., Махлін Н.М., Водолазський В.Є., Попов В.Є., Оліяненко Д.С. Удосконалення головок зварювальних автоматів для орбітального зварювання TIG трубопроводів енергоблоків АЕС 41

Марченко А.Ю., Гнатенко М.Ф., Скорина М.В. Вплив екструзійних модифікаторів обмазувальних мас на різновисхідність електродного покриття 52

Грузевич А.В., Нікіфоров Д.Л. Досвід ремонту деталей обладнання енергоблока ТЕС 61

КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

Дисертації на здобуття наукового ступеня 65

ХРОНІКА

Міжнародний промисловий форум-2019 66

ІНФОРМАЦІЯ

Програми професійної підготовки на 2020 р. 70

CONTENTS

Borys Evgenovych Paton — Honorary Member of IEEE 3

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Poznyakov V.D., Gaivoronsky O.A., Kostin V.A., Berdnikova O.M., Shmigelsky S.V. Influence of thermal cycle of surfacing on mechanical properties and resistance to brittle fracture of haz metal of rail wheel steel M76 4

Boi U., Krivtsun I.V. Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review). Part II. Effects of arc impact on the metal being welded 12

Maksimov S.Yu., Sydoruk V.S., Krazhanovsky D.M. Features of arc with pulsed self-regulation of electrode melting process in relation to manual arc welding 25

INDUSTRIAL

Krivtsun I.V., Korzhik V.N., Khaskin V.Yu., Lo Z., Ilyashenko E.V. Hybrid laser-microplasma welding of stainless steels 33

Lobanov L.M., Makhlin N.M., Vodolazsky V.E., Popov V.E., Oliyanenko D.S. Mechanisms of heads of automatic welding machines for orbital welding of pipelines of NPP power units 41

Marchenko A.Yu., Gnatenko M.F., Skorina M.V. Effect of extrusion modifiers of coating mass on variation of electrode coating thickness 52

Gruzevich A.V., Nikiforov D.L. Experience of repair of equipment parts of TPS power unit 61

BRIEF INFORMATION

Dissertations for a scientific degree 65

NEWS

International Industrial Forum-2019 66

INFORMATION

Vocational training programs for 2020 70



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну в Міжнародному інституті зварювання та в Європейській зварювальній федерації
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine in International Institute of Welding and in European Federation for Welding



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України
Міжнародний науково-технічний та виробничий журнал
E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
International Scientific-Technical and Production Journal

Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
Б.Є. Патон (головний редактор),
С.І. Кучук-Яценко (заст. гол. ред.),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, Ю.С. Борисов,
В.В. Книш, І.В. Кривцун,
Ю.М. Ланкін, Л.М. Лобанов,
С.Ю. Максимов, М.О. Пашин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,
К.А. Ющенко;
В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;
В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;
М.М. Студент, Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів;
М. Зініград, університет Арієля, Ізраїль;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина;
Я. Пілярчик, Інститут зварювання, Глівіце, Польща

Засновники

Національна академія наук України,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Передплата

Передплатний індекс 70031.
12 випусків на рік (видається щомісячно).
Друкowana версія: 2400 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделероллю.
Електронна версія: 2400 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается
англійською мовою під назвою
«The Paton Welding Journal».

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU:
B.E. Paton (Editor-in-Chief),
S.I. Kuchuk-Yatsenko (Deputy Editor-in-Chief),
V.M. Lipodaev (Staff Deputy Editor-in-Chief)
O.M. Berdnikova, Yu.S. Borisov,
V.V. Knysh, I.V. Krivtsun,
Yu.M. Lankin, L.M. Lobanov,
S.Yu. Maksimov, M.O. Pashchin,
V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,
K.A. Yushchenko;
V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv;
V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;
M.M. Student, Karpenko Physico-Mechanical Institute
of NASU, Lviv;
M. Zinigrad, Ariel University, Israel;
U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany;
Ja. Pilarczyk, Welding Institute, Gliwice, Poland

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
International Association «Welding» (Publisher)

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kasimir Malevich Str.
Tel.: (38044) 200 6302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration
of KV 4788 dated 09.01.2001
ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as>

Subscription

Subscription index 70031.
12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$180, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$150, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
Institutions with current subscriptions on printed version
can purchase online access to the electronic versions
of any back issues that they have not subscribed to.
Issues of the Journal (more than two years old)
are available at a substantially reduced price.

«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished in English under
the title «The Paton Welding Journal».

The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

БОРИС ЄВГЕНОВИЧ ПАТОН — ПОЧЕСНИЙ ЧЛЕН IEEE!



Почесне членство в Інституті інженерів електротехніки та електроніки (IEEE) присуджується фізичній особі на все життя. Присуджується Радою директорів IEEE людям, які, не будучи членами IEEE, внесли видатний вклад в розвиток людства в сферах інтересів IEEE.



Секція IEEE України з гордістю повідомляє, що професор Борис Патон, президент Національної академії наук України, директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України обраний для отримання Почесного членства в IEEE 2020. Це визнає його досягнення в технічних галузях IEEE, що впливали на розвиток електрометалургії, матеріалознавства, електрозварювання металів та біологічних тканин.

В кінці поточного року на зборах ради директорів IEEE схвалено рішення по наданню проф. Борису Патону, президенту Національної академії наук України, директору Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України особливої нагороди — Почесного члена IEEE (Honorary Membership Award) з формулюванням «За досягнення в технічних галузях IEEE, що впливають на розвиток електрометалургії, матеріалознавства, електрозварювання металів та біологічних тканин».

Звання Honorary Member присуджується IEEE за вагомий внесок у розвиток технічних наук, визначених IEEE. Інститут інженерів електротехніки та електроніки налічує більше ніж 400 тис. членів з 160 країн світу, однак саме Honorary Members – не більше 50. Одержувачам цього звання вручають сертифікат, знак «Почесний член» та кришталеву статуетку.

В попередні роки одержувачами почесного членства IEEE були Теллі Уїтні (2019), Антон Цайлінгер (2018), Родольфо Стефано Зіч (2016), Елон Маск (2015), Ширлі Марі Тільгман (2014) та інші.

Dear Professor Paton,

It is a great pleasure to inform you that the IEEE Board of Directors selected you to receive the **2020 IEEE Honorary Membership Award**, which is given elected by the Board of Directors from among those individuals, not members of IEEE, who have rendered meritorious service to humanity in IEEE's designated fields of interest.

The award comes with the following citation:

"For lifetime achievements within IEEE technical fields of interest in the development of processes of electrometallurgy, materials science, electric welding of metals, and biological tissues."

For nearly a century, the IEEE Awards Program has paid tribute to researchers, inventors, innovators, and practitioners whose exceptional achievements and outstanding contributions have made a lasting impact on technology, society, and the engineering profession. Each year the IEEE Awards Board recommends a small number of outstanding individuals for IEEE's most prestigious honors. You now join this select group.

Details regarding the award presentation will be sent separately via electronic mail by the IEEE Awards Staff.

Congratulations on your achievement, and thank you for your commitment to IEEE and its mission of advancing technology to benefit humanity.

Very truly yours,

Jose' Moura
IEEE President

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ НАПЛАВЛЕННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ МЕТАЛУ ЗТВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ СТАЛІ М76

В.Д. Позняков, О.А. Гайворонський, В.А. Костін, О.М. Берднікова, С.В. Шмигельський
ІЕЗ ім. ЄО. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Підвищення ресурсу роботи залізничних коліс є актуальною задачею. Рішення цієї проблеми пов'язано з оптимізацією структурного стану металу залізничних коліс. В роботі досліджено вплив швидкості охолодження при плавленні на механічні властивості, опірність крихкому руйнуванню та структурні зміни металу ЗТВ колісної сталі з карбонітридним зміцненням з вмістом вуглецю 0,63 %. Показано, що в процесі наплавки формується гартівна бейнітно-мартенситна структура, об'ємна частка структурних складових в якій визначається швидкістю охолодження. Загартований метал ЗТВ колісної сталі з карбонітридним зміцненням має високу міцність і низьку пластичність та має підвищену схильність до крихкого руйнування. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: дугова наплавка, карбонітридне зміцнення, зона термічного впливу, термічний цикл, крихке руйнування

Для виготовлення коліс вантажних вагонів в Україні сьогодні використовується колісна сталь марки 2, з вмістом вуглецю 0,55...0,65 % [1, 2]. В процесі експлуатації колеса зношуються за профілем кочення. Через особливості роботи пари тертя–кочення «колесо–рейка» більше зношується робоча поверхня гребеня колеса, а на поверхні кочення коліс часто утворюються дефекти типу «вищербини».

Сучасні тенденції розвитку магістрально-го залізничного транспорту в Україні направлені на збільшення навантаження на вісь до 27,5 т та швидкості руху вантажних потягів до 150 км/год, що обумовлює застосування коліс підвищеної міцності та зносостійкості. Найбільш перспективний напрямок досягнення цього ґрунтується на мікролегуванні існуючої колісної сталі карбід- та нітридоутворюючими елементами, за рахунок чого можливо забезпечити диспергування структури металу. Це буде сприяти зростанню пластичних властивостей металу колеса при більшому рівні його міцності [3–5]. Для зниження вірогідності утворення «вищербин» на поверхні кочення колеса, вміст вуглецю в сталі необхідно обмежувати.

Необхідно передбачати, чи можливо буде їх відновлювати після зносу наплавленням в умовах вітчизняного виробництва. Тому розробка науково обґрунтованої технології наплавлення коліс, виготовлених з нової колісної сталі, яка б базувалася на результатах досліджень впливу термометформацийних процесів дугового наплавлення на структурні зміни та властивості нової колісної сталі підвищеної міцності, є актуальною задачею.

В основу технології наплавлення покладена ідея підвищення міцності, твердості, пластичних

властивостей та циклічної тріщиностійкості металу, який наплавляється при відновленні зношеного профілю кочення нових залізничних коліс, шляхом формування в наплавленому металі дрібної однорідної бейнітно-мартенситної структури, яка має добру здатність опиратися зношуванню при терті пари «колесо-рейка».

Методики досліджень. Дослідження впливу швидкості охолодження при наплавленні на механічні властивості металу ЗТВ. Дослідження проводили із застосуванням методу імітації на установці МСР-75 [6]. В якості об'єкту досліджень використовували дослідну колісну сталь з карбонітридним зміцненням (умовне скорочення КС-ТРЗ) наступного складу, мас. %: 0,63 С; 0,35 Si; 1,15 Mn; 0,16 Cr; 0,11 V, 0,019 S, 0,027 P. Результати досліджень колісної сталі КС-ТРЗ порівнювали з результатами аналогічних досліджень колісної сталі марки 2, ГОСТ 10791-2004 (умовне скорочення КС2) наступного складу, мас. %: 0,58 С; 0,44 Si; 0,77 Mn; 0,05 Cr; 0,01 V, 0,015 S, 0,020 P, які наведені в роботі [7].

Використовували зразки розміром 120×12×12 мм, які нагрівали електричним струмом по заданому циклу на базі 60 мм. Максимальна температура нагріву зразків складала 1200...1250 °С, швидкість нагріву 200...210 °С/с. У центральній частині зразків формувалась однорідна за структурою ділянка металу шириною 40 мм. Швидкість охолодження $w_{6/5}$ (в діапазоні температур 600...500 °С) становила 5, 10 та 22 °С/с. Такі швидкості охолодження були обрані виходячи з умов формування найбільш характерних структур для металу ділянки перегріву ЗТВ.

Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>, Гайворонський О.А. – <https://orcid.org/0000-0002-8146-7790>, Костін В.А. – <http://orcid.org/0000-0002-2677-4667>, Берднікова О.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9754-9478>
© В.Д. Позняков, О.А. Гайворонський, В.А. Костін, О.М. Берднікова, С.В. Шмигельський, 2019

Із зразків, після імітації термічного циклу дугового наплавлення, виготовляли спеціальні зразки для оцінки механічних властивостей при статичному розтягу (зразок типу II, ГОСТ 1497-84) та випробувань на ударний вигін (зразок типу I, ГОСТ 9454-78). Дослідження проводили при температурі 20 °С та -40 °С.

Дослідження впливу швидкості охолодження при наплавленні на опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ. Дослідження виконували з використанням модельних зразків розміром 100×20×10 мм, які обробляли у відповідності до термодеомаційного циклу дугового наплавлення. На першому етапі досліджень зразки піддавали термічному обробленню на установці МСР-75. Швидкість нагріву зразків з надрізом становила 150 °С/с. Максимальна температура нагріву складала 1250 °С. Швидкості охолодження металу в інтервалі температур 600...500 °С ($w_{6/5}$) вибирали, виходячи з умов формування найбільш характерних структур металу ділянки перегріву ЗТВ колісної сталі КС-ТРЗ (за результатами попередньо проведених дилатометричних досліджень):

$w_{6/5} = 5$ °С/с — бейнітно-мартенситна структура — 95 % B_H , 5 % М;

$w_{6/5} = 22$ °С/с — мартенситна структура — 18 % B_H , 82 % М.

В подальшому в термічно оброблених зразках механічно робили надріз глибиною 7 мм, з вершини якого потім вирощували тріщину втоми глибиною 3 мм. При цьому використовували симетричний цикл навантаження з частотою 35 Гц і напруженням циклу 120 МПа. Навантаження виконували на втомовій машині малої потужності УМП-1. Після цього зразки з тріщинами випробували при трьохточковому вигині на установці Фрідлянда.

Навантаження зразків здійснювали сталим зусиллям при переміщенні пуансону із швидкістю 1 мм/хв. Величину навантаження, при якому відбувається руйнування зразків, встановлювали за показниками динамометру. Температура зразків при іспитах становила 20 °С. За одержаними даними розраховували критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} [8, 9].

Злами зразків після випробувань досліджували методами растрової електронної емісії на скануючому мікроскопі СЭМ-515 фірми «Philips», оснащеному енергодисперсійним спектрометром системи «LINK».

Дослідження впливу термічного циклу наплавлення на структурні зміни в металі ЗТВ. Дослідження виконували на модельних зразках діаметром 6,0 мм і довжиною 80 мм, які виготовляли з дослідної колісної сталі КС-ТРЗ, хімічний

склад якої зазначено вище. У відповідності з методом іспитів жорстко закріплені зразки нагрівали до температури 1250 °С зі швидкістю 210 °С/с (час нагріву 6 с), а потім охолоджували з різними швидкостями у відповідності до термічних циклів наплавлення [8]. Час перебування металу при температурах вище A_{c3} , в залежності від швидкості охолодження, був 7...10 с.

Температуру початку і закінчення перетворення переохолодженого аустеніту визначали по точці відходу дотичної від діаметричної кривої, а співвідношення фаз, які утворилися в результаті перетворень, встановлювали методом відрізків [11, 12]. В подальшому структуру зразків досліджували методами оптичної металографії, за результатами якої уточнювали співвідношення структурних складових і їх властивості.

Металографічні дослідження виконували за допомогою мікроскопу «Neophot-32», мікротвердість окремих структурних складових і інтегральну твердість металу вимірювали на твердомірі М-400 фірми «LECO» при навантаженнях відповідно 100 г (HV_1) та 1 кг (HV_{10}). Зразки для досліджень підготовлювали за стандартним методом при застосуванні алмазних паст різної дисперсності, виявлення мікроструктури виконували методом хімічного травлення у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти.

Результати експериментів та їх аналіз. Узгальнені порівняні механічні властивості металу ЗТВ колісних сталей КС-ТРЗ та КС2 наведені на рис. 1–3.

Як видно з наведених даних, при великих швидкостях охолодження загартований метал ЗТВ

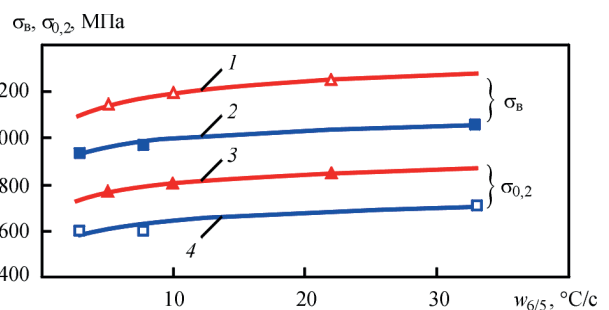


Рис. 1. Вплив швидкості охолодження на міцність металу ЗТВ колісних сталей КС-ТРЗ (1, 3) та КС2 (2, 4)

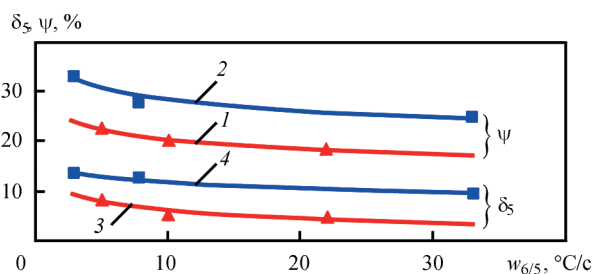


Рис. 2. Вплив швидкості охолодження на пластичні властивості металу ЗТВ колісних сталей КС-ТРЗ (1, 3) та КС2 (2, 4)

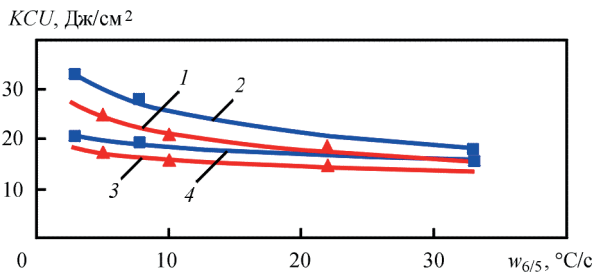


Рис. 3. Вплив швидкості охолодження на ударну в'язкість металу ЗТВ колісних сталей КС-ТРЗ (1, 3) та КС2 (2, 4) при температурі іспитів 20 °С (1, 2) та -40 °С (3, 4)

колійної сталі КС-ТРЗ має найбільші показники міцності і низьку пластичність. В порівнянні з колійною сталлю КС2 тимчасова міцність та границя текучості металу ЗТВ сталі КС-ТРЗ приблизно на 21 % вища, а відносне подовження та звуження нижчі відповідно на 50 та 26 %.

Суттєво на міцність та пластичність металу ЗТВ як колійної сталі марки КС2, так і сталі КС-ТРЗ впливає швидкість охолодження після нагріву. Так, при $w_{6/5} = 22 \text{ }^\circ\text{C/c}$ міцність загартованого металу КС-ТРЗ складає 1250 МПа, а відносне подовження становить всього 4,7 %, звуження 18,3 %. При уповільненні охолодження до $w_{6/5} = 5,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$ можна поліпшити показники пластичності загартованого металу в 1,2...1,8 рази. Але навіть за таких умов охолодження показники ударної в'язкості металу не перевищують 8,8 Дж/см². Очевидно, що такий метал буде мати порівняно низьку деформаційну здатність під дією зовнішнього навантаження, а відповідно і підвищену схильність до крихкого руйнування.

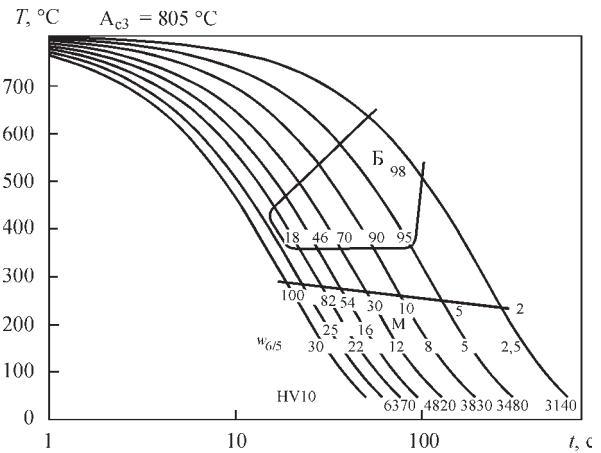


Рис. 4. Діаграма перетворення переохолодженого аустеніту в металі ЗТВ колійної сталі КС-ТРЗ (0,63 % С) при дуговому наплавленні

Зазначені зміни механічних властивостей металу ЗТВ сталі КС-ТРЗ ймовірно за все пов'язані з впливом безперервного нагріву та охолодження по термічному циклу наплавлення на формування структури в даному металі. Про це свідчать результати металографічних досліджень.

Узагальнені результати досліджень у вигляді діаграми перетворення переохолодженого аустеніту в металі ділянки перегріву ЗТВ в залежності від швидкості охолодження у відповідності до термічних циклів наплавлення наведено на рис. 4, а структура металу на рис. 5.

Структура колійної сталі КС-ТРЗ у вихідному стані представлена перлітно-феритною сумішшю (рис. 5, a), величина зерна становить 16...32 мкм, мікротвердість структурних скла-

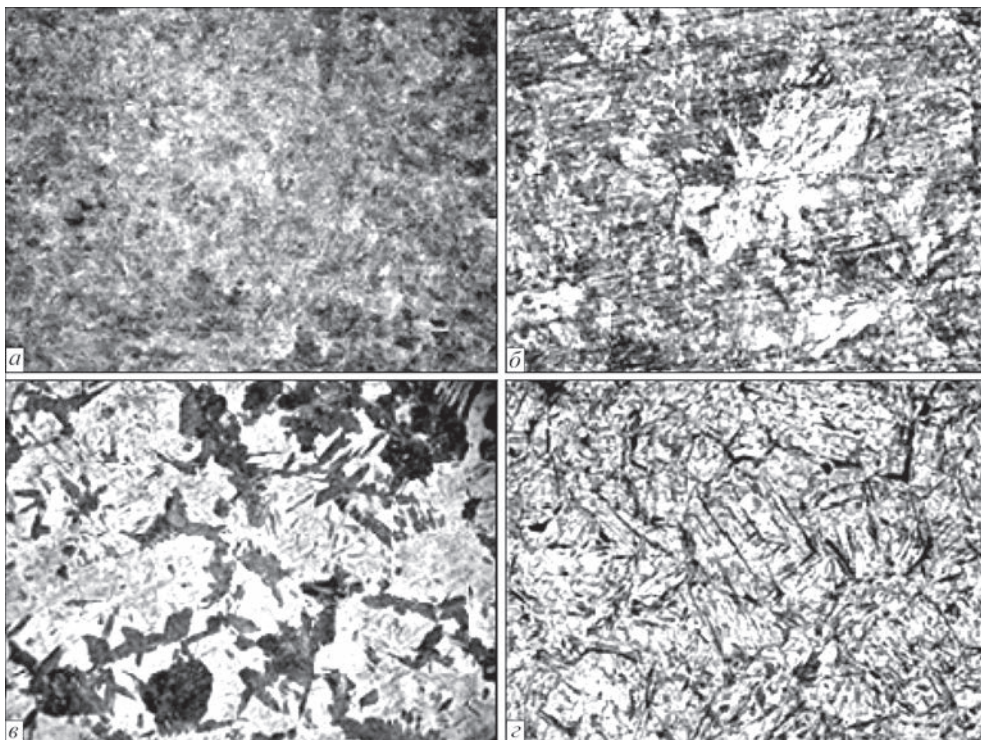


Рис. 5. Мікроструктура (×500) металу ЗТВ колійної сталі КС-ТРЗ: a — метал у вихідному стані; б — $w_{6/5} = 5 \text{ }^\circ\text{C/c}$; в — 22; з — 30

дових $HV_1 - 1990...2450$ МПа. По границям зерен розташовані феритні оторочки розміром $5...10$ мкм. Під дією термічного циклу наплавлення структура металу суттєво змінюється.

При швидкості охолодження $w_{6/5} = 5,0...12,0$ °C/c в металі ділянки перегріву ЗТВ формується бейнітно-мартенситна структура, в якій основну частину складає бейнітна складова (рис. 4). Це є переважно нижній бейніт з мікротвердістю $HV_1 - 3360...3780$ МПа (рис. 5, б). При підвищенні швидкості охолодження в цьому діапазоні частка мартенситу збільшується від 5 до 30 %, а твердість HV_{10} загартованого металу від 3480 до 4820 МПа.

Верхній бейніт ($HV_1 - 2970...3220$ МПа) є основною складовою структури в металі ЗТВ при швидкості охолодження $2,5$ °C/c. При збільшенні швидкості охолодження до $5,0$ °C/c його частка зменшується до 20 % при відповідному збільшенні частки нижнього бейніту.

Мартенситне перетворення в металі ЗТВ колісної сталі КС-ТР3 в залежності від швидкості охолодження починається при температурі $240...280$ °C, а його мікротвердість змінюється від 4250 до 7830 МПа. З підвищенням швидкості охолодження металу в діапазоні $w_{6/5} = 12,0...22,0$ °C/c його частка збільшується від 30 до 82 % (рис. 5, в). Кількість мартенситної складової структури на рівні 50 % відповідає умовам охолодження, коли швидкість охолодження буде становити приблизно $w_{6/5} \approx 15,0$ °C/c (рис. 6). При цьому твердість загартованого металу ЗТВ буде на рівні 5000 МПа.

Узагальнені результати досліджень впливу швидкості охолодження $w_{6/5}$ на опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ колісної сталі КС-ТР3 наведено на рис. 7. Для порівняння на цьому рисунку наведено також раніше отримані результати досліджень опірності крихкому руйнуванню металу ЗТВ колісної сталі КС2 [7].

В залежності від швидкості охолодження зразків, коефіцієнт K_{1c} при руйнуванні металу ЗТВ сталі КС2 може змінюватися в діапазоні від 23 до 35 МПа√м. Основний метал даної сталі має показ-

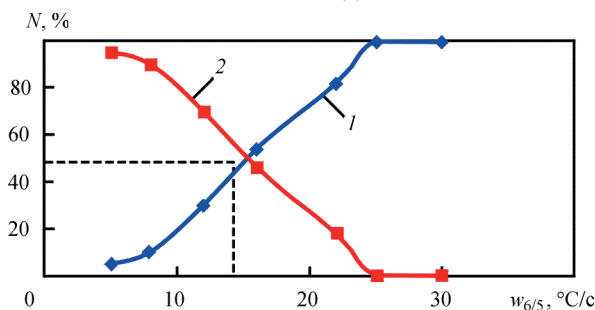


Рис. 6. Вплив швидкості охолодження на зміну складових структури в металі ЗТВ колісної сталі КС-ТР3: 1 — мартенсит; 2 — бейніт

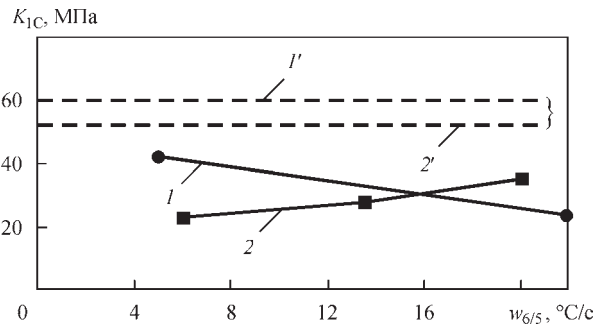


Рис. 7. Опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ колісних сталей КС-ТР3 (1) та КС2 (2). Штрихові лінії — сталь в початковому стані

ники K_{1c} на рівні $51...52$ МПа√м. Найнижчий показник інтенсивності напружень ($K_{1c} = 23$ МПа√м) має метал ЗТВ, швидкість охолодження якого становила $6,0$ °C/c, коли утворюється структура, яка на 98 % складається з верхнього бейніту (Б_в).

При збільшенні швидкості охолодження $w_{6/5}$ до 20 °C/c опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ сталі КС2 підвищується в 1,5 рази ($K_{1c} = 35$ МПа√м). За даних умов охолодження формується більш дисперсна структура нижнього бейніту та мартенситу у рівному співвідношенні.

Коефіцієнт K_{1c} при руйнуванні металу ЗТВ колісної сталі КС-ТР3 в залежності від швидкості охолодження зразків, тобто їх структурного стану, змінюється від 24 до 42 МПа√м. При цьому, метал із структурою переважно нижнього бейніту ($w_{6/5} = 5,0$ °C/c) має найбільшу опірність крихкому руйнуванню, приблизно як і метал ЗТВ сталі КС2 при 20 °C/c. При формуванні переважно мартенситної структури (при 22 °C/c) показник K_{1c} для металу ЗТВ колісної сталі КС-ТР3 найнижчий.

За результатами досліджень зламу зразків були встановлені загальні та особливі умови їх руйнування. Загальним для них є те, що на зламі виділяються три характерні ділянки (рис. 8):

- ділянка I — зародження та розвиток тріщини втоми;

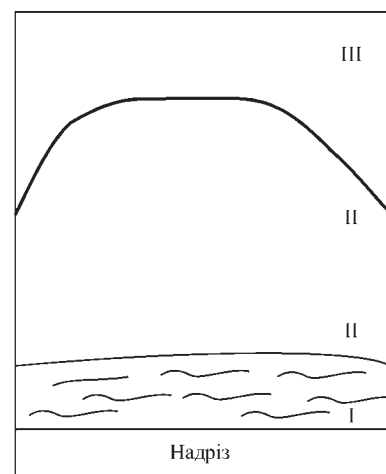


Рис. 8. Умовна схема розподілу характерних ділянок на поверхні зламу зразків при іспитах (опис I–III див. у тексті)

- ділянка II — розвиток магістральної тріщини при статичному навантаженні вигином;
- ділянка III — долом.

Порівняльний аналіз поверхонь руйнувань зразків показав, що незалежно від типу колісної сталі та структурного стану металу ЗТВ зародження і розвитку тріщин втоми має крихкий характер. В зоні зародження тріщини втоми зформували крихкий міжзеренний злам (рис. 9, а, б), а в зоні розвитку — крихкий внутрішньозеренний злам (рис. 9, в, г). Відмінності розвитку тріщин втоми в залежності від типу колісної сталі та структурного стану металу ЗТВ наступні. В металі ЗТВ сталі КС2 зі структурою верхнього бейніту ($w_{6/5} = 6,0$ °C/c) розмір фасеток крихкого зламу становлять 30...100 мкм, а в зламі металу ЗТВ сталі КС-ТР3 при формуванні структури переважно нижнього бейніту ($w_{6/5} = 5,0$ °C/c) — 30...70 мкм. На I ділянці зламів виявлено вторинні тріщини, які розташовуються по границям зерен, їх добре видно на рис. 9, а, б. Їх розміри також залежать від типу сталі. Встановлено, що в металі ділянки перегріву ЗТВ колісної сталі КС2 при даних швидкостях охолодження довжина вторинної тріщини складає $L_{вт} = 50...100$ мкм, а сталі КС-ТР3 не перевищує 60 мкм.

На відміну від зламів металу ЗТВ сталі КС-ТР3, який був термооброблений при швидкості охолодження $w_{6/5} = 5,0$ °C/c, вторинні тріщини в зоні зародження та розвитку тріщин втоми зразків, які мали переважно мартенситну структуру (22 °C/c), були довжиною до $L_{вт} \leq 200$ мкм.

На II ділянці зламу, при швидкості охолодження $w_{6/5}$ на рівні 6,0 °C/c та 13,5 °C/c розмір тріщин становить відповідно не більше 40 мкм та 5 мкм [7]. В металі ЗТВ колісної сталі КС-ТР3 під дією статичного навантаження тріщина розвивається крихко по тілу зерен (крихке внутрішньозеренне руйнування — КВЗ) при $w_{6/5} = 5,0$ °C/c, так і по границям зерен (крихке міжзеренне руйнування — умовне скорочення КМЗ) при 22 °C/c. В структурі зламу виявлено також вторинні тріщини довжиною $L_{вт} \leq 30...60$ мкм (рис. 10).

В зоні долому (ділянка III) руйнування зразків, незалежно від типу колісної сталі та структурного металу ЗТВ, відбувається в'язко (рис. 10). На поверхні зламів виявляються фазові утворення розміром до 1...3 мкм з підвищеним вмістом Mn, Ti, Si, Al і Ca.

Узагальнені результати досліджень зламів металу ЗТВ сталей КС2 та КС-ТР3 наведено в табл. 1.

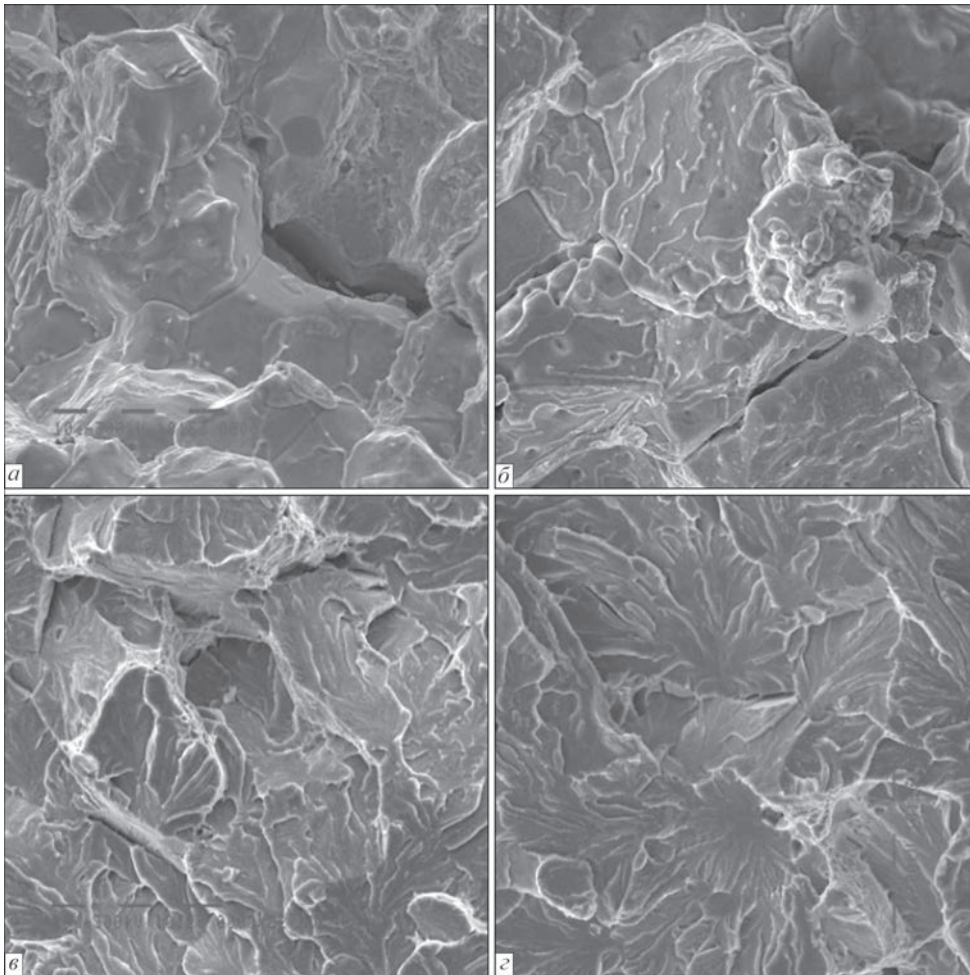


Рис. 9. Характерна поверхня зламу металу ЗТВ колісних сталей КС2 ($w_{6/5} = 6,0$ °C/c) та КС-ТР3 (5,0 °C/c) на ділянці зародження (а, б) та її розвитку (в, г) тріщини втоми ($\times 1010$): а, в — КС2 [7]; б, г — КС-ТР3

Таблиця 1. Характер зламу металу ЗТВ колісної сталі КС2 [7] та сталі КС-ТРЗ в зоні розвитку магістральної тріщини

Сталь КС2 (0,58 % С)				Сталь КС-ТРЗ (0,63 % С)			
$w_{6/5} = 6,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$		13,5 $^\circ\text{C/c}$		5,0 $^\circ\text{C/c}$		22 $^\circ\text{C/c}$	
98 % Б _В		25 % Б _В , 50 % Б _Н , 23 % М		95 % Б _Н , 5 % М		18 % Б _Н , 82 % М	
$\frac{\text{КВЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}} = \frac{100}{40}$	$\frac{\text{КМЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}}$ — не визнач.	$\frac{\text{КВЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}} = \frac{100}{5}$	$\frac{\text{КМЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}}$ — не визнач.	$\frac{\text{КВЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}} = \frac{100}{30}$	$\frac{\text{КМЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}}$ — не визнач.	$\frac{\text{КВЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}} = \frac{85}{60}$	$\frac{\text{КМЗ, \%}}{L_{\text{ВТ}}, \text{ мкм}} = \frac{15}{60}$

Виконані дослідження показали, що метал ЗТВ дослідної колісної сталі КС-ТРЗ, внаслідок формування гартівних структур, має підвищену схильність до крихкого руйнування. В порівнянні з вихідним станом опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ знижується в 1,4...2,5 рази. При цьому, на зміну коефіцієнту інтенсивності напружень K_{1c} при розвитку магістральної тріщини суттєво впливає структурно-фазовий склад загартованого металу. При формуванні в металі ЗТВ переважно структури нижнього бейніту, показник K_{1c} найбільший. Такі умови формування структури в ЗТВ можливо забезпечити при дуговому наплавленні, коли швидкість охолодження становить $w_{6/5} \leq 5,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$.

Узагальнені параметри термічного циклу наведено в табл. 2.

Таким чином, при проведенні досліджень встановлено, що в процесі дугового наплавлення в металі ЗТВ дослідної колісної сталі КС-ТРЗ, вміст вуглецю в якій складає 0,63 %, формується гартівна бейнітно-мартенситна структура, об'ємна частка структурних складових в якій визначається швидкістю охолодження. При підвищенні швидкості охолодження металу від 5,0 до 22 $^\circ\text{C/c}$ частка мартенситу збільшується від 5 до 82 %, а частка нижнього бейніту знижується від 95 до 18 %. При цьому твердість загартованого металу підвищується в 1,8 рази. Швидкість охолодження $w_{6/5}$, коли в структурі металу ЗТВ утворюється 50 % мартенситу, становить 15 $^\circ\text{C/c}$. Утворення переважно верхнього бейніту в структурі при охолодженні, що є небажаним з точки зору забезпечення порівняно високого рівня

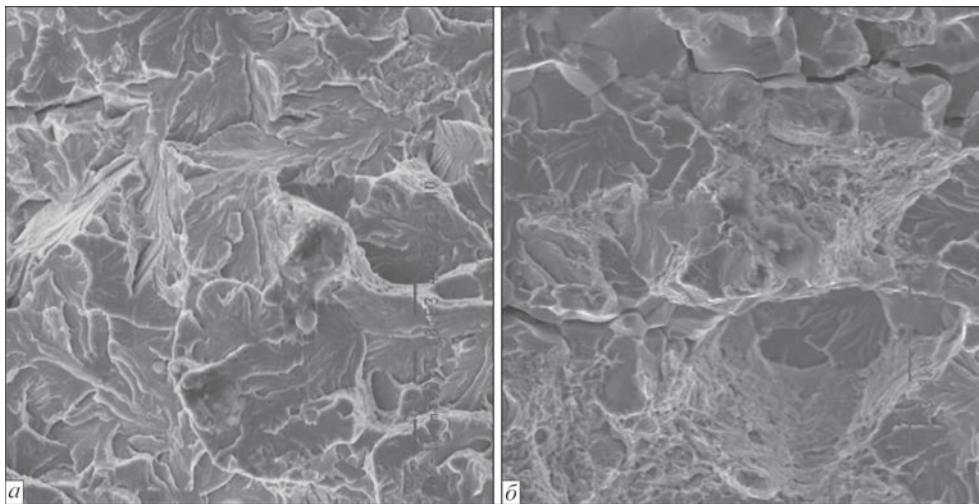


Рис. 10. Характерний злам металу ЗТВ колісної сталі КС-ТРЗ в зоні розвитку магістральної тріщини ($\times 1010$): а — $w_{6/5} = 5,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$; б — 22

Таблиця 2. Параметри термічного циклу в металі ЗТВ при дуговому наплавленні колісної сталі (товщина 20 мм, $T_{\text{max}} = 1250...1350 \text{ }^\circ\text{C}$) [10]

Погонна енергія наплавлення $Q_{\text{св}}$, кДж/см	Температура попереднього підігріву $T_{\text{пн}}$, $^\circ\text{C}$	Параметри термічного циклу		
		Швидкість охолодження $w_{6/5}$, $^\circ\text{C/c}$	Час охолодження від 800 до 500 $^\circ\text{C}$ $\tau_{8/5}$, с	Час охолодження від 800 до 100 $^\circ\text{C}$ $\tau_{8/1}$, с
8,6	20	25...30	8	170
	50	20...25	10	230
	70	15...20	11	250
	100	12...15	12	450
	150	8...10	14	760
	200	5...7	18	890
11,5	250	3...4	25	1050
	20	15...17	14	245
	50	12...14	16	360
15,0	100	6...8	20	850
	20	10...12	17	290

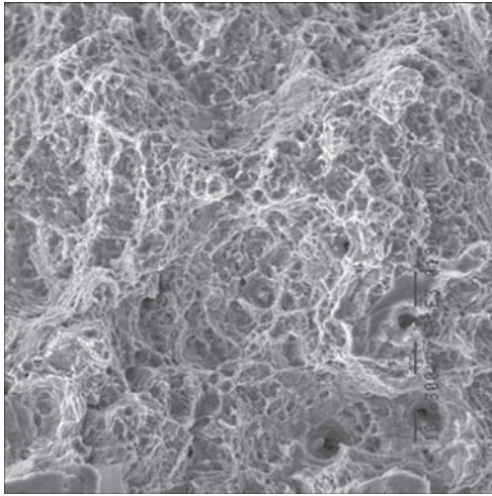


Рис. 11. Поверхня зламу зразків в зоні долому ($\times 1010$)

опірності крихкому руйнуванню металу ЗТВ дослідної колісної сталі КС-ТРЗ, можливо лише при швидкості охолодження $w_{6/5} = 2,5 \text{ }^\circ\text{C/c}$.

Висновки

При виконанні досліджень встановлено:

1. В процесі дугового наплавлення в металі ЗТВ дослідної колісної сталі з карбонітридним зміцненням, вміст вуглецю в якій складає 0,63 %, формується гартівна бейнітно-мартенситна структура, об'ємна частка структурних складових в якій визначається швидкістю охолодження. При підвищенні швидкості охолодження металу від 5,0 до 22 $^\circ\text{C/c}$ частка мартенситу збільшується від 5 до 82 %, а частка нижнього бейніту знижується від 95 до 18 %. При цьому твердість загартованого металу підвищується в 1,8 рази. Швидкість охолодження $w_{6/5}$, коли в структурі металу ЗТВ утворюється 50 % мартенситу — 15 $^\circ\text{C/c}$.

2. Загартований метал ЗТВ колісної сталі з карбонітридним зміцненням має високу міцність і низьку пластичність. В порівнянні з колісною сталлю марки 2 тимчасовий опір та границя текучості металу ЗТВ сталі з карбонітридним зміцненням приблизно на 21 % вища, а відносне подовження та звуження нижчі відповідно на 50 та 26 %.

3. Підвищити показники пластичності загартованого металу ЗТВ колісної сталі з карбонітридним зміцненням в 1,2...1,8 рази можливо за рахунок уповільнення охолодження до $w_{6/5} = 5,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$, коли в металі формується переважно структура нижнього бейніту.

