

3. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. and others. *Processy plasticheskogo strukturoobrazovaniya* [Plastic structuring processes]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1994, 232 p.
4. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis. *Zhurnal Tekhnologii Obrabotki materialov* [Journal of Materials Processing Technology]. 1997, no. 72, pp. 32–41.
5. Kotelkin A.V., Petrov V.A. *Kombinirovannyj bojki* [Combined]. A.S. 774756 USSR.
6. Okhrimenko Ja.M., Tyurin V.A., Baranov S.D. *Kuznechnyj instrument* [Blacksmith tool]. A.S. 442878 USSR.
7. Tyurin V.A. Innovative blacksmith technologies. *Kuznechno-shlampovochnoe proizvodstvo* [Die forging]. 2006, no. 5, pp. 27–29.
8. Bogatov A.A. *Mehanicheskie svojstva i modeli razrushenija metalla. Uchebnoe posobie* [Mechanical properties and models of metal failure. Academic aid]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2002, 328 p.
9. Panov E.I., Jeskin G.I. Influence of transverse screw rolling on the structure and properties of hypereutectic aluminium-silicon alloys. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal Science and thermal metal processing]. 2004, no. 9, pp. 7–13.
10. Ovchinnikov D.V., Bogatov A.A., Erpalov M.V. Development and implementation of production technology of tubings from cast sections. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2012, march, pp. 18–21.
11. Valiev R.Z. Manufacturing of unique nanostructured metals and alloys through severe plastic deformations. *Rossijskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnologies]. 2006, vol. 1-2, 208 p.
12. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh. Rational computer-simulated conditions of a new blacksmith strip stretching process. *Proizvodstvo prokata* [Rolling production]. 2015, no. 3, pp. 3–8.
13. Bogatov A.A., Nukhov D.Sh. Scientific bases for improving efficiency of forging process under alternating deformation. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroenii* [Production of blanks in mechanical engineering]. 2015, no. 3, pp. 12–17.

Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Разработка способа кузнечной протяжки без изменения формы и размеров исходной заготовки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 16–21.

Bogatov A.A., Nukhov D.Sh. Development of a method of blacksmith stretching without changing the shape and dimensions of the billet. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 16–21.

УДК 65.011.56: 621.771: 621.778: 669.21/23.018

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КАТОДНЫХ СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ*

Довженко Н.Н.¹, Сидельников С.Б.¹, Архипов Г.В.², Константинов И.Л.¹,
Довженко И.Н.¹, Лопатина Е.С.¹, Ворошилов Д.С.¹, Феськов Е.В.¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
² РУСАЛ ИТЦ, Красноярск, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по разработке технологий получения заготовок для катодного стержня электролизера из стали марки Ст3, плакированного с одной стороны медью марки М1. Показано, что для их получения необходимо комплексное применение методов обработки металлов давлением и диффузионной сварки в различном их сочетании. Представлены результаты моделирования процесса горячей прокатки сталемедной заготовки и определены параметры деформационного режима ее обжатия.

Ключевые слова: сталь, медь, технологические процессы, моделирование, диффузионная сварка, прокатка, структура.

Введение

В рамках реализации федеральной целевой программы «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» выполнены исследования по теме «Разработка технологии получения алюминия со снижением расхода электроэнергии на действую-

ющих электролизерах на 300–1000 кВт·ч/т алюминия» по соглашению № 14.579.21.0032 о предоставлении субсидии.

Целью проведенных работ явилось опробование технологии получения биметалла сталь–медь в лаборатории кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения СФУ.

При этом решались следующие задачи:

- выбрать последовательность технологических операций для получения сталемедных композиций с использованием операций обработки давлением и диффузионной сварки;
- выполнить моделирование процесса прокатки и установить параметры деформационного режима обжатия заготовки;
- провести опробование режимов создания ста-

* Статья по материалам доклада на международной молодежной научно-технической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства», состоявшейся 15–17 июня 2015 г. в ФГБОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №15-38-10185).

© Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Архипов Г.В., Константинов И.Л., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Феськов Е.В., 2015

лемедных композиций, полученных на модельных образцах и заготовках промышленных размеров;

- исследовать структуру и свойства плакированных сталемедных заготовок;

- выполнить анализ результатов проведенных лабораторных исследований и, в случае необходимости, корректировку режимов получения биметалла с учетом масштабного фактора;

- разработать рекомендации для промышленной технологии получения сталемедной композиции.

Анализ научно-технической [1–6] и патентной [7–15] литературы показал, что для решения поставленных задач целесообразно использовать методы диффузационной сварки и методы обработки металлов давлением.

Материалы и методы исследования

В качестве материала использовали заготовки прямоугольного сечения (**рис. 1**) для изготовления электролизной полосы по ТУ 14-104-135-92 из стали марки Ст3 (**рис. 1, а**) с сечением в виде прямоугольника размерами 115×230 мм со скругленными углами радиусом 15 мм (**рис. 1, б**) и длиной 500 мм.

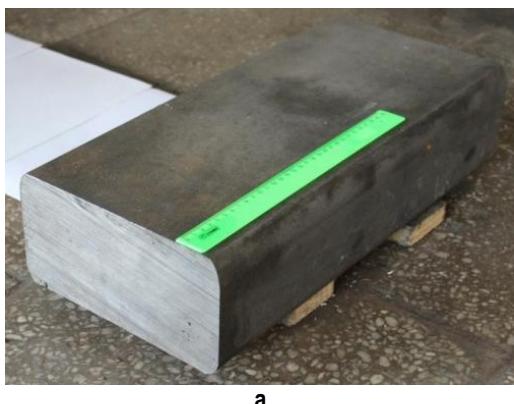


Рис. 1. Заготовка из стали марки Ст3 (а) и размеры ее поперечного сечения (б)

Заготовка для медного покрытия представляла собой пластину прямоугольного сечения с размерами в плане 190×500 мм, толщиной 16 мм из меди марки М1 (ГОСТ 1173-2006).

Оценку структуры сварного шва проводили с помощью металлографических методов исследования на световом микроскопе Axio Observer A1m фирмы Carl Zeiss.

Проведенные исследования на модельных образцах и моделирование процесса горячей прокатки дали возможность отработать технологию соединения меди и стали в масштабе 1:10 и получить параметры процесса диффузационной сварки и деформации металла. Однако переход на образцы промышленных заготовок потребовал новых исследований и уточнения параметров их обработки.

Технические и технологические разработки

Для реализации поставленных задач использовали различные варианты получения сталемедных соединений. Модельный образец после применения операций диффузационной сварки и горячей прокатки представлен на **рис. 2**.



Рис. 2. Вид модельного образца

Опробование режимов изготовления биметалла, полученных на модельных образцах, проводилось на промышленных заготовках по различным вариантам.

В первую очередь выполняли предварительную обработку контактных поверхностей стальной заготовки и медной пластины путем шлифовки. После этого на столе гидравлического пресса марки ПО443 с номинальным усилием 20 МН собирался пакет, который затем подвергали сжатию, создавая усилие 10–12 МН, что соответствовало напряжению на соединяемых поверхностях равному 85–105 МПа, а для фиксации пакета в сжатом состоянии проводили сварку прокладки 2 и стальной заготовки 5 (**рис. 3**) с помощью 4–6 стяжных пластин 4. При этом верхнюю часть пластин приваривали к прокладке 2, а нижнюю часть – непосредственно к стальной заготовке. Таким образом, достигалось надежное и герметичное прижатие медной и стальной заготовок и последующее их фиксирование в этом состоянии. После этого аналогичную операцию производили для противоположной стороны пакета, используя для этого также четыре стяжные пластины.