4. Метал ЗТВ дослідної колісної сталі з карбонітридним зміцненням, внаслідок формування гартівних структур, має підвищену схильність до крихкого руйнування. В порівнянні з вихідним станом опірність крихкому руйнуванню металу ЗТВ знижується 1,4...2,5 рази. При цьому, на зміну коефіцієнту інтенсивності напружень K_{1c} при розвитку

магістральної тріщини суттєво впливає структурно-фазовий склад загартованого металу. При формуванні в металі ЗТВ переважної структури нижнього бейніту, показник K_{1c} найбільший. Такі умови формування структури в ЗТВ можливо забезпечити при дуговому наплавленні, коли швидкість охолодження буде становити $w_{6/5} \leq 5,0 \text{ }^\circ\text{C/c}$.

Список літератури

1. Узлов И.Г. (2003) Прогрессивные процессы производства и качество железнодорожных колес. *Сталь*, **5**, 69–72.
2. Железнодорожные колеса и бандажи KЛW (Интерпайп НТЗ Украина) // www.interpipe.biz.
3. Узлов И.Г., Бабаченко А.И., Деметьева Ж.А. (2005) Влияние микролегирования стали на вязкость разрушения железнодорожных колес. *Металлургия и горнорудная промышленность*, **5**, 46–47.
4. Бабаченко А.И., Литвиненко П.Л., Кныш А.В. и др. (2011) Совершенствование химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их стойкости к образованию дефектов на поверхности катания. *Фундамент. и прикл. проблемы черной металлургии. Сб. научн. тр. ИЧМ НАН Украины*, **23**, 226–233.
5. Иванов Б.С., Филипов Г.А., Демин К.Ю. и др. (2007) Модифицирование колесной стали азотом. *Сталь*, **9**, 22–25.
6. Саржевский В.А., Сазонов В.Я. (1981) Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75. *Автоматическая сварка*, **5**, 69–70.
7. Гайворонский А.А., Позняков В.Д., Маркашова Л.И. и др. (2016) Сопrotивляемость хрупкому разрушению металла ЗТВ соединений высокопрочных сталей с содержанием углерода 0,55...0,65 %, выполненных дуговой сваркой. *Там же*, **9**, 3–9.
8. Роботнов Ю.Н. (ред.). (1972) *Новые методы оценки сопротивляемости металлов хрупкому разрушению*. Москва, Мир.
9. (1985) ГОСТ 25.506-85. *Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении*. Москва, Изд-во стандартов.
10. Гайворонский А.А. (2014) Сопrotивляемость образованию холодных трещин металла ЗТВ сварного соединения высокопрочных углеродистых сталей. *Автоматическая сварка*, **2**, 3–12.
11. Черепин В.Т. (1968) *Экспериментальная техника в физическом металловедении*. Киев, Техніка.
12. Васильев В.Г., Саржевский В.А., Корниенко Т.А., Гайворонский А.А. (1997) Приставка к dilatометру для изучения фазовых превращений при низких температурах. *Автоматическая сварка*, **5**, 55–57.

References

1. Uzlov, I.G. (2003) Advanced processes of manufacturing and quality of railway wheels. *Stal*, **5**, 69-72 [in Russian].
2. Railway wheels and tyres KЛW (Interpipe NTZ Ukraine). www.interpipe.biz [in Russian].
3. Uzlov, I.G., Babachenko, A.I., Dementieva, Zh.A. (2005) Influence of steel microalloying on fracture toughness of railway wheels. *Metallurgiya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **5**, 46-47 [in Russian].
4. Babachenko, A.I., Litvinenko, P.L., Knysh, A.V. et al. (2011) Improvement of chemical composition of steel for railway wheels ensuring the increase of their resistance to defect formation on roll surface. In: *Fundament. i Prikl. Problemy Chyorn. Metallurgii, Transact. of IFM, NANU*, **23**, 226-233 [in Russian].
5. Ivanov, B.S., Filipov, G.A., Demin, K.Yu. et al. (2007) Modification of wheel steel by nitrogen. *Stal*, **9**, 22-25 [in Russian].
6. Sarzhevsky, V.A., Sazonov, V.Ya. (1981) Installation for simulation of welding thermal cycles on the base of MSR-75 machine. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 69-70 [in Russian].

7. Gajvoronsky, A.A., Poznyakov, V.D., Markashova, L.I. et al. (2016) Brittle fracture resistance of HAZ metal in arc-welded joints of high-strength steels with carbon content of 0.55-0.65 %. *The Paton Welding J.*, **9**, 2-8.
8. (1972) *New methods for evaluation of brittle fracture resistance of metals*. Ed. by Yu.N. Robotnov. Moscow, Mir [in Russian].
9. (1985) GOST 25.506-85: *Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics under the static loading*. Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
10. Gajvoronsky, A.A. (2014) Resistance to cold crack formation of HAZ metal of welded joint of high-strength carbon steels. *The Paton Welding J.*, **2**, 2-11.
11. Cherepin, V.T. (1968) *Experimental technique in physical metal science*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
12. Vasiliev, V.G., Sarzhevsky, V.A., Kornienko, T.A., Gajvoronsky, A.A. (1997) Attachment to dilatometer for examination of phase transformations at low temperatures. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 55-57 [in Russian].

INFLUENCE OF THERMAL CYCLE OF SURFACING ON MECHANICAL PROPERTIES AND RESISTANCE TO BRITTLE FRACTURE OF HAZ METAL OF RAIL WHEEL STEEL M76

V.D. Poznyakov, O.A. Gaivoronsky, V.A. Kostin, O.M. Berdnikova, S.V. Shmigelsky
11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kyiv.ua

Increasing the life of railway wheels is an urgent task. The solution to this problem is associated with the optimization of the structural state of metal of the railway wheels. In the work the influence of cooling rate during melting on mechanical properties, resistance to brittle fracture and structural changes of HAZ of wheel steel with carbonitride strengthening with a carbon content of 0.63% were investigated. It is shown that in the course of surfacing a hardening bainite-martensitic structure is formed, the volume fraction of the structural components in which is determined by the cooling rate. The hardened HAZ metal of wheel steel with carbonitride strengthening has a high strength and a low ductility and has a high tendency to brittle fracture. 12 Ref., 2 Tabl., 11 Fig.

Keywords: arc surfacing, carbonitride strengthening, heat-affected-zone, thermal cycle, brittle fracture

Надійшла до редакції
10.10.2019

МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ПРОФЕСІОНАЛІВ



19-22 травня 2020 р. відбудеться Міжнародна конференція молодих професіоналів «Young Professionals International Conference on Welding and Related Technologies YPIC and WRTYS 2020» під егідою Міжнародного інституту зварювання.

З 2001 р. Міжнародна конференція «Зварювання та споріднені технології» – WRTYS (Welding and Related Technologies on Young Scientists), головним організатором якої є Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, стала головним місцем зустрічі українських та зарубіжних молодих спеціалістів в галузі зварювання, металургії та матеріалознавства. У 2017 р. успішно була проведена 9-та Міжнародна конференція WRTYS 2017.

У 2014 р. Угорським зварювальним товариством було започатковано захід для молодих спеціалістів в області зварювання під назвою YPIC (Young Professional International Conference) – Міжнародна конференція для молодих професіоналів. Даний захід проходить щорічно і вже встиг побувати в Угорщині, Німеччині та Франції.

У 2020 р. Україна є країною організатором 6-ої Міжнародної конференції YPIC 2020 та традиційної ювілейної 10-ої Міжнародної конференції молодих спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» WRTYS 2020. Міжнародний інститут зварювання об'єднує ці конференції в спільний міжнародний науковий захід «YPIC and WRTYS 2020».

Організатори конференції: Національна академія наук України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Рада молодих вчених ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Громадська організація «Віртус», Посольство Франції в Україні та Представництво Польської академії наук у м. Києві.

Теми конференції:

- Передові технології зварювання та з'єднання матеріалів
- Нові структурні та функціональні матеріали, наноматеріали, композити
- Адитивні технології
- Моделювання процесів та матеріалів
- Інноваційні технології та процеси в металургії
- Неруйнівний контроль та якість зварних з'єднань
- З'єднання полімерів та адгезивні технології
- Механіка руйнування
- Здоров'я, безпека та довкілля

Запрошуємо прийняти участь в роботі Міжнародної конференції молодих професіоналів «YPIC and WRTYS 2020» 19-22 травня 2020 р. Місце проведення: Київська обл., с. Мощун, вул. Лісова, 1, готельний комплекс «Пуща Лісова».

За більш детальною інформацією звертатися на офіційний сайт конференції: www.ypic2020.com та e-mail: office@wrtys.com.ua

ПРОЦЕССЫ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С МОДУЛЯЦИЕЙ СВАРОЧНОГО ТОКА (Обзор).

Часть II. Эффекты дугового воздействия на свариваемый металл

У. Бон¹, И.В. Кривцун²

¹Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона).
510650, г. Гуанчжоу, Тяньхе, ул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнен обзор работ, посвященных процессам сварки неплавящимся электродом в инертном газе с модуляцией сварочного тока. Вторая часть обзора посвящена анализу работ, в которых рассматриваются особенности проплавления металла (алюминиевые сплавы, нержавеющие стали, никель-хромовые жаропрочные сплавы) и формирования швов при TIG сварке модулированным током. Библиогр. 12, табл. 16, рис. 19

Ключевые слова: дуга с тугоплавким катодом, TIG сварка, свариваемый металл, проплавление, сварной шов, модуляция сварочного тока, импульс, частота, коэффициент заполнения, амплитуда

Особенности горения нестационарной дуги при сварке неплавящимся электродом с модуляцией тока, описанные в первой части данного обзора [1], вызывают значительные изменения характеристик теплового и динамического воздействия дуги на свариваемый металл, а, следовательно, процессов его проплавления и формирования швов по сравнению с соответствующими процессами при TIG сварке на постоянном токе.

Работа [2] является одним из первых исследований, посвященных сравнительному анализу качества и механических свойств сварных швов, полученных при однопроходной TIG сварке образцов из алюминиевого сплава 2219 толщиной 0,125; 0,250; 0,350 дюйма (3,2; 6,4 и 8,9 мм) на постоянном токе прямой полярности и с его импульсной модуляцией. При проведении экспериментов использовались два источника питания – для высокочастотной (ВЧИ) и низкочастотной (НЧИ) импульсной модуляции сварочного тока. Первый из них обеспечивал ВЧИ модуляцию тока прямоугольными импульсами до значения 500 А, с частотой следования $f = 2 \dots 25$ кГц и регулируемым коэффициентом заполнения δ в диапазоне от 20 до 80 %, что позволяло варьировать среднее значение тока от 100 до 400 А. Второй источник обеспечивал дополнительную НЧИ модуляцию высокочастотного тока дуги прямоугольными импульсами с частотой 1...10 Гц и коэффициентом заполнения 10...100 %. Ток подставки во всех случаях был равен 3 А. Следует отметить, что кроме подачи однополярных импульсов тока такая система позволяет также реализовать модуляцию сварочного тока (в том числе комбинированную) импульсами прямой и обратной полярности.

Кривцун И.В. – <http://orcid.org/0000-0001-9818-3383>
©У. Бон, И.В. Кривцун, 2019

На всех образцах выполнялись наплавочные и стыковые швы (в нижнем положении, на весу) при двух режимах модуляции тока: высокочастотном и комбинированном (высокочастотная + низкочастотная модуляция), а также при TIG сварке на постоянном токе. Полученные швы подвергались радиографическому контролю. Рентгеновские изображения анализировались при десятикратном увеличении и определялось количество дефектов (пор и оксидных включений) размером более 0,005 дюйма (0,13 мм) по всей длине шва. На рис. 1, 2 показаны зависимости длины неоднородностей (дефектов) от длины швов на образцах из алюминиевого сплава 2219 толщиной 8,9 и 3,2 мм, соответственно, при различных режимах модуляции. Приведенные на этих рисунках экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение ВЧИ модуляции тока существенно (до 80 %) снижает количество пор и неметаллических включений на единицу длины шва, при этом

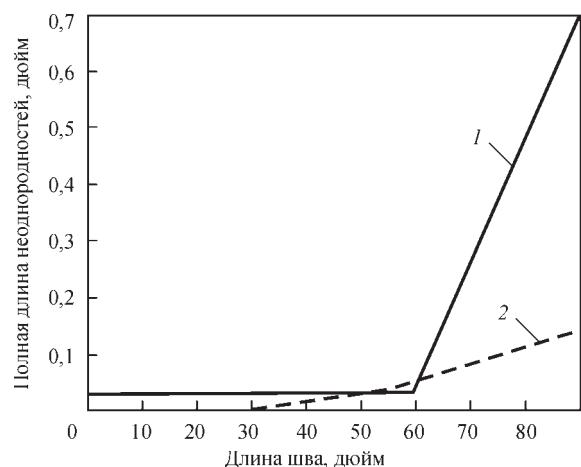


Рис. 1. Полная длина неоднородностей (дюймов) в зависимости от длины шва (дюймов) при TIG сварке образцов толщиной 8,9 мм на постоянном токе (1) и с ВЧИ модуляцией тока (2) [2]

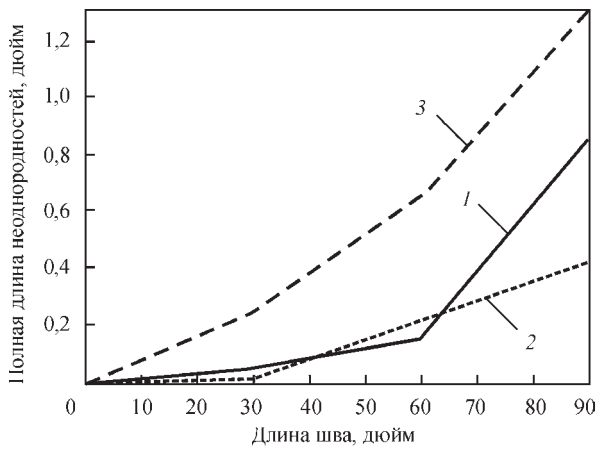


Рис. 2. Повна довжина неоднородностей в залежності від довжини шва при TIG-сварці образців товщиною 3,2 мм на постійному тоці (1), с ВЧІ модуляцією тоці (2) і с комбінованою модуляцією (3) [2]

використання комбінованого режиму помітно погіршує цей показник.

Автором [2] показано, що високочастотна імпульсна модуляція зварочного тоці може ефективно використовуватися для руйнування неоднорідної литої структури металу, спостережуваної в швах, виконаних зваркою неплавлячим електродом на постійному тоці. В результаті мікроструктура металу швів при зварці алюмінієвого сплаву 2219 с ВЧІ модуляцією тоці являється однорідною як в продольному, так і в поперечному сеченні зварочного шва. Тому такі шви характеризуються значеннями в'язкості руйнування на 10...15 % вище, ніж при TIG-сварці на постійному тоці.

Низькочастотна модуляція тоці дуги в поєднанні з високочастотною не приводить до формування однорідної мікроструктури в зварних швах на алюмінієвому сплаві 2219. Вона може бути використана тільки для управління геометрією шва при однопрохідній TIG-сварці образців товщиною 0,125 дюйма (3,2 мм) з вільним формуванням. Це дозволяє якісно зварювати більш тонкі матеріали, що забезпечує зниження ваги зварної конструкції.

В роботі [3] експериментально досліджено вплив п'яти параметрів режиму TIG-сварки образців з нержавіючої сталі з низькочастотною (1...5 Гц) модуляцією тоці прямокутними імпульсами, а саме: амплітуди (глибини) і ча-

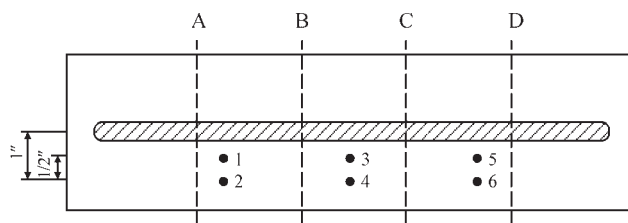


Рис. 3. Розташування термопар на поверхні зразка: точки 1, 3, 5 на відстані 1/2 дюйма (12,7 мм); 2, 4, 6 – 1 дюйм (25,4 мм) від середньої лінії шва [3]

стоти модуляції тоці, коефіцієнта заповнення і максимального значення тоці, а також швидкості зварки на глибину проплавлення, коефіцієнт форми шва і термоцикли в зварюваному металі. Для аналізу такого впливу при трьох рівнях значень вказаних параметрів, наведених в табл. 1, методом математичного планування експеримента було вибрано 46 їх комбінацій, для яких були проведені натурні експерименти.

При проведенні всіх експериментів використовувалася водоохладжуєма зварочна горелка з тугоплавким катодом з торированного вольфраму діаметром 3/32 дюйма (2,38 мм), довжина дуги встановлювалася рівною 0,05 дюйма (1,27 мм), в якості захисного газу використовувалася суміш 75%He + 25%Ar. Виконувалися наплавочні шви на зразках з нержавіючої сталі 304 товщиною 1/4 дюйма (6,35 мм), довжина всіх швів була однаковою і рівною 10 дюймів (25,4 см). Температура вимірювалася термопарами хромель-алюмель в шести точках поверхні зразка, показаних на рис. 3.

Характерні часові залежності температури в відповідних точках показані на рис. 4, при цьому максимальні значення температури в точках 1, 3, 5, а також в точках 2, 4, 6 виявляються практично однаковими.

Вимірянні значення максимальної температури в вибраних точках ставилися в відповідності догонна енергія X (Дж/дюйм) процесу зварки, яка в разі імпульсної модуляції тоці вивчалася наступним чином $X = 0,6U[I_H\delta + I_L(100 - \delta)]/S$, де U – напруга на дугі, яке вибиралося постійним (не залежним від значень тоці в паузі і максимального тоці) і рівним 11,75 В, а позначення інших параметрів і їх розмірності відповідають використаним в табл. 1. Наведені на рис. 5 залежності максимальних значень температури в точках 1, 3, 5 і, відповідно, 2, 4, 6 від погонної енергії процесу

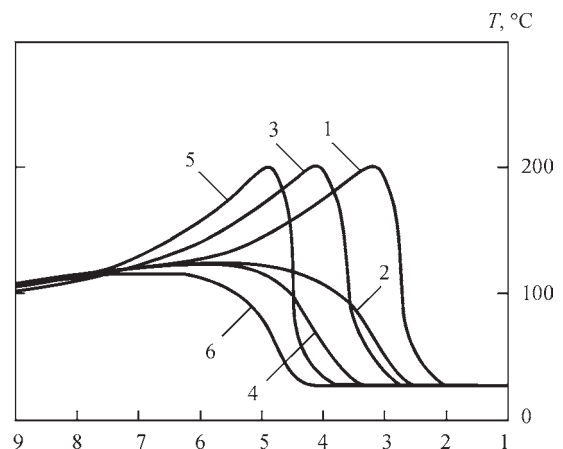


Рис. 4. Термоцикли в різних точках поверхні зразка [3]

Таблиця 1. Параметри досліджуваних режимів зварки [3]

Параметр	Значення		
Глибина модуляції току I_L/I_H , %	80	50	20
Частота модуляції f , Гц	5	3	1
Коефіцієнт заповнення δ , %	75	50	25
Максимальне значення току I_H , А	175	125	75
Швидкість зварки S , дюйм/мин	9	6	3

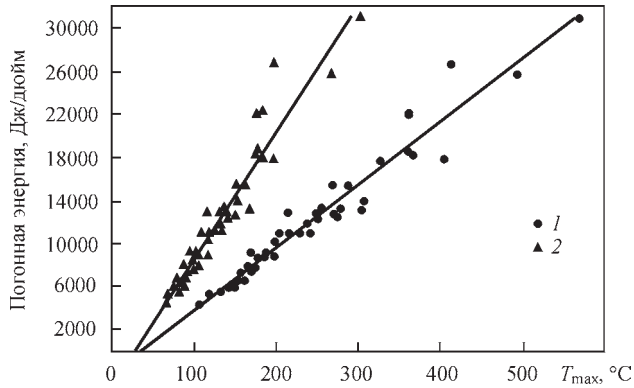


Рис. 5. Залежність від погонної енергії максимальних значень температури в точках, знаходячись на відстані 1/2 дюйма від середньої лінії шва (1) і в точках, знаходячись на відстані 1 дюйм (2) [3]

са свідчать про лінійність вказаних залежностей у всьому досліджуваному діапазоні параметрів режиму зварки.

На основі отриманих експериментальних даних були побудовані рівняння регресії для розрахунку глибини проплавлення h і її відношення до ширини шва h/b як функцій розглянутих параметрів режиму зварки. Рівняння регресії, запропоновані авторами для визначення глибини проплавлення, показує, що основну роль при цьому грає швидкість зварки S , далі йде амплітуда модуляції I_L/I_H і максимальне значення току I_H , потім коефіцієнт заповнення δ і, нарешті, частота f . Побудовані з допомогою даного рівняння лінії постійної глибини проплавлення h в змінних $S - I_H$ представлені на рис. 6. На цьому ж малюнку показані лінії постійних значень погонної енергії X , розраховані як вказано вище. Що стосується рівняння регресії для розрахунку відношення глибини проплавлення до ширини шва, то головну роль тут грає максимальне значення току I_H , далі йде швидкість зварки S , далі йде амплітуда модуляції I_L/I_H , частота f і коефіцієнт заповнення δ .

Приведені на рис. 6 розрахункові дані дозволяють, наприклад, визначати оптимальні комбінації I_H і S , відповідні мінімальному значенню погонної енергії, необхідної для досягнення будь-якої заданої глибини проплавлення. В частині, найкраща комбінація вказаних параметрів режиму зварки для досягнення глибини проплавлення $h = 0,09$ дюйма (2,29 мм)

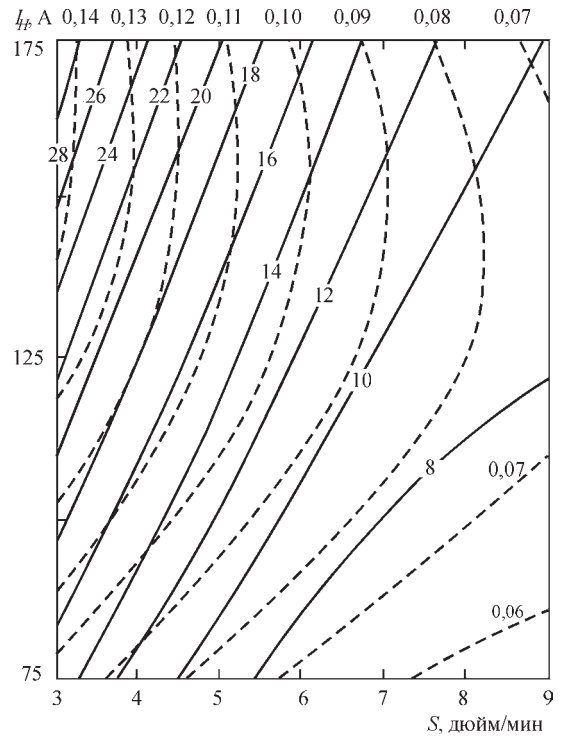


Рис. 6. Лінії постійних значень глибини проплавлення (штрихові криві, цифрами вказані значення h в дюймах) і погонної енергії (сплошні криві, цифрами вказані значення X , кДж/дюйм) при $\delta = 75\%$; $I_L/I_H = 20\%$; $f = 1$ Гц [3] єсть $I_H = 115$ А, $S = 6$ дюйм/мин, при цьому мінімально необхідне значення X становить приблизно 10 кДж/дюйм.

С допомогою такого підходу було проаналізовано 27 комбінацій параметрів режиму зварки. Отримані дані для ТІГ зварки на постійному тоці, а також при трьох комбінаціях значень коефіцієнта заповнення δ і амплітуди модуляції I_L/I_H представлені на рис. 7.

Завершивши розгляд роботи [3], необхідно відзначити важливий висновок, до якого приходять автори, а саме, при будь-яких комбінаціях параметрів режиму ТІГ зварки з НЧІ модуляцією току глибина проплавлення і її відношення до ширини шва виявляються більшими, ніж у випадку зварки на постійному тоці, при тому ж значенні погонної енергії.

Робота [4] присвячена експериментальним дослідженням процесів ТІГ і плазменної зварки з використанням низькочастотної (1...40 Гц) і високочастотної (2...20 кГц) імпульсної модуляції зварочного току, а також комбінованої модуляції (10 Гц + 2 кГц). У всіх експериментах по ТІГ зварці використовувалась горелка з вольфрамовим (W+2%Th) катодом діаметром 3/32 дюйма (2,36 мм), маючим кут заточки робочого кінця 60°, довжина дуги встановлювалась рівною 3/32 дюйма (2,36 мм), в якості захисного газу використовувалась аргон. Проводилась зварка зразків зі сплаву Інконель 600 товщи-

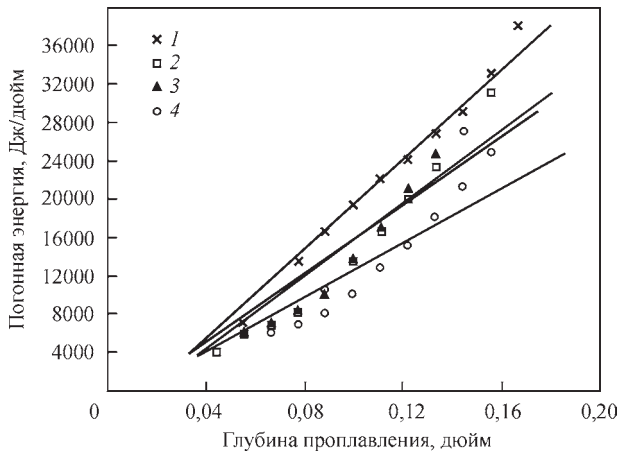


Рис. 7. Минимально возможные значения погонной энергии процесса TIG сварки нержавеющей стали в зависимости от достигаемой глубины проплавления для сварки на постоянном токе (1) и трех режимов с импульсной модуляцией тока дуги: $\delta = 50\%$, $I_L/I_H = 80\%$ (2); 25% и 80% (3); 75% и 20% (4) [3]

ной 0,109 дюйма (2,77 мм), скорость сварки выбиралась постоянной, равной 4 дюйма в минуту (1,69 мм/с). Питание дуги осуществлялось от двух источников, один из которых был предназначен для низкочастотной модуляции тока, а второй, транзисторный, – для высокочастотной.

Поскольку результаты исследования влияния низкочастотной импульсной модуляции сварочного тока на глубину и форму проплавления металла описаны выше (см. работу [3]), рассмотрим данные работы [4], касающиеся TIG сварки с высокочастотной импульсной модуляцией тока дуги. Для корректного сравнения глубины проплавления h при сварке на постоянном токе с ее значением в случае ВЧИ модуляции тока дуги прямоугольными импульсами, соответствующие эксперименты проводились при одном и том же значении среднего тока $I_{av} = \frac{I_B t_B + I_P t_P}{t_B + t_P}$, где I_B , I_P – значения тока в паузе и в импульсе; t_B , t_P – длительности паузы и импульса, соответственно. На рис. 8 приведены зависимости величины h от значения тока в паузе при TIG сварке с модуляцией тока в

форме меандра ($\frac{t_P}{t_B} = 1$) при частотах модуляции $f = \frac{1}{t_B + t_P}$, равных 2, 10 и 20 кГц и среднем токе $I_{av} = 60$ А. Горизонтальной прямой показана глубина проплавления металла при сварке на постоянном токе, равном I_{av} . Как следует из приведенных на этом рисунке экспериментальных данных, глубина проплавления при TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока дуги слабо зависит от частоты модуляции, заметно возрастает с ростом I_B и при $I_B > 30$ А превышает соответствующее значение для сварки постоянным током.

Для исследования влияния параметров модуляции тока на микроструктуру сварных швов, в работе [4] были проведены металлографические исследования металла шва и зоны термического влияния. В частности, было установлено, что с ростом частоты модуляции f сварочного тока размер зоны проплавления металла уменьшается, тогда как размер зоны термического влияния – увеличивается. Это свидетельствует о снижении эффективности плавления свариваемого металла (термического КПД процесса) при увеличении f . Что касается микроструктуры металла шва, то использование ВЧИ модуляции тока не приводит к заметному ее улучшению по сравнению с TIG сваркой на постоянном токе.

В работе [5] выполнены исследования влияния модуляции тока на глубину проплавления D и ширину W лицевой стороны шва при сварке образцов из нержавеющей стали 304. В случае синусоидальной модуляции тока дуги длиной 4 мм в диапазоне 30...270 А (среднее значение тока $\langle I \rangle = 150$ А) были получены зависимости от частоты модуляции глубины проплавления и ширины шва, представленные на рис. 9.

Как следует из приведенных на этих рисунках экспериментальных данных глубина проплавления в случае сварки модулированным током во всем исследованном диапазоне частот модуляции оказывается заметно выше, чем в случае сварки на постоянном токе, равном среднему значению модулированного тока. При этом с ростом частоты модуляции величина D монотонно возрастает, выходя на плато при частотах порядка 4 кГц. Что касается ширины шва, то в случае сварки с низкочастотной модуляцией тока ($f = 100$ Гц) она оказывается несколько больше соответствующей величины для сварки на постоянном токе, уменьшаясь с ростом частоты модуляции и выходя на постоянное

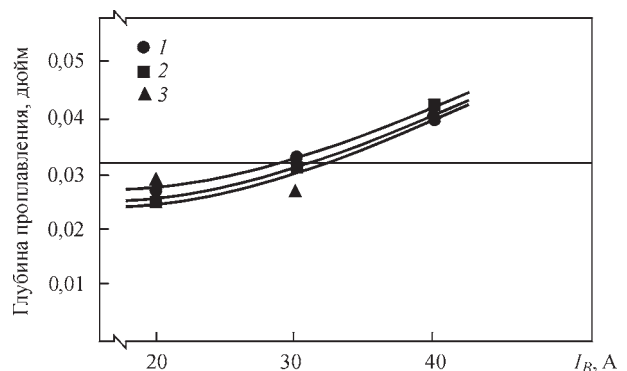


Рис. 8. Зависимость глубины проплавления от значения тока в паузе при модуляции тока прямоугольными импульсами в форме меандра с частотой следования $f = 2$ (1); 10 (2) и 20 (3) кГц и среднем значении тока $I_{av} = 60$ А, горизонтальной линией показана глубина проплавления при TIG сварке на постоянном токе $I = 60$ А [4]

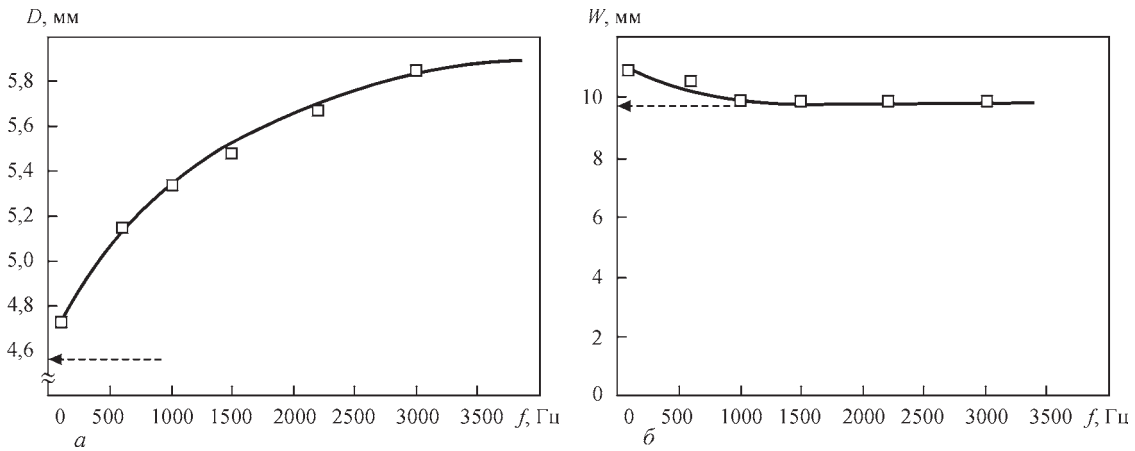


Рис. 9. Зависимости глубины проплавления (а) и ширины лицевой стороны шва (б) от частоты синусоидальной модуляции тока, штриховыми линиями показаны соответствующие значения для сварки постоянным током $I = 150$ А [5]

значение, соответствующее значению W при сварке постоянным током, при частоте порядка 1,5 кГц.

В работе [6] также приводятся данные, свидетельствующие об увеличении глубины проплавления при использовании высокочастотной модуляции тока дуги. В частности, на рис. 10 показана зависимость глубины проплавления T_N от значения тока в импульсе I_p (кривая 1) при частоте модуляции 10 кГц, токе в паузе $I_B = 5$ А и постоянном среднем значении тока дуги, равном 50 А (модуляция тока осуществлялась прямоугольными импульсами, коэффициент заполнения выбирался из условия постоянства среднего значения тока). На этом же рисунке приведены зависимости T_N от длины дуги при ТIG сварке модулированным током с частотой модуляции 10 кГц и среднем токе $\langle I \rangle = 50$ А (кривая 2), а также при сварке на постоянном токе (кривая 3), равном среднему значению модулированного тока.

Как следует из рис. 10, глубина проплавления повышается при увеличении амплитуды модуляции тока (см. кривую 1) и заметно снижается при увеличении длины дуги (см. кривые 2, 3), оставаясь существенно выше в случае модуляции тока с частотой 10 кГц по сравнению со сваркой на постоянном токе.

Кроме того, в работе [6] приводятся изображения поперечных сечений швов, выполненных ТIG свар-

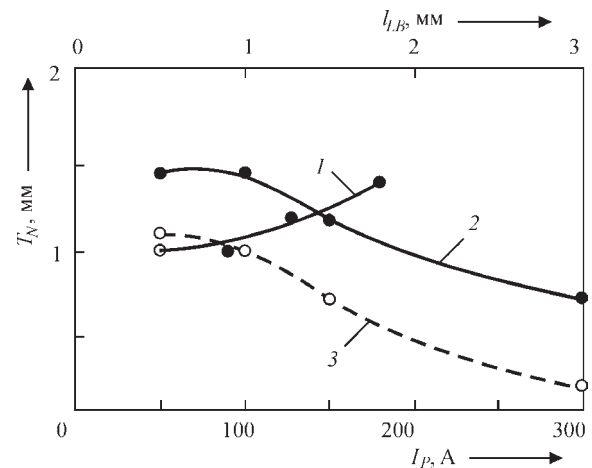


Рис. 10. Зависимости глубины проплавления T_N от значения тока в импульсе I_p (1) и от длины дуги l_{LB} (2 – 10 кГц, 3 – 0 Гц) [6] кой (защитный газ 95%Ar + 5%N₂, без присадочной проволоки) нержавеющей стали 1.4301 (AISI 304) толщиной 2 мм на постоянном токе и с ВЧИ модуляцией тока дуги. Как следует из сравнения фотографий поперечных сечений стыковых швов, представленных на рис. 11, применение ВЧИ модуляции тока дуги позволяет достичь того же результата, что и в случае сварки на постоянном токе, равном среднему значению модулированного тока, при существенно более высокой скорости сварки. Это свидетельствует не только о большей проплавляющей способности

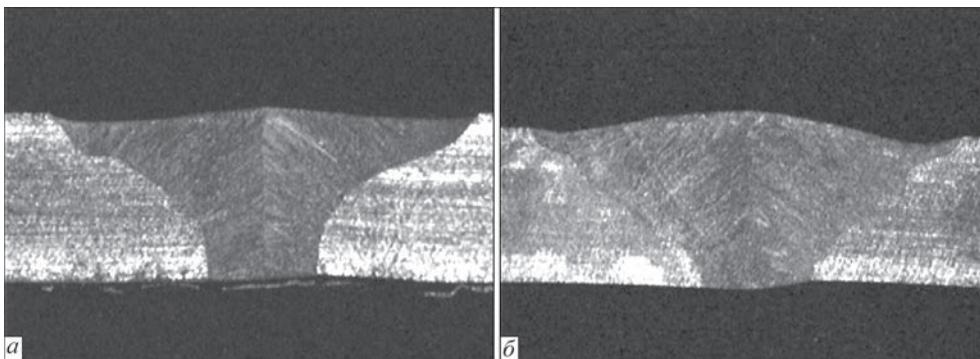


Рис. 11. Макрошлифы поперечных сечений стыковых швов, выполненных на стали 1.4301 толщиной 2 мм ТIG сваркой с ВЧИ модуляцией тока (а) и на постоянном токе (б) при следующих параметрах режимов: а – частота модуляции 6 кГц, значение тока в импульсе 375 А, средний ток 292 А, скорость сварки 2,4 м/мин; б – ток дуги 292 А, скорость сварки 1,6 м/мин [6]

Таблица 2. Состав свариваемого металла и присадочной проволоки [7]

Материал	Химический состав, мас. %							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Металл	0,04	0,6	1,01	0,032	0,005	8,26	18,34	бал.
Проволока	0,013	0,35	1,88	0,024	0,003	12,65	19,63	бал.

дуги модулированного тока, но и о более высокой ее пространственной стабильности.

В работе [7], наряду с результатами экспериментальных исследований характеристик дуги с тупоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом при ВЧИ модуляции (до 20 кГц) с высоким пиковым значением тока (до 500 А), приведены данные о влиянии такой модуляции на глубину проплавления и ширину наплавочных швов, выполненных TIG сваркой, на образцах из нержавеющей стали толщиной 16 мм, в том числе с использованием присадочной проволоки диаметром 0,6 мм (химический состав используемых материалов приведен в табл. 2).

На рис. 12 представлены зависимости глубины проплавления D и ширины швов W от длины дуги L при TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока (среднее и пиковое значения тока 150 и 500 А, соответственно) и при сварке постоянным током, равным среднему значению модулированного тока. Как следует из приведенных на этом рисунке экспериментальных данных ширина швов при короткой дуге ($L = 0,5$ мм) практически не зависит от частоты модуляции. С увеличением длины дуги при частоте модуляции 5 кГц величина W вначале увеличивается, затем несколько уменьшается и снова возрастает, достигая максимального значения порядка 10 мм при $L = 3$ мм (см. рис. 12, а). При частотах 10

и 16 кГц величина W немонотонно растет с увеличением длины дуги. Здесь следует отметить, что швы в случае сварки модулированным током оказываются заметно шире, чем в случае сварки на постоянном токе при той же длине дуги.

Что касается глубины проплавления при TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока на частотах от 5 до 16 кГц, то величина D уменьшается при увеличении длины дуги более быстро в диапазоне $L = 0,5 \dots 1,0$ мм и более плавно при $L > 1$ мм, оставаясь заметно выше соответствующих значений для случая сварки на постоянном токе (см. рис. 12, а). При сварке с использованием присадочной проволоки описанные выше закономерности изменения величин D и W с увеличением длины дуги сохраняются (см. рис. 12).

На рис. 13 представлены формы поперечного сечения наплавочных швов, выполненных TIG сваркой нержавеющей стали (см. табл. 2) с ВЧИ модуляцией тока (среднее и пиковое значения тока – 150 и 500 А, соответственно), а также на постоянном токе, равном среднему значению модулированного тока. К сожалению, в работе [7] не приводятся данные о скорости сварки и скорости подачи проволоки в экспериментах, результаты которых представлены на рис. 12, 13, а также не

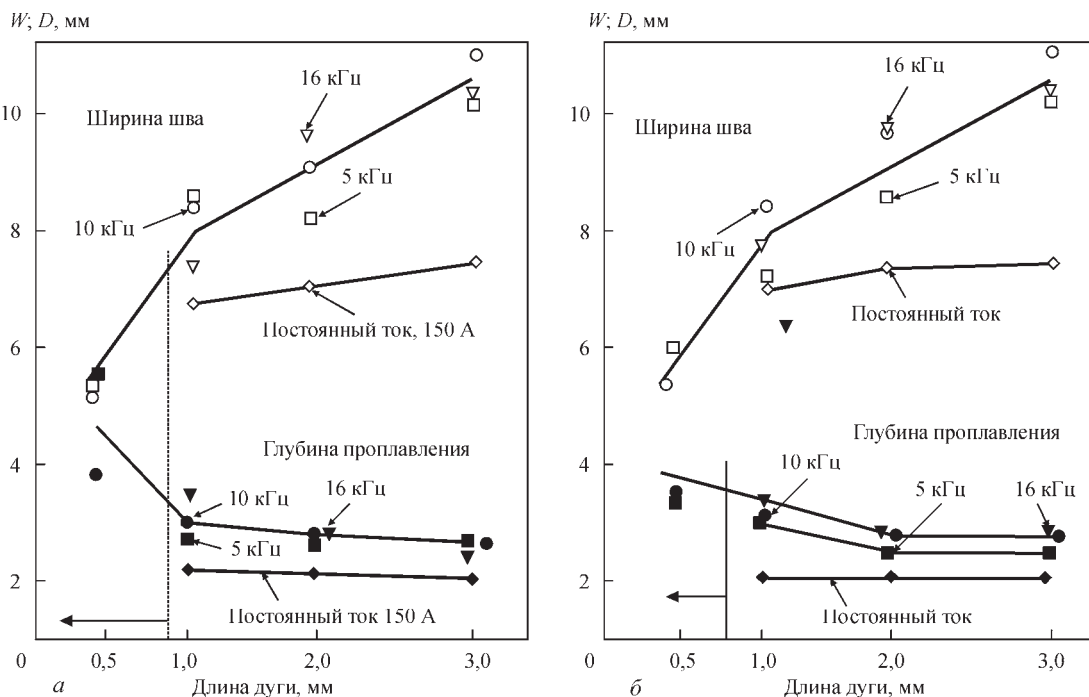


Рис. 12. Зависимости глубины проплавления и ширины шва от длины дуги при TIG сварке с модуляцией тока на частотах 5, 10 и 16 кГц (пиковое значение тока 500 А, среднее значение – 150 А) и сварке постоянным током 150 А: а – сварка без присадки; б – сварка с присадочной проволокой; горизонтальной стрелкой указана область в которой невозможна сварка на постоянном токе [7]

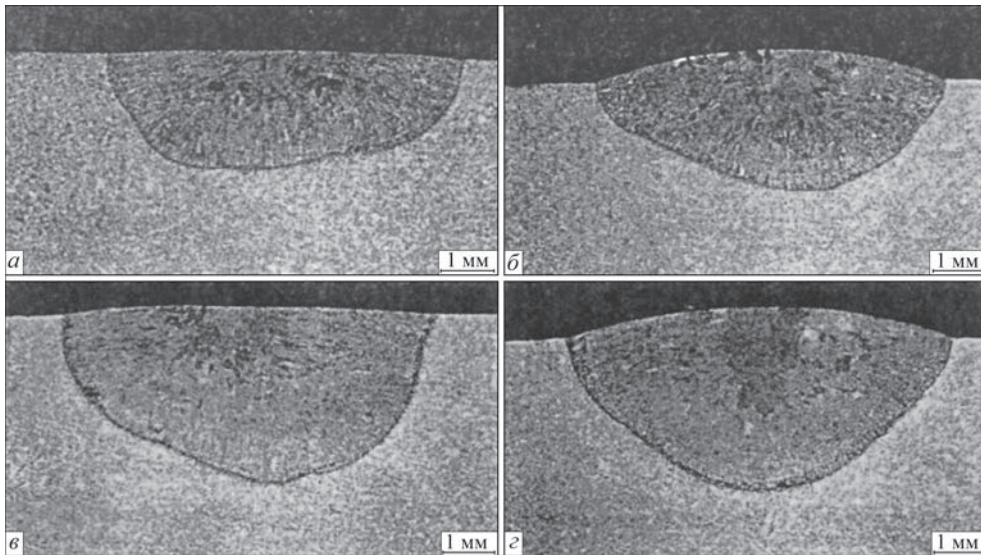


Рис. 13. Макрошліфи поперечних сечень наплавочних швів при ТІГ сварці постійним током 150 А, виконаних без присадки (а) і з присадочною проволокою (в), а також при ВЧІ модуляції сварочного тока на частоті 16 кГц (пікове значення тока 500 А, середнє значення – 150 А) без використання (б) і з використанням (г) присадочної проволоки [7]

указана довжина дуги, при якій були отримані форми проплавлення, показані на рис. 13.