Для защиты от окисления пакет покрывали краской (водный раствор порошка мела), сушили на воздухе и загружали в печь марки СНО-3,6,2/10И с температурой нагрева $1000 \pm 10^\circ\text{C}$. Выдержка в печи составляла 120 мин, после этого

печь выключали, и охлаждение пакета проходило вместе с печью. Далее пакет разбирали и оценивали качество сварного соединения и микроструктуру полученного биметалла в зоне сварки.

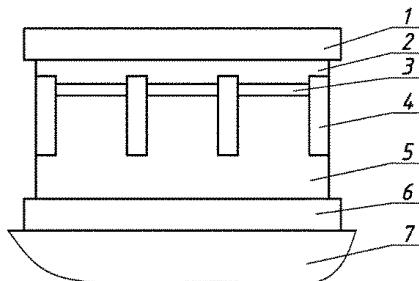


Рис. 3. Пакет для получения биметалла сталь-медь в сборе: 1 – верхняя плита; 2 – прокладка; 3 – медь; 4 – стяжные пластины; 5 – сталь; 6 – нижняя плита; 7 – стол пресса

Другой вариант предусматривал выполнение операции протяжки нагретой медной заготовки со степенями деформации, определенными в результате моделирования процесса горячей деформации металла. Образец заготовки представлен на **рис. 4**.



Рис. 4. Вид сталемедной заготовки

Данное техническое решение позволяет исключить из технологии изготовления сталемедных катодных стержней операцию горячей прокатки, однако требует больших энергосиловых затрат на деформацию металла.

Результаты исследований и их обсуждение

С целью получения параметров горячей обработки проведено моделирование в пакете Deform 3D™ прокатки биметалла сталь-медь на гладких валках со следующими исходными данными: диаметр валков 156 мм, длина бочки валка 220 мм; температура заготовок 1000°C, температура валков 20°C; скорость вращения валков 7 об/мин.; теплообмен заготовки с окружающей средой и прокатными валками; условия контактного взаимодействия заготовок и валков по Зи-

белю с показателем трения 0,5; относительное обжатие при прокатке 16,6%. Распределение скоростей деформации металла в очаге деформации показано на **рис. 5**.

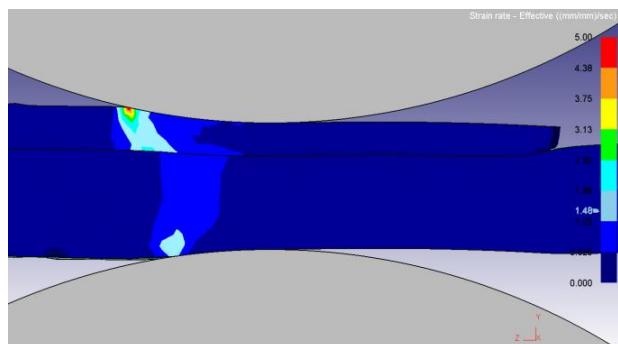


Рис. 5. Распределение скоростей деформации металла при прокатке

Следует отметить, что интенсивность скоростей деформации в зоне входа в очаг деформации со стороны меди в 3,3 раза выше (максимум 5 s^{-1}), чем со стороны стали (максимум $1,52 \text{ s}^{-1}$), а также объем металла со стороны меди с повышенной скоростью деформации значителен и простирается до слоя стали.

На границе между слоями меди и стали в этой области виден скачок скорости, что говорит о создании условий сдвига между слоями и, как следствие, развитии деформации, способствующей схватыванию и сварке слоев. В этой области также имеется разрыв касательных напряжений, который виден на **рис. 6**. Кроме того, разрыв появляется и в зоне опережения (за нейтральным сечением ближе к выходу из очага деформации). На **рис. 7** показано распределение интенсивности напряжений на границе сталь-медь, из которого также следует наличие разрыва в указанных ранее областях.