В роботі [8] індійських учених було досліджено вплив низькочастотної ($f = 6$ Гц) модуляції тока дуги при ТІГ сварці алюмінієвого сплаву на розподіл температури в зварюваному металі і форму його проплавлення, прочнісні властивості і мікроструктурні особливості металу шва і зони термічного впливу, розподілу твердості і залишкових напружень в зварених зразках. Во всіх експериментах використовувалася дуга з тугоплавким катодом (W+2%Th) діаметром 3,2 мм, довжина дуги підтримувалася постійною, рівною 2 мм, в якості захисного газу використовувався хімічно чистий аргон (99,99 %). Виконувалися наплавочні шви на зразках товщиною 4 мм із алюмінієвого сплаву AA6351-T6, склад і механічні властивості якого приведені в табл. 3, 4. Вимірювання температури здійснювалися трь-

ма термопарами, розташованими на відстанях 5, 15 і 30 мм від середньої лінії шва.

Параметри режимів в експериментах по сварці постійним током і з низькочастотною імпульсною модуляцією тока дуги приведені в табл. 5 і 6, відповідно. Швидкість s сварки модульованим током вибиралася такою ж, як і при сварці на постійному тоці (4,167 мм/с), ККД процесу η передбачалося постійним, рівним 70 % і не залежати від режиму сварки. Відповідна погонна енергія вивчалася по формулі $Q = (\eta IV)/s$, де I, V – сварочний ток і напруга на дугі. В випадку модульованого тока його значення, входять в приведену формулу, визначалися як середнє $I_m = (I_p t_p + I_b t_b)/t_T$, де I_p, I_b – значення тока в імпульсі і в паузі; t_p, t_b – тривалості імпульсу і паузи; t_T – тривалість періоду модуляції, коефіцієнт заповнення вивчалася як $\delta = t_p/t_T$.

Форми і геометричні розміри поперечних сечень наплавочних швів, отриманих в експериментах по сварці неплавящимся електродом на постійному тоці (ПТ) і при сварці модульованим током (МТ), представлені в табл. 7. Тут слід відзначити, що в результаті експеримента

Таблиця 3. Хімічний склад зварюваного металу (мас. %) [8]

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Zr	Al
0,7	1,2	0,5	0,1	0,6	0,2	0,05	бал.

Таблиця 4. Механічні властивості основного металу [8]

Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение на 50 мм длины, %	Микротвердость HV при 0,49 Н
150	250	20	95

Таблиця 5. Параметри режимів сварки постійним током [8]

Номер експеримента	Сварочний ток, А	Напруга на дугі, В	Швидкість сварки, мм/с	ККД процесу, %	Погонна енергія, Дж/мм
1	110	12,5	4,167	70	231
2	120	12,7	4,167	70	256
3	130	12,2	4,167	70	266
4	140	12,5	4,167	70	294
5	150	12,4	4,167	70	312

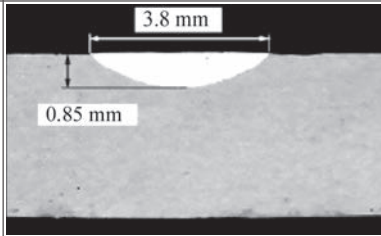
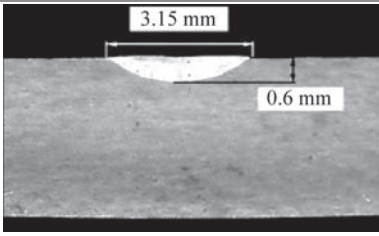
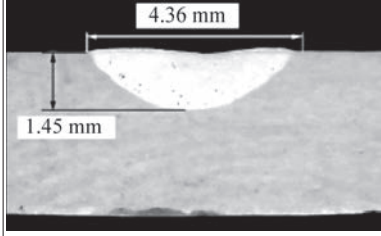
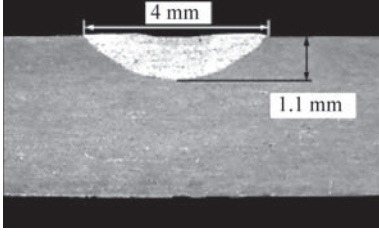
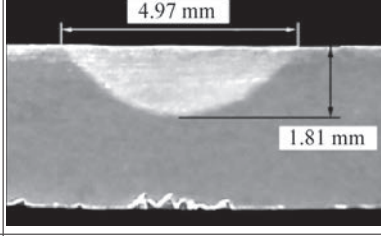
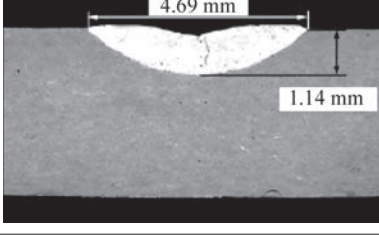
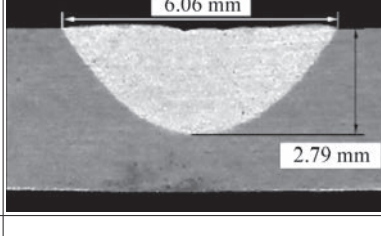
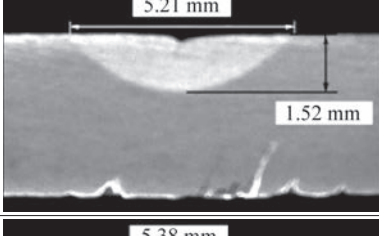
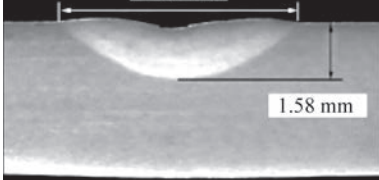
Таблиця 6. Параметри режимов сварки с импульсной модуляцией тока дуги ($f=6$ Гц) [8]

Номер эксперимента	Ток в импульсе, А	Ток в паузе, А	Напряжение на дуге, В	Коэффициент заполнения, %	Погонная энергия, Дж/мм
1	110	55	11	50	161
2	120	60	12	50	191
3	130	65	13	50	224
4	140	70	12,5	50	232
5	150	75	13,5	50	269

№ 5 по сварке постоянным током (погонная энергия 312 Дж/мм) происходило образование трещин, поэтому соответствующие данные в работе [8] не приводятся.

Максимальные значения температуры и значения скорости охлаждения в диапазоне 400...200 °С

Таблиця 7. Формы поперечных сечений и геометрические характеристики швов, выполненных TIG сваркой на постоянном токе и с низкочастотной импульсной модуляцией тока [8]

Ток, А	Поперечное сечение швов		D/T*		W/D	
	ПТ	МТ	ПТ	МТ	ПТ	МТ
110			0,22	0,15	5,50	5,25
120			0,36	0,28	3,00	3,64
130			0,45	0,29	2,75	4,11
140			0,70	0,38	2,17	3,43
150	–		–	0,40	–	3,41

Примечание *Т – толщина образца.

в точках, находящихся на расстоянии 5 и 15 мм от средней линии шва, представлены в табл. 8.

Для сравнения прочностных свойств, микротвердости, микроструктуры и остаточных напряжений использовались только два образца, на одном из которых наплавочный шов был выполнен дугой постоянного тока 120 А (эксперимент № 2), а на другом – с модуляцией сварочного тока при токе в импульсе 140 А (эксперимент № 4). Глубина проплавления на обоих образцах была примерно одинаковой 1,45 и 1,52 мм (см. табл. 7), что позволило сравнить прочностные характеристики наплавочных швов путем удаления непроплавленного металла до толщины образцов 1,5 мм. Результаты соответствующих механических испытаний приведены в табл. 9.

Таблиця 8. Максимальные значения температуры и скорость охлаждения при TIG сварке на постоянном токе, а также с импульсной модуляцией тока дуги [8]

Номер эксперимента	Ток, А	Погонная энергия, Дж/мм		Максимальная температура (5 мм), К		Скорость охлаждения, °C/c		Максимальная температура (15 мм), К	
		ПТ	МТ	ПТ	МТ	ПТ	МТ	ПТ	МТ
1	110	231	161	586	589	16,1	19,2	475	460
2	120	256	191	648	609	14,4	13,5	210	447
3	130	266	224	666	626	12,7	13,0	519	484
4	140	294	232	710	704	11,8	12,9	544	505
5	150	312	268	-	707	-	11,9	-	516

Таблиця 9. Прочностные характеристики швов, выполненных на постоянном токе и с импульсной модуляцией тока [8]

Процесс	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение, %	Прочность относительно основного металла, %
ПТ	185	200	8	80
МТ	205	225	10	90

Распределение микротвердости исследуемых образцов приведено в табл. 10, распределение остаточных напряжений – в табл. 11.

Как следует из экспериментальных данных, приведенных в табл. 9–11, использование НЧИ модуляции тока ($f = 6$ Гц) приводит к улучшению прочностных характеристик, повышению микротвердости и снижению уровня остаточных напряжений в образцах по сравнению со сваренными на постоянном токе. Причиной этого является установленное в [8] измельчение структуры металла шва и зоны термического влияния при модуляции сварочного тока.

В работе [9] приведены экспериментальные данные по глубине и форме проплавления при TIG сварке нержавеющей стали 0Cr18Ni9Ti толщиной 6 мм в аргоне (скорость сварки 120 мм/мин) с высокочастотной ($f =$

$= 20 \dots 80$ кГц) модуляцией тока прямоугольными импульсами в форме меандра (ток в импульсе 130 А, ток в паузе 50 А). Для сравнения приводятся соответствующие данные для сварки на постоянном токе, значение которого равно эффективному значению модулированного тока ($I = I_{eff} \approx 100$ А). Макрошлифы соответствующих наплавочных швов показаны в табл. 12, а на рис. 14 изображены зависимости глубины проплавления H и ширины шва B от частоты модуляции. Как следует из приведенных данных, глубина проплавления немонотонно возрастает с увеличением частоты, а ширина шва практически линейно уменьшается.

Авторами работы [9] проведено также численное моделирование геометрических параметров наплавочных швов, полученных в экспериментах. При проведении расчетов учитывался прогиб по-

Таблиця 10. Распределение микротвердости в образцах, сваренных на постоянном токе и с импульсной модуляцией тока [8]

Процесс	Микротвердость HV			
	Центр шва	5 мм от центра шва	15 мм от центра шва	Основной металл
ПТ	72	84	92	95
МТ	81	88	93	95

Таблиця 11. Распределение остаточных напряжений в образцах, сваренных на постоянном токе и с импульсной модуляцией тока [8]

Процесс	Остаточные напряжения, МПа			
	Центр шва	5 мм от центра шва	15 мм от центра шва	Основной металл
ПТ	134	92	-60,5	-38,4
МТ	112	74	-55,6	-36,3

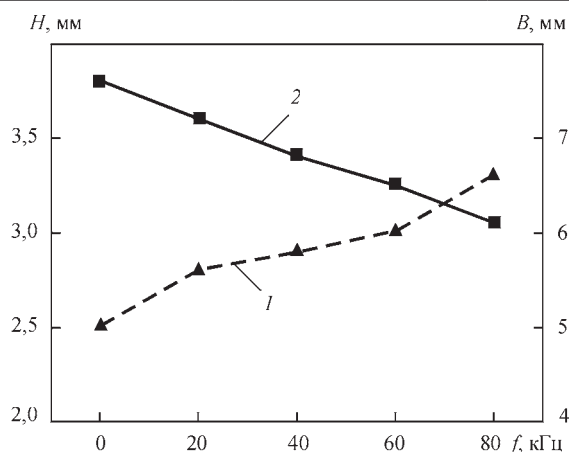


Рис. 14. Зависимости глубины проплавления (1) и ширины шва (2) от частоты модуляции тока дуги [9]

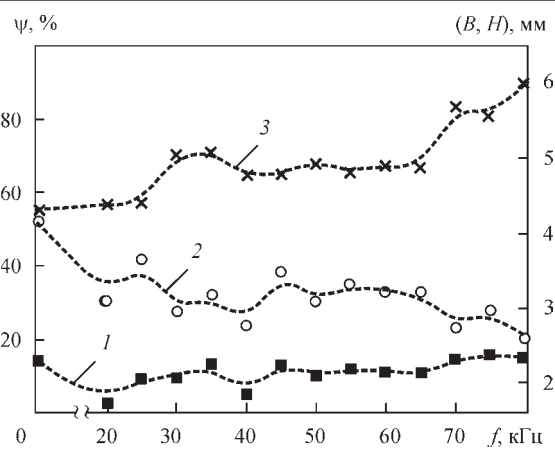
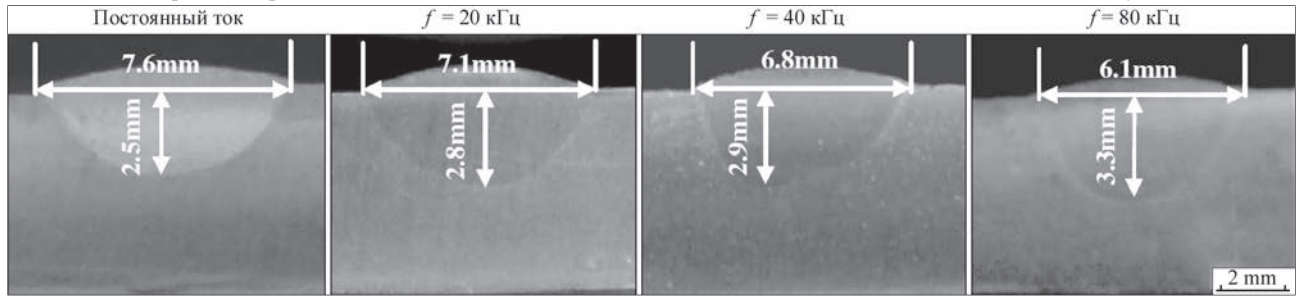


Рис. 15. Зависимости глубины проплавления H , мм (1), ширины шва B , мм (2) и коэффициента формы шва ψ , % (3) от частоты модуляции сварочного тока [10]

Таблиця 12. Формы поперечных сечений наплавочных швов, выполненных на постоянном токе и с ВЧИ модуляцией тока [9]



верхности сварочной ванны, вызванный возрастающими с частотой значениями давления дуги на эту поверхность. Результаты моделирования вместе с соответствующими экспериментальными данными сведены в табл. 13. Сравнение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует об их удивительном совпадении (с точностью порядка 1 %).

Работа [10] китайских ученых посвящена экспериментальному исследованию влияния частоты импульсной модуляции тока дуги на проплавление металла при TIG сварке. В экспериментах использовалась дуга длиной 3 мм с тугоплавким (W+2%Ce) катодом диаметром 2,4 мм, защитный газ Ar (99,99 %), скорость сварки 150 мм/мин. Сваривались образцы из титанового сплава TC4, состав которого приведен в табл. 14, толщиной 2,5 мм. Параметры модуляции тока были следующими: прямоугольные импульсы в виде меандра, следующие с частотой в диапазоне 20...80 кГц, при базовом значении тока

$I_b = 40 \text{ A}$, пиковом значении $I_p = 100 \text{ A}$ (среднее значение тока 70 A). Для сравнения были проведены эксперименты по сварке на постоянном токе $I = 80 \text{ A}$.

Зависимости глубины проплавления H , ширины шва с лицевой стороны образца B и коэффициента формы шва $\psi = H/B$ от частоты f модуляции приведены на рис. 15. Как следует из представленных на этом рисунке экспериментальных данных, ширина шва с ростом частоты модуляции заметно снижается при некотором увеличении глубины проплавления. Эту тенденцию авторы [10] объясняют уменьшением радиуса области анодной привязки («корня») r дуги с увеличением частоты модуляции, что иллюстрируют экспериментальные данные, приведенные на рис. 16.

В работе [11] экспериментально исследовалось влияние токовых параметров НЧИ модуляции при TIG сварке стали SAE 1020 толщиной 6,5 мм в ат-

Таблиця 13. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по глубине проплавления и ширине шва [9]

Частота модуляции, кГц	Глубина проплавления, мм		Ширина шва, мм	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
0	2,47	2,45	7,61	7,6
20	2,81	2,78	7,13	7,14
40	2,90	2,91	6,80	6,84
60	3,0	3,0	6,5	6,6
80	3,33	3,32	6,11	6,16

Таблиця 14. Химический состав свариваемого материала (мас. %) [10]

Al	V	N	C	H	O	Fe	Ti
5,82	3,99	0,023	1,83	0,0007	0,063	<0,05	бал.

Таблиця 15. Токовые параметры модуляции, используемые при проведении экспериментов [11]

Номер эксп.	Базовое значение тока, А	Пиковое значение тока, А	Амплитуда модуляции, А	Среднее значение тока, А		Эффективное значение тока, А	
				Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
1	150	150	0	150	150	150	150
2	95	205	110	150	151	160	160
3	70	230	160	150	151	170	169
4	50	250	200	150	150	180	179
5	35	265	230	150	151	189	188
6	20	280	260	150	146	198	192
7	10	290	280	150	146	205	198
8	128	168	40	148	148	150	150
9	78	198	120	138	139	150	151
10	10	212	200	111	114	150	150

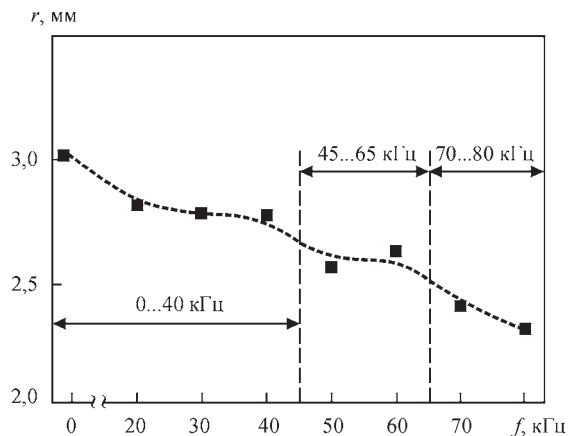


Рис. 16. Зависимость радиуса корня дуги r от частоты модуляции тока f [10]

мосфере аргона. Использовался тугоплавкий катод EWTh2 диаметром 2,4 мм с углом заточки рабочего конца 60°. Длина дуги во всех экспериментах была 2 мм, скорость сварки 10 см/мин. Ток дуги модулировался прямоугольными импульсами в виде меандра, следующими с частотой 50 Гц, токовые параметры модуляции приведены в табл. 15.

На рис. 17 представлены экспериментальные данные по глубине проплавления, ширине шва и площади его поперечного сечения для первых семи экспериментов, при проведении которых

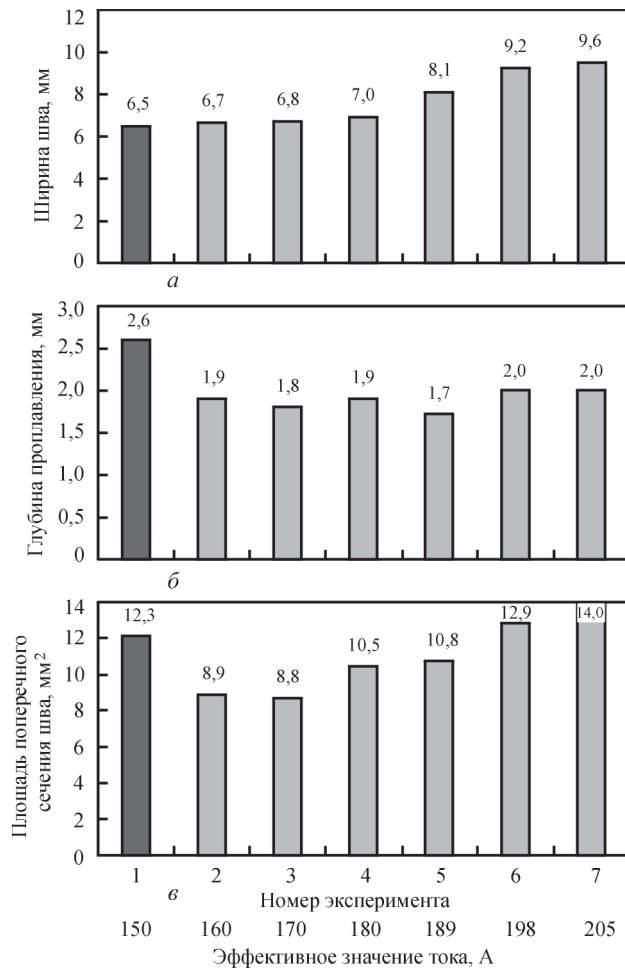


Рис. 17. Зависимости ширины шва (а), глубины проплавления (б) и площади поперечного сечения шва (в) от эффективного значения тока при постоянном $I_m = 150$ А [11]

Таблица 16. Параметры модуляции тока, используемые при проведении экспериментов [12]

Режим	Устанавливаемые параметры			Измеряемые параметры			
	I_m, A	I_p, A	I_b, A	I_m, A	I_{rms}, A	U_m, B	U_{rms}, B
$\Delta I 300$	200	350	50	199	249	12,5	12,8
$\Delta I 200$	200	300	100	202	225	12,9	13,0
$\Delta I 100$	200	250	150	200	206	12,7	12,9
$\Delta I 50$	200	225	175	200	201	12,8	13,0
$\Delta I 20$	200	210	190	200	200	12,6	12,8
$\Delta I 10$	200	205	195	198	200	12,5	12,7
$\Delta I 0$	200	–	–	199	200	12,8	12,8
$\Delta I 0$	206	–	–	206	206	12,9	12,9
$\Delta I 0$	224	–	–	225	225	12,6	12,6
$\Delta I 0$	249	–	–	251	251	12,9	12,9

поддерживалось постоянное среднее значение тока дуги $I_m = 150$ А.

Как следует из приведенных на этом рисунке диаграмм, ширина шва растет с увеличением амплитуды модуляции, а, следовательно, и эффективного значения тока I_{rms} (см. табл. 15), а глубина проплавления практически не изменяется, оставаясь ниже соответствующего значения для сварки на постоянном токе. Площадь поперечного сечения швов также возрастает с ростом эффективного значения тока и начинает превышать глубину проплавления в случае сварки на постоянном токе при $I_{rms} > 198$ А.

На рис. 18 приведены аналогичные данные для экспериментов 1, 8–10, выполненных при условии постоянства I_{rms} и соответствующем снижении I_m .

Приведенные на рис. 18 экспериментальные данные свидетельствуют о заметном снижении (относительно соответствующих характеристик для сварки на постоянном токе) глубины проплавления и площади поперечного сечения шва при уменьшении среднего значения тока дуги, тогда как ширина шва существенно не изменяется. Это позволило авторам [11] сделать вывод о том, что глубина проплавления при TIG сварке с низкочастотной модуляцией тока зависит в основном от среднего значения модулированного тока, тогда как ширина шва – от его эффективного значения.

Работа [12] также посвящена анализу влияния таких характеристик модуляции сварочного тока, как его среднее I_m и эффективное (действующее) I_{rms} значения на глубину проплавления, ширину и площадь поперечного сечения шва, а также на погонную энергию при TIG сварке углеродистой стали толщиной 6,3 мм в атмосфере аргона. В экспериментах использовался тугоплавкий катод (W+2%Th) диаметром 4 мм с углом заточки рабочего конца 60°, длина дуги была постоянной, равной 3,5 мм, скорость сварки – 12 см/мин. Ток дуги модулировался прямоугольными импульсами в форме меандра ($t_p = t_b = 0,25$ с, частота 2 Гц), токовые параметры модуляции приведены в табл. 16.

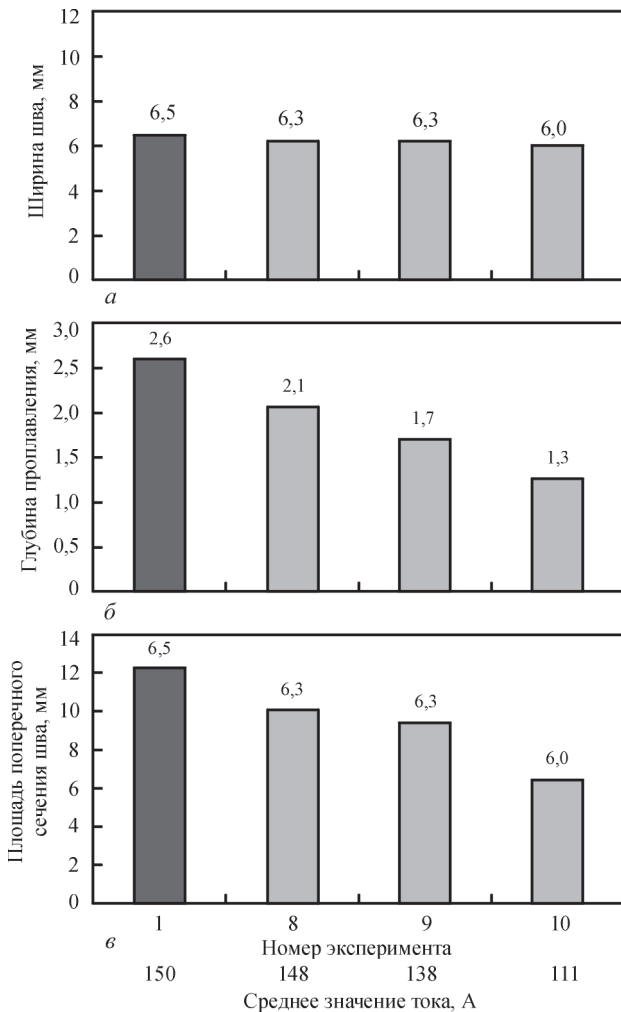


Рис. 18. Зависимости ширины шва (а), глубины проплавления (б) и площади поперечного сечения шва (в) от среднего значения тока при постоянном $I_{rms} = 150$ А [11]

Приведенные на рис. 19 экспериментальные данные подтверждают вывод работы [11] о том, что геометрические характеристики швов при TIG сварке углеродистой стали с НЧИ модуляцией тока определяются как средним, так и эффективным значением модулированного тока.

Анализ результатов экспериментальных работ по исследованию процессов проплавления металла, геометрических параметров, качества и механических характеристик швов при TIG сварке с модуляцией сварочного тока позволяет сделать следующие выводы:

1. При TIG сварке алюминиевых сплавов использование низкочастотной импульсной модуляции тока дуги с частотой 6 Гц приводит к заметному улучшению прочностных характеристик (на 10...13 %) и повышению микротвердости (до 12 %) металла шва, а также к снижению уровня остаточных напряжений (до 20 %) по сравнению с образцами, сваренными на постоянном токе. Причиной этого является измельчение структуры металла шва и зоны термического влияния при НЧИ модуляции сварочного тока. При-

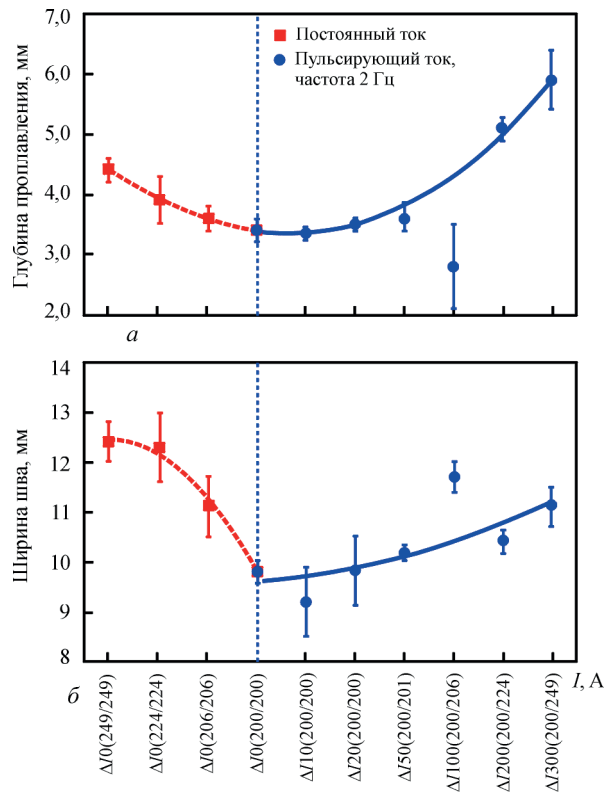


Рис. 19. Влияние среднего I_m и эффективного I_{rms} значений тока на глубину проплавления (а) и ширину шва (б), где ΔI – амплитуда модуляции; в скобках – I_m / I_{rms} [12]

менение ВЧИ модуляции тока с частотой до 25 кГц существенно снижает количество пор и неметаллических включений на единицу длины шва (до 80 %). Кроме того, такая модуляция может эффективно использоваться для разрушения неоднородной литой структуры металла, наблюдающейся в швах, выполненных на постоянном токе. В результате микроструктура металла шва при TIG сварке алюминиевых сплавов с ВЧИ модуляцией тока дуги является более однородной, поэтому такие швы имеют значения вязкости разрушения на 10...15 % выше, чем при сварке постоянным током.

2. В случае TIG сварки нержавеющей стали с низкочастотной модуляцией тока прямоугольными импульсами, следующими с частотой 1...5 Гц, глубина проплавления и ее отношение к ширине шва оказываются больше, чем в случае сварки на постоянном токе с тем же значением погонной энергии. При среднечастотной синусоидальной модуляции тока в диапазоне до 4 кГц и высокочастотной модуляции тока прямоугольными импульсами на частотах в диапазоне 10...80 кГц глубина проплавления нержавеющей стали также превосходит соответствующую величину при TIG сварке постоянным током, равным среднему значению модулированного тока. Что касается ширины шва, то она оказывается несколько больше соответствующей величины для швов, выполненных TIG сваркой на постоянном токе.

3. С ростом частоты импульсной модуляции сварочного тока в случае ТIG сварки никель-хромовых жаропрочных сплавов размер зоны проплавления металла уменьшается, тогда как размер зоны термического влияния – увеличивается. Это свидетельствует о снижении эффективности плавления свариваемого металла (термического КПД) при увеличении частоты модуляции тока дуги. Что касается микроструктуры металла шва, то использование ВЧИ модуляции тока не приводит к заметному ее улучшению по сравнению с ТIG сваркой на постоянном токе.

4. При ТIG сварке углеродистой стали с низкочастотной модуляцией тока прямоугольными импульсами глубина проплавления металла зависит в основном от среднего значения модулированного тока, тогда как ширина шва – от его эффективного значения.

Список литературы / References

1. Бои У., Кривцун И.В. (2019) Процессы сварки неплавящимся электродом с модуляцией сварочного тока (Обзор) Часть I. Особенности горения нестационарных дуг с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **11**, 29–39.
2. Roden, W.A. (1972) High-frequency, pulsed-current GTA welding. In: *Proc. of National Aerospace Engineering and Manufacturing Meeting* (2–5 Oct. 1972, San Diego, California, USA). Paper 720874, pp. 1–8.
3. Leitner, R.E., McElhinney, G.H., Pruitt, E.L. (1973) An investigation of pulsed GTA welding variables. *Welding J., Res. Suppl.*, **9**, 405–410.
4. Omar, A.A., Lundin, C.D. (1979) Pulsed plasma – pulsed GTA arcs: A study of the process variables. *Ibid.*, **4**, 97–105.
5. Saedi, H.R., Unkel, W. (1988) Arc and weld pool behavior for pulsed current GTAW. *Ibid.*, **11**, 247–255.
6. Dzelnitzki, D. (2000) Muendersbach TIG – direct-current welding with high-frequency pulses, an interesting process variant. *EWM Hightec Welding GmbH*. WM008801. DOC; 08.00.
7. Onuki, J., Anazawa, Y., Nihei, M. et al. (2002) Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation. *Japan. J. Appl. Phys.*, **41**, 5821–5826.
8. Karunakaran, N., Balasubramanian, V. (2011) Effect of pulsed current on temperature distribution weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 278–286.
9. Qi, B., Yang, M., Cong, B. et al. (2013) The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **66**, 1545–1553.
10. Yang, Z., Qi, B., Cong, B. et al. (2013) Effect of pulse frequency on weld appearance behavior by TC4 titanium alloys. *Trans. China Welding Institute*, **34**(12), 37–40.
11. Cunha, T.V.d., Louise-Voigt, A., Bohorquez, C.E.N. (2016) Analysis of mean and RMS current welding in the pulsed TIG welding process. *J. of Materials Processing Technology*, **231**, 449–455.
12. Silva, D.C.C., Scotti, A. (2016) Using either mean or RMS values to represent current in modeling of arc welding bead geometries. *Ibid.*, **240**, 382–387.

ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ (Огляд).

Частина II. Ефекти дугового впливу на зварювальний метал

У. Бої¹, І.В. Кривцун²

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона).

510650, м. Гуанчжоу, Тяньхе, вул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано огляд робіт, присвячених процесам зварювання неплавким електродом в інертному газі з модуляцією зварювального струму. Друга частина огляду присвячена аналізу робіт, в яких розглядаються особливості проплавлення металу (алюмінієві сплави, нержавіючі сталі, нікель-хромові жаростійкі сплави) та формування швів при ТIG зварюванні модульованим струмом. Бібліогр. 12, табл. 16, рис. 19.

Ключові слова: дуга з тугоплавким катодом, ТIG зварювання, зварювальний метал, проплавлення, зварювальний шов, модуляція зварювального струму, імпульс, частота, коефіцієнт заповнення, амплітуда

PROCESSES OF NONCONSUMABLE ELECTRODE WELDING WITH WELDING CURRENT MODULATION (Review).

Part II. Effects of arc impact on the metal being welded

U.Boi¹, I.V.Krivtsun²

¹Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O.Paton Institute of Welding).

363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

A review of studies, devoted to the processes of nonconsumable electrode inert-gas welding with welding current modulation was performed. The second part of the review is devoted to analysis of the works, dealing with the features of metal penetration (aluminium alloys, stainless steel, high-temperature nickel-chromium alloys) and weld formation in TIG welding with modulated current. 12 Ref., 16 Tabl., 19 Fig.

Keywords: arc with refractory cathode, TIG welding, welded metal, penetration, weld, welding current modulation, pulse, frequency, fill factor, amplitude

Поступила в редакцію
04.11.2019

В порядку обговорення

ОСОБЛИВОСТІ ДУГИ З ІМПУЛЬСНИМ САМОРЕГУЛЮВАННЯМ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ПРИ РУЧНОМУ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

С.Ю. Максимов, В.С. Сидорук, Д.М. Кражановський

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Стаття присвячена проблемі забезпечення стабільності процесу дугового плавлення електрода стосовно технології зварювання або наплавлення. Було запропоновано використати джерело струму, зібране із серійно виготовлених комплектуючих. Особливість запропонованого джерела полягає у тому, що це – джерело пульсуючого струму постійної напруги, яке живиться від побутової однофазної електромережі напругою 220 В. Показано, що процес був однаково стабільний як у разі механізованого зварювання у вуглекислому газі, так і ручного зварювання електродами для постійного струму на режимах, суттєво менших за рекомендовані розробниками електродних матеріалів. Запропонована схема джерела живлення забезпечує можливість варіювати значення струму в широких межах, що дозволить розширити технологічні можливості зварювання, у тому числі по більших зазорах між кромками і у різних просторових положеннях. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: саморегулювання, процес плавлення електрода, електричні параметри, коливальний характер дуги, перетікання краплі, складене джерело струму, вольт-амперна характеристика, осцилограма, гістограма, розривна довжина дуги

В основі дугового зварювання плавленням, як і споріднених процесів (наплавлення, паяння, переплав), лежить плавлення металевго електрода під дією дуги. Дугове плавлення електрода – нестационарний процес: утворення, відрив від кінця електрода і перенос краплі розплавленого металу через міжелектродний (дуговий) проміжок; несталість довжини дуги і т. д. Існує проблема керування цим процесом для збереження його стабільності. Характерні явища, що означають втрату стабільності: надмірне збільшення довжини дуги – до її природнього обриву і зменшення довжини дуги – до короткого замикання електрода на виріб.

Відомі дві можливості збереження стабільності: активне керування і саморегулювання процесу плавлення електрода.

Активне керування відоме у двох варіантах: ручне і автоматичне.

Автоматичне керування, як правило, відтворює алгоритми ручного керування засобами автоматизації. У цьому випадку у зварювальному комплексі існує крім зварювального апарата і джерела живлення третій компонент – блок керування процесом. Пріоритет на такий спосіб зварювання належить фірмі General Electric Company, P. Nobel (1920 р.) [1].

У ті часи автоматичне керування відносилось до дугового зварювання довгою дугою, переважно

під флюсом, при якому коротке замикання електрода сприймалося як катастрофа – припинення дугового процесу. В останні роки стосовно до дугового зварювання в захисних газах розроблена значна кількість процесів з автоматичним керуванням, при яких дуга періодично перемикається керованими короткими замиканнями електрода через краплю розплавленого металу [1].

Назвемо найбільш відомі.

1. STT (Surface Tension Transfer) – перенос металу поверхневим натягом [2]. Процес був запатентований фірмою Lincoln Electric Company у 1988 р. і реалізується в промисловості з 1994 р.

2. Адаптивні імпульсні процеси зварювання і наплавлення, автор Ю. М. Сарасєв [3].

3. СМТ (Cold Metal Transfer) – перенос «холодного» металу [4].

4. Автоматичне зварювання і наплавлення з використанням джерела живлення із цифровим керуванням, що відрізняється можливістю створювати зовнішню (вольт-амперну) характеристику у вигляді багатосекційної ламаної лінії [5]. Автори називають її самоадаптивною замкненою системою автоматичного керування зварювальною дугою.

Автоматичне керування зварювальною дугою забезпечує найвищу якість зварювання і незамінне при виготовленні особливо відповідальних конструкцій, переважно з тонколистового металу і з різномірних металів.

У масовому виробництві, а також в умовах індивідуального виробництва, зокрема, на малих підприємствах, зварювання з автоматичним керуванням поки що не конкурентне в порівнянні зі зварюванням із саморегулюванням.

Саморегулювання відрізняється від активно-го керування тим, що зварювальний комплекс не має у своєму складі блоку керування. Стабільність процесу зберігається завдяки тому, що джерело живлення зроблено таким чином, що воно спонтанно (мимовільно) реагує на ситуацію в дузі, причому однозначно: усякій зміні довжини дуги, а відповідно і її напруги відповідає зміною струму, спрямованою у протилежну сторону. Зі зменшенням довжини дуги (при постійній швидкості подачі електрода) джерело збільшує струм, завдяки чому швидкість плавлення електрода зростає, і довжина дуги збільшується до заданого значення. У випадку збільшення довжини дуги проти заданої реакція джерела протилежна: зменшення струму, і відповідно – зниження швидкості плавлення електрода.

Принцип саморегулювання дуги був запропонований в ІЕЗ ім. С. О. Патона В. І. Дятловим у 1942 р. [6].

Разом з тим «класичний» спосіб саморегулювання має серйозний недолік: він працює, як показав Б. Є. Патон [7], тільки при досить великій густині струму на електроді. На підставі виробничого досвіду ми встановили, що мінімально можлива густина струму (при автоматичному зварюванні під флюсом маловуглецевим дротом діаметром 5 мм) дорівнює 30 А/мм². При зварюванні в захисних газах вона може перевищувати 100 А/мм².

Виникла необхідність розробити такий алгоритм саморегулювання плавлення електрода, при якому сталість зварювального процесу була б високою при зменшенні густини струму на електроді хоча б як при ручному дуговому зварюванні (12 А/мм²). Це значить, що при зварюванні дротом «великого» діаметра при малій швидкості його подачі дуга не повинна ні обриватися при випадковому збільшенні її довжини, ні згасати в короткому замиканні при зменшенні її довжини.

Ми пішли по шляху об'єднання в одному процесі властивостей ручного дугового зварювання ($VAX_{дж}$ повинна бути крутоспадною, де $U_{x,x}$ у кілька раз вище заданої U_d), із властивістю механізованого зварювання, де $VAX_{дж}$ повинна бути пологоспадною, а $U_{x,x}$ не набагато перевищувати задане значення U_d , при цьому коливання параметрів дуги, з якими багато борються, «гасячи» їх, ми перетворюємо в інструмент технології. Яким чином нам це вдалося? Живленням дуги одночасно від двох джерел: із крутоспадною $VAX_{дж}$ як

для ручного дугового зварювання, і з пологоспадною – як при механізованому.

Оскільки зміна електричних параметрів – напруги та струму у процесі зварювання відбувається імпульсно, запропонований різновид саморегулювання був названий імпульсним [8].

Одна з характерних рис такої дуги – її коливальний характер: довжина дуги періодично зменшується – іноді (при необхідності) – до короткого замикання, після чого знову зростає (що пов'язане з відривом краплі електродного металу, що утворюється на кінці електрода, що плавиться, і переносу її в металеву ванну). У період укорочення дуги (як правило, він збігається з періодом утворення на кінці електрода краплі розплавленого металу) зварювальний струм зростає, і якщо крапля, не встигнувши відділитися від електрода, торкається металевої ванни, «примержання» електрода не відбувається завдяки вже стрибкоподібному в цей момент збільшенню струму в порівнянні зі «звичайною» амплітудою.

Цей період у циклі коливання довжини дуги має істотне значення. На відміну від процесу плавлення електрода на довгій дузі, коли крапля відділяється від кінця електрода і переноситься у зварювальну ванну через міжелектродний проміжок, тут крапля «стікає» з кінця електрода безпосередньо в металеву ванну. Таке відбувається при зварюванні на короткій дузі з періодичними короткими замиканнями, причому плавлення електрода в такі моменти не припиняється, інакше відбувалося б його «примержання» до виробу, що зварюється. На відміну від чисто дугового плавлення тут у періоди коротких замикань відбувається інший процес – контактного плавлення [8]. Періоди дугового і контактного плавлення чергуються із частотою коротких замикань електрода.

Процесом контактного плавлення можна управляти, для цього в електричній схемі джерела живлення необхідно передбачити третю складову, так сказати, третє джерело. Його основні характеристики: мала напруга холостого ходу (не більш суми катодного і анодного спадань напруги), жорстка вольт-амперна характеристика, великий струм короткого замикання.

Такий алгоритм надзвичайно ефективний для механізованого дугового зварювання з постійною швидкістю подачі електрода, де мінімальна припустима густина струму на електроді може бути зменшена в порівнянні із традиційним механізованим зварюванням у кілька раз, іноді – на порядок.

Разом з тим цей же алгоритм виявився досить корисним і затребуваним для ручного дугового зварювання/наплавлення покритими електродами.

Спорідненість алгоритмів реагування джерела живлення на ситуацію в дузі для механізованого дугового зварювання/наплавлення – з однієї сторони і для ручного – з іншої відкриває гарну перспективу для побудови універсальних джерел живлення, придатних як для механізованого, так і для ручного дугового зварювання – з відповідним вибором параметрів реагування джерела живлення.

Більше того, виявляється можливим створити джерело живлення для зварювання/наплавлення постійним струмом (точніше струмом постійної полярності), що підключається до однофазної мережі 220 В (по суті «побутової мережі»), що може залучити інтерес широкого кола користувачів, і не тільки на промислових підприємствах.

У даній роботі приводяться результати експериментів із застосуванням джерела постійної полярності, що підключається до «побутової» мережі 220В, побудованого на базі – увага! – трьох серійних трансформаторів із жорсткою вольт-амперною характеристикою і малою напругою холостого ходу 14 В: два ОСМ1–1,0 кВА та один ОСМ1–1,6 кВА.

Нижче приводиться один з варіантів схеми пропонованого «складеного» джерела живлення у варіанті із трьома низьковольтними трансформаторами на вторинну напругу 14 В, що послужили базою для трьох функціональних блоків ФБ «комбінованого» джерела (рис. 1). Ці блоки різняться формами вольт-амперних характеристик: перший – крутоспадної форми з підвищеною напругою холостого ходу U_{xx} дуги, що забезпечує сталість дуги на малому струмі при збільшеній її напрузі, другий – пологоспадної форми із середньою напругою U_{xx} , що забезпечує стійке горіння дуги на заданому «робочому» струмі, третій – із жорсткою вольт-амперною характеристикою, що забезпечує «гарячий старт» і контактне плавлення електрода. Трансформатори підключені первинними обвитками паралельно до електромережі, а їх вторинні обвитки з'єднані послідовно, завдяки чому множиться їхня вторинна напруга (холостого ходу) на загальне число вторинних обмоток. Оскільки кожний із трансформаторів має по дві вторинні обвитки з напругою 14 В, а таких трансформаторів 3, сумарна напруга холостого ходу всіх вторинних обмоток становить 84 В. Разом з випрямним блоком В1 і помножувачем напруги ПН1 ці обвитки утворюють функціональний блок ФБ1. Помножувач ПН1 використовують, коли необхідно додатково підняти U_{xx} джерела. «Круте падіння» ВАХ створюється дроселем ДР₁ і додатково – ДР₂.

Другий функціональний блок ФБ2 з пологоспадною ВАХ містить 4 послідовно включених вторинних обмоток трансформаторів, випрямний блок В2 і частину обмоток дроселя ДР₂.

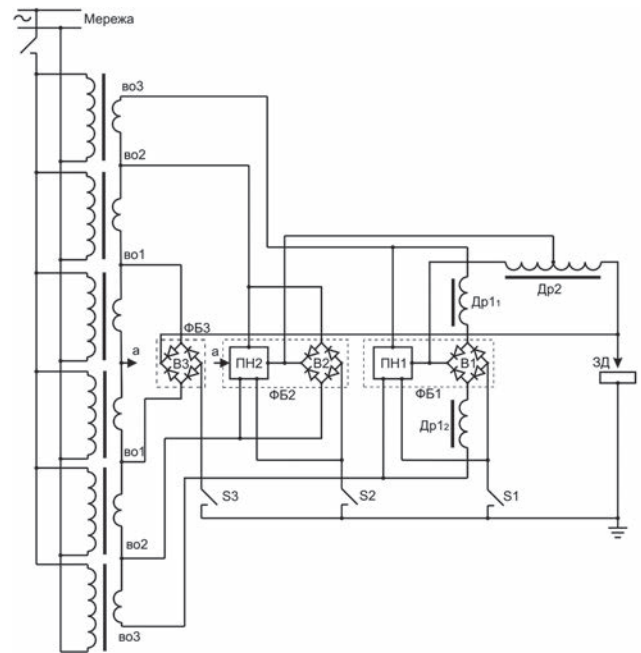


Рис. 1. Схема пропонованого «складеного» джерела живлення

Третій функціональний блок ФБ3 із жорсткою ВАХ містить 2 послідовно включені вторинні обмотки трансформаторів і випрямний блок В3.

Помітимо ще раз: згадані помножувачі напруги використовують, коли необхідно для підвищення сталості процесу підняти напругу холостого ходу на відповідному функціональному блоці джерела живлення.

Той факт, що експериментальне складене джерело живлення – однофазового підключення, і що в періоди зміни полярності струм падає до нуля, можна припустити, що стабільність процесу плавлення електрода повинна бути низькою, що робить дане джерело живлення непридатним для зварювання. Проте, експерименти показали, що це «нестандартне» джерело забезпечило сталий процес як ручного зварювання, так і механізованого у вуглекислому газі.

Використовувалися покриті електроди, придатні як для зварювання постійним струмом (УОНИ-13/55, ОЗЛ-8), так і змінним (АНО-24).

Паралельно – для порівняння – виконували експерименти з живленням від серійного випрямляча ВДУ-306.

Методика експериментів полягала в тому, що в процесі горіння дуги за допомогою інформаційно-вимірювальної системи ІВС записували із частотою 10 кГц осцилограми струму і напруги дуги (рис. 2, 3). Система обробляла за спеціальною програмою ці параметри і видавала по запиту графічне відображення в координатах $U-I$ їх конкретних значень, зафіксованих у різні моменти (останнє одержало назву вольт-амперна характеристика процесу плавлення електрода) (рис. 4).

Крім того, система видавала гістограми цих параметрів (кількість зафіксованих їхніх значень залежно від амплітуди) – рис. 5.

Розшифрування цих відображень дається нижче.

На рис.2 представлені осцилограми струму і напруги для електродів марки АНО-24 діаметром 3 мм із живленням від дослідного джерела, а на рис.3 – для електродів марки ОЗЛ-8 діаметром 3 мм із живленням як від дослідного джерела (рис. 3, а), так і від серійного ВДУ-306 (рис. 3, б).

На цих рисунках можна бачити «хвилеподібний» характер осцилограм, особливо струму.

Як можна бачити з рис. 2, коливання дуги не строго періодичні, їх частота коливається в межах від 9 Гц (див. момент 9,5 с) до 23 Гц (момент 9,75 с). Короткі замикання через краплі електродного металу відбувалися в моменти 8,97 с; 9,136; 9,33 і т. д. У той час, як «звичайна» амплітуда струму дуги становила 150 А, значення імпульсів струму в моменти замикання краплі на металеву ванну, як правило, перевищували 250 А и сягали 450 А (наприклад, момент 9,33 с), при тому, що середнє значення струму було близько 80 А, тобто імпульси струму в моменти коротких замикань перевищували середнє значення струму в 3,0...5,6 раз. Природньо, що при таких імпульсах струму ні про яке «примержання» не може бути й мови.

Пилкоподібний імпульсний характер осцилограм із частотою 100 Гц відповідає промисловій частоті струму 50 Гц.

Напруга зварювання в процесі коливання дуги перебувала в межах 20...30 В, за винятком окремих «моментів»: до значень близько 4 В при коротких замиканнях.

Чудова сталість дуги при такій «рваній» формі осцилограм струму і напруги, яку можна бачити на рис. 2, входить у суперечність з існуючими канонічними уявленнями про сталість дуги: безперервність осцилограм струму і напруги при незначних їхніх відхиленнях від середнього значення, особливо, що стосується напруги дуги, і ставить на порядок денний формулювання умов сталості процесу плавлення електрода при дуговому зварюванні з імпульсним саморегулюванням цього процесу.

Описаний вище коливальний процес плавлення електрода корисний з технологічної і виробничої позицій по декількох міркувань.

По-перше, зменшується окиснення краплі електродного металу атмосферою дуги за рахунок скорочення довжини «вільного її пробігу» через дуговий проміжок. По-друге, чергування протягом циклу коливання дуги підвищеного струму – при вкороченні, і підвищеної напруги – при подовженні дуги забезпечує, з одного боку, надійний провар основного металу, з іншого боку – прийнятне формування валика шва. По-третє, зсув режиму в область менших напруг створює передумови для скорочення витрати електроенергії (енергоекономії).

Останнє ілюструється результатами експериментів з використанням електродів марки ОЗЛ-

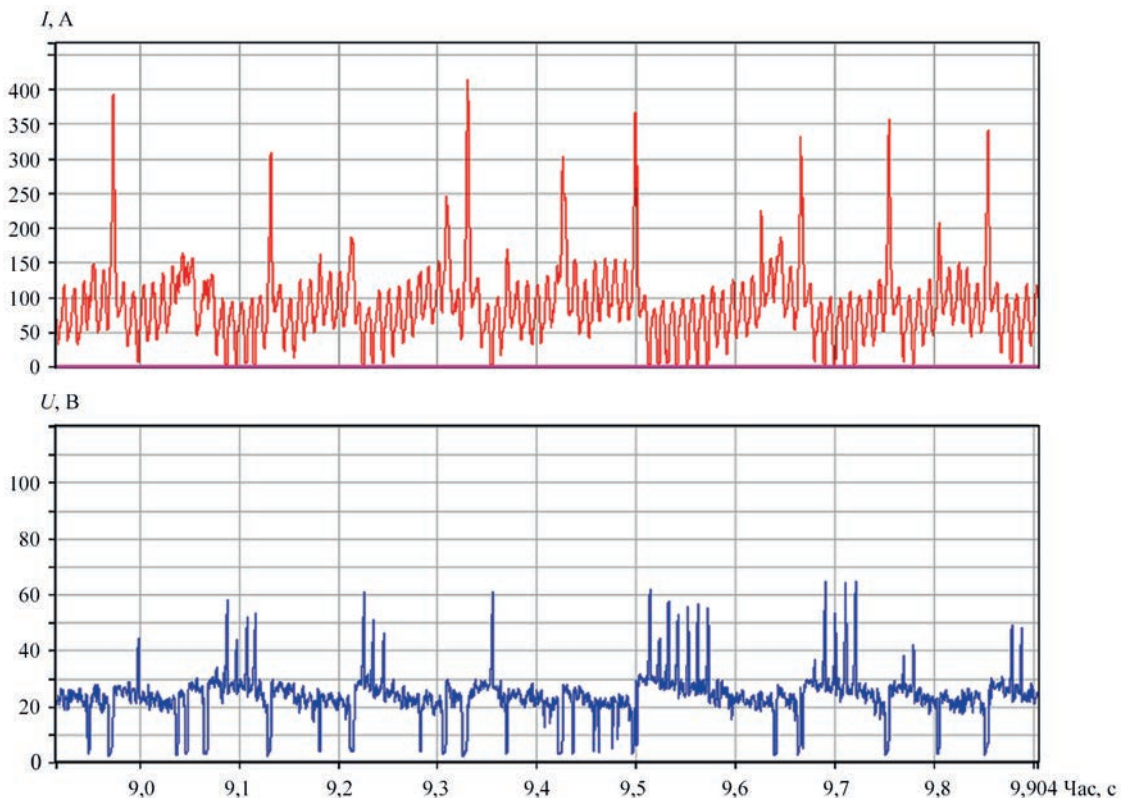


Рис. 2. Осцилограми струму і напруги процесу зварювання електродами марки АНО-24 діаметром 3 мм

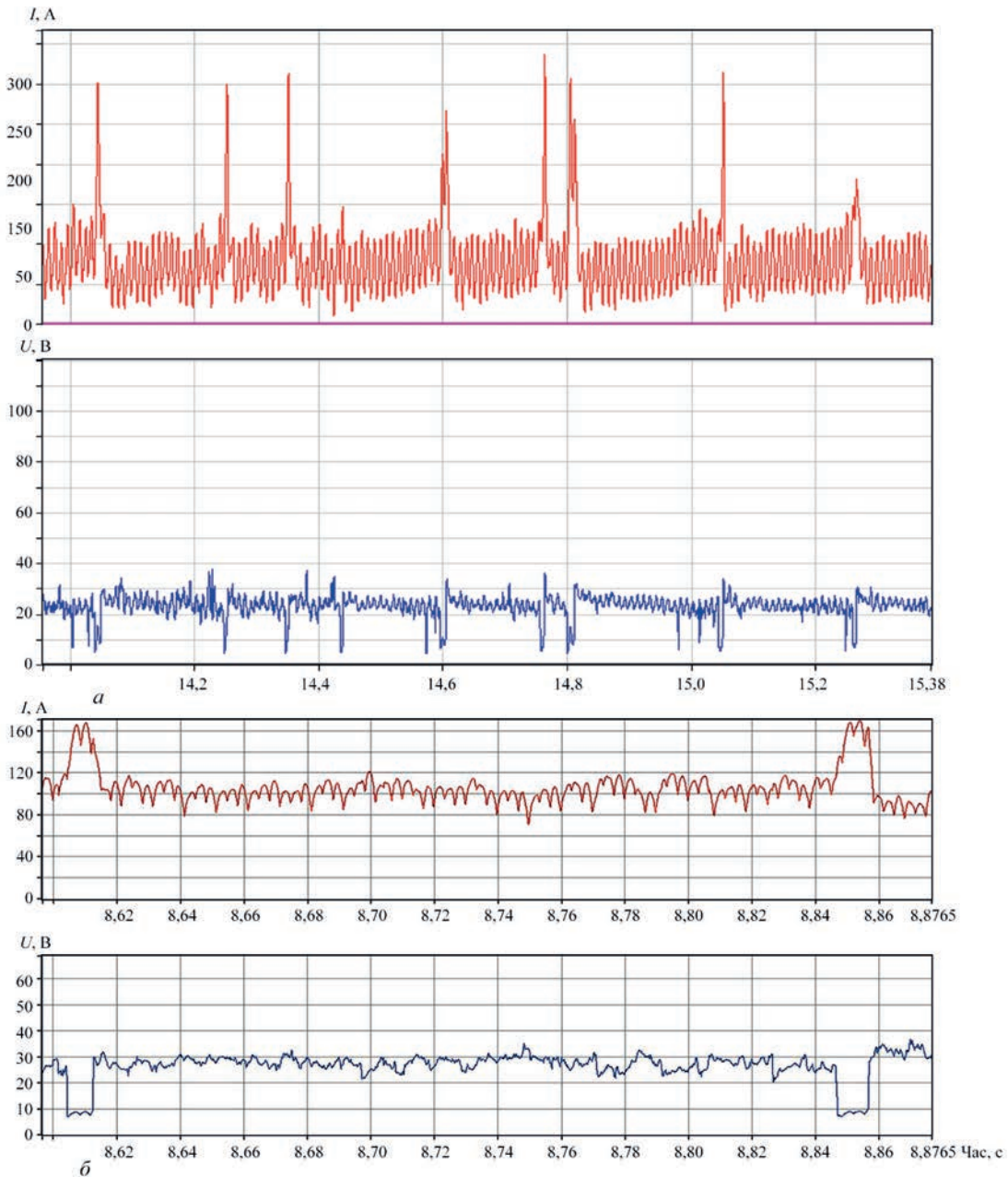


Рис. 3. Осцилограми струму і напруги, отримані при зварюванні від дослідного (а) та джерела живлення ВДУ-306 (б) з використанням електродів марки ОЗЛ-8 діаметром 3 мм

8 діаметром 3 мм. Зварювання виконували по черзі від двох джерел (для порівняння): від дослідного і від серійного ВДУ-306. На рис. 3, а показані осцилограми струму і напруги, отримані при зварюванні від дослідного джерела, на рис. 3, б – те ж – від серійного ВДУ-306. Видно, що в порівнянні з дослідним джерелом дуга від ВДУ-306 характеризується коливаннями струму і напруги з незначними амплітудами, що свідчить про режим зварювання на довгій дузі. Виключення становлять епізоди в проміжках часу, близькими до моментів 8,59657 і 8,62 с, а також між 8,84 і 8,86 с – короткі замикання через краплі електродного металу (частота замикань близько 4 Гц).

Порівняння вольт-амперних характеристик процесів (рис. 4, а, б) дозволяє встановити істотні відмінності між ними. Якщо при зварюванні від ВДУ-306 область існування режимів розташовується в зоні напруг 18...38 В в діапазоні струмів зварювання від 70 до 125 А при середньозваженому значенні струму близько 97 А (рис. 4, б), то аналогічні показники для дослідного джерела становлять по напрузі 13...30 В, а по струму – 30...160 А при середньозваженому значенні струму близько 88 А. Видно, що область режимів від дослідного джерела розташовується по напрузі значно нижче, чим від ВДУ-306. Так, при струмі 75 А напруга дуги перебувала в різні моменти на дослідному джерелі в області від 13 до 30 В

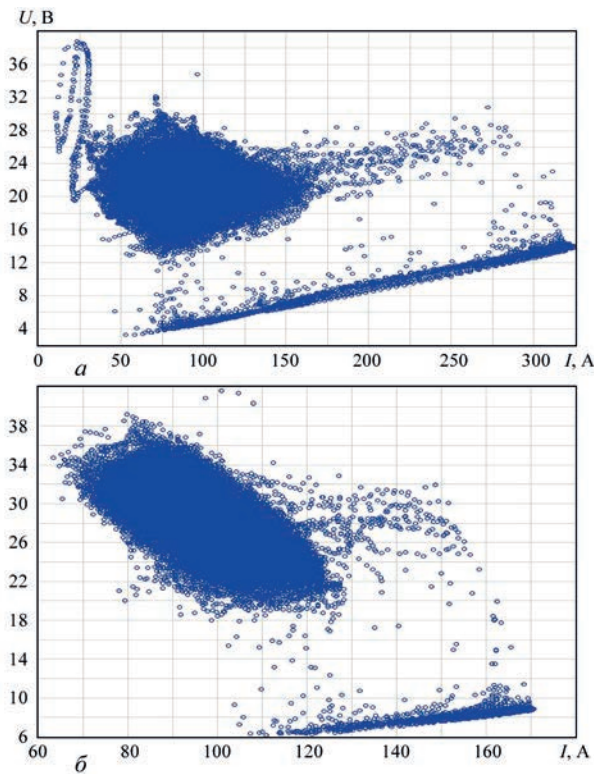


Рис. 4. Вольт-амперна характеристика процесу зварювання від дослідного (а) та джерела живлення ВДУ-306 (б) з використанням електродів марки ОЗЛ-8 діаметром 3 мм

(в середньому – 21,5 В) (рис. 4, а), а від ВДУ-306 – відповідно від 28 до 36 В, в середньому – 32 В, (рис. 4, б), тобто майже в 1, 5 рази вище. Відповідно витрата енергії на дугу при тому самому струмі при зварюванні від ВДУ-306 в 1, 5 рази більше, ніж від дослідного джерела.

Інша особливість порівнюваних режимів: при використанні дослідного джерела частка енергії, що витрачається на плавлення електрода в моменти коротких замикань (це – контактне плавлення, ця область режиму плавлення розташовується окремо в нижній частині вольт-амперної характеристики у вигляді висхідної темної смуги) набагато більше, чим від ВДУ-306: тут вона охоплює область струмів короткого замикання від 75 до 325 А, у той час як від ВДУ-306 – від 115 до 170 А. Оскільки спадання напруги при коротких замиканнях в 2,6...5,0 рази менше, ніж дуги при тих же значеннях струму, то і витрата на контактне плавлення відповідно менша, ніж на дугове. А це – додатковий канал економії електроенергії.

Характерні параметри дуги при експериментальному зварюванні

Марка електрода	Параметри дуги				
	«Установлені» значення		Значення в момент розриву дуги		
	Струм дуги I_d , А	Напруга дуги U_d , В	«Розривна» довжина дуги L_d , мм	«Розривна» напруга $U_{рл}$, В	«Розривний» струм $I_{рл}$, А
АНО-24	63	23	18	38	36
УОНИ-13/55	68	23	16	40	40
ОЗЛ-8	68	23	14	40	40

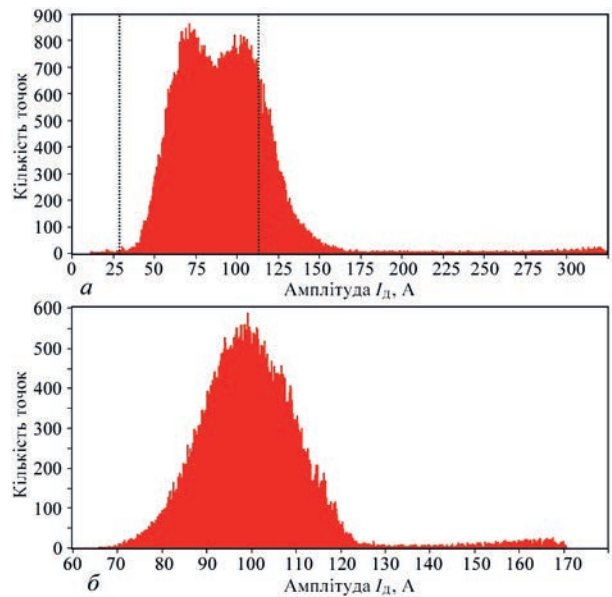


Рис. 5. Гістограма струму процесу зварювання електродом ОЗЛ-8 з живленням від дослідного (а) та серійного джерела ВДУ-306 (б)

Нижче надається таблиця характерних параметрів дуги при експериментальному зварюванні на мінімальних «установлених» значеннях зварювального струму для електродів різних марок діаметром 3 мм – із примусовим розривом дуги.

З таблиці випливає, що «установлене» значення струму малоамперної дуги при зварюванні від дослідного джерела суттєво нижче межі його паспортного значення для трьох наведених марок електродів при тому, що довжина дуги в моменти примусового розриву суттєво більше нормативного значення 2...4 мм.

Слід відмітити, що у всіх випадках зварювання, наведених у таблиці, запалювання дуги було надійне (незважаючи на низьке значення «установлено» струму), і горіння дуги було стабільним.

Тут наведений усього лише один варіант розробленої технології: ручне дугове зварювання. Показані деякі результати експериментів з використанням дослідного («саморобного») джерела постійного струму, що живиться від однофазної («побутової») мережі, і зібраного із серійних виробів: понижувальні трансформатори із жорсткою вольт-амперною характеристикою, з невлавним для зварювальної технології низькою напругою холостого ходу 14 В (звичайно застосовуваних у системах керування), діоди (можливі тиристри), дросель та ін.

На сьогодні вже пророблені деякі інші варіанти розроблюваної технології: механізоване дугове зварювання з постійною швидкістю подачі електродного дроту, спареними електродами, з комбінацією пластинчастого і дровового електрода та ін.

Отримано деякі обнадійливі результати: зменшуються вигоряння легуючих елементів і витрата електроенергії, подрібнюється мікроструктура металу шва і біляшовної зони і т. д.

Частина запропонованих технічних рішень захищена патентами ([9], [15]).

Можна відмітити, що подібне явище спостерігається і при електрошлаковому зварюванні.

Висновки

1. Експерименти зі зварювання покритими електродами різних марок з живленням від дослідного джерела, побудованого відповідно до принципу імпульсного саморегулювання дуги, показали гарне збудження дуги навіть за умови малого встановленого номінального струму, що забезпечується більшим значенням струму короткого замикання – до 450 А, а також гарну сталість дуги, що підтверджується великою її довжиною в момент примусового розриву – до 14...18 мм у порівнянні з нормативним значенням довжини дуги 2...4 мм при тому, що струм дуги був нижче його паспортного значення.

2. Оскільки експерименти були успішні з використанням джерела постійного струму (точніше, струму постійної полярності), що живиться від однофазної мережі 220 В («побутової»), користувачами такого джерела і пропонувані технологічні рішення можуть бути малі підприємства і фізичні особи.

3. Технологія припускає можливість виконувати зварювання на струмах, суттєво менших їхнього паспортного значення, при збереженні відмінного збудження і гарної стабільності дуги, що дозволяє відмовитися в деяких випадках від використання дефіцитних електродів малого діаметра.

4. Можливість варіювати значення струму в широких межах дозволяє розширити технологічні можливості зварювання, у тому числі по більших зазорах між кромками, у різних просторових положеннях, зварюванні різномірних металів, наплавленні та ін.

5. Оскільки параметри дуги при рівних струмах від дослідного джерела зміщені в порівнянні з ВДУ-306 в область менших напруг, розроблювана технологія дає реальну можливість заощаджувати електроенергію.

Список літератури

1. Pogrebisky, David M. (2016) *Welding of Metals: Classification Brief History*, development. INSTY PRINTS, Jerusalem.

- Bruce D, DeRuntz (2003) Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer ® Welding to Industry. *J. of Industrial Technology*, **19**, 4, 2–7.
- Сараєв Ю.Н. (1995) *Разработка адаптивных импульсных технологических процессов сварки и наплавки. Автореферат дис. ... д-ра техн. наук.* Москва, ЦНИИТМАШ.
- Hacke, H., Himmelbauer, K. (2005) The CMT-Process-A Revolution in Welding Technology. *IW Doc. № XII-1875–05*.
- Zhimihng OU., Yong W., Masao U., Manabu T. (1999) New Concept for the Characteristic of an Arc Welding Power Source (Report II) *Trans. JWRI*, **28**, 1, 26–38.
- Патон Е.О. (1956) *Воспоминания* (Держ. вид-во худ. літ-ри). Київ.
- Патон В.Е. (1952) Self – regulation of arc welding using consumable electrode. *Аvtomaticheskaya Svarka*, **1**, 38–45.
- Paton B., Sidoruk V., Maksimov S. (2016) *Pulsed self regulation melting of electrode process*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany.
- Патон Б.Є., Кривцун І. В., Сидорук В. С., Максимов С. Ю., Колесник Г. Ф. (2014) *Спосіб дугового зварювання, наплавлення або паяння електродом, що плавиться, та джерело струму для його здійснення*. Україна, Пат. 104214.
- Патон Б.Є., Сидорук В. С., Максимов С. Ю., Ключко Р. І., Кражановський Д. М. (2014) *Спосіб електричного дугового зварювання, паяння або переплаву плавким електродом з модуляцією параметрів режиму*. Україна, Пат. 106293.
- Патон Б.Є., Сидорук В. С., Максимов С. Ю., Колесник Г. Ф., Явдошин І. Р., Марченко А. Ю. (2015) *Спосіб ручного дугового зварювання або наплавлення покритими електродами з модуляцією параметрів дуги*. Україна, Пат. 110397.
- Максимов С.Ю., Сидорук В. С., Коротинський О. Є., Колесник Г. Ф., Кражановський Д. М., Захарченко С. А. (2016) *Спосіб ручного дугового зварювання або наплавлення модульованим струмом з керуванням параметрами дуги*. Україна, Пат. 110556.
- Патон Б.Є., Максимов С. Ю., Сидорук В. С. (2017) *Спосіб електродового механізованого зварювання у вертикальному та/або похилому положеннях з імпульсним саморегулюванням процесу плавлення електрода*. Україна, Пат. 113883.
- Патон Б.Є., Колесник Г. Ф., Максимов С. Ю., Сидорук В. С., Коротинський О. Є. (2017) *Джерело струму для дугового зварювання, наплавлення або паяння плавким електродом*. Україна, Пат. 114908.
- Патон Б.Є., Сидорук В. С., Максимов С. Ю. (2017) *Джерело струму для дугового зварювання, наплавлення або паяння віддалених конструкцій*. Україна, Пат. 114938.

References

- Pogrebisky, D.M. (2016) *Welding of metals: Classification, brief history, development*. INSTY PRINTS, Jerusalem.
- Bruce, D., DeRuntz (2003) Assessing the benefits of surface tension transfer ® welding to industry. *J. of Industrial Technology*, **19** (4), 2–7.
- Saraev, Yu.N. (1995) *Development of adaptive pulsed technological processes of welding and surfacing*. In: *Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree*. Moscow, TsNIITMASH [in Russian].
- Hacke, H., Himmelbauer, K. (2005) *The CMT-process – a revolution in welding technology*. IW Doc. XII-1875–05.
- Zhimihng, Ou, Yong, W., Masao, U., Manabu, T. (1999) New concept for the characteristic of an arc welding power source (Report II). *Trans. JWRI*, **28** (1), 26–38.
- Paton, E.O. (1956) *Memoirs*. Derzh. Vyd-vo Khud. Lit-ry, Kyiv [in Russian].
- Paton, V.E. (1952) Self-regulation of arc welding using consumable electrode. *Аvtomatich. Svarka*, **1**, 38–45 [in Russian].
- Paton, B., Sidoruk, V., Maksimov, S. (2016) *Pulsed self regulation melting of electrode process*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbruecken, Germany.

9. Paton, B.E., Krivtsun, I.V., Sydoruk, V.S. et al. (2014) *Method of arc welding, surfacing and soldering using consumable electrode and current supply for its realization*. Pat. Ukraine 104214 [in Ukrainian].
10. Paton, B.E., Sydoruk, V.S., Maksymov, S. Yu., Klochko, R.I. et al. (2014) *Method of electric arc welding, soldering or remelting using consumable electrode by modulation of mode parameters*. Pat. Ukraine 106293 [in Ukrainian].
11. Paton, B.E., Sydoruk, V.S., Maksymov, S. Yu. et al. (2015) *Method of manual arc welding or surfacing with coated electrodes by modulation of arc parameters*. Pat. Ukraine 110397 [in Ukrainian].
12. Maksymov, S. Yu., Sydoruk, V.S., Korotynskiy, O.A. et al. (2016) *Method of manual arc welding or surfacing by modulated current with control of arc parameters*. Pat. Ukraine 110556 [in Ukrainian].
13. Paton, B.E., Maksymov, S. Yu., Sydoruk, V.S. (2017) *Method of electric arc mechanized welding in vertical and/or inclined positions with pulsed self regulation of electrode melting process*. Pat. Ukraine 113883 [in Ukrainian].
14. Paton, B.E., Kolesnik, G.F., Maksymov, S. Yu. et al. (2017) *Current supply for arc welding, surfacing or soldering using consumable electrode*. Pat. Ukraine 114908 [in Russian].
15. Paton, B.E., Sydoruk, V.S., Maksymov, S. Yu. (2017) *Current supply for arc welding, surfacing or soldering of remote structures*. Pat. Ukraine 114938 [in Ukrainian].

FEATURES OF ARC WITH PULSED SELF-REGULATION OF ELECTRODE MELTING PROCESS IN RELATION TO MANUAL ARC WELDING

S. Yu. Maksimov, V.S. Sydoruk, D.M. Krazhanovsky

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,

11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kyiv.ua

Article deals with the problem of providing stability of the electrode arc melting process with respect to welding or surfacing technology. The task of the work is to find a technical solution to the use of the method of pulsed self-regulation of the electrode melting process previously proposed for mechanical welding and surfacing, in manual arc welding using coated electrodes. To solve the specified problem, it was proposed to use a current source assembled from serially manufactured components, in particular, transformers of the brand OSM with the power of 1 and 1.6 kVA with the idle voltage of 14 V. The electric parameters of the arc and the peculiarities of the electrode melting process were experimentally studied in comparison with those that occur in the case of using the traditional current source VDU-306. The peculiarity of the proposed source is that it is a source of pulsating DC voltage, which is powered from 220V single-phase mains. It was shown that the process was equally stable both in case of mechanised welding in carbon gas, as well as during manual welding using electrodes for direct current under the conditions, which are substantially lower than those recommended by the developers of electrode material. The proposed circuit of power supply provides the ability to vary the value of the current over a wide range, which will extend the technological possibilities of welding, including larger gaps between the edges and in different spatial positions. As compared to the process of welding with the power from VDU-306, welding from an experimental source is more power-saving. The circuit diagram can be of interest to both small enterprises as well as to individual entrepreneurs. 15 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: self-regulation, electrode melting process, electric parameters, arc oscillatory character, droplet overflow, complex current source, volt-ampere characteristic, oscillation pattern, histogram, breaking arc length

Надійшла до редакції
04.12.2019

Х МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах»

Україна, Одеса, готель «Аркадія»
14 – 18 вересня 2020 р.



Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Для участі в конференції необхідно заповнити реєстраційну картку і разом з тезами доповіді направити її в Оргкомітет до 19 червня 2020 р. До початку конференції будуть видані тези доповідей.

Збірники праць дев'яти попередніх конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» знаходяться у відкритому доступі на сайті:
<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

Оргкомітет

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича 11
м. Київ, 03150, Україна
тел. / факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2020>

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей	до 19.06.2020 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 17.07.2020 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 15.09.2020 р.

ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ*

И.В. Кривцун¹, В.Н. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскин^{1,2}, З. Ло², Е.В. Илляшенко¹

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона).
510650, г. Гуанчжоу, Тяньхэ, ул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

Одним из современных инновационных способов сварки тонколистовых нержавеющей сталей, позволяющих минимизировать остаточные деформации, получать высококачественные и долговечные соединения, является гибридная лазерно-микроплазменная сварка. В данной работе отработаны базовые технологические приемы гибридной лазерно-микроплазменной сварки, уточнены параметры режимов, а также оценены механические свойства и коррозионная стойкость получаемых соединений стали SUS304. Экспериментально подтверждена перспективность применения лазерно-микроплазменной сварки для соединения нержавеющей сталей малых толщин. Библиогр. 6, табл. 2, рис. 10.

Ключевые слова: лазерно-микроплазменная сварка, нержавеющая сталь SUS304, присадочная проволока, погонная энергия, прочность, удлинение, коррозионная стойкость, гибридный эффект

Сварные изделия из тонколистовых нержавеющей сталей изготавливаются современной промышленностью с целью применения их в областях техники, связанных с необходимостью эксплуатации достаточно прочных конструкций, подверженных коррозии и определенным механическим воздействиям. Примерами таких задач могут быть: изготовление конструкций бытового назначения для условий морского климата или повышенной влажности, элементов корпусных конструкций транспортной техники (например, корпусов железнодорожных вагонов), сильфонных компенсаторов для атомной энергетики, оборудования химической и пищевой промышленности (например, баков, фильтров) и прочее. При этом часто ставятся задачи сварки нержавеющей сталей толщиной до 3,0 мм встык. Как правило, для решения таких задач используют контактную [1] или аргонодуговую сварку [2], реже – плазменную [3].

Однако данные способы сварки далеко не всегда позволяют максимально приблизить механические характеристики получаемых соединений к характеристикам основного металла, а также часто не удовлетворяют требованиям минимизации остаточных сварочных деформаций тонколистовых сталей. Одним из лучших на сегодняшний день способов сварки с позиций минимизации остаточных деформаций, получения высококачественных и долговечных соединений является лазерная сварка [4]. Однако из-за сравнительно высокой стоимости лазерного оборудования этот способ на сегодняшний день не

получил широкого распространения. Одним из путей снижения стоимости лазерного оборудования является уменьшение мощности излучения за счет частичной ее замены плазменно-дуговой составляющей в сварочном процессе. Такой процесс называется гибридной лазерно-плазменной сваркой [5]. Если при этом сохранить качество сварных соединений близким к качеству лазерной сварки, возможно получение новой перспективной сварочной технологии. Поэтому данная работа посвящена исследованию возможностей гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовых нержавеющей сталей на примере стали SUS304 толщиной $\delta = 0,3...3,0$ мм.

Целью данной работы является отработка базовых технологических приемов гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовых нержавеющей сталей на примере стали SUS304, выбор параметров режимов для таких приемов, а также проверка механических и коррозионных свойств получаемых соединений.

Технологические исследования процесса гибридной лазерно-микроплазменной сварки нержавеющей стали SUS304 (аналог 08X18H10) проводились согласно схеме, приведенной на рис. 1. В ходе экспериментов применяли дисковый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 1,03$ мкм, мощность которого изменяли в пределах 0,3...1,2 кВт. Диаметр фокального пятна составлял порядка 0,4 мм. В примененном для исследований интегрированном коаксиальном плазматроне прямого действия оригинальной разработки лазерное излучение со-

*По материалам доклада, представленного на международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 9–13 сентября 2019 г., г. Одесса.

Кривцун И.В. – <http://orcid.org/0000-0001-9818-3383>

© И.В. Кривцун, В.Н. Коржик, В.Ю. Хаскин, З. Ло, Е.В. Илляшенко, 2019

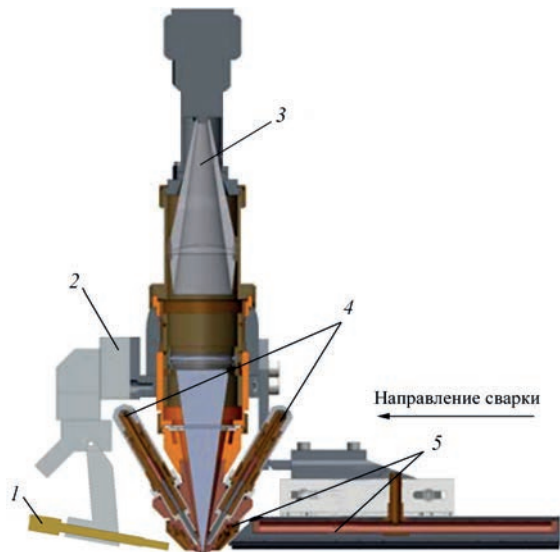


Рис. 1. Схема интегрированного плазмотрона и проведения экспериментов: 1 – подача присадочной проволоки; 2 – крепление на руке робота; 3 – подача лазерного излучения мощностью 0,3...1,2 кВт; 4 – катодные узлы; 5 – газовая защита

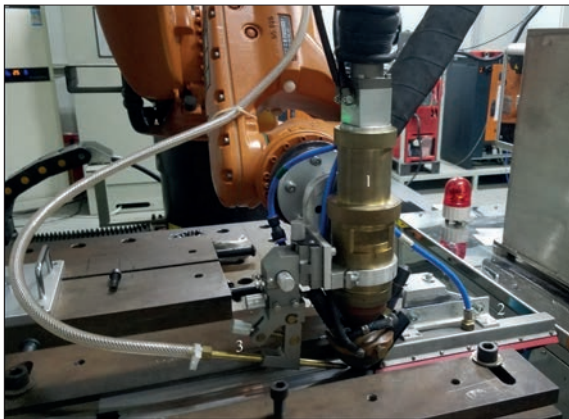


Рис. 2. Внешний вид головки для лазерно-микроплазменной сварки в руке робота KUKA KR30HA: 1 – интегрированный плазмотрон; 2 – система защиты формируемого шва; 3 – мундштук для подачи присадочной проволоки

вмещали со сжатой малоамперной дугой мощностью до 2,3 кВт [6]. В нем сфокусированное лазерное излучение и сжатая дуга выводились совместно через общее сопло диаметром 2,5 мм на свариваемый образец, расположенный на расстоянии порядка 3 мм от среза сопла. Фокальную плоскость лазерного излучения располагали на глубине порядка 0,5 мм относительно поверхности образца. Имелась возможность подачи присадочной проволоки со скоростью 60...600 м/ч. В экспериментах применяли электрическую дугу непрерывного действия прямой полярности. Сила тока дуги интегрированного микроплазматрона плавно регулировалась до 80 А при напряжении на дуге до 28 В. В качестве образцов для сварки встык и выполнения проплавов использовали листы стали SUS304 размером (200...300)×100×δ мм, где δ = 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 мм. В качестве присадки использовали проволоку ESAB OK Autrod 308L (диаметром 0,8 мм), которую подавали со скоростью 60 м/ч. Интегрированный плазмотрон перемещали относительно свариваемого образца при помощи антропоморфного робота KUKA KR30HA (рис. 2).

Проведенные эксперименты показали высокую стабильность процесса лазерно-микроплазменной сварки. Так, в случае гибридной сварки встык листов стали SUS304 (δ = 3,0 мм) с присадочной проволокой были получены положительные результаты как с зазором 0,5 мм между свариваемыми кромками, так и без зазора. Положительные результаты по критерию формирования верхнего и обратного валика шва были получены в широком диапазоне сварочных скоростей – от 30 до 50 м/ч. При этом приемлемые результаты сварки без зазора между кромками наблюдались в диапазоне скоростей 30...40 м/ч, а с зазором – 40...50 м/ч (рис. 3, 4).

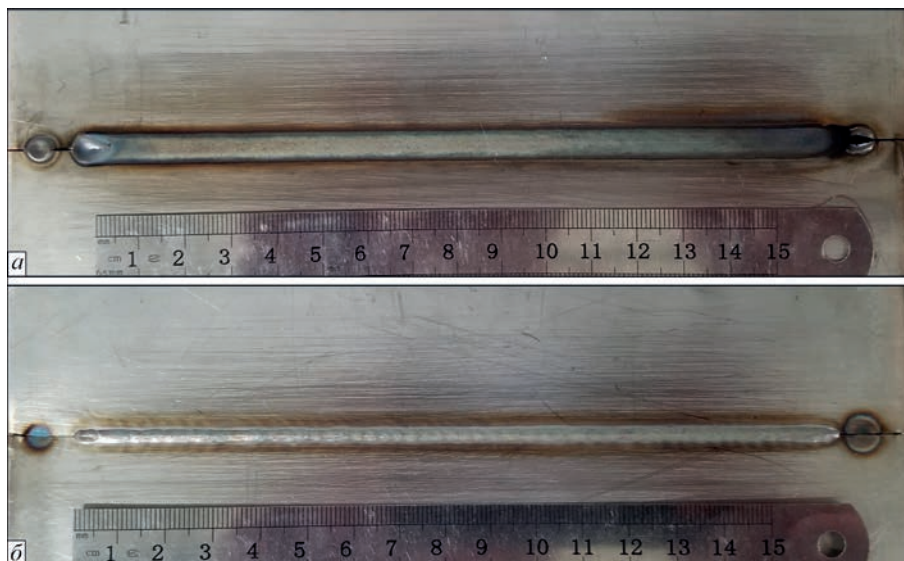


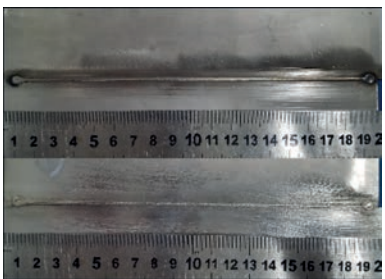

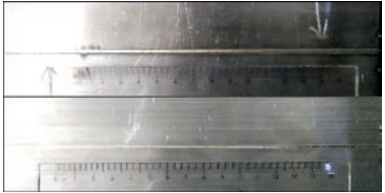



Рис. 3. Внешний вид пластин стали SUS304 (δ = 3,0 мм), сваренных встык с зазором 0,5 мм между кромками лазерно-микроплазменным способом (мощность излучения $P = 1,2$ кВт, сварочный ток $I = 80$ А, напряжение $U = 28$ В, скорость сварки $v = 30$ м/ч): лицевая (а) и обратная (б) стороны


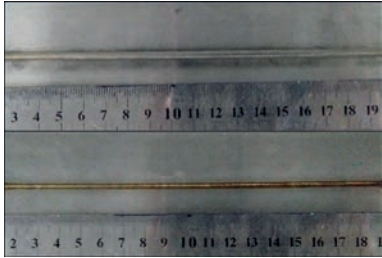
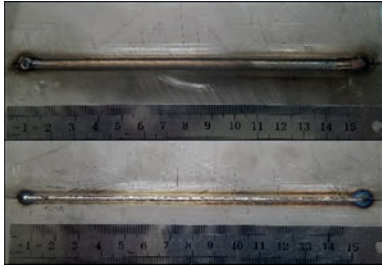

В результате проведения ряда экспериментов были определены параметры режимов гибридной сварки встык листов стали SUS304 как без применения присадочной проволоки (табл. 1), так и с ее применением (табл. 2). Согласно этим параметрам были сварены соединения, из которых затем были изготовлены образцы типа XIII (XIIIa) (ГОСТ 6996-66) для выполнения механических испытаний и об-

разцы произвольной формы для исследований коррозионной стойкости по весовой методике. Кроме того, при исследовании процесса лазерно-микроплазменной сварки стали SUS304 без применения присадочной проволоки были найдены такие параметры режима, которые позволяют выполнять качественные соединения без подрезов и провисаний шва во всем диапазоне рассмотренных толщин.