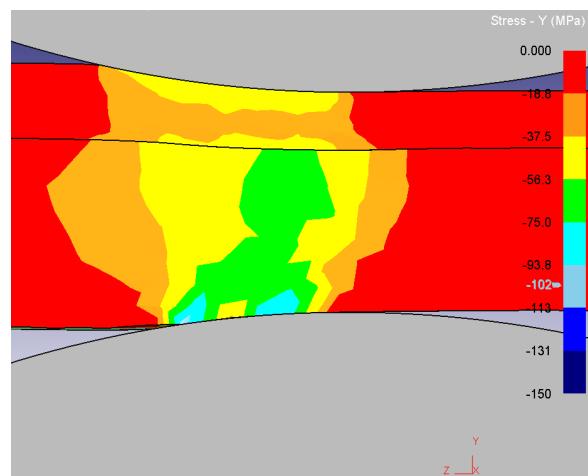


Рис. 6. Схема напряженно-деформированного состояния по оси Y

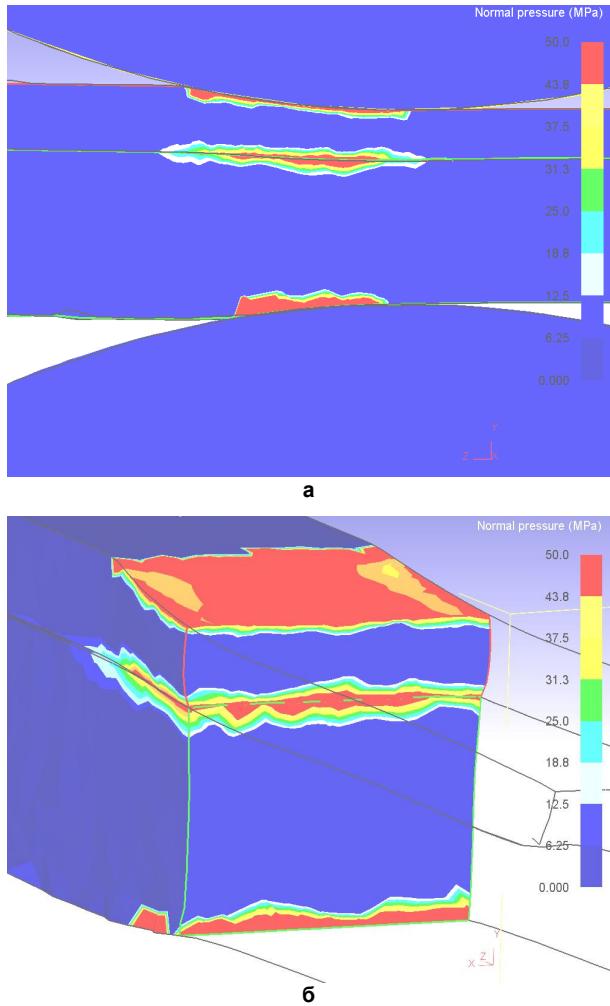


Рис. 7. Контактные напряжения на границах:
а – вид по осям Z, Y; б – продольный разрез
по осям X, Y

Программный комплекс позволяет анализировать температуру в любой точке заготовки, изделия и инструмента в любой момент времени. На **рис. 8** представлены результаты моделирования распределения температуры по вертикальному сечению при прокатке.

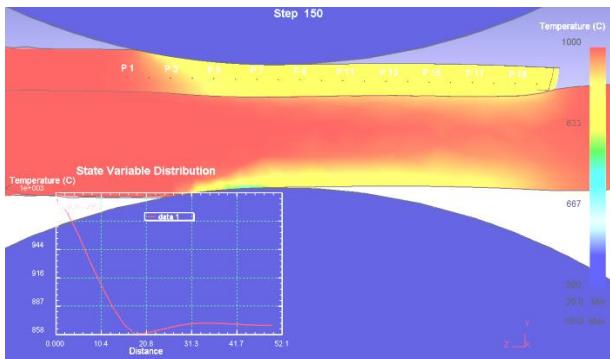


Рис. 8. Распределение температуры при прокатке

Установлено, что за счет несимметричности очага деформации и разности свойств стали и меди формируются две области: одна в зоне отставания и вторая в зоне опережения, в которых возникает разрыв скоростей деформации и касательных напряжений, обеспечивающих условия деформационной сварки стали и меди. Для обеспечения требуемой прочности соединения биметалла сталь-медь на срез необходимо, чтобы на границе сталь-медь при температуре горячей прокатки интенсивность скоростей сдвига была не ниже $1,5 \text{ с}^{-1}$, интенсивность касательных напряжений не ниже 75 МПа, величина нормальных напряжений не ниже 50 МПа.

Изучение микроструктуры образцов после диффузионной сварки (**рис. 8, а**) и горячей прокатки (**рис. 8, б**) показало, что опробованный режим приводит к формированию четкого и плотного сварного шва.

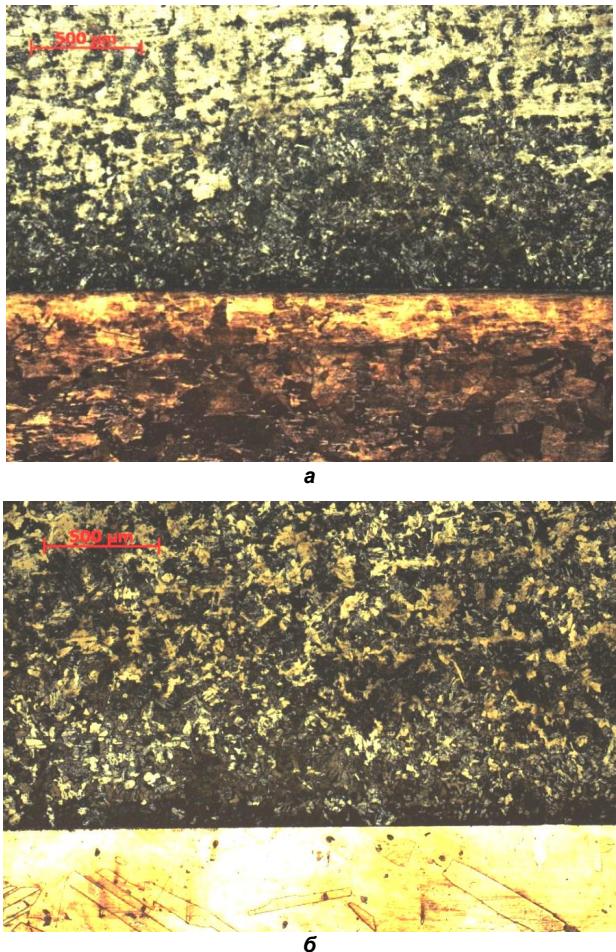


Рис. 9. Микроструктура сталемедной заготовки,
полученной диффузионной сваркой (а)
и горячей прокаткой (б): верхний слой – сталь;
нижний слой – медь; $\times 50$

Для оценки прочности сварного шва были проведены испытания образцов на срез слоев по ОСТ 5.9311-78, которые показали, что величина сопротивления срезу сварного шва образцов после диффузионной сварки составила около 50 МПа, а после прокатки увеличилась до 70 МПа.

Полученные результаты использования различных технологий получения сталемедного соединения в настоящее время используются для создания инновационной технологии, позволяющей получать катодные стержни для электролизеров длиной до 2500 мм с наименьшими затратами и гарантированным сварным соединением.

Заключение

Таким образом, проведено моделирование горячей обработки биметаллической заготовки и установлены параметры, которые использовались для экспериментальных исследований по получению сталемедных композиций с применением операций горячей обработки давлением и диффузионной сварки. В результате получены опытные образцы биметаллических заготовок с требуемыми эксплуатационными характеристиками по прочности сварного шва.