Таблица 1. Режимы и результаты гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовой стали SUS304 без применения присадочной проволоки

δ, мм	Мощность излучения, Вт	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Результат (вид шва сверху и снизу)
0,3	300	15	22	400	
0,5	1000	50	26	360	
1,0	1000	50	26	180	
1,0	1000	70	27	180	
1,5	1200	50	26	120	
3,0	1200	80	28	48	

Таблиця 2. Режимы и результаты гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовой стали SUS304 с применением присадочной проволоки (диаметром 0,8 мм), подаваемой со скоростью 60 м/ч

δ , мм	Мощность излучения, Вт	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Результат (вид шва сверху и снизу)
1,0	1000	70	27	120	
1,5	1200	50	26	90	
3,0	1200	80	28	42	
3,0	1200	80	28	30	

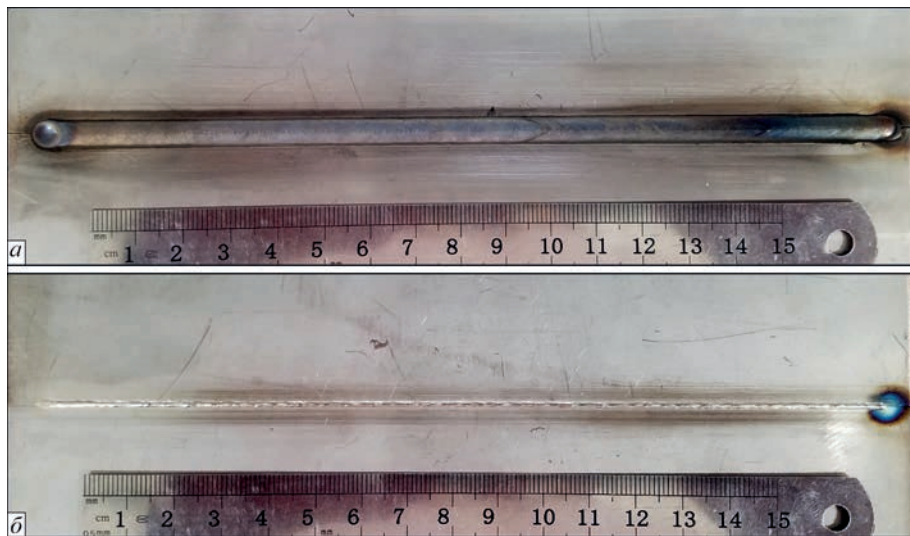


Рис. 4. Внешний вид пластин стали SUS304 ($\delta = 3,0$ мм), сваренных встык без зазора между кромками лазерно-микроплазменным способом (мощность излучения $P = 1,2$ кВт, сварочный ток $I = 80$ А, напряжение $U = 28$ В, скорость сварки $v = 40$ м/ч): лицевая (а) и обратная (б) стороны



Рис. 5. Сваренный образец SUS304 ($\delta=1,5$ мм): лицевая (а, б) и обратная (в) стороны

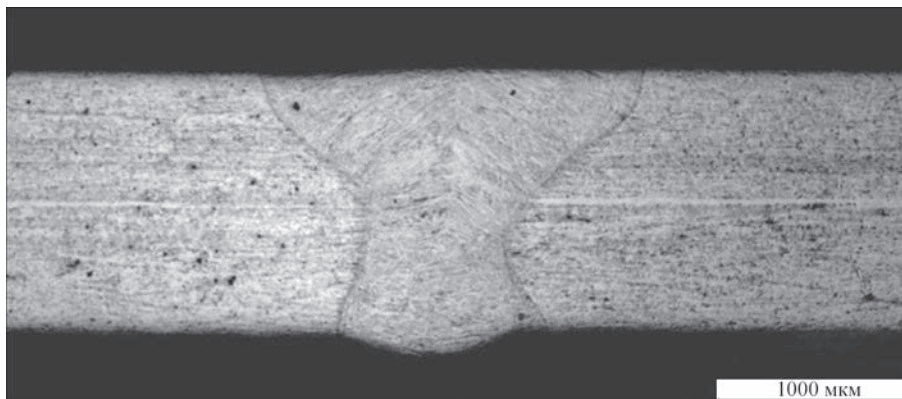


Рис. 6. Макроструктура стыкового соединения стали SUS304 ($\delta = 1,5$ мм), полученного лазерно-микроплазменной сваркой без применения присадочной проволоки

Один из примеров – результат сварки стали SUS304 толщиной $\delta = 1,5$ мм – приведен ниже и на рис. 5, 6.

Режим и результат гибридной лазерно-микроплазменной сварки бездефектного соединения из стали SUS304 ($\delta = 1,5$ мм) без применения присадки

Мощность лазера P , Вт.....	1200
Ток дуги I , А	50
Расход плазмообразующего газа $Q_{пл.}$, л/мин.....	10
Расход защитного газа $Q_{зщ.}$, л/мин	10
Скорость сварки v , м/мин.....	2
Зазор от детали до сопла, мм	3
Расход дополнительного защитного газа	
$Q_{доп.зщ.}$, л/мин	20
Расход газа защиты корня шва $Q_{обр.}$, л/мин.....	20
Ширина лицевой (верхней) стороны шва, мм.....	2,1
Выпуклость лицевой стороны, мм	0,2
Ширина обратной стороны шва (корня), мм	1,0
Выпуклость обратной стороны шва (корня), мм	0,25

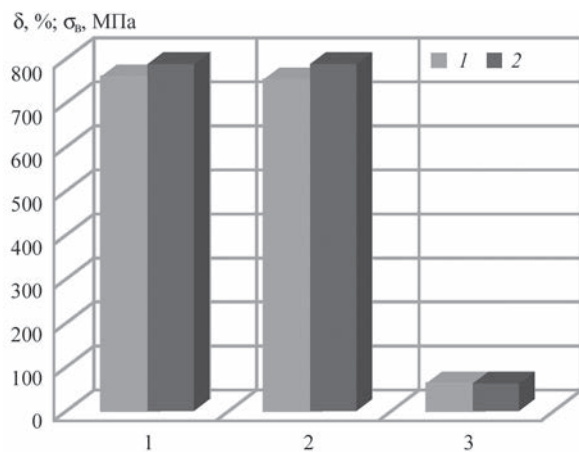


Рис. 7. Сравнительные результаты механических испытаний сваренных лазерно-микроплазменным способом образцов из стали SUS304 (1) и основного металла (2) при их статическом растяжении: 1 – усредненный предел прочности σ_B (МПа) для образцов толщиной 1 и 3 мм; 2 – усредненный предел прочности σ_B (МПа) для образцов толщиной 1,5 мм; 3 – относительное удлинение δ (%) для всех случаев

Для получения результатов сравнительных механических испытаний основного металла и соединения из стали SUS304 ($\delta = 1,5$ мм), сваренного встык лазерно-микроплазменным способом без присадки, были вырезаны две серии по три образца. Еще одна серия из четырех образцов была вырезана из сваренных гибридным способом стыков той же стали толщиной $\delta = 1$ и 3 мм (по два образца каждого типа). При помощи разрывной машины типа MTS Criterion 45 проводились испытания на статическое растяжение стыковых швов для определения предела прочности σ_B (МПа) и относительного удлинение δ (%). Измеренные для каждой серии образцов результаты усреднялись. По полученным усредненным значениям построили соответствующие диаграммы (рис. 7). В результате было установлено, что прочность гибридной лазерно-микроплазменной сварки нержавеющей стали SUS304 – около 96 % прочности основного металла, относительное удлинение сваренных таким способом образцов – 100 % основного металла. Для большинства сварочных задач приведенные показатели являются удовлетворительными.

Испытания коррозионной стойкости стыковых соединений из стали SUS304 ($\delta = 1,0; 1,5$ и 3,0 мм), полученных лазерно-микроплазменной сваркой без присадочной проволоки, выполняли по весовой методике. Согласно этой методе из сваренных образцов вырезали темплеты (по три образца для каждого случая), близкие по ширине к ширине швов из ЗТВ. Размеры темплетов составляли $(5...10) \times (3...8) \times \delta$ мм. Таким образом, темплет содержал определенную часть сварного шва и ЗТВ при минимальной части основного металла. Отдельно вырезали темплеты близких размеров из основного металла (контрольные образцы). Готовые темплеты взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,001 г, после чего погружали в так называемую царскую водку – смесь кислот $HNO_3 + 2HCl$. Через определенное время (как пра-

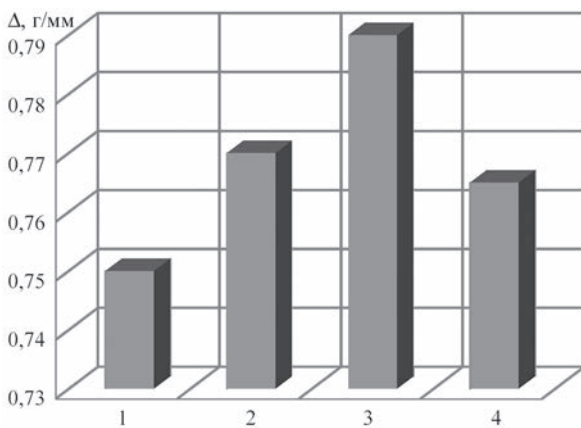


Рис. 8. Усредненные величины потерь массы образцов из стали SUS304 (Δ): 1 – $\delta = 1,0$ мм; 2 – $\delta = 1,5$ мм; 3 – $\delta = 3,0$ мм; 4 – основной металл

вило, 1...2 ч) образцы доставали, тщательно промывали, высушивали и взвешивали еще раз. Величина потери веса позволяет судить о скорости коррозии. Сравнение потери веса контрольного образца из основного металла с потерей веса сваренного образца позволяет определить коррозионную стойкость последнего.

Результаты испытаний на коррозионную стойкость вырезанных образцов отражены в виде диаграмм на рис. 8. По этим результатам можно сделать заключение о том, что все полученные данные находятся в пределах ошибки эксперимента, а отклонение величин потери массы сварных соединений от основного металла находится в пределах 3...4 %. Потеря массы образцов лежит в пределах 0,7...0,8 г/ч. Скорость коррозии при этом составляет $(6...7) \cdot 10^{-3}$ г/мин. Наблюдаемая тенденция роста потери массы образцов с ростом их толщины может объясняться ростом размера зерен и увеличением ЗТВ, вызванным ростом погонной энергии сварки.

В ходе анализа проведенных технологических исследований определили погонную энергию процесса (E , Дж/мм) как сумму мощностей лазерной (P , Вт) и микроплазменной (IU , Вт) составляющих, отнесенную к скорости сварки (v , мм/с). По результатам вычислений построили зависимость изменения погонной энергии двух рассмотренных процессов лазерно-микроплазменной сварки – с присадочной проволокой и без нее (рис. 9). Сравнение кривых 1 и 2, приведенных на рис. 9, показало, что для применения присадочной проволоки погонную энергию процесса необходимо увеличить на 20...40 % в случае сварки с плотно состыкованными кромками и на 15...30 % в случае сварки с зазором между кромками. Желательно, чтобы величина такого зазора составляла порядка 15...20 % толщины стыкуемых кромок.

Для сравнения результатов лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки был проведен следующий эксперимент.

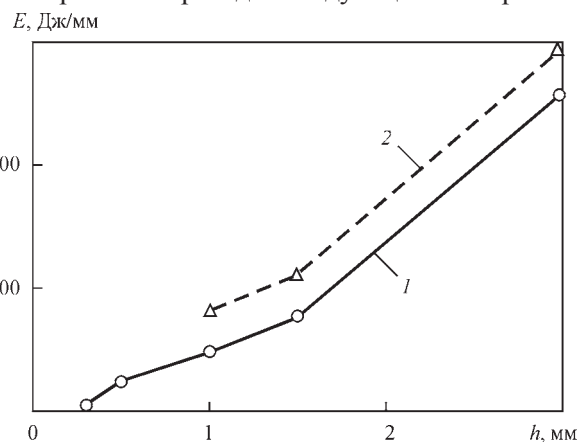


Рис. 9. Зависимости погонной энергии E (Дж/мм) лазерно-микроплазменной сварки без проволоки (1) и с проволокой (2) от толщины h (мм) свариваемой стали SUS304

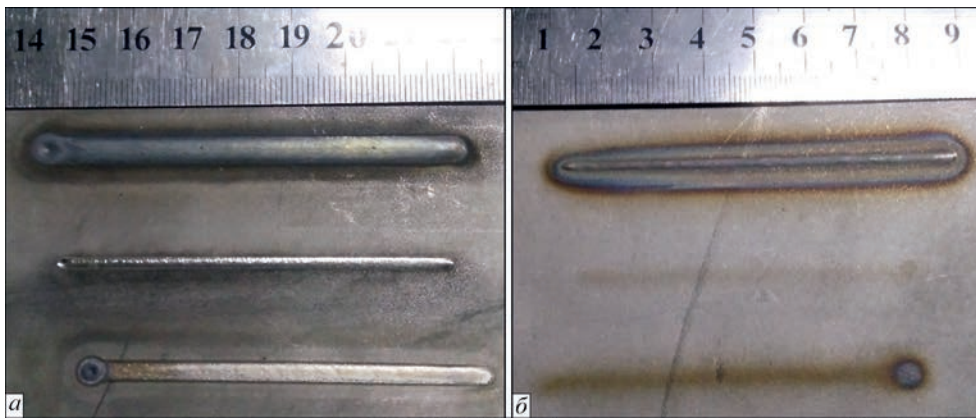


Рис. 10. Внешний вид лицевой (а) и обратной (б) сторон проваров в пластине из стали SUS304 толщиной $\delta = 3,0$ мм (сверху вниз): гибридный, лазерный, микроплазменный

Лазерно-микроплазменным способом без применения присадки был получен гарантированный провар в пластине из стали SUS304 ($\delta = 3,0$ мм) на режиме: $P = 1200$ Вт, $I = 80$ А, $U = 28$ В, $v = 45$ м/ч. Затем на той же скорости и с теми же прочими параметрами режима были выполнены два провара – лазерным и микроплазменным способами (рис. 10). При этом сумма погонных энергий составляющих процессов соответствовала погонной энергии гибридной сварки.

Исследование поперечных сечений этих проваров показало, что глубина гибридного провара, примерно на 25 % превосходит сумму глубин лазерного и микроплазменного проваров. Это позволило сделать заключение о наличии явно выраженного гибридного эффекта в случае лазерно-микроплазменной сварки рассмотренным способом.

Выводы:

1. В ходе данной работы исследовали гибридную лазерно-микроплазменную сварку тонколистовых нержавеющей сталей на примере стали SUS304 без присадочной проволоки и с ее применением. Определили, что применение присадочной проволоки целесообразно, начиная с толщин не менее 1,0 мм. При этом для полного переплава проволоки диаметром 0,8 мм в случае сварки с плотно состыкованными кромками погонную энергию процесса необходимо увеличить на 20...40 %, а в случае сварки с зазором между кромками – на 15...30 %. Величина зазора должна составлять порядка 15...20 % толщины стыкуемых кромок.

2. Определение механических свойств получаемых гибридной лазерно-микроплазменной сваркой соединений из нержавеющей стали SUS304 показало, что их прочность на статический разрыв составляет около 96 % прочности основного металла, а относительное удлинение аналогично данному параметру основного металла. Для боль-

шинства сварочных задач приведенные показатели являются удовлетворительными.

3. Испытания на коррозионную стойкость показали, что отклонение величин потери массы сварных соединений относительно основного металла находится в пределах 3...4 %. Потеря массы образцов лежит в пределах 0,7...0,8 г/ч. Скорость коррозии при этом составляет $(6...7) \cdot 10^{-3}$ г/мин. Величина потерь массы образцов увеличивается с ростом их толщины, что может объясняться ростом размера зерен и увеличением ЗТВ, вызванными повышением погонной энергии сварки.

4. Сравнительные исследования проваров, выполненных в стали SUS304 лазерным, микроплазменным и гибридным способами показали, что глубина гибридного провара примерно на 25 % превосходит сумму глубин лазерного и микроплазменного проваров. При этом сумма погонных энергий составляющих процессов соответствовала погонной энергии гибридной сварки. Это свидетельствует о наличии гибридного эффекта в случае лазерно-микроплазменной сварки.

Работа выполнялась в рамках проекта №2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (Научно-исследовательские разработки лазерных и плазменных технологий гибридной сварки и резки)», Guangzhou, China, а также в рамках специального проекта № 2017GDASCX-0411 «Capacity – Building of Innovation – Driven Development for Special Fund Projects» Программ Академии наук провинции Гуандун (КНР) «Исследование физико-химических процессов при взаимодействии паровой плазмы с поверхностью металлов и разработка научных основ технологии водо-воздушной плазменной резки листовых сталей для получения сварных соединений».

Список літератури

1. Банов М.Д. (2008) *Технология и оборудование контактной сварки*: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. 3-е изд. Москва, Издательский центр «Академия».
2. Петров В.Н. (1969) *Сварка и резка нержавеющей стали*. Ленинград, Судостроение.
3. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. (2008) *Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение*. Москва, Машиностроение.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. (1988) *Лазерная техника и технология*. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов. Учеб. пособие для вузов. Григорьянц А.Г. (ред.). Москва, Высшая школа.
5. Кривцун И.В., Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. и др. (2007) Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **5**, 49–53.
6. Кривцун И.В., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю. и др. (2017) Установка нового поколения для лазерно-микроплазменной сварки. *Лучевые технологии в сварке и обработке материалов*. Сб. докл. Восьмой между. конф. Кривцун И.В. (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», сс. 95–100.

References

1. Banov, M.D. (2008) *Technology and equipment for resistance welding*: Manual for students of schools of vocat. educ. 3rd ed. Moscow, Akademiya [in Russian].
2. Petrov, V.N. (1969) *Welding and cutting of stainless steels*. Leningrad, Sudostroenie [in Russian].
3. Sosnin, N.A., Ermakov, S.A., Topolyansky, P.A. (2008) *Plasma technologies. Welding, coating, strengthening*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N. (1988) *Laser engineering and technology*. In: 7 books. Book 5: Laser welding of metals: Manual for higher educ. instit. Ed. by A.G. Grigoryants. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
5. Krivtsun, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. et al. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **5**, 36-40.
6. Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N., Khaskin, V.Yu. et al. (2017) Unit of new generation for laser-microplasma welding. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Materials Processing*. Ed. by I.V. Krivtsun. Kiev, IAW, 95-100.

ГІБРИДНЕ ЛАЗЕРНО-МІКРОПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ НЕРЖАВІЮЧИХ СТАЛЕЙ

І.В. Кривцун¹, В.М. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскін^{1,2}, З. Ло², Є.В. Илляшенко¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона).

510650, м. Гуанчжоу, Тяньхе, вул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

Одним із сучасних інноваційних способів зварювання тонколистових нержавіючих сталей, що дозволяють мінімізувати залишкові деформації, отримувати високоякісні та довговічні з'єднання, є гібридне лазерно-микроплазмове зварювання. У даній роботі відпрацьовані базові технологічні прийоми гібридного лазерно-микроплазмового зварювання, уточнені параметри режимів, а також оцінені механічні властивості та корозійна стійкість одержуваних сполук сталі SUS304. Експериментально підтверджена перспективність застосування лазерно-микроплазменного зварювання для з'єднання нержавіючих сталей малої товщини. Бібліогр. 6, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: лазерно-микроплазмове зварювання, нержавіюча сталь SUS304, присадний дріт, погонна енергія, міцність, подовження, корозійна стійкість, гібридний ефект

HYBRID LASER-MICROPLASMA WELDING OF STAINLESS STEELS

I.V. Krivtsun¹, V.N. Korzhik^{1,2}, V.Yu. Khaskin^{1,2}, Z. Lo², E.V. Ilyashenko¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O.Paton Institute of Welding).

363 Chiansin Str., 510650, Guangzhou, Tianhe. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

Hybrid laser-microplasma welding is one of the modern innovative processes of welding sheet stainless steels, allowing minimization of residual deformations, producing high-quality and durable joints. In this study, basic techniques of hybrid laser-microplasma welding were optimized, mode parameters were précised, and mechanical properties and corrosion resistance of the produced joints of SUS 304 steel were assessed. The good prospects for application of laser-microplasma welding for joining thin stainless steels were confirmed experimentally. 6 Ref., 2 Tab., 10 Fig..

Keywords: laser-microplasma welding, stainless steel SUS 304, filler wire, heat input, strength, elongation, corrosion resistance, hybrid effect

Поступила в редакцію 21.10.2019

Щорічна конференція-виставка
«**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ-2020**»

Травень 2020 р., Київ, «Асоціація «ОКО»

<http://www.ndt.com.ua>

Міжнародна конференція

«**ТИТАН 2020: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ**»

1–3 червня 2020 р., Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

тел.: 38044 200-82-77, journal@paton.kiev.ua, <http://pwi-scientists.com/rus/titan2020>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОЛОВОК СВАРОЧНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ TIG ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

Л.М. Лобанов¹, Н.М. Махлин², В.Е. Водолазский², В.Е. Попов², Д.С. Олияненко^{2*}

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины».

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: electro@paton.kiev.ua

К точности и надежности исполнительных механизмов современных автоматов для орбитальной сварки (GTAW) неповоротных стыков трубопроводов энергоблоков АЭС предъявляется ряд специфических требований, в частности, к наибольшему диаметрам планшайб головок сварочных таких автоматов, на которых размещаются, как правило, все или большинство этих механизмов. В настоящей работе описаны разработанные в НИЦ СКАЭ конструкции исполнительных механизмов современных автоматов для GTAW неповоротных стыков трубопроводов АЭС. Разработаны механизмы зажима (фиксации) головок сварочных на свариваемой трубе, механизм стабилизации длины дуги, механизм вращения (вращателя) планшайбы вокруг оси свариваемых труб, механизм автоматического регулирования напряжения дуги, механизм колебаний неплавящегося электрода (поперек сварного шва) и механизм подачи присадочной проволоки. Приведены результаты промышленной эксплуатации некоторых разработанных в НИЦ СКАЭ автоматов для GTAW, в которых использованы описанные механизмы. Цель настоящей работы – представление результатов работ, проведенных в НИЦ СКАЭ в направлении создания составных частей автоматов для GTAW неповоротных стыков тонкостенных трубопроводов из сталей аустенитного, перлитного классов, углеродистых сталей и сплавов цветных металлов (кроме алюминия и его сплавов). Библиогр. 11, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: дуговая автоматическая орбитальная сварка, неплавящийся электрод, инертные газы, головка сварочная, планшайба, механизмы исполнительные, вращатель планшайбы, колебатель неплавящегося электрода, присадочная проволока

Одним из основных требований к головкам сварочным накидного типа автоматов для GTAW является минимально возможный диаметр их вращающихся частей (планшайб), что объясняется необходимостью обеспечения осуществления GTAW неповоротных стыков трубопроводов в условиях реальных межтрубных расстояний, существующих на АЭС. Поэтому создание головок сварочных, способных функционировать в широком диапазоне наружных диаметров свариваемых трубопроводов, не представляется возможным, что заставляет прибегнуть к разбивке этого диапазона на поддиапазоны с учетом диаметров трубопроводов, применяемых в отрасли атомной энергетики Украины.

Ранее проведенными в НИКИМТ (г. Москва) исследованиями [1, 2] было установлено, что для сварки неповоротных стыков тонкостенных трубопроводов (широко используемых при монтаже, ремонте и модернизации энергоблоков АЭС) способом GTAW наиболее приемлемы методы автоопрессовки, последовательного проплавления или

*В разработке механизмов головок сварочных автоматов для GTAW принимали участие Н.С. Федоренко, В.Л. Кобрянский, В.М. Гавва, А.Д. Чередник, А.В. Ткаченко, В.Ю. Буряк и Э.В. Кункина (НИЦ СКАЭ).

Л.М. Лобанов — <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>

© Л.М. Лобанов, Н.М. Махлин, В.Е. Водолазский, В.Е. Попов, Д.С. Олияненко, 2019

антиопрессовки, что позволяет значительно упростить построение соответствующего сварочного оборудования, в том числе головок сварочных. Опыт НИКИМТ и других организаций с учетом влияния предельно допустимых отклонений параметров режима автоматической дуговой орбитальной сварки GTAW неповоротных стыков труб на качество сварных соединений [3, 4] послужил базой для разработок в НИЦ СКАЭ отечественных орбитальных автоматов для GTAW и их механизмов. Следует отметить, что в направлении разработки и изготовления орбитальных автоматов для GTAW значительных успехов достигли такие известные фирмы, как ARC MACHINES, INC и DIMETRICS, INC (США), «POLYSOUDE» (Франция), ESAB (Швеция), «SIEMENS» и «GES. M.V.H» (ФРГ), «RTA» (Италия), НИКИМТ (Россия) и др.

В табл. 1 приведены некоторые основные сравнительные параметры и характеристики предлагаемых рынком головок сварочных автоматов для GTAW тонкостенных металлических трубопроводов энергоблоков АЭС, получившие широкое распространение в Украине и России методами автоопрессовки, последовательного проплавления или антиопрессовки, разработки и производства различных компаний.

Таблица 1. Некоторые основные параметры и характеристики головок сварочных автоматов для GTAW методами автоопрессовки, последовательного проплавления или антиопрессовки

Номер п/п	Наименование параметра, характеристика	Головка сварочная (марка или обозначение и разработчик/производитель)			
		АДЦ 627.03.00.000 (для сварки в среде аргона), Украина, НИЦ СКАЭ	АДЦ 627.03.00.000-01 (для сварки в среде гелия), Украина, НИЦ СКАЭ	АДЦ 625.03.00.000 (для сварки в среде аргона), Украина, НИЦ СКАЭ	АДЦ 626.03.00.000 (для сварки в среде аргона), Украина, НИЦ СКАЭ
1	Минимальный диаметр свариваемой трубы, мм	7	7	18	42
2	Максимальный диаметр свариваемой трубы, мм	24	24	42	76
3	Максимальный сварочный ток, А	140	140	160	200
4	Диапазон регулирования скорости сварки, м/ч	0,42...48,80		1,9...33,5	4,0...39,6
5	Диаметр неплавящегося (вольфрамового) электрода, мм	1,6		2,0...3,0	
6	Радиус вращающихся частей, мм, не более	50		70	86
7	Охлаждение электрода	Газовое			
8	Система стабилизации напряжения дуги	Механический копир-стабилизатор (СДЦ)		Автоматический регулятор напряжения дуги (АРНД)	
9	Габаритные размеры: длина, мм, не более ширина, мм, не более высота, мм, не более	110 285 280		142 285 357	178 330 357
10	Масса головки (без коммуникационных кабелей и шлангов), кг, не более	3,00		3,50	4,30

Продолжение табл. 1.

Номер п/п	Наименование параметра, характеристика	Головка сварочная (марка или обозначение и разработчик/производитель)			
		ОДА-1с (для сварки в среде аргона), Россия, НИКИМТ	ОДА-2с (для сварки в среде аргона), Россия, НИКИМТ	ОДА-3с (для сварки в среде аргона), Россия, НИКИМТ	MU –IV 8/38 P (для сварки в среде аргона), Франция, POLYSOUDE
1	Минимальный диаметр свариваемой трубы, мм	8	20	42	8
2	Максимальный диаметр свариваемой трубы, мм	26	42	76	38
3	Максимальный сварочный ток, А	100	160	200	180
4	Диапазон регулирования скорости сварки, м/ч	6,0...23,0	6,0...30,0		0,5...40,0
5	Диаметр неплавящегося (вольфрамового) электрода, мм	2,0...3,0		2,0...4,0	
6	Радиус вращающихся частей, мм, не более	40	55	90	63
7	Охлаждение электрода	Водяное			
8	Система стабилизации напряжения дуги	СДЦ	АРНД		
9	Габаритные размеры: длина, мм, не более ширина, мм, не более высота, мм, не более	81 146 235	100 180 250	155 190 355	112 152 282
10	Масса головки (без коммуникационных кабелей и шлангов), кг, не более	3,70	5,70	11,70	3,25

К особенностям разработанных в НИЦ СКАЭ головок сварочных АДЦ 627.03.00.000, АДЦ 627.03.00.000-01, АДЦ 625.03.00.000 и АДЦ 626.03.00.000 для GTAW тонкостенных металлических трубопроводов методами автоопрессовки, последовательного проплавления или антиопрессовки можно отнести возможность с их помощью осуществлять шагоимпульсную сварку и сварку модулированным током при поддержании неизменной скорости вращения их планшайб (скорости сварки), что существенно расширяет технологические возможности разработанных отечественных автоматов для GTAW. Другая особенность этих головок сварочных заключается в возможности использовать одну и ту же систему управления с контроллерами приводов механизмов, позволяющую не только обеспечивать пред-

варительную установку и плавное регулирование (программирование) значений параметров циклов и режимов сварки, но и задавать количество полнокольцевых проходов сварочной дуги (от 1 до 4), а также реверсирование направления вращения планшайб после осуществления определенного количества таких проходов [5–9].

Головка сварочная АДЦ 627.03.00.000-01 предназначена для работы в контролируемой среде (преимущественно в среде гелия) с наклоном оси на 15° (градусов угловых) неплавящегося электрода относительно вертикали к свариваемому изделию и отличается от головки сварочной АДЦ 627.03.00.000 только изолятором, через который крепится горелка АДЦ 627.03.02.000 с неплавящимся электродом, типом электрических вилок и газового штуцера токогазоподвода, обеспечива-

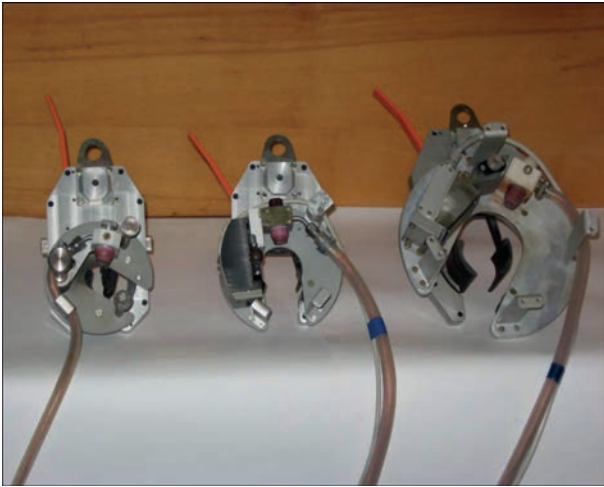


Рис. 1. Общий вид головок сварочных АДЦ 627.03.00.000, АДЦ 625.03.00.000 и АДЦ 626.03.00.000 со стороны их планшайб

ющим подключение головки для ее работы внутри герметичной камеры с контролируемой средой.

На рис. 1 представлен общий вид головок сварочных АДЦ 627.03.00.000, АДЦ 625.03.00.000 и АДЦ 626.03.00.000. Более подробно общий вид головок сварочных АДЦ 627.03.00.000 и АДЦ 627.03.00.000-01 приведен на рис. 2. На выходной шестерне редуктора вращателя 1 головки установлена планшайба 5. На ней закреплены рычаг 2 копира-стабилизатора, горелка с неплавящимся электродом, фиксация пространственного положения которого (включая «вылет») производится с помощью маховичка 3, копир 8, две стойки 6 для укладки токогазопровода и стойка 7 для его закрепления («заневоливания»). Рычаг 2 включает винт-копир 8, собственно рычаг 9, гайку с выполненным из электроизоляционного материала маховичком 10, корпус 11, а также закрепленную на планшайбе и взаимодействующую с гайкой 10 ось, втулку и пружину. Корпус 11 обеспечивает крепление в нем горелки с неплавящимся электродом и ее электрическую изоляцию от потенциала планшайбы 5, а, следовательно, от потенциала свариваемого трубопровода. Входящая в состав рычага 2 ось дает возможность его поворота на некоторый угол в плоскости планшайбы 5, что обеспечивает дополнительные удобства при выполнении операций установки головки сварочной АДЦ 627.03.00.000 (АДЦ 627.03.00.000-01) на свариваемый трубопровод и ее снятия с него, а также при наладке и техническом обслуживании горелки с неплавящимся электродом. Гайка 10 предназначена для осуществления фиксации рычага 2 в рабочем положении или его расфиксации при необходимости выполнить его поворот. Винт — копир 8 обеспечивает установление (задание) требуемой для процесса сварки длины межэлектродного промежутка (длины сварочной дуги) и ее поддержание (с помощью пружины рычага 2) с

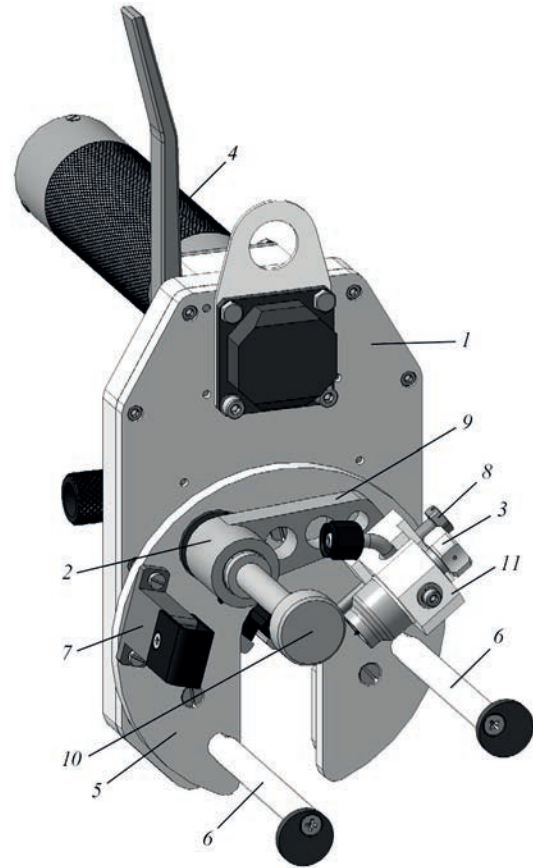


Рис. 2. Общий вид головки сварочной АДЦ 627.03.00.000 (АДЦ 627.03.00.000-01) со стороны планшайбы (4 — рукоятка поляя, остальные обозначения см. в тексте)

точностью не хуже $\pm 0,2$ мм при вращении планшайбы 5 вокруг свариваемого трубопровода.

Механизмы вращения и механизмы зажима (фиксации) всех сварочных головок, разработанных в НИЦ СКАЭ, а также механизмы АРНД головок построены по единым унифицированным схемам и отличаются для механизмов вращения только мощностью мотор-редуктора и коэффициентом редукции для каждой модели головки, а для механизмов зажима (фиксации) на свариваемой трубе — геометрией и площадью захватов. Механизмы вращения ряда головок приводятся в движение с помощью унифицированных регулируемых реверсивных электроприводов, выполненных на мотор-редукторах 2657 W 024 CR 30/1 фирмы «Faull Haber» и энкодерах (датчиках скорости вращения вала электродвигателей) фирмы «Kübler», вырабатывающих 125 или 128 импульсов за один полный оборот вала электродвигателя. Управление подобными приводами подробно рассмотрено в работе [8]. На рис. 3 показан общий вид вращателей всех разработанных в НИЦ СКАЭ моделей головок. Передача крутящего момента от выходного вала мотор-редуктора привода 2 к шестерне приводной 3 редуктора 1 головки сварочной осуществляется с помощью вала 4.

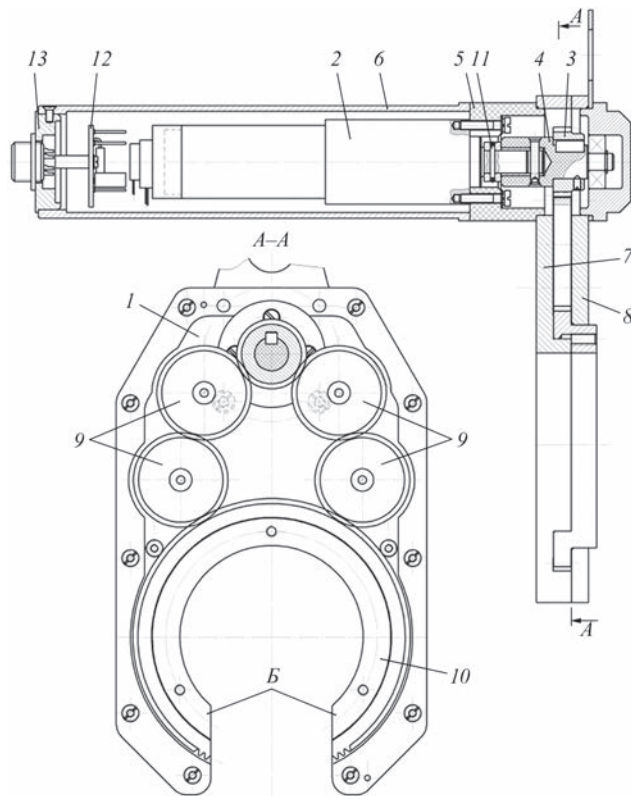


Рис. 3. Общий вид вращателя всех разработанных в НИЦ СКАЭ моделей головок сварочных (со стороны их механизма зажима (обозначения см. в тексте)

Защита привода 2 от воздействия электрических потенциалов, которые могут возникать на узлах и деталях редуктора 1, обеспечивается как с помощью вала 4, так и выполненной из электроизоляционного материала проставки 5, а защита от воздействия механических факторов внешней среды — с помощью рукоятки цилиндрической 6, в которой, кроме привода 2, размещены фильтр-ограничитель 12 и вилка 13 для подключения к вращателю коммуникационного кабеля. Редуктор 1 головки сварочной включает корпус 7, крышку 8 этого корпуса, набор шестерен 9 и шестерню выходную 10. С целью обеспечения возможности установления головок сварочных на трубы «бесконечной» длины корпус 7, крышка 8 и шестерня выходная 10 и планшайба выполнены с пазом Б. Шестерня выходная 10 редуктора 1 находится в зацеплении с двумя шестернями набора шестерен 9, что обеспечивает плавное и непрерывное вращение шестерни выходной 10 независимо от ее углового положения относительно своих двух ортогональных осей (осей плоскости, перпендикулярной продольной оси свариваемого трубопровода). Две другие шестерни набора шестерен 9 находятся в зацеплении с шестерней приводной 3, закрепленной на вале 4 с помощью шпоночного соединения. Вал 4 выполнен в виде цилиндрического тела вращения из электроизоляционного материала, которое с помощью внутренней стальной

штулки и штифта 11 скреплено с валом выходным привода 2. Штифт 11 обеспечивает защиту привода 2 от превышения максимально допустимого значения нагрузки — при достижении или превышении такого значения штифт 11 срезается и подлежит замене после устранения причин чрезмерной нагрузки. На шестерне выходной 10 установлена планшайба.

Так как при конструировании автоматов АДЦ 627 УЗ.1, АДЦ 625 УЗ.1, АДЦ 626 УЗ.1, АДЦ 628 УХЛ4, АДЦ 629 УХЛ4 и АДЦ 630 УХЛ4 для GTAW учитывался наиболее прогрессивный мировой опыт в этом направлении и технологические возможности отечественного производства, механизмы зажима (фиксации) разработанных в НИЦ СКАЭ головок сварочных на свариваемой трубе во многом схожи с механизмами аналогичного назначения фирмы «Polysoude» (Франция). Основой такого технического решения послужили свойства «ломающегося» рычага. Общий вид механизмов зажима головок сварочных, разработанных в НИЦ СКАЭ, приведен на рис. 4. В состав механизма зажима входят винт 1, гайки 2 и 3, оси 4 и 5, маховички 6, стойки 7 и 8, рычаг 9, шатун 10, щеки 11 и 12, захваты 13, вставки 14. Винт 1 выполнен в виде шпильки, имеющей с одного конца правую резьбу, а с другого — левую. Установленная в один из захватов 13 гайка 2 также имеет правую резьбу, а установленная в другой захват 13 гайка 3 — левую. При вращении винта 1 (с помощью маховичков 6) захваты 13 сходятся или расходятся — в зависимости от направления вращения маховичков 6. Помимо этого, захваты 13 с помощью осей 4 связаны с рычагом 9, который, в свою очередь, с помощью оси 5 соединен с шатуном 10. Так как в щеке 12 предусмотрены два паза Г и один паз Д, то при вращении рычага 9 оси 4 приобретают возможность перемещаться в пазах Г, а ось 5 — в пазе Д, при этом захваты 13 поворачиваются вокруг гаек 2 и 3. В одном из возможных крайних положений рычага 9 оси 4 окажутся смещенными вниз (в вертикальном направлении) на 0,5 мм относительно оси 5, в результате чего механизм зажима придет в состояние, при котором он окажется кинематически замкнутым. С учетом конструкции и кинематической схемы механизма зажима для фиксации головки сварочной на свариваемом трубопроводе следует установить эту головку на свариваемый трубопровод, рычаг 9 механизма зажима перевести в крайнее левое положение и вращением маховичков 6 свести захваты 13 до их соприкосновения с наружной поверхностью свариваемого трубопровода, после чего рычаг 9 установить в крайнее правое положение и произвести поворот маховичков 6 на пол-оборота в направлении, обеспечивающем сведение захватов 13, и перевести рычаг 9 (со щелч-

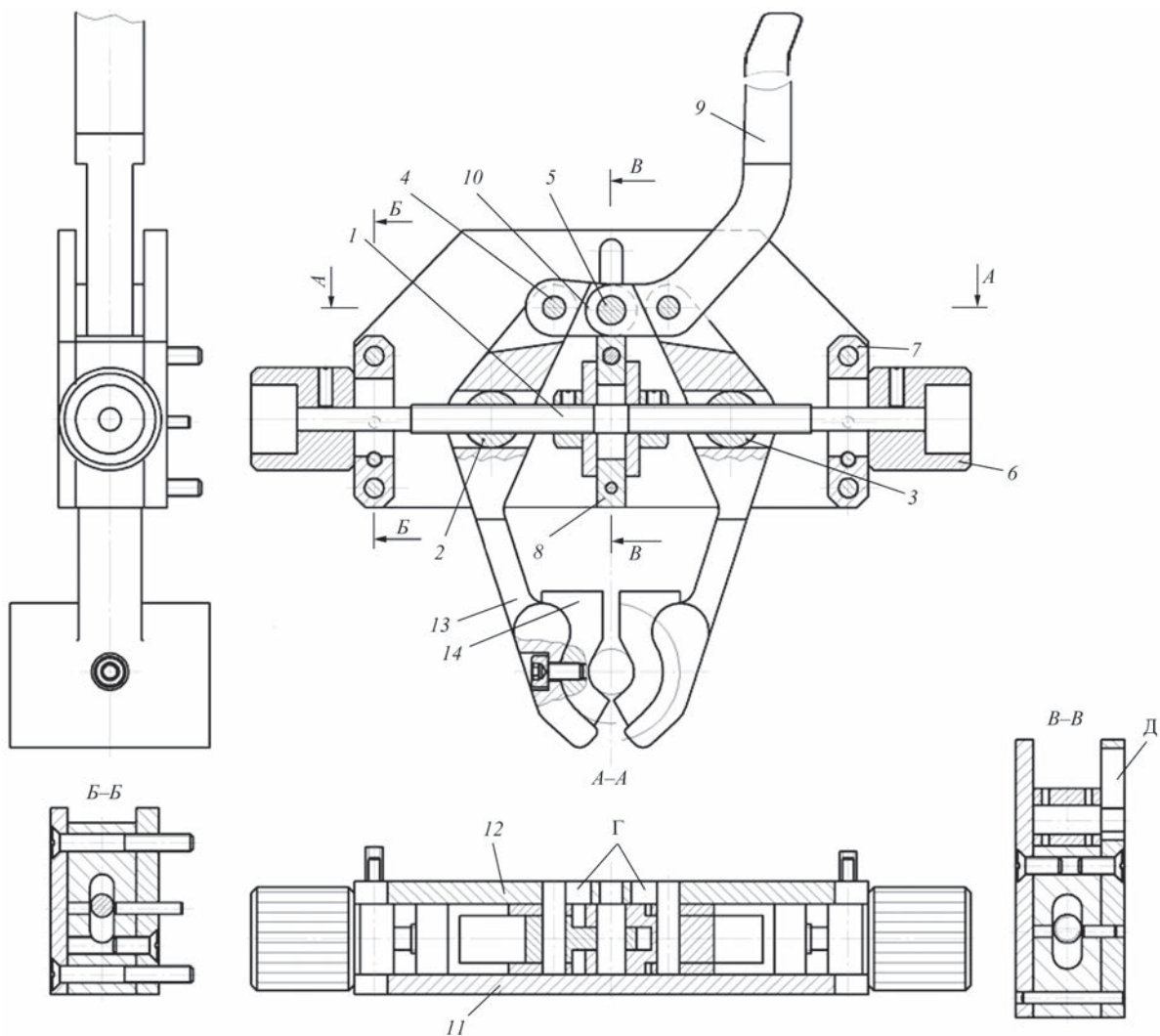


Рис. 4. Общий вид механизма зажима всех разработанных в НИЦ СКАЭ моделей головок сварочных (обозначения см. в тексте)

ком) в крайнее левое положение. Затем необходимо проверить надежность фиксации головки сварочной на свариваемом трубопроводе и в случае обнаружения недостаточности зажима головки повторить в приведенной последовательности все операции по ее фиксации.

Однако в процессе внедрения и опытно-промышленной эксплуатации автоматов АДЦ 627 УЗ.1, АДЦ 625 УЗ.1 и АДЦ 626 УЗ.1 для GTAW выявились и недостатки механизмов зажима головок сварочных, общий вид которых приведен на рис. 4. К наиболее существенным недостаткам таких механизмов зажима можно отнести необходимость их предварительной настройки на образцах, наружный диаметр которых совпадает или очень близок к наружному диаметру подлежащего сварке трубопровода, высокие требования к отсутствию овальности его наружной поверхности, невозможность достижения точности центрирования головки сварочной на свариваемом трубопроводе, обуславливающие необходимость применения АРНД, необходимость для обеспечения

минимально возможного межтрубного расстояния ориентировать определенное пространственное положение головки сварочной из-за наличия в ее механизме зажима рычага 9. В значительной степени отмеченных недостатков лишены разработанные в НИЦ СКАЭ в 2017–2019 гг. с учетом опыта НИКИМТ и других организаций альтернативные механизмы зажима, общий вид которых (типичный) приведен на рис. 5. Как видно из этого рисунка, предложенный механизм зажима состоит из двух базовых пластин 1 и 2, разделенных стойками 3. По направляющим 4 и 5, одна из которых выполнена четырехгранной, с помощью винта 6, имеющего на своих противоположных окончаниях правую и левую резьбу и вращающегося при помощи маховичка 7 с откидывающейся рукояткой, могут перемещаться в двух противоположных направлениях зажимы (призмы) 8 и 9. Одним из достоинств такого технического решения является сохранение радиусов вращающихся частей головок сварочных, значения которых приведены в таблицах 1 и 2. К другим достоинствам следует

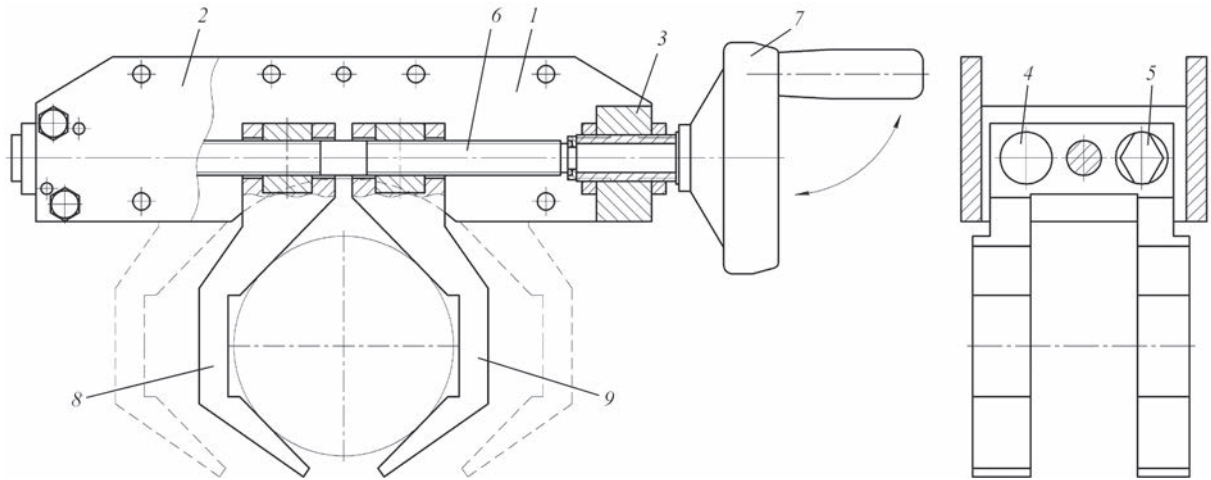


Рис. 5. Общий вид разработанных в НИЦ СКАЭ альтернативных механизмов зажима для всех моделей головок сварочных (обозначения см. в тексте)

отнести то, что благодаря точному выполнению рабочих поверхностей зажимов и синхронному их перемещению при сведении и разведении, а также возможности регулирования положения оси механизма зажима относительно оси вращения головки сварочной с последующей фиксацией этого положения при ее сборке предложенный механизм зажима обеспечивает точное центрирование головки сварочной на свариваемой трубе, при этом отпадает необходимость в поддерживании в процессе сварки заданной длины дуги (например, с помощью устройства СДД или АРНД).

Вместе с тем для регулирования, предварительного задания (программирования) и автоматического поддержания стабильным в процессе сварки напряжения дуги в соответствии с заданным значением и избранным алгоритмом цикла сварки в головках сварочных АДЦ 625.03.00.000 и АДЦ 626.03.00.000 предусмотрено унифицированное устройство АРНД. Механизм этого устройства представляет собой неподвижный корпус, в котором параллельно плоскости планшайб упомянутых головок сварочных размещен мало мощный реверсивный мотор-редуктор постоянного тока (например, 1524 Т 024 SR IE2 — 128 16/7 фирмы «Faull Naber»). Выходной вал мотор-редуктора связан зубчатой передачей с установленным в неподвижном корпусе механизма АРНД ходовым винтом, чем обеспечивается преобразование вращательного движения вала мотор-редуктора (в любом из двух возможных направлений) в возвратно-поступательное движение ходового винта, вызывающее соответствующее линейное перемещение ползуна по двум неподвижным цилиндрическим направляющим. В свою очередь, ползун через металлический кронштейн и изолятор (выполненный из электроизоляционного материала) жестко соединен с корпусом горелки сварочной, чем обеспечивается возможность пе-

ремещения этой горелки по оси, совпадающей с осью установленного в горелке неплавящегося электрода в одном из двух возможных направлений. Выбор этого направления при отработке перед заданного цикла сварки происходит автоматически и зависит от знака сигнала ошибки, определяемого рассогласованием текущего и заданного (программируемого) значений напряжения дуги [4, 9]. Для предотвращения повреждения редуктора механизма АРНД при нахождении его ползуна в одном из крайних положений ходовой винт этого механизма оснащен защитной муфтой. Подробное описание работы контроллера, управляющего функционированием устройства АРНД головок сварочных АДЦ 625.03.00.000 и АДЦ 626.03.00.000, приведено в работе [8].

Автоматы АДЦ 627 УЗ.1, АДЦ 625 УЗ.1, АДЦ 626 УЗ.1 для GTAW неповоротных стыков металлических трубопроводов, содержащие выше описанные приводы, не только успешно выдержали комплексные технологические и эксплуатационные испытания в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины и НИЦ СКАЭ, но и прошли опытно-промышленную проверку в ОП «Атомэнергомаш», ОП «КБ «Атомприлад» ГП «НАЭК «Энергоатом», а также в ООО «ТИСЭР», причем опытные образцы автоматов АДЦ 627 УЗ.1 с головками сварочными АДЦ 627. 03. 00. 000 и АДЦ 627. 03. 00. 000-01 находятся в эксплуатации с 2010 г. и по сей день. Результаты опытно-промышленной проверки положительны. В настоящее время в НИЦ СКАЭ завершаются комплексные технологические и эксплуатационные испытания автоматов АДЦ 628 УХЛ4, АДЦ 629 УХЛ4 и АДЦ 630 УХЛ4 для GTAW неповоротных стыков металлических трубопроводов с колебаниями неплавящегося электрода и механизированной подачей присадочной проволоки.

Таблица 2. Некоторые основные параметры и характеристики головок сварочных автоматов для GTAW с колебаниями неплавящегося электрода и подачи присадочной проволоки

Номер п/п	Наименование параметра, характеристики	Головка сварочная (марка или обозначение и разработчик/производитель)			
		АДЦ 628.03.00.000 (для сварки в среде аргона), Украина, НИЦ СКАЭ	АДЦ 629.03.00.000 (для сварки в среде аргона), Украина, НИЦ СКАЭ	АДЦ 630.03.00.000 (для сварки в среде аргона), Украина, НИЦ СКАЭ	ТАМ - 2 (для сварки в среде аргона), Россия, НИКИМТ
1	Минимальный диаметр свариваемой трубы, мм	76	114	159	76
2	Максимальный диаметр свариваемой трубы, мм	114	159	219	133
3	Максимальный сварочный ток, А	250			
4	Диапазон регулирования скорости сварки, м/ч	1,7...27,0	0,95...13,50		3,0...14,0
5	Диаметр неплавящегося (вольфрамового) электрода, мм	3,0...4,0			2,0...4,0
6	Диаметр присадочной проволоки, мм	1,2; 1,4; 1,6			1,2; 1,4; 1,6; 2,0
7	Радиус вращающихся частей, мм, не более	152,0	180,5	222	R*+130
8	Диапазон регулирования скорости подачи присадочной проволоки, м/ч	4...55			10...50
9	Максимальное радиальное перемещение горелки (неплавящегося электрода), мм	35,5		41,5	33,0
10	Максимальное перемещение горелки (неплавящегося электрода) поперек стыка, мм	± 12	± 17		± 12
11	Охлаждение	Жидкостное (водяное)			
12	Габаритные размеры:				
	длина, мм, не более	437	480	440	275
	ширина, мм, не более	303	350	440	340
	высота, мм, не более	402	475	589	450
13	Масса головки (без массы коммуникационных кабелей и шлангов), кг, не более	13,5	16,0	22,0	29,0

Окончание табл. 2.

Номер п/п	Наименование параметра, характеристики	Головка сварочная (марка или обозначение и разработчик/производитель)		
		ТАМ - 3 (для сварки в среде аргона), Россия, НИКИМТ	MU –IV 76/195 P со встроенным механизмом подачи присадочной проволоки (для сварки в среде аргона), Франция, POLYSOUDE	MU –IV 114/275 P со встроенным механизмом подачи присадочной проволоки (для сварки в среде аргона), Франция, POLYSOUDE
1	Минимальный диаметр свариваемой трубы, мм	133	76	114
2	Максимальный диаметр свариваемой трубы, мм	219	195	275
3	Максимальный сварочный ток, А	250		290
4	Диапазон регулирования скорости сварки, м/ч	3,0...14,00	0,5...20,0	
5	Диаметр неплавящегося (вольфрамового) электрода, мм	2,0...4,0	2,0...3,2	
6	Диаметр присадочной проволоки, мм	1,2; 1,4; 1,6; 2,0	0,8	
7	Радиус вращающихся частей, мм, не более	R*+155	205	250
8	Диапазон регулирования скорости подачи присадочной проволоки, м/ч	10...50	0,5...55	
9	Максимальное радиальное перемещение горелки (неплавящегося электрода), мм	33,0	20	
10	Максимальное перемещение горелки (неплавящегося электрода) поперек стыка, мм	± 12	± 15	
11	Охлаждение	Жидкостное (водяное)		
12	Габаритные размеры:			
	длина, мм, не более	90	500	616
	ширина, мм, не более	520	410	500
	высота, мм, не более	550	500	530
13	Масса головки (без массы коммуникационных кабелей и шлангов), кг, не более	35,0	32,0	35,0

Примечания. 1) R* — номинальный наружный радиус свариваемых трубопроводов, мм. 2) Горелки головок сварочных всех указанных в табл. 2 марок и разработчиков / производителей снабжены керамическими соплами и газовыми линзами для формирования ламинарного потока вытекающего из них защитного инертного газа или их смесей.

Механизмы вращения и зажима головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 для GTAW выполнены аналогично таким же механизмам головок сварочных АДЦ 627. 03. 00. 000, АДЦ 627. 03. 00. 000-01,

АДЦ 625. 03. 00. 000 и АДЦ 626. 03. 00. 000, при этом в механизмах вращения головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 используются те же фильтры-ограничители и принципы построения редукторов,

что и в головках сварочных АДЦ 627. 03. 00. 000, АДЦ 627. 03. 00. 000-01, АДЦ 625. 03. 00. 000 и АДЦ 626. 03. 00. 000, а механизмы зажима отличаются от последних только захватами. Общий вид конструкции типичного исполнения головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 приведен на рис. 6. В табл. 2 приведены некоторые основные сравнительные параметры и характеристики предлагаемых рынком головок сварочных автоматов для GTAW металлических трубопроводов с колебаниями неплавящегося электрода и подачей присадочной проволоки разработки и производства различных компаний [6, 10, 11].

Особенностью головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 является то, что помимо закрепленных в неподвижных корпусах этих головок и установленных на их планшайбах исполнительных механизмов (горелка, механизмы АРНД и поперечного перемещения горелки (неплавящегося электрода), узел канала подачи присадочной проволоки), на каждой планшайбе установлен и жестко закреплен датчик пространственного положения (акселерометр) электрода. Механизмы вращения головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 и их механизмы зажима обеспечивают реализацию тех же опций, что и аналогичные механизмы головок сварочных АДЦ 627.03.00.000, АДЦ 627.03.00.000-01, АДЦ 625.03.00.000 и АДЦ 626.03.00.000. В механизме вращения головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 в качестве основных компонентов привода использован реверсивный мотор-редуктор 3257G 024 CR 32/3 фирмы «Faull Haber» и энкодер 05.2420.1211.0128 фирмы «Kübler».

Конструктивная база горелки головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 — ее металлический корпус прямоугольной формы с двумя внутренними герметичными полостями, одна из которых предназначена для наполнения охлаждающей жидкостью (водой) с целью осуществления ее теплообмена с указанным корпусом, а вторая — для функционирования в качестве камеры защитного (инертного) газа, поступающего в горелку через соответствующий патрубок из магистрали газоснабжения автоматов для GTAW и вытекающего из нее через 10 отверстий диаметром 1,2 мм, что в сочетании с установленным во внутренней нижней части корпуса горелки газовым фильтром обеспечивает ламинарное вытекание защитного (инертного) газа в направлении зоны сварки через керамическое сопло горелки.

Механизм АРНД в головках сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 предназначен для обеспечения поддержания в процессе сварки предварительно заданной (запрограммированной) длины сварочной дуги и по построению аналогичен механизму АРНД головок сварочных АДЦ 625.03.00.000 и АДЦ 626.03.00.000. Особенность механизма АРНД

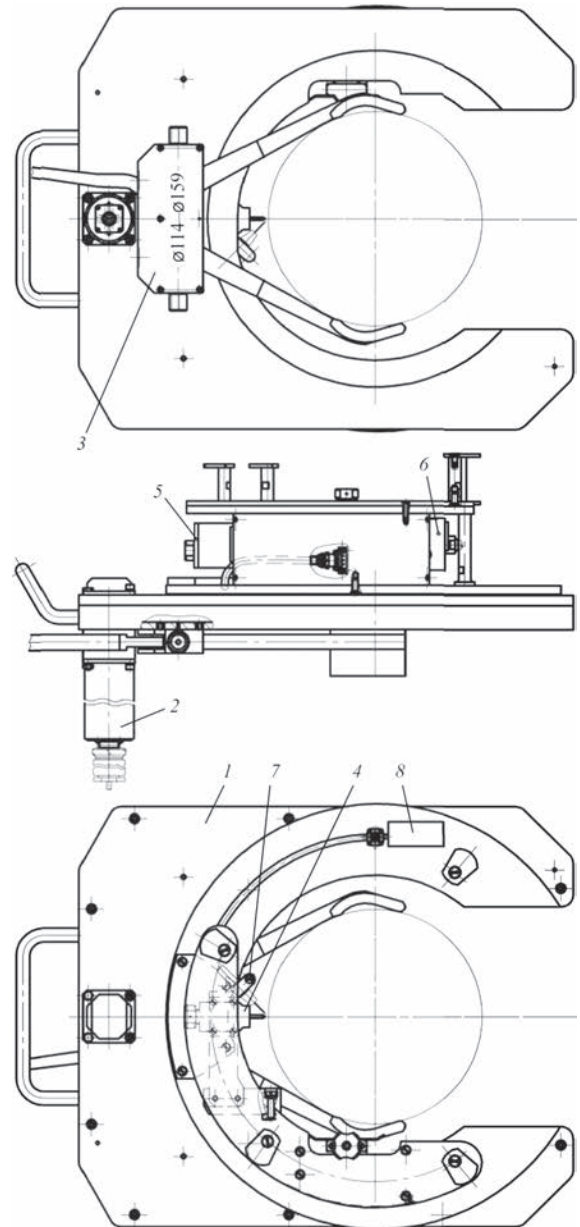


Рис. 6. Типичный общий вид головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000: 1 — корпус; 2 — механизм вращения (вращатель); 3 — механизм зажима (фиксации) головки сварочной на свариваемой трубе; 4 — горелка; 5 — механизм АРНД; 6 — механизм поперечного перемещения неплавящегося электрода (колебатель); 7 — лайнер; 8 — датчик пространственного (углового) положения неплавящегося электрода

в головках сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 заключается в том, что этот механизм жестко связан с механизмом

поперечного перемещения горелки (неплавящегося электрода), предназначенного для направления («нацеливания») неплавящегося электрода на свариваемый стык и обеспечения корректировки пространственного положения этого электрода поперек упомянутого стыка, а также для осуществления колебаний неплавящегося электрода поперек стыка в соответствии с запрограммированными значениями амплитуды и частоты колебаний с движениями электрода по прямой [4, 9]. В качестве привода в механизме АРНД головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 используется реверсивный мотор-редуктор 2224 U 024 SR 20/1 фирмы «Faull Haber», а в механизме поперечного перемещения неплавящегося электрода (механизме колебателя) — реверсивный мотор-редуктор 2642 W 024 CR фирмы «Faull Haber» со встроенным энкодером 05.24.20.1111.0128 фирмы «Kübler», что дает возможность не только регулировать амплитуду и частоту колебаний электрода и поддерживать в процессе сварки стабильными их запрограммированные значения, но и автоматически определять направление перемещения неплавящегося электрода.

Конструктивно механизмы АРНД и колебателя неплавящегося электрода в головках сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 объединены в один блок, при этом с целью оптимизации габаритных размеров этих головок механизм АРНД установлен перпендикулярно относительно плоскости планшайбы, а механизм колебателя — параллельно ей.

Узел канала подачи присадочной проволоки (узел лайнера) обеспечивает направление (подачу) присадочной проволоки в зону сварочной дуги (зону сварочной ванны), корректирование пространственного положения присадочной проволоки относительно неплавящегося электрода горелки, смену и фиксацию пространственного положения лайнера при изменении направления сварки (направления вращения планшайбы).

Наличие установленного на планшайбе каждой из головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 трехкоординатного датчика пространственного положения (акселерометрического типа) с электронным выходом предоставляет возможность автоматического определения углового положения неплавящегося электрода в плоскости (сечении) свариваемого стыка относительно вектора гравитации, что обеспечивает выполнение запрограммированного цикла сварки независимо от первоначального пространственного положения неплавящегося электрода, а также получение достоверной информации о его угловом положении для осуществления про-

граммы цикла сварки в соответствии с адекватными осями управления.

Механизм подачи присадочной проволоки головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 предназначен для обеспечения передвижения с запрограммированной скоростью присадочной проволоки в зону сварки и выполнен в виде отдельного внешнего блока, что позволяет использовать для присадочной проволоки стандартную катушку диаметром до 300 мм. В качестве привода этого механизма использован электродвигатель постоянного тока с номинальной мощностью 100 Вт и встроенным энкодером, вырабатывающим 500 импульсов за один полный оборот выходного вала электродвигателя. Основными узлами механизма подачи присадочной проволоки являются два редуктора и стандартный, изготавливаемый в Украине, четырехроликковый механизм прижима. Первый из редукторов — одноступенчатый цилиндрический — обеспечивает первоначальную редукцию с коэффициентом 1:3, а с помощью второго редуктора — червячного типа — осуществляется редукция с коэффициентом 1:100. Выходной вал второго редуктора соединен с четырехроликковым механизмом прижима, в котором обеспечивается прижим с подпружиниванием роликов подачи к присадочной проволоке и ее направление в канал подачи. Управление скоростью подачи осуществляется с помощью входящего в состав блока интерфейса системы управления (СУ) автоматов АДЦ 628 УХЛ4, АДЦ 629 УХЛ4 и АДЦ 630 УХЛ4 для GTAW контроллера привода подачи присадочной проволоки [8], формирующего напряжение на якоре электродвигателя и обеспечивающего регулирование и поддержание стабильного значения запрограммированной скорости подачи присадочной проволоки за счет обратной связи, осуществляемой путем обработки последовательности импульсов, поступающих в этот контроллер с информационного выхода встроенного в электродвигатель оптоэлектрического энкодера.

Система водяного охлаждения головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000 построена по принципу замкнутой системы жидкостного охлаждения и базируется на основе применения серийных отечественных автономных блоков водохлаждения, предназначенных для обеспечения охлаждения и циркуляции рабочей жидкости в полостях горелок с водяным охлаждением установок для TIG – сварки на сварочном токе до 500 А.

Управление работой механизмов и систем автоматов АДЦ 628 УХЛ4, АДЦ 629 УХЛ4 и АДЦ 630 УХЛ4, в том числе исполнительных механизмов головок сварочных АДЦ 628.03.00.000, АДЦ 629.03.00.000 и АДЦ 630.03.00.000, осу-

ществляется одной и той же СУ с помощью ее аппаратно-программных средств. Обязательным компонентом СУ является стандартный персональный компьютер. Программное обеспечение разработанных в НИЦ СКАЭ автоматов для GTAW выполнено на базе применения интегрированной среды Lab VIEW и персонального компьютера с операционными системами Windows XP-SP2 или Windows 7 или Windows 10.

Выводы

1. Разработка, изготовление, испытания и результаты опытно-промышленной эксплуатации опытных образцов автоматов АДЦ 627 УЗ.1, АДЦ 625 УЗ.1 и АДЦ 626 УЗ.1 для орбитальной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов или их смесей (преимущественно методами автопрессовки, последовательного проплавления и антипрессовки) и разработка, изготовление и испытания опытных образцов автоматов АДЦ 628 УХЛ4, АДЦ 629 УХЛ4 и АДЦ 630 УХЛ4 для орбитальной сварки с колебаниями неплавящегося электрода и подачей присадочной проволоки и дальнейшее освоение промышленного изготовления этих автоматов и их составных частей создают все необходимые предпосылки для оснащения монтажных организаций и ремонтных подразделений и предприятий отрасли энергетики и других отраслей экономики Украины отечественным современным оборудованием, обеспечивающим возможность реализации как отработанных, так и новых технологий автоматической сварки неповоротных стыков тонкостенных трубопроводов с номинальным наружным диаметром от 7 до 76 мм, а также трубопроводов с с номинальным наружным диаметром от 76 до 219 мм с толщиной стенки до 12 мм и разделкой кромок из сталей аустенитного, перлитного и мартенситного классов, высоколегированных сплавов, цветных металлов и сплавов (кроме алюминия и его сплавов).

2. Наличие в составе СУ разработанных автоматов АДЦ 628 УХЛ4, АДЦ 629 УХЛ4 и АДЦ 630 УХЛ4 персонального компьютера дает возможность осуществлять не только адаптивное управление процессами GTAW и оборудованием для ее реализации, но и документировать текущие значения параметров этих процессов и режимов сварки, проводить их ретроспективный анализ и сравнение с отработанными компьютерными моделями, получать исходную информацию для выполнения достоверного неразрушающего контроля, диагностики и прогнозных расчетов надежности сварных соединений неповоротных стыков трубопроводов.

3. Дальнейшее развитие отечественных технологий GTAW неповоротных стыков трубопроводов и оборудования для их реализации в на-

правлении повышения уровня автоматизации, приближенного к роботизации, возможно за счет модернизации некоторых исполнительных механизмов головок сварочных для GTAW, применения видеосенсоров, создания банка типовых режимов сварки, углубленного использования современных (например, сигнальных) микропроцессоров и энергонезависимой памяти.

4. Рассмотренные и описанные в настоящей работе механизмы автоматов для GTAW могут успешно применяться в сварочных автоматах и установках для выполнения неплавящимся электродом в среде инертных газов и их смесей прямо- и криволинейных швов.

Список литературы

1. Букаров В.А. (2002) Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах. *Сварка в атомной промышленности и энергетике. Труды НИКИМТ*. Москва, АТ, Т.1, сс. 149–210.
2. Гриненко В.И., Рощин В.В., Хаванов В.А., Полосков С.И. (2008) К вопросу об автоматизации сварки монтажных стыков трубопроводов атомных электростанций. *Технология машиностроения*, **8**, 48–51.
3. Полосков С.И., Букаров В.А., Ищенко Ю.С. (2000) Влияние отклонений параметров режима аргонодуговой сварки неповоротных стыков труб на качество сварных соединений. *Сварка и смежные технологии. Всероссийская научно-техническая конференция. Сб. докладов*. Москва, МЭИ (ТУ), сс. 22–25.
4. Смирнов В.В. (ред.) (1986) *Оборудование для дуговой сварки*. Справ. пособие. Ленинград, Энергоатомиздат.
5. Махлин Н.М., Коротинский А.Е., Богдановский В.А. и др. (2011) И.А Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций. *Автоматическая сварка*, **11**, 34–44.
6. Махлин Н.М., Коротинский О.С., Свириденко А.О. (2013) Апаратно-програмні комплекси для автоматичного зварювання неповоротних стиків трубопроводів атомних електростанцій. *Наука та інновації*, **9**, 6, 31–45.
7. Махлин Н.М., Попов В.Е., Федоренко Н.С. и др. (2013) Применение автоматической орбитальной сварки при изготовлении чехлов нейтронных измерительных каналов ядерных реакторов. *Автоматическая сварка*, **6**, 29–34.
8. Махлин Н.М., Буряк В.Ю. (2019) Приводы механизмов автоматов для орбитальной TIG сварки стыков металлических трубопроводов энергоблоков АЭС. *Там же*, **9**, 62–69.
9. Гладков Э.А. (2006) *Управление процессами и оборудованием при сварке*. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва, Академия.
10. Гриненко В.И., Хаванов В.А., Белоусов А.Н., Полосков С.И. (2002) Опыт НИКИМТ по созданию оборудования для орбитальной сварки труб в монтажных условиях. *Сварка в атомной промышленности и энергетике. Труды НИКИМТ*. Москва, АТ, Т.2, сс. 310–339.
11. (2019) <http://www.polysoude.com>

References

1. Bukarov, V.A. (2002) Technology of automatic shielded-arc welding. In: *Welding in nuclear industry and power engineering. Trudy NIKIMT*. Moscow, AT, Vol.1, 149-210 [in Russian].
2. Grinenko, V.I., Roshchin, V.V., Khavanov, V.A., Poloskov, S.I. (2008) To problem of automation of welding of field joints in nuclear plant piping. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **8**, 48-51 [in Russian].
3. Poloskov, S.I., Bukarov, V.A., Ishchenko, Yu.S. (2000) Effect of parameter deviations of argon-arc welding of pipe position butt joints on quality of welded joints. In: *Proc.*

- of All-Russian Sci.-Techn. Conf. on Welding and Related Technologies.* Moscow, MEI (TU), 22-25 [in Russian].
4. (1986) *Arc welding equipment: Refer. book.* Ed. by V.V.Smirnov. Leningrad, Energoatomizdat [in Russian].
 5. Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E., Bogdanovsky, V.A. et al. (2011) Single- and multioperator systems for automatic welding of position butt joints of nuclear plant piping. *The Paton Welding J.*, **11**, 28-36.
 6. Makhlin, N.M., Korotynsky, O.E., Svyrydenko, A.O. (2013) Hardware and software complexes for automatic welding of position butt joints of nuclear plant pipings. *Nauka ta Innovatsii*, **9(6)**, 31-45 [in Ukrainian].
 7. Makhlin, N.M., Popov, V.E., Fedorenko, N.S. et al. (2013) Application of automatic orbital welding in manufacture of housings of neutron measurement channels of nuclear reactors. *The Paton Welding J.*, **6**, 28-33.
 8. Makhlin, N.M., Buryak, V.Yu. (2019) Drives of mechanisms of automatic machines for orbital TIG welding of metal pipeline butt joints in NPP power units. *Ibid.*, **9**, 47-52.
 9. Gladkov, E.A. (2006) *Control of processes and equipment in welding: Manual for students of higher education inst.* Moscow, Akademiya [in Russian].
 10. Grinenko, V.I., Khavanov, V.A., Belousov, A.N., Poloskov, S.I. (2002) Experience of NIKIMT on creation of equipment for orbital welding of pipes in site. In: *Welding in nuclear industry and power engineering. Trudy NIKIMT.* Moscow, AT, Vol. 2, 310-339 [in Russian].
 11. (2019) <http://www.polysoude.com>

УДОСКОНАЛЕННЯ ГОЛОВОК ЗВАРЮВАЛЬНИХ АВТОМАТІВ ДЛЯ ОРБІТАЛЬНОГО ЗВАРЮВАННЯ TIG ТРУБОПРОВОДІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

Л.М. Лобанов¹, Н.М. Махлін², В.Є. Водолазський², В.Є. Попов², Д.С. Оліяненко²

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «НДЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України».

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: electro@paton.kiev.ua

До точності і надійності виконавчих механізмів сучасних автоматів для орбітального зварювання (GTAW) неповоротних стиків трубопроводів енергоблоків АЕС пред'являється ряд специфічних вимог, зокрема, до найбільших діаметрів планшайб головок зварювальних таких автоматів, на яких розміщуються, як правило, всі або більшість цих механізмів. У даній роботі описані розроблені в НДЦ ЗКАЕ конструкції виконавчих механізмів сучасних автоматів для GTAW неповоротних стиків трубопроводів АЕС. Розроблено механізми затиску (фіксації) головок зварювальних на зварюваній трубі, механізм стабілізації довжини дуги, механізм обертання (обертача) планшайби навколо осі труб, що зварюються, механізм автоматичного регулювання напруги дуги, механізм коливань неплавкого електрода (поперек зварного шва) і механізм подачі присадного дроту. Наведено результати промислової експлуатації деяких розроблених в НДЦ ЗКАЕ автоматів для GTAW, в яких використані описані механізми. Мета цієї роботи — представлення результатів робіт, проведених в НДЦ ЗКАЕ в напрямку створення складових частин автоматів для GTAW неповоротних стиків тонкостінних трубопроводів із сталей аустенітного, перлітного класів, вуглецевих сталей та сплавів кольорових металів (крім алюмінію та його сплавів). Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: дугове автоматичне орбітальне зварювання, неплавкий електрод, інертні гази, головка зварювальна, планшайба, механізми виконавчі, обертач планшайби, коливач неплавкого електрода, присадний дріт

MECHANISMS OF HEADS OF AUTOMATIC WELDING MACHINES FOR ORBITAL WELDING OF PIPELINES OF NPP POWER UNITS

L.M. Lobanov¹, N.M. Makhlin², V.E. Vodolazsky², V.E. Popov², D.S. Oliyanenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²SE «Scientific and engineering centre of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: electro@paton.kyiv.ua

To the accuracy and reliability of actuating mechanisms of modern automatic machines for orbital (GTAW) welding of stationary butts of pipelines of NPP power units a number of specific requirements is specified. In particular, they concern the largest diameters of faceplates of welding heads of such automatic machines, in which, as a rule, all or the most of those mechanisms are located. This paper describes the designs of actuating mechanisms of modern automatic machines for GTAW of stationary butts of NPP pipelines, designed at the Scientific and engineering centre of welding and control in the field of nuclear energy. The mechanisms of clamping (fixation) of welding heads on the pipe being welded, the mechanism for stabilizing the arc length, the mechanism for rotation (rotator) of the faceplate around the axis of the pipes to be welded, the mechanism for automatic regulation of arc voltage, the mechanism for oscillation of non-consumable electrode (across the weld) and the mechanism of filler wire feed were developed. The results of industrial operation of some automatic machines for GTAW, designed at the Scientific and engineering centre of welding and control in the field of nuclear energy, are presented, in which the described mechanisms are used. The aim of this work is to present the results of works carried out at the Scientific and engineering centre of welding and control in the field of nuclear energy in the direction of creating components of automatic machines for GTAW of stationary butts of thin-walled pipelines of steels from austenitic, pearlite classes, carbon steels and alloys of non-ferrous metals (except aluminum and its alloys). 11 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: automatic orbital arc welding, non-consumable electrode, inert gases, welding head, faceplate, actuating mechanisms, faceplate rotator, non-consumable electrode oscillator, filler wire

Поступила в редакцію 05.08.2019

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРУЗИОННЫХ МОДИФИКАТОРОВ ОБМАЗОЧНЫХ МАСС НА РАЗНОТОЛЩИННОСТЬ ЭЛЕКТРОДНОГО ПОКРЫТИЯ*

А.Е. Марченко¹, М.Ф. Гнатенко², Н.В. Скорина¹

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ООО «ВЕЛМА», 02160, г. Киев, ул. Каунасская, 3

С применением метода осциллографирования сигналов, генерируемых электромагнитным датчиком, через канал которого следуют электроды на выходе из обмазочной головки пресса, изучено влияние экструзионных модификаторов обмазочной массы на разнотолщинность покрытия при изготовлении опытных электродов УОНИ 13/55 диаметром 4 мм. Феномен понижения разнотолщинности покрытия под влиянием модификаторов (КМЦ, альгинатов, целлюлозы или кальцинированной соды) объясняется тем, что вместе с изменением вида и повышением содержания модификатора постепенно увеличивается доза вводимого в обмазку жидкого стекла. Вследствие гидратирования частиц модифицирующих добавок за счет поглощения влаги жидкого стекла, оно загущается, его междузеренные прослойки в обмазочной массе утолщаются, гамакеровское взаимодействие зерен наполнителя ослабляется. Понижается вероятность возникновения и накопления упругих напряжений в ходе экструзионного нанесения обмазки на стержни. Соответственно возрастает способность потока обмазки обволакивать стержни при опрессовке электродов равномерным концентричным слоем. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 11.

Ключевые слова: производство покрытых электродов, обмазочная масса, разнотолщинность покрытия, экструзионные модификаторы, жидкое стекло, вязкость обмазки, качество электродов

Чтобы поддерживать стационарное напорное течение обмазочных масс в процессе их экструзионного нанесения на стержни и обеспечения равномерного концентричного слоя покрытия, используются технологические добавки природного происхождения или синтезированные химическим путем. К ним относятся силикаты (каолин, бентонит, слюда-мусковит), химикаты (сода, поташ) или порошки органических гидроколлоидов (целлюлоза, КМЦ, альгинаты). Пластифицирующее действие перечисленных модификаторов объясняют их загущающим влиянием на жидкостекольное связующее в составе обмазки или подавлением химической реакции между жидким стеклом и мрамором обмазки. Известно, что в составе силикатов имеется структурная влага, а основа щелочных гидроколлоидов состоит из углеводов. Важно, чтобы их использование не привело к ухудшению металлургических и других технологических показателей качества изготовленных электродов.

Номенклатура модификаторов достаточно обширна, а механизм их предполагаемого действия стал проясняться лишь в конце 1980-х гг. В настоящей работе анализируются его физико-химические особенности и обосновываются рациональные пути реализации.

Объекты и методика исследования. Исследованы порошки органических гидроколлоидов в виде Na-КМЦ марки 85CO Наманганского химзавода и Na-альгината марки Manutex RK/F фирмы Alginat Industries Ltd (Великобритания), целлюлозы ЭЦ, а также кальцинированной соды. Каждый из них тестировался индивидуально, изменялось лишь его содержание в обмазке. Для сравнения исследовали обмазку, указанные добавки не содержащую. Использована методика исследования, детально изложенная в работе [1].

Характеристики зернового состава шихты: проход сквозь сетку 0063 – 34,0 %, удельная поверхность 3700 см²/г, плотность упаковки зерен 0,790.

Во всех опытах использовано жидкое NaK стекло с модулем 3,05; $\rho = 1435 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ и $\eta = 910 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, а в опыте с альгинатом – с $\eta = 500 \text{ мПа}\cdot\text{с}$. Обмазку готовили в однокатковом бегунковом смесителе.

Условия приготовления обмазочных масс приведены в таблице. Принятые в ней обозначения:

- $t_{\text{см}}, P_{\text{опр}}$ – продолжительность приготовления обмазки и давление, развиваемое в головке пресса при опрессовке электродов;

- $e_p, e_{\text{св}}, R_c, S_p$ – индивидуальные, выборочные средние, размахи и среднеквадратичные отклонения значений разнотолщинности покрытия,

*По материалам доклада, представленного на семинаре «Сварочные материалы: состояние и перспективы», 18–20 июня 2019 г., г. Гомель.

вычисленные по координатным составляющим вектора разнотолщинности покрытия x_i и y_i (КС ВРП), зарегистрированных на осциллограммах;

$N = 100$ – количество замеров e_i в генеральной совокупности, накопленной в течение 60 с. Скорость ленты осциллографа $10 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$, скорость опрессовки электродов 420 шт. в минуту (на 3 электрода приходилось 2 измерения x_i и y_i).

Для вычисления значений $e_{\text{св}}$, R_c и S_p использовали методику скользящих средних, применяемую в исследованиях временных рядов, прогнозируя, к примеру, погоду, курс валют, рыночные цены и пр. С этой целью, как и в работе [1], генеральную совокупность данных условно разбивали на 20 последовательных выборок, каждая из пяти

следующих друг за другом значений e_i . Выборочные значения $e_{\text{св}}$, R_c , S_p , устраняя шумы, лучше отражают тренды, чем e_i .

Результаты исследований.

Разнотолщинность покрытия из обмазки, не содержащей модификаторов. Как и ожидалось, у обмазки без экструзионных модификаторов, обозначенной индексом 1188, выявлены неблагоприятные технологические свойства. Опрессовать из нее электроды стало возможным лишь после того, как зазор между наконечником стержнепровода и калибрующей втулкой, т.е. объем прессовой камеры, увеличили вдвое по сравнению с ее штатным размером. Обмазка все же обволакивает при этом стержни неравномерным слоем, а процесс опрессовки по су-

Условия и результаты экспериментов

Номер опыта	Стекло, обмазка			Выборочные показатели разнотолщинности покрытия, мм					Доля брака, %
	Доза, %	$t_{\text{см}}$, мин	$P_{\text{опр}}$, МПа	Номер зарядки	N , шт	$e_{\text{св}}$	R_c	S_p	
0 % КМЦ марки 85СО в шихте									
1188	23,0	10,5	55,0 ¹	1.1	100	0,18	0,055	0,025	57,0
				1.2	100	0,23	0,050	0,015	61,0
				1.3	100	0,15	0,060	0,025	35,0
				2	90	0,16	0,060	0,030	26,0
0,5 % КМЦ марки 85СО в шихте									
1205	24,4	7,0	52,0	1	100	0,07	0,060	0,025	0
				2	100	0,08	0,040	0,015	0
				3	100	0,09	0,035	0,015	0
1,0 % КМЦ марки 85СО в шихте									
1306	27,0	5,0	52,0	1	100	0,11	0,035	0,025	2,0 ²
				2	80	0,14	0,025	0,010	0
				3	90	0,12	0,025	0,010	0
1,5 % КМЦ марки 85СО в шихте									
1407	30,1	3,5	52,0	1	120	0,06	0,025	0,015	0
1,0 % альгината в шихте									
8848	28,7	7,0	53,0	1	100	0,03	0,035	-	0
				2	100	0,04	0,040	-	0
				3	80	0,02	0,025	-	0
2,0 % целлюлозы в шихте									
2313	28,8	8,0	44,0	1	65	0,04	0,030	0,015	0
				2	50	0,06	0,030	0,017	0
				3	90	0,04	0,043	0,056	0
2,5 % целлюлозы в шихте									
1814	28,8	8,0	48,0	1	70	0,01	0,009	0,004	0
				2	55	0,01	0,018	0,009	0
				3	45	0,02	0,023	0,017	0
1,2 % соды в шихте									
2408	31,6	4,0	40,0	1	100	0,04	0,040	0,015	0
				4	100	0,07	0,015	0,010	0
2,4 % соды в шихте									
2409	37,5	5,0	40,0	1	60	0,01	0,015	0,005	0
				5	60	0,03	0,023	0,010	0

Примечания. ¹ Давление опрессовки при штатном зазоре превышает 80 МПа; ² в осциллограмму попал стартовый участок опрессовки.