Список литературы

1. Баранов И. Б. Холодная сварка пластичных металлов. 3 изд. Л., 1969. 208 с.
2. Сварка. Введение в специальность: учеб. пособие / В.А. Фролов [и др.]. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 293 с.
3. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочки, Л.Г. Стрижевская. М.: Машиностроение, 1984. 239 с.
4. Получение методом горячей прокатки в вакууме слоистых и композиционных материалов типа медь-сталь и исследование их свойств / Ильченко Н.И., Диценко С.Ю., Неклюдов И.М., Бондаренко С.Л. // Вопросы атомной науки и техники. 2003. №3. С. 158–160.
5. Гарбуз Н.А. Исследование диффузии и механической прочности биметаллов сталь-медь // Труды Иркутского горно-металлургического института. Вып. 8. Иркутск, 1956.
6. Голованенко С.А., Устименко В.А., Менандров Л.В. Производство биметаллов. М.: Металлургия, 1966. 153 с.
7. Пат. 1145562 Российская Федерация, МПК6 B23K20/00. Способ сварки давлением / Н.В. Гузев, А.П. Семенов, С.П. Коcharmin; заявитель и патентообладатель АООТ «Научно-исследовательский технологический институт». № 3439365/27; заявл. 18.05.1982; опубл. 20.12.1996.
8. Пат. 1178014 Российская Федерация, МПК⁶ B23K20/00 B23K20/14. Способ изготовления диффузионной сваркой преимущественно слоистых конструкций / М.Б. Николов, В.Н. Родионов; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля. № 3705345/27; заявл. 01.03.1984; опубл. 27.06.1995.
9. Пат. 1543733 Российская Федерация, МПК⁶ B23K20/00. Способ изготовления плакированных металлических материалов / Н.К. Чернов, М.Т. Казанцева; заявитель и патентообладатель НИИ Материалов электронной техники. № 4249443/27; заявл. 26.05.1987; опубл. 20.02.1995.
10. Пат. 2010689 Российской Федерации, МПК⁵ B23K20/00. Способ сварки давлением / В.С. Федягин; заявитель и патентообладатель Федягин Владимир Сергеевич. № 4925800/27; заявл. 04.04.1991; опубл. 15.04.1994.
11. Пат. 2025237 Российской Федерации, МПК⁵ B23K20/00. Способ плакирования двуслойного биметалла / Е.Н. Никитенко, Е.В. Байков, А.Г. Маншилин, А.В. Лабецкий, А.В. Завертьев, Л.Н. Дмитров; заявитель и патентообладатель Нытвенский машиностроительный институт (RU). № 5003168/27; заявл. 01.07.1991; опубл. 30.12.1994.
12. Пат. 2056960 Российской Федерации, МПК⁶ B21C23/22. Способ изготовления слоистых изделий / И.В. Ситников; заявитель и патентообладатель ТОО Научно-производственная фирма «Бинар». № 93010057/08; заявл. 26.02.1993; опубл. 27.03.1996.
13. Пат. 2082575 Российской Федерации, МПК⁶ B23K20/00, B23K20/04. Способ получения плоских биметаллических материалов / Н.Д. Лукашкин; А.П. Борисов, Л.С. Кохан; заявитель и патентообладатель Московский вечерний металлургический институт. № 24044816/02; заявл. 21.12.1994; опубл. 27.06.1997.
14. Пат. 2099166 Российской Федерации, МПК⁶ B23K20/00 B21C23/22. Способ изготовления биметаллической проволоки / Ю.А. Щербо, И.В. Ситников, Г.А. Поляков, А.В. Андреев, Ю.Б. Андреева, О.Г. Казаринов; заявитель и патентообладатель Промисинг Фьюче Корпорэйшн (US). № 96121187/02; заявл. 08.10.1996; опубл. 20.12.1997.
15. Пат. 2274528 Российской Федерации, МПК B23K20/04 B32B15/01 B32B15/18. Способ изготовления пакетов для производства крупногабаритных плакированных листов / В.А. Дурынин, Т.