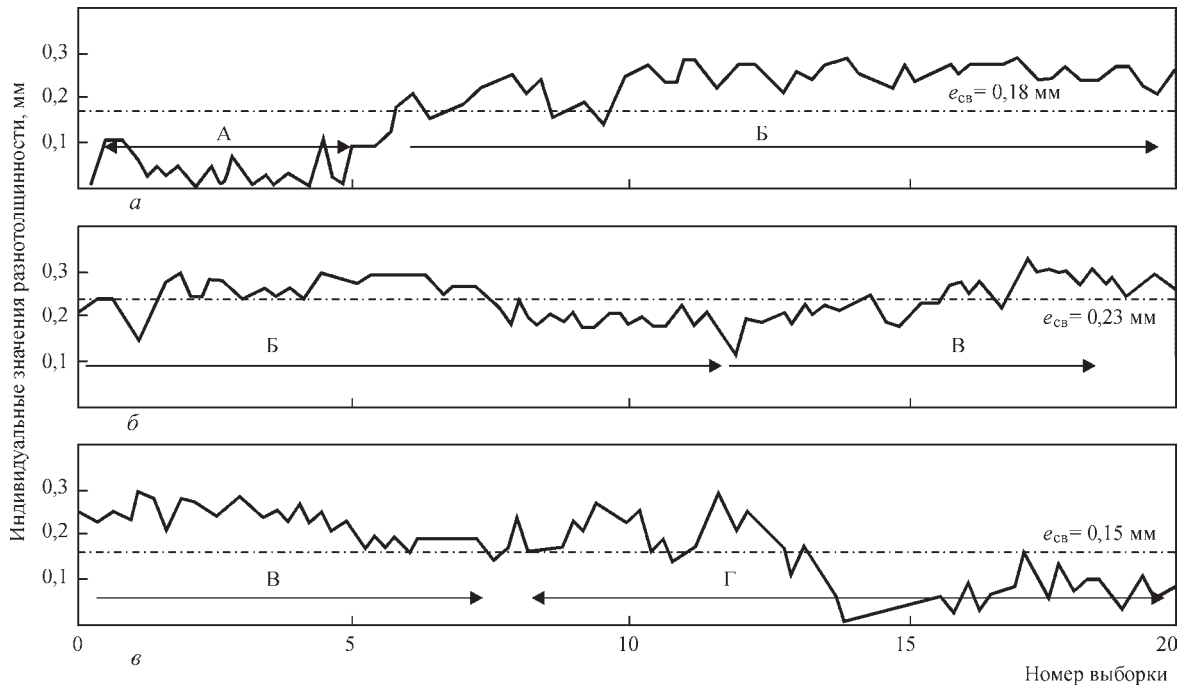


Рис. 1. Эволюция e_i у электродов, опрессованных из обмазки 1188 (зарядка 1); а-в – обозначения начального (в таблице обозначен индексом 1.1), среднего (1.2) и конечного (1.3) участков осциллограмм ВРП

ществу не поддается настройке. Значения КС ВРП в этом опыте регистрировали непрерывно в течение 240 с. Из приведенных в таблице данных следует, что изготовленные электроды имели недопустимо высокие и весьма нестабильные показатели разнотолщинности покрытия. Доля брака, т.е. количество электродов со сверхнормативным значением разнотолщинности покрытия превышает 60 %.

По форме осциллограмм можно судить о том, что экструзионное нанесение покрытия на стержни из обмазки 1188 – процесс стохастический и многофакторный. В ходе опрессовки случайным образом изменяются и горизонтальная, и вертикальная координатные составляющие ВРП. В данном опыте амплитуда и продолжительность отклонений x_i от нулевых значений больше, чем у y_i .

Судя по ориентации стохастических отклонений x_i от x_0 от нулевых линий, они вероятнее всего, вызваны действием на пруток напора столба обмазки, нагнетаемой из цилиндра в обмазочную головку пресса. На них явно накладываются проскальзывания обмазки по поверхности поворотной плиты.

В профиле вертикальной составляющей ВРП преобладает мотив периодических кратковременных и малоамплитудных отклонений. Они могут быть вызваны пульсирующим прохождением обмазки сквозь вертикально расположенные окна рассекателя перед прессовой камерой.

На рис. 1 показана эволюция вычисленных индивидуальных значений разнотолщинности покрытия электродов, опрессованных из обмазки 1188. Стрелками выделены стартовый участок осциллограммы А, участки сверхнормативных значе-

ний разнотолщинности Б и В, а также переходный участок Г, в пределах которого изменяется направление эволюции значений разнотолщинности. Отчетливо видны волнообразные элементы эволюции разнотолщинности с большим (А), меньшим (Б) периодом и примерно одинаковой амплитудой.

В пределах каждого периода видна стохастическая пульсация с частотой, на порядки большей, чем у волн с периодом А и Б.

На рис. 2 приведен вид траектории перемещения проекции электродного сердечника на плоскость, перпендикулярную оси электрода. Индексами 2Н и 2К обозначены начальная и конечная ветви фазограммы, а индексами С и Ф – начало и конец каждой ветви. Между ними раскручивается ломаная по виду спираль, со сменой правого закручивания (сплошная линия) на противоположное (пунктир), и одновременной пульсацией ее продольных и поперечных размерных параметров. Начальная ветвь, обозначенная индексом 2Н, на протяжении примерно 30 с пульсирует вдоль направления перемещения электрода, оставаясь, в основном, в пределах 0,20 мм, а финишная точка перемещения ВРП почти совпала со стартовой. Конечная ветвь спирали, обозначенная индексом 2К, напротив, отражает малоамплитудные пульсации вершины ВРП, которая в течение такого же промежутка времени, постепенно смещаясь в радиальном направлении, выходит, в конце концов, за пределы окружности допустимых значений разнотолщинности с диаметром 0,20 мм.

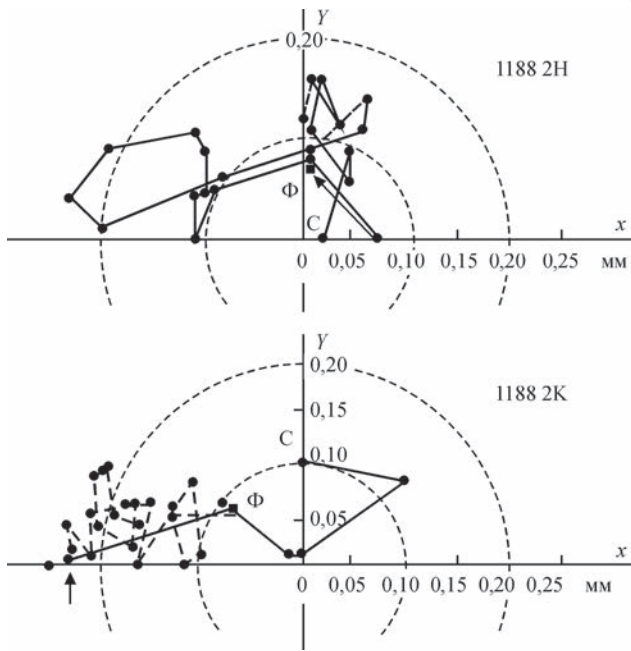


Рис. 2. Вид фазовых траекторий ВРП, полученных при опрессовке электродов из зарядки 2 обмазки 1188 (обозначения см. в тексте)

По характеру кривых, приведенных на рис 1 и 2, можно утверждать, что в ходе опрессовки, которую они отражают, невозможно отрегулировать процесс с применением средств, которыми располагает оператор.

Влияние модификаторов на разнотолщинность покрытия. С введением в обмазку органических гидроколлоидов в виде КМЦ (от 0,5 до 1,5 %) и альгината (1%) опрессовка из нее электродов возможна при штатном зазоре в головке пресса, а средние выборочные значения и показатели рассеяния разнотолщинности покрытия уменьшаются (см. таблицу).

Обмазки с КМЦ. Начиная с 0,5 % КМЦ, профиль осциллограмм эволюции КС ВРП, а также кривые изменения e_i в ходе опрессовки сглаживаются тем в большей мере, чем больше доля КМЦ в обмазке (рис. 3).

При этом в эволюции $e_{св}$, R_c и S_p усиливаются крупномасштабные тренды, свидетельствующие о повышении, однородности электродов по показателю e_i , а случаев сверхнормативной разнотолщинности нет вообще.

Естественно, гистограммы распределения e_i и траектории фазограмм ВРП существенно уплотняются, хотя последние и сохраняют спиралевидную форму, не выходящую за пределы круга с диаметром 0,15 мм.

Обмазки с альгинатом. Судя по приведенным в таблице абсолютным значениям $e_{св}$, технологические свойства обмазки с альгинатом лучше, чем обмазки с таким же содержанием КМЦ. Это можно объяснить меньшей вязкостью использованного жидкого стекла и большим его содержанием, чем в обмазке с индексом 1188, выбранной в качестве аналога. По показателям рассеяния значений e_i электроды из обмазок с одинаковым содержанием альгината и КМЦ идентичны друг другу.

Обмазки с содой. С точки зрения способности подавлять разнотолщинность покрытия кальцинированная сода – более эффективный экстраузид

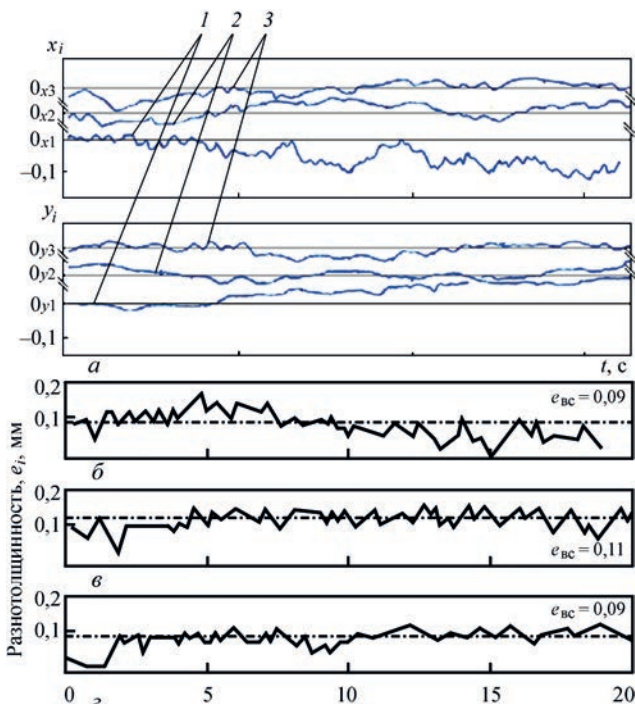


Рис. 3. Выкопировки из осциллограмм КС ВРП (x_i и y_i) (а) и эволюция e_i в ходе опрессовки электродов из обмазок 1205 (б), 1306 (в) и 1407 (г), содержащих 0,5 (1), 1,0 (2) и 1,5% (3) КМЦ, соответственно

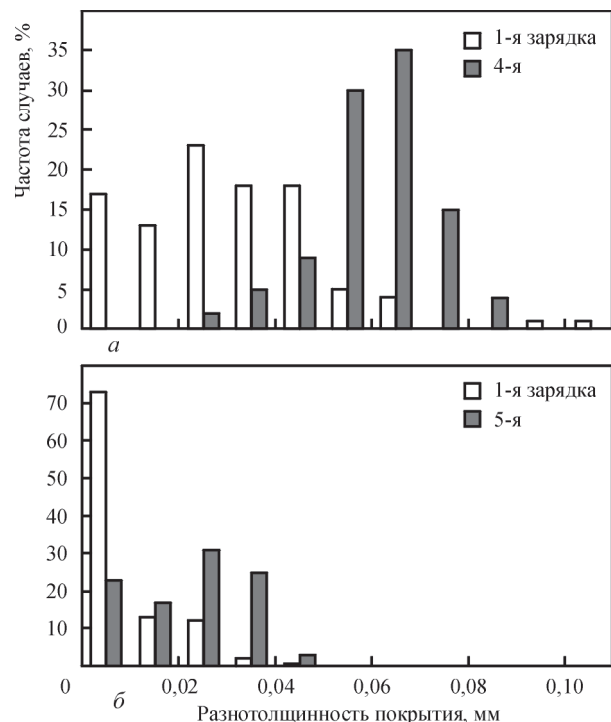


Рис. 4. Плотность распределения e_i у электродов, изготовленных из обмазок 2008 (2 % соды, а) и 2009 (2,4 % соды, б)

онный модификатор, чем КМЦ. В подтверждение достаточно сослаться на рис. 4, из которого следует, что у электродов, изготовленных из этих обмазок, разнотолщинность покрытия не превышает 0,10 мм. В течение часовой выдержки обмазок значение $e_{св}$ несколько возросло. Следовательно, набухание содовых частиц продолжилось. Рассеяние e_i при этом понизилось и ни один из результатов не превысил значения 0,10 мм.

Обмазки с целлюлозой. Данные, полученные при испытании обмазок с 2,0 и 2,5 % целлюлозы, приведены на рис. 5. У электродов из обмазки, обозначенной индексом 2313 (2 % целлюлозы), область рассеяния значений e_i не выходит за пределы 0,10 мм, а опрессованных из обмазки 1814 – за пределы 0,05 мм. Выдержка обмазки 2313 изменяет профиль рассеяния e_i , которое, тем не менее, не выходит за 0,10 мм. Выдержка обмазки 1814 изменяет и профиль, и ширину области рассеяния e_i , однако даже в самом неблагоприятном случае она не выходит за пределы 0,05 мм.

Обсуждение результатов. Форма осциллограмм КС ВРП, характер изменения индивидуальных значений разнотолщинности покрытия, а также вид траекторий ВРП показывают, что изменение разнотолщинности покрытия в ходе экструзионного его нанесения на стержни – процесс стохастический и многофакторный.

Ломаная форма кривых $e_i = f(t)$ и хаотичное перемещение проекций траекторий ВРП на плоскость, перпендикулярную движению электрода, несут в себе признаки фрактальности, свойственной турбулентному течению жидкостей и броуновскому движению взвешенных частиц, соответственно. Беспорядочно изменяющиеся отклонения от нулевой позиции горизонтальной, вертикальной, а, в случае низкой технологичности обмазки, обеих КС ВРП можно считать следствием не только турбулентного течения обмазки, но и сложным силовым взаимодействием упругого (стержень) и вязкоупругого (обволакивающая обмазка) элементов ее потока в прессовой камере. Упругость – причина, а вязкость – средство демпфирования процесса ее релаксации. Модуль упругости стержня постоянен. Результаты наших исследований позволяют заключить, что соотношение модуля упругости и вязкости уменьшаются, а вероятность появления эластической турбулентности обмазки как источника разнотолщинности покрытия в состоянии напорного потока возрастает по мере ужесточения консистенции и усложнения конфигурации потока обмазки, вызванного изменением его направления, степени, а также скорости редуцирования.

Исследованные экструзионные модификаторы обмазок относятся к гидрофильным материалам. Диспергированные в жидком стекле частицы

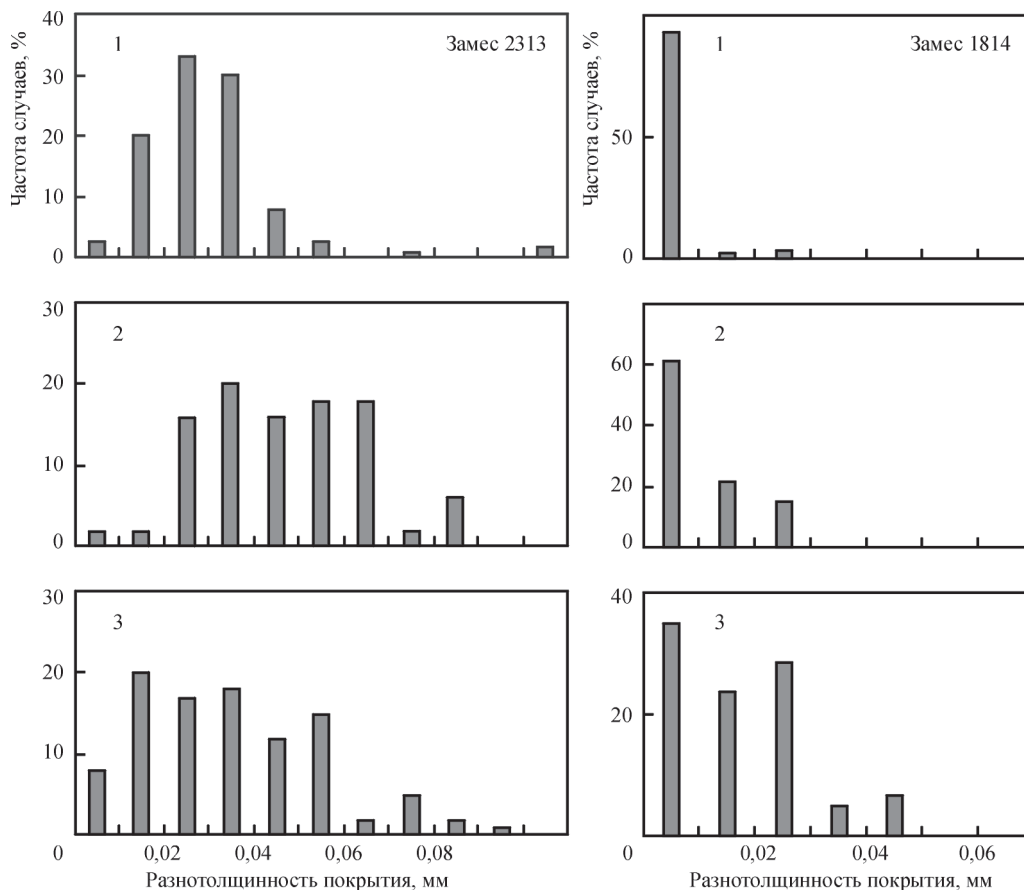


Рис. 5. Плотность распределения e_i у электродов, изготовленных из обмазок 2313 (2 % ЭЦ) и 1814 (2,5 % ЭЦ). 1–3 – номер зарядки

КМЦ, сорбируя из него влагу, набухают и увлажняются, по нашим данным, до 115...125 %, альгинатов – чуть в меньшей, а целлюлозы, по-видимому, в наименьшей степени. Содовые частицы, гидратируясь, могут по аналогичным расчетам сорбировать до 200 % H_2O из жидкого стекла.

В результате обезвоживания жидкого стекла в междузерненном пространстве, вязкость его и соответственно сопротивляемость обмазки экструдированию P_3 , а также ее пластическая прочность P_m , должны повыситься. Это согласуется с данными, приведенными на рис. 6.

Из таблицы следует, что вместе с изменением вида и повышением содержания модификатора увеличивается доза вводимого в обмазку жидкого стекла: с 23,0 % (обмазка без пластификатора, обозначена индексом 1188) до 37,5 % (обмазка с 2,4 % соды, индекс 2409). Именно таким образом компенсируется загущение обмазки под действием модификатора. При этом понижается степень наполнения объема зернами шихты, утолщается межзерненная пленка связующего, ослабляется взаимодействие зерен наполнителя, что, в конечном счете, должно облегчить активационное зарождение вакансий, необходимых для сдвигового перемещения зерен наполнителя экструдированной обмазки.

Соответственно, понижается вероятность накопления упругих напряжений в потоке обмазки в ходе нанесения ее на стержень. Нет необходимости их релаксации, например, путем спонтанного перехода напорного потока обмазки с симметричного на эксцентричное кольцевое се-

чение, более благоприятное с энергетической точки зрения [2].

Важно, чтобы ослабление консистенции обмазки, вызванное увеличением содержания в ней жидкого стекла, как и сами модификаторы не стали причиной появления других дефектов покрытия и швов.

Производственный опыт показывает, что вероятность возникновения разнотолщинности покрытия, обусловленной неблагоприятными экструзионными характеристиками обмазки, как правило, понижается, в то время как его склонность к механическим повреждениям, обусловленная ее слабой консистенцией, повышается. Об этом, в частности, свидетельствуют приведенные на рис. 7 систематизированные и обобщенные нами годовые результаты приемо-сдаточных испытаний электродной продукции, выполненных службой Госприемки одного из предприятий, изготавливающих электроды.

Изменением состава, характеристик и дозы жидкого стекла, с одной стороны, а также видом и концентрацией модификатора, с другой, можно отрегулировать консистенцию обмазки и добиться благоприятных соотношений ее экструзионных показателей (P_3 как меры энергоемкости процесса экструзионного нанесения покрытия на стержни) и пластической прочности (P_m как меры стойкости сырого покрытия против механических повреждений). Из данных, приведенных на рис. 8, следует, что высокомодульные жидкие стекла, особенно с низкой вязкостью, позволяют получить больший диапазон значений P_m обмазки при одних и тех же вариациях P_3 (заштрихованная зона), чем низко модульные стекла. Это подтверждают и приведенные в таблице результаты опыта с опрессовкой электродов из обмазки с альгинатом.

Модифицирующая эффективность рассматриваемых добавок существенно зависит не только от

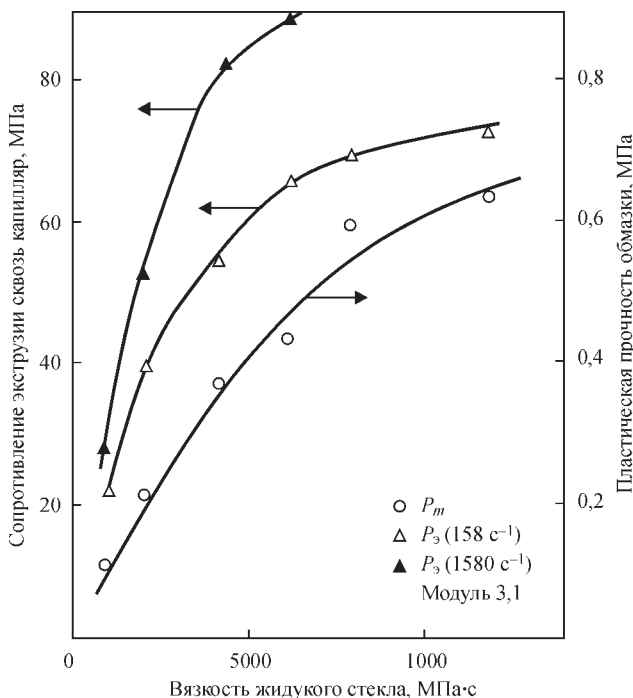


Рис. 6. Изменение P_m и P_3 обмазочной массы для электродов УОНИ 13/55, вызванное повышением вязкости NaK жидкого стекла (25 мас. %)

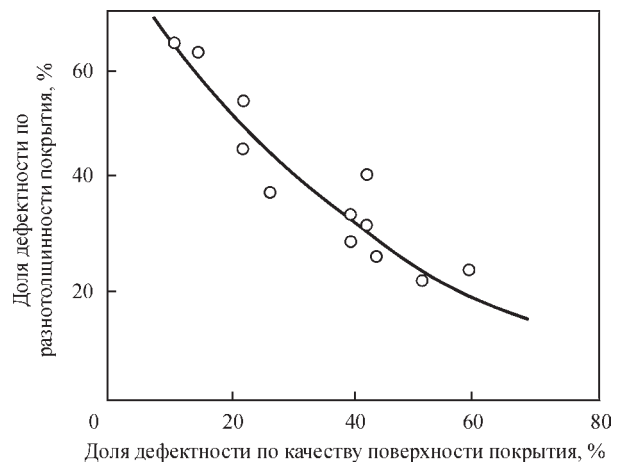


Рис. 7. Взаимосвязь доли электродов, забракованных по разности толщин и качеству поверхности покрытия (суммарная доля брака 3,5 %)

загущающей способности, но и от их влияния на характер физико-химического взаимодействия поверхности зерен наполнителя с жидким стеклом. Полимерные анионы асимметричных молекул КМЦ и альгинатов, диспергированных в междузеренной пленке связующего, а также изомофных карбонатных анионов, образовавшихся в результате диссоциации в нем молекул соды, избирательно сорбируются твердой поверхностью частиц наполнителя обмазки. Подобно другим поверхностно-активным веществам они блокируют доступ к ней жидкостекольных кремнекислородных анионов. Этим предотвращается непрогнозируемое загущение обмазки, вызываемое возрастанием сольватационного барьера, а, следовательно, гидродинамического размера зерен, а также ионно-обменным переходом в нее Са из мраморных частиц в междузеренную жидкостекольную пленку.

Противостояние щелочного силиката и Na-КМЦ в стремлении сорбироваться на поверхности зерен кальцита подтверждается ИК-спектроскопическими и реологическими исследованиями. Результаты ИК-спектроскопических исследований рассмотрены нами в работе [3, 4]. Реологические результаты представлены на рис. 9 в виде экструзионных кривых, зарегистрированных пластометром ОБ-1435 при исследовании образцов УОНИ 13/55, содержащих от 0 до 2 % низковязкой (68/350) и высоковязкой (68/920) Na-КМЦ. Используются капилляры диаметром 4 мм, длиной 40 мм при среднем градиенте скорости сдвига 158 с^{-1} .

Видно, что у образцов без КМЦ и с 0,5 % КМЦ характер истечения весьма нестабилен – давле-

ние пульсирует и нарастает по мере выработки обмазки, вследствие ее дилатантности и отжатия жидкой фазы. При столь низких концентрациях сопоставляемые составы КМЦ не способны блокировать процессы сорбции ККА и переход ионов кальция в жидкое стекло. Это согласуется с приведенными в таблице результатами определения разнотолщинности покрытия.

Течение обмазки, содержащей 1 % высоковязкой КМЦ, стабилизируется и остается стабильным при концентрациях, превышающих 1 %. Низковязкая ее модификация способна обеспечить стабильную экструзию лишь при содержании 1,5 % и выше.

В настоящее время используется несколько производственных вариантов модифицирования экструзионных свойств образцов: индивидуально (КМЦ, альгинат, сода или целлюлоза), КМЦ в комбинации с содой, а также КМЦ в сочетании с целлюлозой.

Чтобы повысить их технологическую эффективность, для приготовления обмазочных масс рекомендуются интенсивные смесители протivotочного типа. В смеситель вместе со стеклом вводят до 2 % воды, слегка «припудривая» обмазку порошком гидроколлоида перед выгрузкой из смесителя.

Вид, содержание и соотношение долей экструзионных модификаторов обмазки в сочетаниях с видом, модулем, вязкостью и дозой жидкого стекла, оптимальные с точки зрения минимизации раз-

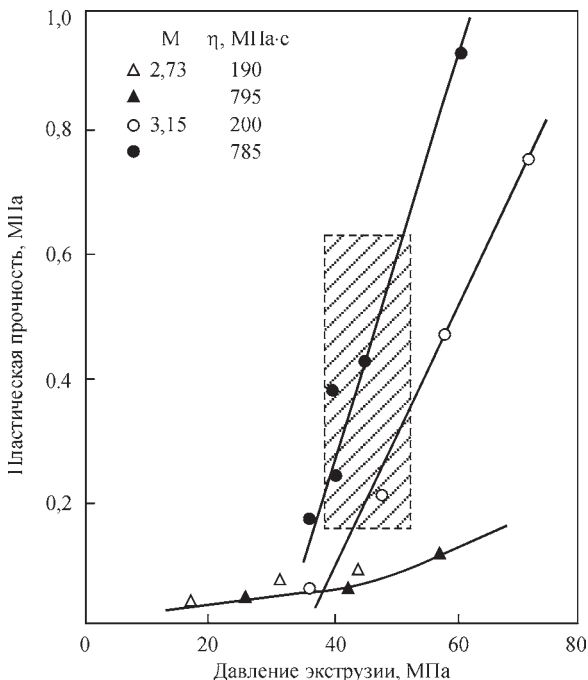


Рис. 8. Влияние модуля и вязкости КNa жидкого стекла на пластическую прочность обмазки для электродов АНО-27

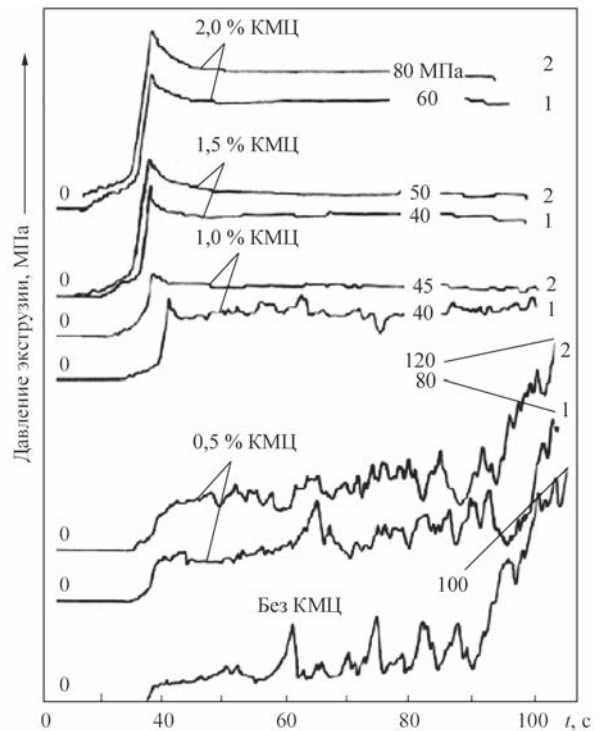


Рис. 9. Кривые экструзии обмазочной массы УОНИ 13/55 с различным содержанием низковязкой (1) и высоковязкой (2) КМЦ (NaK-жидкое стекло с модулем 2,9 и вязкостью 175 мПа·с, 22,5 мас. %)

нотолщинности покрытия, выбираются с учетом особенностей применяемой термообработки и требований к потребительским свойствам электродов.

Так, например, следует учитывать, что в начале сушки электродов сода повышает склонность обмазки к тепловому размягчению, которое способствует образованию поверхностных дефектов покрытия [5]. Это подтверждается отображенным на рис. 10 влиянием температуры на P_m обмазочных масс АНО-4 и УОНИ 13/55. Именно у обмазки, содержащей соду, выявлено самое интенсивное понижение P_m при нагреве, обусловленное высвобождением (начиная с $T = 40^\circ\text{C}$) влаги, поглощенной содой в процессе смешивания шихты с жидким стеклом. У обмазок, содержащих органические гидроколлоиды, темп теплового размягчения, напротив, понижается, особенно когда используются их грубодисперсные модификации [4].

Для предотвращения образования вмятин и исключения прилипания покрытий, содержащих соду в качестве экструзионного модификатора, на рабочие поверхности металлических рамок, используемых для транспорта электродов в сушильных печах проходного типа, вынуждены наклеивать войлочные ленты толщиной 3...5 мм [6].

Сода, к тому же, гигроскопична и понижает гигросорбционную стойкость покрытия (рис. 11). Этот недостаток тривиальными технологическими приемами не устраняется.

В отличие от соды, органические гидроколлоиды в составе покрытия полностью деструктурируют при штатном режиме прокаливания низководородных электродов. Гигроскопичность покрытия, обусловленная образовавшимися при этом порами и их зольными остатками, даже в самом неблагоприятном случае намного меньше, чем вызванная содой (см. рис 11). Следует, тем не менее, учитывать, что гигроскопичность может повыситься, если будет

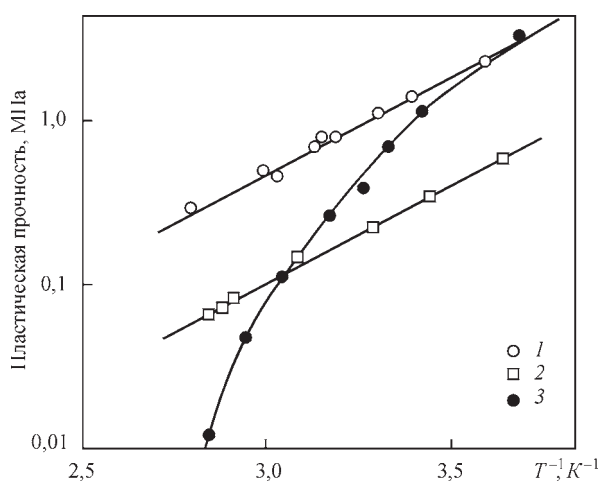


Рис. 10. Влияние температуры на размягчение обмазочных масс АНО-4 (1) и УОНИ 13/55 без соды (2) и с добавкой 1,5 % соды (3)

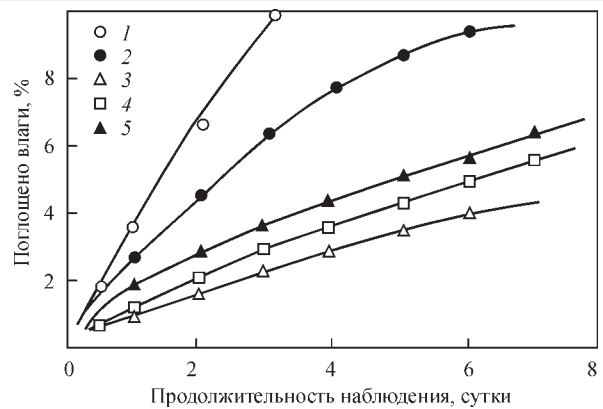


Рис. 11. Сравнение гигроскопичности покрытия электродов УОНИ 13/55, изготовленных из обмазки, содержащей 2,4 (1), 1,6 (2) соды, 1,5 (3), 1,0 (4) и 0 (5) % NaKMЦ

слишком превышена доза стекла, необходимая для компенсации загущения обмазки модификатором.

Заключение

Анализ результатов проведенных исследований позволяет заключить, что порошки КМЦ, альгинатов, целлюлозы и кальцинированной соды действительно модифицируют обмазочную массу низководородных электродов. Диспергированные в междузеренной прослойке жидкого стекла, гидрофильные частицы модификаторов сорбируют из него влагу, в результате чего вязкость обмазки возрастает. Повышение дозы жидкого стекла является средством, «разжижающим» обмазку вследствие увеличения незанятого наполнителем объема и концентрации вакансий в нем, образующихся в ходе течения.

Конкурируя с кремнекислородными анионами жидкого стекла (ККА), гидратированные молекулы органических модификаторов или одноименные карбонатные ионы соды вытесняют ККА из междуфазного слоя на поверхности зерен мрамора и других ингредиентов наполнителя. Благоприятно трансформированная при этом природа междуфазного слоя, блокирование перехода ионов кальция в жидкостекольную пленку, уменьшение гидродинамического размера частиц и заряда ДЭС на поверхности зерен наполнителя, ослабляет консистенцию обмазки вследствие добавления в нее жидкого стекла. Гидратированные частицы модификаторов сами по себе могут рассматриваться как дополнительные вакансии для зерен наполнителя потока обмазки.

Сочетая определенные виды и концентрации модификаторов, с одной стороны, с нужными характеристиками и дозой жидкого стекла в обмазке, с другой стороны, можно улучшить ее консистенцию до уровня, необходимого для реологического обеспечения требуемого качества

електродов по різнотолщинності, не ухудшая их качество по другим видам дефектов покриття.

Список литературы

1. Марченко А.Е. (2017) Экспериментальные исследования разнотолщинности покрытия электродов при опрессовке. *Автоматическая сварка*, **1**, 1–9.
2. Бернхардт Э. (1965) *Переработка термопластичных материалов*. Москва, Химия.
3. Лавренов Л.В., Марченко А.Е., Шкурко С.А. (1975) Особенности адсорбции щелочных силикатов из жидкого стекла мрамором и флюоритом в электродных покрытиях. *Автоматическая сварка*, **3**, 34–38.
4. Марченко А.Е., Скорина Н.В. (2013) Влияние технологических факторов изготовления низководородных электродов на содержание водорода в наплавленном металле. *Там же*, **8**, 14–25.
5. Марченко А.Е., Гнатенко М.Ф., Горшкова С.Д. (1984) *Методика оценки теплового размягчения электродных обмазочных масс*. Информ. материалы. СЭВ. Координационный центр по проблеме «Развитие науч. основ...», **1**, сс. 66–69.
6. Шелепов Е.П. (2000) *Печь модели Г-232 для термообработки сварочных электродов*. Сборник материалов научно-технического семинара «Электродное производ-

ство на пороге нового тысячелетия». Санкт-Петербург, 22–26 мая 2000, г. Череповец, сс. 170–175.

References

1. Marchenko, A.E. (2017) Experimental studies of electrode coating thickness variation at pressing. *The Paton Welding J.*, **1**, 20-27.
2. Bernhardt, E. (1965) *Recycling of thermoplastic materials*. Moscow, Khimiya [in Russian].
3. Lavrenov, L.V., Marchenko, A.E., Shkurko, S.A (1975) Peculiarities of adsorption of alkaline silicates from liquid glass by marble and fluorite in electrode coatings. *Automatich. Svarka*, **3**, 34-38 [in Russian].
4. Marchenko, A.E., Skorina, N.V. (2013) Influence of technological factors in manufacture of low-hydrogen electrodes on hydrogen content in the deposited metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 13-24.
5. Marchenko, A.E., Gnatenko, M.F., Gorshkova, S.D. (1984) *Method of evaluation of thermal softening of electrode paste*. In: *Inform. documents, CMEA*, **1**, 66-69 [in Russian].
6. Shelepov, E.P. (2000) *Furnace of G-232 model for heat treatment of welding electrodes*. In: *Proc. of Sci.-Techn. Seminar on Electrode Manufacture on the Threshold of New Millennium* (St.-Petersburg, 22-26 May, 2000). Cherepovets, 170-175 [in Russian].

ВПЛИВ ЕКСТРУЗІЙНИХ МОДИФІКАТОРІВ ОБМАЗУВАЛЬНИХ МАС НА РІЗНОТОВЩИННІСТЬ ЕЛЕКТРОДНОГО ПОКРИТТЯ

А.Ю. Марченко¹, М.Ф. Гнатенко², М.В. Скорина¹

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ООО «ВЕЛМА». 02160, м. Київ, вул. Каунаська, 3

Із застосуванням методу осцилографування сигналів, що генеруються електромагнітним датчиком, через канал якого слідує електроди на виході з обмазувальної головки преса, вивчено вплив екструзійних модифікаторів обмазувальної маси на різнотовщинність покриття при виготовленні дослідних електродів УОНИ 13/55 діаметром 4 мм. Феномен зниження різнотовщинності покриття під впливом модифікаторів (КМЦ, альгінатів, целюлози або кальцинованої соди) пояснюється тим, що разом зі зміною виду та підвищенням вмісту модифікатора поступово збільшується доза, що вводиться в обмазки рідкого скла. Внаслідок гідратування частинок модифікуючих добавок, за рахунок поглинання вологи рідкого скла, воно загущується, його міжзеренні прошарки в обмазувальній масі стовщуються, гамакерівська взаємодія зерен наповнювача послаблюється. Знижується ймовірність виникнення та накопичення пружних напружень в ході екструзійного нанесення обмазки на стрижні. Відповідно зростає здатність потоку обмазки обволікати стрижні при оприсуванні електродів рівномірним концентричним шаром. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: виробництво покритих електродів, обмазочна маса, різнотолщинність покриття, екструзійні модифікатори, рідке скло, в'язкість обмазки, якість електродів

EFFECT OF EXTRUSION MODIFIERS OF COATING MASS ON VARIATION OF ELECTRODE COATING THICKNESS

A.Yu. Marchenko¹, M.F. Gnatenko², M.V. Skorina¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²WELMA Co. Ltd., 3 Kaunasskaya Str., 02160, Kyiv

The method of oscillographing the signals generated by electromagnetic sensor, through the channel of which the electrodes pass at the outlet of the press coating head, was used to study the effect of extrusion modifiers of the coating mass on thickness variation in manufacture of test electrodes UONI 13/55 of 4 mm diameter. The phenomenon of reduction of coating thickness variations under the effect of modifiers (CMC, alginates, cellulose or soda ash) is explained by that the dose of liquid glass added to the coating gradually increases with the change of the type and increase of the content of modifier. Hydrating of modifying additive particles as a result of absorption of liquid glass moisture leads to thickening of the glass, and of its intergranular layers in the coating mass, and to weakening of Hamaker interaction of filler grains. Probability of generation and accumulation of elastic stresses during extrusion application of the coating on the rods becomes lower. The ability of the coating flow to cover the rods in a uniform concentric layer at pressing of the electrodes becomes higher, accordingly. 6 Ref., 1 Tabl., 11 Fig.

Keywords: coated electrode production, coating mass, coating thickness variation, extrusion modifiers, liquid glass, coating viscosity, electrode quality

Поступила в редакцію
17.09.2019

ДОСВІД РЕМОНТУ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОБЛОКА ТЕС

А.В. Грузевич¹, Д.Л. Нікіфоров²

¹Трипільська ТЕС. 08720, м. Українка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

²ПАТ «Центрэнерго». 03022, м. Київ, вул. Козацька 120/4. E-mail: d.l.nikiforov.jsc.ce@gmail.com

Представлена технологія ремонтного зварювання та відновлення працездатності валу регулятора граничного числа обертів автомату безпеки турбоживильного насосу енергоблоку № 1 Трипільської ТЕС. Проаналізовано умови роботи валу регулятора автомату безпеки та причини його пошкодження. Проведена оптимізація параметрів режиму зварювання та термічної обробки валу регулятора зі сталі 40Х. Досліджені мікроструктура та механічні властивості зразків-свідків, а також визначені оптимальні технологічні умови отримання якісного, ремонтного зварного з'єднання. Отримані результати підтверджені успішною експлуатацією турбоагрегату протягом 2743 год. Бібліогр. 7, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: відновлювальний ремонт енергоустаткування, TIG зварювання, зварні з'єднання, термообробка, мікроструктура, механічні властивості

На енергоблоках ТЕС потужністю 300 МВт для подачі живильної води з деаератора через підігрівачі високого тиску в котел ТПП-210А використовується живильний насос ПН-1135–340 з турбоприводом ОР-12ПМ [1]. Привідна турбіна живильного насосу споживає пар III відбору ($P = 1,56$ МПа, $T = 440$ °С).

Одним із основних елементів автомату безпеки, що встановлюється на турбоживильному насосі (ТЖН) та служить для його захисту від надмірного підвищення частоти обертання ротору, є регулятор критичного числа обертів (рис. 1).

Призначення, умови роботи валу та причини пошкодження. Регулятор критичного числа обертів кільцевого типу розташований на роторі привідної турбіни і налаштований на число обертів 5700 об./хв.

За період експлуатації автомату безпеки ТЖН спостерігались випадки як часткового пошкодження валу-регулятора, так і повне його руйнування. Так, в період планового ремонту енергоблоку 2016 р., після напрацювання регулятором 75000 год., було виявлено пошкодження валу регулятора в місці галтельного переходу у вигляді не-

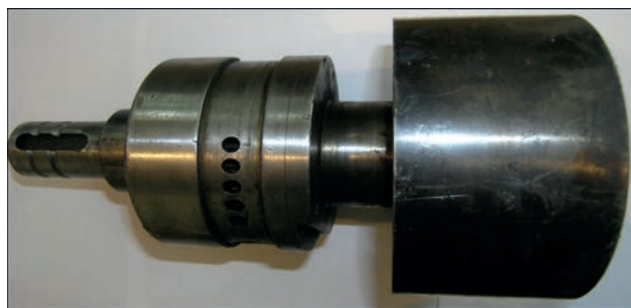


Рис. 1. Загальний вид регулятора критичного числа обертів автомату безпеки ТЖН турбіни К-300-240

© А.В. Грузевич, Д.Л. Нікіфоров, 2019

наскрізної кільцевої тріщини. Місце пошкодження зображено на рис. 2.

Тріщина була усунена шляхом проточування шийки валу на глибину 3,1 мм. Після вибірки тріщини додатково було усунуто шар металу на глибину 0,5 мм для гарантованої ліквідації невиявлених мікротріщин. Повноту видалення тріщини контролювали шляхом візуального огляду та проведення кольорової дефектоскопії.

Аналіз умов роботи валу регулятора (інтенсивні знакозмінні навантаження в місті концентрації напружень) та фрактографічні дослідження зламу

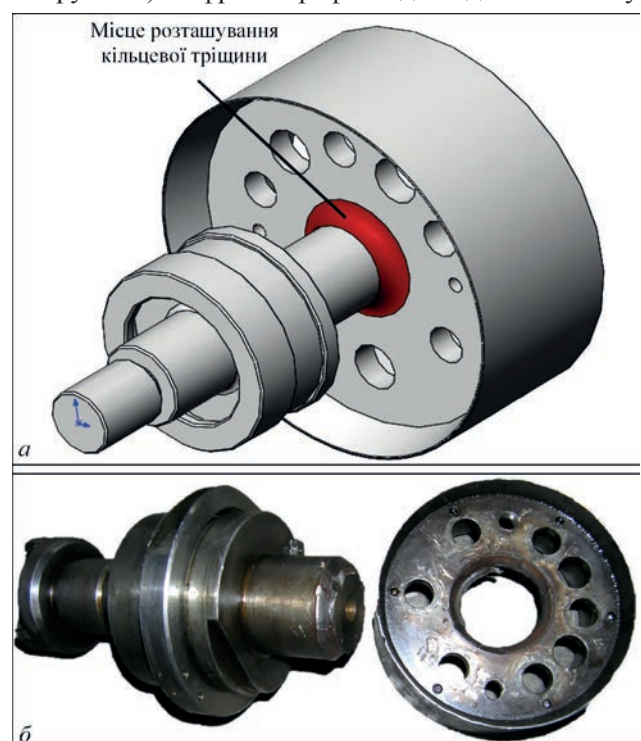


Рис. 2. Місце втомного пошкодження на валу регулятора (а) та випадок повного руйнування валу внаслідок циклічних навантажень (б)

аналогічного валу, який був замінений новим, вказують на транскристалітний вид руйнування та втомний характер пошкодження.

Після врахування всіх факторів (відсутність досвіду ремонту методами зварювання подібних деталей, прецизійність геометричних розмірів валу та значні вимоги до їх відхилень, стислі часові рамки ремонтної кампанії та відсутність необхідних запасних частин) прийнято рішення про виконання ремонтних робіт в цехових умовах підприємства.

Метою роботи є розробка та випробування технології ремонту зварюванням валу-регулятора ТЖН в місці втомного пошкодження в цехових умовах із застосуванням електродного матеріалу аустенітного класу, виконанням термічного відпуску виробу та використанням спеціалізованого технологічного оснащення.

Методика досліджень. Вал регулятора виготовлений з конструкційної, легованої сталі 40X за ГОСТ 8479–70. Введення хрому сприяє зменшенню критичної швидкості загартування, а отже, поліпшенню прокалюваності. В табл. 1, 2 представлені хімічний склад та механічні властивості сталі 40X, відповідно.

Враховуючи обмежену зварюваність сталі 40X [2–4], необхідність попереднього підігріву та фінішної термообробки деталі, методика відпрацювання технології зварювання та вибору режимних параметрів виконувалась на зразках–свідках.

Проведені дослідження були реалізовані за допомогою наступного устаткування:

- спектральний аналіз проводився оптико-емісійним спектрометром PMI–MASTER Pro;
- механічні випробування виконувались на розривній машині УММ-10;
- твердість за Брінеллем та Роквелом визначалась на УЗК твердомірі ТКМ-459;

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 40X відповідно до ГОСТ 4543-71 та визначений за допомогою PMI Master Pro хімічний склад сталі 40X і наплавленого металу Св-04X19Н11М3

Матеріал	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
40X (ГОСТ 4543-71)	0,36...0,44	0,17...0,37	0,5...0,8	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8...1,1	до 0,3
40X (PMI Master Pro)	0,451	0,277	0,977	0,0824	-	-	1,09	0,0962
Наплавлений метал Св-04X19Н11М3	0,216	0,288	1,19	5,41	-	-	8,10	0,201

Таблиця 2. Механічні властивості сталі 40X при T = 20 °C

Сортамент	Розмір, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU, кДж / м ²	Термообробка
Поковка ГОСТ 8479-70	150	655	490	13	40	540	Гартування 860 °C, масло; відпуск 550 °C, вода,
Твердість 40X після відпуску							НВ 218...248

Таблиця 3. Параметри режимів зварювання зразків–свідків зі сталі 40X

Номер зразка	Спосіб зварювання	Матеріал присадний	Діаметр електрода, мм	I, А	U _{хх} , В	Температура термообробки, °C	Початкова та кінцева твердість НВ		
							Основний метал	Зварний шов	ЗТВ
1	TIG	Св-04X-19Н11М3	2	80	не більше 95	300	183...192	270...275	290...295

– мікроструктура оцінювалась на мікроскопі Метам РВ-21–2 при збільшенні $\times 100...500$.

Спосіб зварювання та режимні параметри представлені в табл. 3. В якості джерела живлення для зварювання використовувався ВД-306Д.

TIG зварювання виконувалось в нижньому положенні, в два шари. Після зварювання зразки подавали загальному нагріванню в електропечі до температури 300 °C. Наступним етапом зразки охолоджували разом з піччю протягом двох годин і контролювали. Огляд зовнішньої поверхні зварних з'єднань після шліфування з подальшим травленням кислотою показав відсутність дефектів.

В результаті проведених макродосліджень виявлено щільна будова наплавленого металу зварного шва і біляшовної зони. Мікроструктура зони наплавленого металу Св-04X19Н11М3 – аустеніт із дрібнодисперсними карбідними частинками (рис. 3).

Результати механічних випробувань межі міцності σ_B та відносного звуження Ψ зразків зі зварним з'єднанням відповідають вимогам до основного металу та складають $\sigma_B = 806,7$ МПа, $\Psi = 40\%$. Руйнування зразків мало в'язкий характер та відбувалось по зоні термічного впливу.

Зварні зразки пройшли випробування на твердість. Виміри проводились в трьох повздовжніх площинах з початком відліку від центральної осі зварного з'єднання з кроком 1,5...2,0 мм.

Результати випробувань показали, що зварювання сталі 40X за вказаною технологією змінює структуру і твердість основного металу в зоні термічного впливу (рис. 4). Схема розкриття кромки на галтельному переході вала та оснастка, яка використовувалась під час ремонтного зварювання, представлені на рис. 5. Після виконання ремонтного зварювання із усіма етапами термічної об-

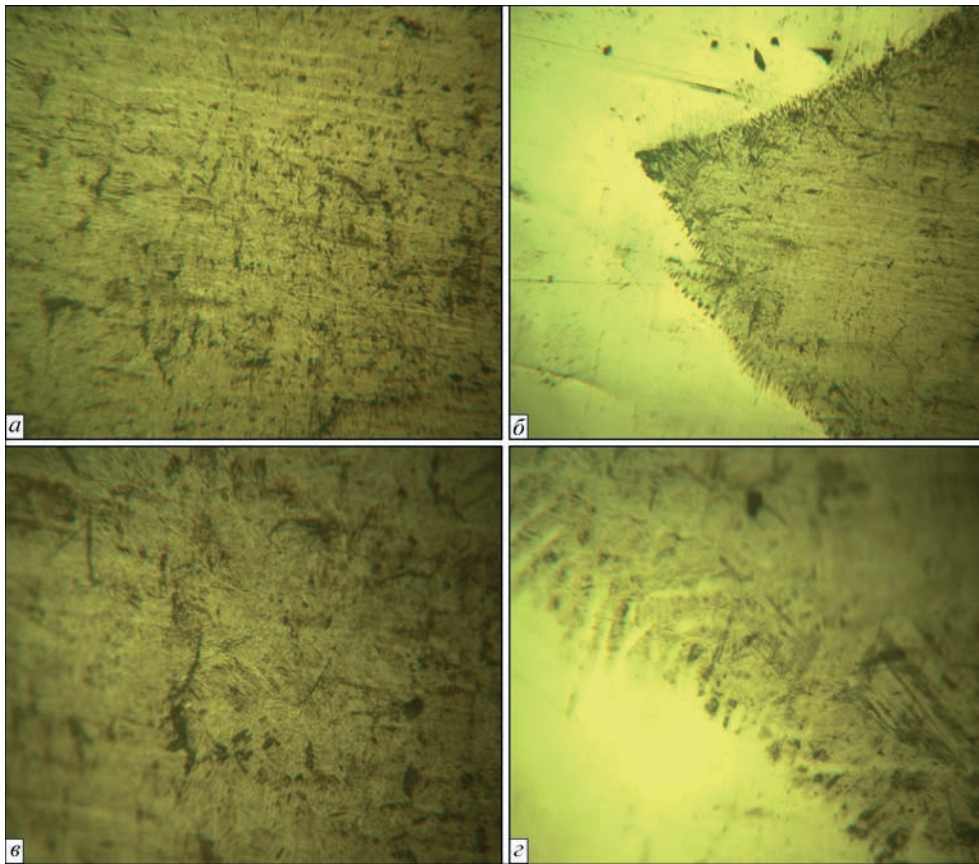


Рис. 3. Мікροструктура участків зварного з'єднання сталі 40X: а – Св-04X19Н11М3, ЗТВ, ×100, TIG; б – зварний шов, ×100, TIG; в – Св-04X19Н11М3, ЗТВ, ×500, TIG; г – зварний шов, ×500, TIG

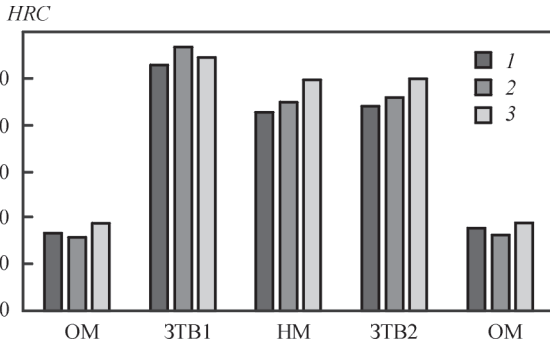


Рис. 4. Графіки розподілу твердості за Роквелом в зварних зразках, виконаних Св-04X19Н11М3: 1 – площа 1; 2 – 2; 3 – 3 робки успішно проведено вібродіагностичні випробування вала.

Аналіз результатів. Результати після експлуатаційного інспектування вказують на можливість

використання аустенітного присадного матеріалу для ремонту вала регулятора із одночасним проведенням попереднього підігріву (200...300 °С) та термічного відпочинку (250 °С). Таким чином, застосування технологічних прийомів (спеціального оснащення для закріплення вала) в сукупності із відпрацьованою технологією зварювання дозволило забезпечити успішну експлуатацію вала регулятора ТЖН ПН-1135–340 з турбоприводом ОР-12ПМ в міжремонтний період енергоблоку потужністю 300 МВт.

Слід зазначити, що досвід ремонту енергетичного обладнання (особливо великогабаритного) із застосуванням різнорідних (аустеніт + перліт) матеріалів існує досить давно [5, 6]. Головними перевагами даного підходу є можливість, за

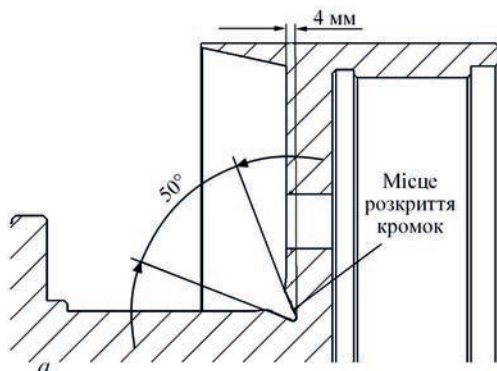


Рис. 5. Схема розкриття кромки галтельного переходу вала регулятора (а) та оснащення для реалізації технології зварювання вала (б)

рахунок запасу пластичності наплавленого металу, уникнути необхідності проведення фінішної термообробки, що на ТЕС, в деяких випадках, є технологічно неможливо. Для зменшення водневої крихкості та зниження рівня дифузії рухомого водню в металі шва валу, після зварювання, використаний термічний відпуск, при якому в зварних з'єднаннях зменшується вміст водню [7] та дещо знижується рівень залишкових зварювальних напружень.

До недоліків слід віднести недовготривалість та низьку надійність даного виду ремонту через фактори, зазначені вище.

Висновок

Вибір аустенітного класу наплавленого металу, не дивлячись на очевидні недоліки, такі, як хімічна і структурна неоднорідність, дозволив мінімізувати режим кінцевої термічної обробки та зменшити ризик деформування деталі і, як результат, відхилень високопрецизійної геометрії валу, після зварювальних операцій, від вимог креслень, що підтверджено вібродіагностичними випробуваннями.

Список літератури

1. Косяк Ю.Ф. (1982) *Паровая турбина К-300-240 ХТГЗ*. Москва, Энергоиздат.
2. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. (2014) Устойчивость аустенита при разных температурах и механические свойства горячекатаной стали 40Х. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, **10**, 27-32;
3. Пчелінцев В.О., Говорун Т.П., Раб В.М., Берладір Х.В. (2012) Термоциклічна обробка вала зі сталі 40Х відцентрового насоса типу НКВ. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*, **4**, 123-132

4. Васин П.А., Винокуров В.А. (2013) Нанесение защитных и упрочняющих покрытий на сталь 40Х методом электроискрового легирования. *Современные техника и технологии. Материалы XIX Международной научно-практической конференции*. Томск, сс. 26 – 27.
5. (1988) РД 108.021.112-88 *Исправление дефектов в литых корпусных деталях паровых турбин и арматуры методом заварки без термической обработки*. НПО «ЦКТИ»
6. (1990) РД 34.17.205-90 Инструкция по приварке штуцеров к коллекторам из стали 12Х1МФ аустенитными электродами без термической обработки. ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского.
7. Касаткин С.Б., Мусяченко В. Ф., Смиян О. Д. (1974) Влияние подогрева на распределение водорода в сварном соединении высокопрочной стали. *Автоматическая сварка*, **5**, 72–73.

References

1. Kosyak, Yu.F. (1982) *Steam turbine K-300-240 KhTGZ*. Moscow, Energoizdat [in Russian].
2. Filippov, A.A., Pachurin, G.V., Kuzmin, N.A. (2014) Stability of austenite at different temperatures and mechanical properties of hot-rolled steel 40Kh. *Int. J. of Applied and Fundamental Research*, **10**, 27-32.
3. Pchelintsev, V.O., Govorun, T.P., Rab, V.M., Berladir, Kh.V. (2012) Thermocyclic treatment of 40Kh steel shaft of centrifugal pump of NKV type. *Visnyk Sum. Derzh. Un-tu. Seriya Tekhnichni Nauky*, **4**, 123-132 [in Ukrainian].
4. Vasin, P.A., Vinokurov, V.A. (2013) Deposition of protective and hardening coatings on 40Kh steel by electric-spark alloying. *In: Proc. of XIX Int. Sci.-Pract. Conf. on Modern Engineering and Technologies*. Tomsk, 26-27.
5. (1988) RD 108.021.112.88: *Repair of defects in cast housing parts of steam turbines and fittings using welding-up method without heat treatment*. St.-Petersburg, NPO CKTI [in Russian].
6. (1990) RD 34.17.205-90: *Instruction on welding of connecting branches to collectors from 12Kh1MF steel by austenitic electrodes without heat treatment*. Moscow, VTI [in Russian].
7. Kasatkin, S.B., Musiyachenko, V.F., Smiyani, O.D. (1974) Effect of preheating on hydrogen distribution in welded joint of high-strength steel. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 72-73 [in Russian].

EXPERIENCE OF REPAIR OF EQUIPMENT PARTS OF TPS POWER UNIT

A.V. Gruzevich¹, D.L. Nikiforov²

¹Trypillya TPS, 08720, Ukrajinka. E-mail: gruzevich@bigmir.net

²PSJC «Tsentrenergо», 120/4 Kozatska Str., 03022, Kyiv, Ukraine.

E-mai: d.i.nikiforov.jsc.ce@gmail.com

Technology of welding and recovery of performance of the shaft of regulator of limiting number of revolutions in overspeed governor of turbo feed pump in No.1 power unit of Trypillya TPS is presented. Operating conditions of overspeed governor regulator shaft and causes for its damage have been analyzed. Parameters of the mode of welding and heat treatment of the regulator shaft from steel 40Kh were optimized. Microstructure and mechanical properties of witness-samples were studied, and optimum technological conditions of producing a sound repair welded joint were determined. Obtained results were confirmed by successful operation of the turboset for 2743 h. 7 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

Keywords: reconditioning repair of power equipment, TIG welding, welded joints, heat treatment, microstructure, mechanical properties

Надійшла до редакції 09.10.2019



**СВАРКА
и РЕЗКА**

**20-я международная специализированная
выставка оборудования, приборов
и инструментов для сварки и резки**

7-10.04.2020

ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ

(Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України)



Костеневич О.С. (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України) захистила 11 грудня 2019 р. кандидатську дисертацію на тему «Математичне моделювання залишкових напружень в зоні антикорозійних наплавлень корпусу реактора ВВЕР-1000».

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми визначення залишкових напружень (ЗН) в зоні антикорозійних наплавлень корпусу реактора (КР) ВВЕР-1000 від дугового наплавлення та їх перерозподіл після термообробки з урахуванням мікроструктурних фазових перетворень та варіації технологічних параметрів.

На основі математичного моделювання визначено мікроструктурний склад та кінетику при фазових перетвореннях корпусної сталі 15X2НМФА при характерних термічних циклах наплавлення для різних ділянок КР – циліндричної, де застосовувалось автоматичне наплавлення під флюсом стрічковими електродами, та зони патрубків, яка наплавлялась ручним дуговим наплавленням покритими електродами. Результати розрахунків показали, що в зоні термічного впливу (ЗТВ) основного матеріалу КР при напавленні утворюється бейнітно-мартенситна структура.

Було проведено валідацію результатів розрахунку мікроструктури з експериментальними даними дилатометричного аналізу розпаду аустеніту при охолодженні та металографії зразків сталі 15X2НМФА. Вперше, за результатами експериментальних досліджень побудовано термокінетичні діаграми розпаду аустеніту сталі 15X2НМФА для характерних зварювальних швидкостей охолодження, на основі яких експериментально підтверджено формування бейнітно-мартенситної структури в ЗТВ сталі 15X2НМФА при дуговому напавленні.

Вперше отримані результати математичного моделювання залишкових напружень з урахуванням мікроструктурних фазових перетворень та варіації режимів наплавлення і параметрів термообробки корпусу реактора ВВЕР-1000.



Кулініч М.В. (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України) захистила 11 грудня 2019 р. кандидатську дисертацію на тему «Теплофізичні процеси при паянні сплаву АМг6 з використанням реакційних багатошарових фольг».

У роботі, на прикладі пластин сплаву АМг6, показано принципову можливість з'єднання алюмінієвих сплавів шляхом локального нагрівання зони з'єднання теплом, що утворюється в реакційних багатошарових фольгах (БФ) при ініціюванні в них реакції самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС).

Досліджено умови приєднання накладних елементів до поверхні великого розміру для відновлення герметичності алюмінієвих конструкцій оболонкового типу та запропоновано схему такого процесу.

Для обґрунтування такої схеми проведено розрахунок теплових полів в такій системі при нестационарних умовах її нагрівання за рахунок джерела тепла, що знаходиться в тепловому контакті з пластиною-накладкою, з врахуванням товщини пластин, характеристик матеріалів, що з'єднуються, характеристик припою і наявності теплового опору в зонах контактів між елементами системи. Це дало можливість визначити параметри нагрівача, необхідні для забезпечення процесу паяння в залежності від товщини пластин, що з'єднуються, та адіабатичної температури реакції СВС в БФ. Встановлено, що для запобігання оплавлення пластини-накладки, що контактує з нагрівачем, у процесі паяння температура нагрівача не повинна перевищувати деяку граничну величину, яка визначається температуропровідністю сплаву. Запропоновано метод самоузгодженого розрахунку коефіцієнтів теплопередачі між елементами системи шляхом співставлення експериментальних та теоретично розрахованих термограм у процесі її нагрівання в нестационарних умовах.

МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2019

З 19 по 22 листопада в м. Києві на території МВЦ відбувся XVIII Міжнародний промисловий форум — захід, який з 2005 р. входить до переліку провідних світових промислових виставок, офіційно сертифікованих і визнаних Всесвітньою асоціацією виставкової індустрії (UFI), і рік за роком залишається найбільшою в Україні подією.

Виставка організована Міжнародним виставковим центром, який забезпечив прекрасні умови для багатьох компаній і організацій, що не перший рік вибирають Промисловий форум як майданчик для демонстрації своїх новітніх розробок і місце зустрічі з широким колом фахівців і потенційних партнерів. Тематика форуму охоплювала демонстрацію широкого спектру новітніх технологій металообробки, машинобудування, виробництва інструментів, зварювання й обробки поверхні, приводного обладнання та промислової автоматизації, вантажно-розвантажувального обладнання, техніки безпеки і пов'язаних з нею промислових технологій.

Всього у виставці взяли участь 383 компанії, підприємств та організацій. Вони представляли експонати з 31 країни. Чехія і Туреччина сформуливали свої національні експозиції. Загальна площа форуму перевищила 23000 м². Загальна кількість відвідувачів складала понад 12500.

Зупинимося дещо докладніше на розділі форуму «Укрзварювання». У ньому взяли участь понад 20 українських експонентів та одна компанія з Білорусі. Серед них:

- ТОВ «Бінцель Україна ГмБХ» — торговельно-виробничий центр в Україні всесвітньо відомого провідного виробника комплектуючих до зварювального обладнання (зварювальні пальники для ручного, автоматичного та роботизованого зварювання плавким та неплавким електродом, зварювальні трактори, робопериферія, електродотримачі, плазмотрони, установки Jackle для зварювання MIG/TIG/MMA (160...600 А) та плазмової різки (25...300 А) та інше;

- ТОВ «Фроніус Україна» — реалізує стандартне та інвентарне обладнання для різноманітних способів зварювання, а також надає повний спектр послуг щодо обслуговування, ремонту та оренди зварювального обладнання. Має власні філії в м. Стрий та м. Дніпро, а також партнерів зі збуту та сервісу в Запоріжжі, Києві, Одесі та Сумах;

- ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК» — ведуча компанія в Україні по розробці та виробництву порошкових дротів для зварювання, наплавлення, напилення



та порошкових стрічок для наплавлення; по виробництву легких металоконструкцій;

- ПРАТ «ВІСТЕК машинобудівний завод» — спеціалізується на випуску круглоланкових ланцюгів різного призначення, виробництві зварювальних електродів, зварювального дроту та дроту загального призначення, ковальсько-пресовому виробництві;

- ТОВ «ВІТАПОЛІС» — ведучий виробник в Україні дротів для зварювання вуглецевих, низьколегованих, високоміцних, нержавіючих, жаростійких, броньових сталей та сплавів на основі нікелю. Продукція ТМ «ХОРДА» сертифікована TÜV (Німеччина), CWB (Канада), Регістром судноплавства України та внесена до Державних будівельних норм (мостові конструкції);

- ООО «ДЗЗУ ІЕЗ ім. Є.О. Патона» виробляє великий асортимент професійного зварювального обладнання і є одним із лідерів ринку на території України та країн СНД. Впроваджуючи провідні технології та конструкторські розробки, завод виробляє зварювальне обладнання високої якості з оптимальними технічними характеристиками, що задовольняють потреби як великих промислових підприємств, так і приватних осіб;

- ТОВ «ЗОНТ» — розробка та виробництво машин для термічного різання, виробництво машин для плазмового різання, комплексів для лазерного різання з волоконними лазерами, машин для газокисневого різання, столів розкрійних з вбудованою системою вентиляції та фільтрації, реалізація





систем плазмового різання фірм Hypertherm, Kjellberg, OTC Daihen, капітальний ремонт та модернізація машин для термічного різання;

- ООО «ДОНМЕТ» — завод автогенного обладнання, підприємство, на якому на основі власних запатентованих розробок серійно налагоджено виробництво десятків найменувань обладнання для різання, зварювання та пайки металів, з гарантованим терміном користування до 24 місяців. Газозварювальне обладнання підприємства і система керування якістю сертифіковані в системі УкрСЕПРО по ДСТУ ISO 9001-2001;

- ТОВ «НАВКО-ТЕХ» розробляє та виготовляє спеціалізоване устаткування: установки для зварювання прямолінійних швів (димоходи, обичайки та ін.); установки для зварювання кільцевих швів (балони, ресивери, крани та ін.); установки для наплавлення на циліндричних, конічних та плоских поверхнях по спіралі; зварювальні комплекси на базі промислових роботів FANUC; апаратуру для зварювання (пристрої охолодження, зварювальні обертачі та ін.);

- ТОВ «ОЛІВЕР» (Білорусь) – спеціалізується на виробництві зварювального дроту та електродів широкої номенклатури, зварювального устаткування, аксесуарів та приладдя для зварювання;

- ТОВ «САММІТ» – спеціалізоване підприємство з продажу, обслуговування електрозварювального обладнання відомих брендів з Фінляндії, США, Німеччини та інших країн.

Перелік обладнання вітчизняного та іноземного виробництва, яке постачається: зварювальні інвертори, напіваавтомати, зварювальні автомати, зварювальні трактори; машини контактного зварювання; обладнання для плазмового різання; редуктори, вентилі, пальники, різакі та ін.; газо-



ві змішувачі WITT; зварювальні матеріали (дріт, флюс, електроди); роботи для зварювання.

Замовниками компанії є більш ніж 800 металургійних, машинобудівних та інших підприємств.

- ТОВ «СВ ТЕХНОЛОГІЯ» – займається розвитком, виробництвом та реалізацією широкого спектру зварювального обладнання, пристосувань і матеріалів, засобів захисту, інструменту, абразивного матеріалу та ін. Працює на ринку України з 1997 р. Має декілька торгових філіалів;

- НТЦ «ПРОМАВТОСВАРКА» – протягом останніх чотирьох років освоїв новий напрямок – розробка обладнання та технології для нанесення покриттів методом металізації. Здійснюється виробництво металізаторів, які успішно застосовуються на підприємствах України для нанесення антикорозійних покриттів з цинку, алюмінію, бронзи, а також для відновлення зношених деталей та придання деталям особистих властивостей;

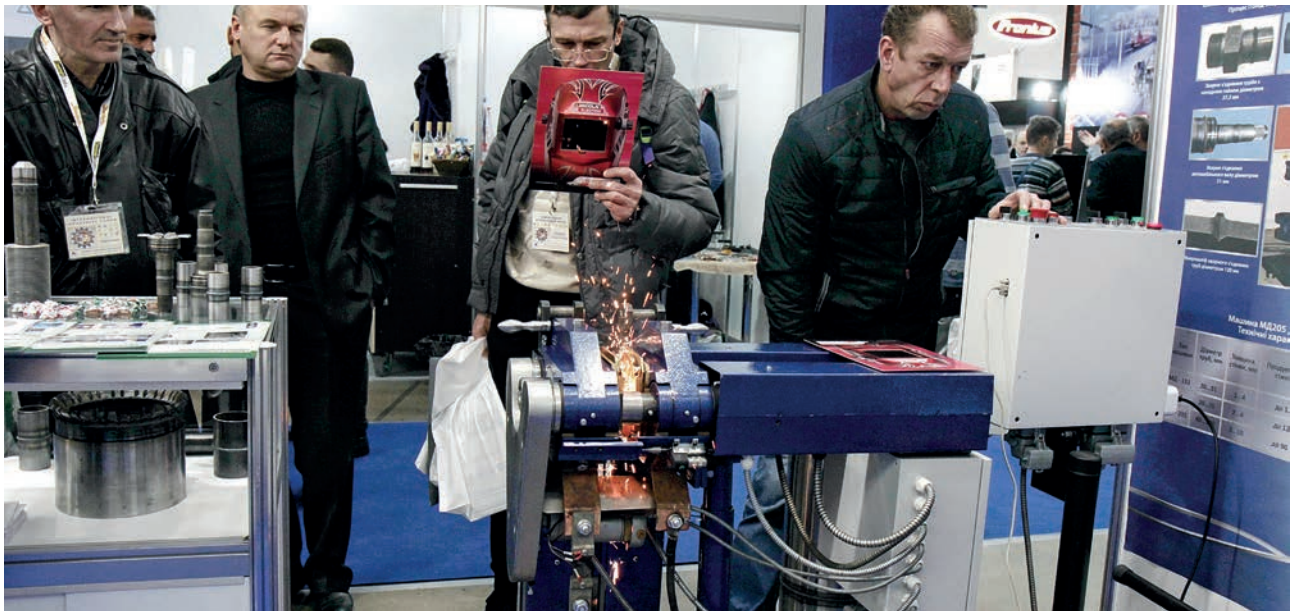
- ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» (раніше ТОВ «ФРУНЗЕ-ЕЛЕКТРОД») є провідним підприємством України з виготовлення зварювальних електродів спеціального та загального призначення з високими зварювально-технологічними властивостями за конкурентоспроможними цінами, які з успіхом застосовуються при виготовленні та ремонті відповідальних металоконструкцій на підприємствах машинобудівної, хімічної та енергетичної (у т.ч. атомної) галузей України та країн СНД;

- ТОВ «ТЕРМАКАТ Україна, ГМБХ: торгівельна марка всесвітнього виробника (THERMACUT®) апаратів плазмового різання, а також витратних деталей, комплектуючих та аксесуарів для термічного різання металу, що представлені у трьох сегментах (лазер, плазма, газ).

- НПВ «ТЕХВАГОНМАШ» – компанія представляє повний набір послуг: від етапу проектування до етапу проведення шеф-монтажних та пусконаладжувальних робіт, включаючи виробництво спеціального технологічного обладнання. Основними напрямками діяльності є: комплексне проектування та оснащення підприємств транспортно-машинобудівництва; спеціальне технологічне обладнання для виробництва залізничного транспорту; технологічне обладнання для ремонту вагонів; обладнання для виробництва причіпної та навісної техніки комерційного автотранспорту; роботизовано-зварювальні комплекси.

- НВП «ТЕХМАШ» – машини плазмового та газокисневого різання металу. Виробництво, продаж, розробка, обслуговування, модернізація, постачання запчастин та витратних матеріалів

- ТОВ «ТРИАДА-ЗВАРКА» в Україні є ексклюзивним дистриб'ютором турецького виробника зварювальних матеріалів заводу «ASKAYNAK». Завод



«ASKAYNAK» є власністю компанії «LINCOLN ELECTRIC» (США). ASKAYNAK – світовий лідер з виробництва зварювального дроту та електродів.

• ТОВ «ФОРСАЖ УКРАЇНА» – власне виробництво зварювального обладнання ТМ «Forsage» із застосуванням повного циклу обробки деталей. Сучасне виробництво з застосуванням комплексів: лазерна різка, листовий ЧПК, гільютина ЧПК, вакуумний пристрій просочення трансформаторів, автоматична машина встановлення СМД-деталей, піч запікання СМД з ЧПК, фрезерний верстак з ЧПК, різьбонарізний верстат з ЧПК. Потужності підприємства дозволяють виготовити будь-яку конфігурацію зварювального обладнання на замовлення у найкоротші строки.

• ГО «ТОВАРИСТВО ЗВАРНИКІВ УКРАЇНИ» – це громадська організація, що об’єднує учених, фахівців та робітників у галузі зварювання та споріднених процесів в Україні для кращого обміну науково-технічною інформацією та формування консолідованої технічної політики в сфері зварювального виробництва; задоволення та захисту творчих інтересів учених та інженерів; сприяння покращенню

умов роботи членів Товариства, розвитку науки та освіти, впровадження наукових, технічних та методичних досягнень в практику; популяризації професій, удосконаленню системи професійної підготовки та перепідготовки кадрів; співробітництва за національними зварювальними товариствами інших країн та з міжнародними зварювальними організаціями.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України представив на форумі інноваційні технології для автоматизованого пресового зварювання металевих труб відповідального призначення (на фото зверху – процес зварювання дугою, що обертається в магнітному полі), а також зварювання пластмасових труб. На стенді була представлена також видавнича діяльність Інституту, зокрема журнали «Автоматичне зварювання», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» та «Сучасна електрометалургія». Великий інтерес у відвідувачів виставки визвала демонстрація на стенді художніх виробів з титану, виконаних з використанням ТІГ зварювання художником-зварником Дмитром Кушніруком.

Молоді зварювальники України взяли участь в XIII конкурсі «Золотий кубок Бенардоса-2019»,



організованому Товариством зварників України (ТЗУ) і Одеським обласним відділенням ТЗУ. Конкурс проходив в наступних номінаціях: ручна дугова зварка покритим електродом (метод 111 / SMAW); дугове зварювання електродом, що плавиться, в активних газах (метод 135 / SMAW); дугове зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах (метод 141 / SMAW).

Додатково були проведені два позаконкурсних заходи: конкурс на зварювальному тренажері «SOLKAMATIC»; конкурс плазмового різання на обладнанні «JASIC».

У конкурсі взяли участь 27 зварників з 13 підприємств і трьох професійно-технічних навчальних закладів України. Всі переможці були нагороджені призами, наданими спонсорами конкурсу.

Співставляючи Промисловий форум-2019 з раніше проведеними, можна відзначити зростаючу кількість його учасників, розширення географії і підвищену увагу експонентів до демонстрації інноваційних технологій, включаючи автоматизацію та роботизацію зварювальних процесів, розробку 3D технологій, мінімізацію впливу людського фактора, раціональне дослідження виробничих площ.

О.Т. Зельніченко, В.М. Ліподаєв





X спеціалізована виставка **МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ**

місце проведення

ВЦ «Південний-ЕКСПО»
вул. Щирецька, 36, м. Львів

- металорізальні верстати та оснастка
- металорізальні інструменти
- слюсарний та монтажний інструмент
- зварювальне обладнання
- обладнання для обробки металу
- ручний електроінструмент
- металовироби, вироби для з'єднання та кріплення
- засоби захисту
- ковальське обладнання

Інформаційні спонсори



Контакти

☎ тел./факс: (032) 244-18-88

✉ e-mail: expolviv@gmail.com

🌐 web: www.expolviv.ua

Організатор







Передплата – 2020 на журнал «Автоматичне зварювання»
www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/as
 Передплатний індекс 70031
 (з 1948 по 2019 рр. журнал видавався під назвою «Автоматическая сварка»)

Україна		Зарубіжні країни	
на півріччя	на рік	на півріччя	на рік
1200 грн.	2400 грн.	90 дол. США	180 дол. США

У вартість передплати включена доставка рекомендованою банделроллю.

Підписано до друку 17.12.2019. Формат 60×84/8. Офсетний друк.

Ум. друк. арк. 8,37.

Друк ТОВ «ДІА».

03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.



Программы профессиональной подготовки на 2020 г.

Шифр курса	Наименование программы	Продолжительность	Сроки проведения	
1. Повышение квалификации инженерно-технических работников				
101	Подтверждение профессиональной компетентности координаторов (руководителей) сварочных работ согласно ДСТУ ISO 14731 «Координация сварочных работ. Задачи и функции»	сертификация	3 недели (112 ч)	
102		ресертификация	24 ч	
103	Расширение области аттестации координаторов (руководителей) сварочных работ		6 ч	
106	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
107		переаттестация	22 ч	
109	Техническое руководство работами по контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.		72 ч	
111	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)		3 недели (112 ч)	
112	Расширение области аттестации председателей комиссий по аттестации сварщиков – экспертов УАКС (согласно НПАОП 0.00-1.16-96)		8 ч	
1121	Расширение полномочий экспертов УАКС на право аттестации сварщиков согласно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 ч	
1122	Расширение полномочий экспертов УАКС на право аттестации сварщиков пластмасс согласно ДСТУ EN 13067		72 ч	
113	Подготовка и аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	
114		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)	
115		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)	
116	Расширение области аттестации членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке (согласно НПАОП 0.00-1.16-96)		6 ч	
117	Расширение полномочий членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке на право аттестации сварщиков согласно ДСТУ EN ISO 9606-1		32 ч	
118	Расширение полномочий членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов по техническому контролю на право аттестации сварщиков согласно ДСТУ EN ISO 9606-1		24 ч	
119	Подтверждение полномочий (переаттестация) председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС:		32 ч	
120	Подтверждение полномочий (переаттестация) членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке	32 ч	
121		специалистов по техническому контролю	16 ч	
122		специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	36 ч	
123		специалистов по охране труда	16 ч	
130	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки (МИС) с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке	453 / 128 ч ¹	
132		Международный технолог по сварке	372 / 91 ч ¹	
134		Международный специалист по сварке	248 / 60 ч ¹	
135		Международный практик по сварке	114 ч	
136		Международный дизайнер (конструктор) по сварке	40 ч	
137		Международный инспектор по сварке	полного уровня	230 ч
139			базового уровня	115 ч
149		специалистов, которые имеют квалификацию «Международный инженер / технолог по сварке»	76 / 78 ч	
141	Металлографические исследования металлов и сварных соединений	специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
142		переаттестация	22 ч	
143	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений	специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	
144		переаттестация	20 ч	
145	Эмиссионный спектральный анализ (стилюскопирование) металлов и сплавов	специальная подготовка и аттестация	2 недели (74 ч)	
146		переаттестация	22 ч	
151	Производство сварочных материалов: организация, технологии и системы управления качеством		2 недели (72 ч)	

Тематические семинары (возможно проведение на территории заказчика)			
161	Нормативно-техническая документация в сварочном производстве, состоянии и перспективы	2 дня (16 ч)	март, июнь
162	Обеспечение качества сварки. Требования национальных и международных стандартов	2 дня (16 ч)	апрель, июнь, октябрь
163	Изготовление конструкций из стали согласно требований ДСТУ EN 1090	32 ч	февраль

2. Повышение квалификации педагогических работников системы профессионально-технического образования в области сварки

203	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке	110 ч	по согласованию с заказчиком
204	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка»	70 ч	

3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации квалифицированных рабочих в области сварки и родственных технологий (с присвоением квалификации в соответствии с национальной и международной квалификационными системами)

Курсовая подготовка СВАРЩИКОВ:				
301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами (с присвоением национальной и международной квалификации)	9 недель (356 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG) (с присвоением национальной и международной квалификации)	5 недель (192 ч)		
304	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) (с присвоением национальной и международной квалификации)	7 недели (276 ч)		
306	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	3 недели (112 ч)		
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных трубопроводов)	3 недели (112 ч)		
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб) с аттестацией в соответствии с ДСТУ EN 13067	5 недель (196 ч)		
Подготовка сварщиков по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:				
310	Международный сварщик угловых швов (IFW) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	130 – 210 ч ²	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
312	Международный сварщик плоских соединений (IPW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	250 – 380 ч ²		
315	Международный сварщик труб (ITW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	360 - 510 ч ²		
318	Международный практик-сварщик (IWP) с аттестацией по EN ISO 9606-1	35 - 153 ч ²		
Переподготовка СВАРЩИКОВ с присвоением квалификации «Международный сварщик»: (IFW, IPW, ITW)				
321	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (MMA) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 112 ч ²	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
322	переподготовка сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	76 - 118 ч ²		
323	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 - 78 ч ²		
Повышение квалификации СВАРЩИКОВ:				
330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)	
331	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	2 недели (72 ч)		
333	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	2 недели (72 ч)		
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)		
335	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком	
336	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)		
Курсовая подготовка контролеров неразрушающего контроля:				
343	Специализация – визуально-оптический контроль	72/196 ч ³	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком	
344	Специализация – радиографический контроль	72/196 ч ³		
345	Специализация – ультразвуковой контроль	72/196 ч ³		
346	Специализация – магнитопорошковый контроль	72/196 ч ³		
347	Специализация – капиллярный контроль	72/196 ч ³		
Целевая подготовка и подтверждение квалификации:				
362	Персонала, занимающегося нанесением защитных покрытий	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
363		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)	
364		детонационным напылением	3 недели (112 ч)	
365		плазменным напылением	3 недели (112 ч)	

ІНФОРМАЦІЯ

367	сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах, выполняющих наплавку острых, крестовин стрелочных переходов железнодорожных путей с аттестацией согласно СОУ 35.2-00017584-030-1:2009	5 недель (194 часа)	по согласованию с заказчиком
-----	---	---------------------	------------------------------

4. Аттестация персонала сварочного производства

400	Аттестация координаторов (руководителей) сварочных работ в соответствии с ДСТУ ISO 14731	8 ч	проводится по окончании курсов 101-109	
401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с правилами НПАОП 0.00-1.16-96 и стандартами ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732	72 ч	постоянно	
402	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно с НПАОП 0.00-1.16-96	24 ч		
403	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5	32 ч		
405	Специальная подготовка и аттестация сварщиков авиационной промышленности в соответствии с ДСТУ ISO 24394	72 ч		
406, 457	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1	24 ч		
407	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматической сварки плавлением в соответствии со стандартом ДСТУ ISO 14732	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком	
411	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)	3 недели (112 ч)		
412	Периодическая аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)	32 ч	проводится по окончании курса 308	
413	Специальная подготовка и аттестация операторов-сварщиков контактно-стыковой сварки рельсов в соответствии с ДСТУ ISO 14732 и СОУ 35.2-00017584-030-1:2009	2 недели (72 ч)		
414	Аттестация сварщиков пластмасс в соответствии с ДСТУ EN 13067 (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)		проводится по окончании курса 309	
415	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб) в соответствии с ДСТУ EN 13067	32 ч	ежеквартально	
421	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно ДСТУ EN 9712	ультразвуковой контроль	32 / 36 / 64 (I yr) ч ⁴	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
423			40 / 48 / 72 / 80 / 144 (II yr) ч ⁴	
427		радиографический контроль	36 / 40 / 72 (I yr) ч ⁴	
430			40 / 48 / 76 / 80 / 152 (II yr) ч ⁴	
433			16 / 20 / 30 (I yr) ч ⁴	
436	визуально-оптический контроль	20 / 24 / 35 / 40 / 70 (II yr) ч ⁴		
448	Переаттестация сварщиков контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов согласно требованиям ДСТУ ISO 14732 и СОУ 35.2-00017584-030-1:2009	32 ч	февраль	

5. Тренинги, тестирование и подтверждение квалификации

501	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	4 – 12 ч ⁵	по согласованию с заказчиком
502	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)	4 – 12 ч ⁵	
503	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (MMA)	4 – 16 ч ⁵	
512	Практические тренинги по различным способам сварки	8 – 32 ч ⁵	

¹ - Продолжительность обучения определяется в зависимости от базовой профессиональной подготовки и опыта работы в сварочном производстве.

² - Продолжительность обучения зависит от специализации.

³ - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

⁴ - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

⁵ - Длительность программы зависит от условий и характера испытаний.

- По согласованию с Заказчиками возможно проведение обучения по другим программам, не вошедшим в данный перечень.
- На период обучения слушателям предоставляется жилье с оплатой за наличный расчет.
- Стоимость обучения определяется при заключении договора.
- Для приема на обучение необходимо направить заявку с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

Украина, 03150, г. Киев, ул. Антоновича, 56 Тел. (044) 456-63-30, 456-10-74, 200-82-80, 200-81-09,
Факс (044) 456-48-94; E-mail: paton_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua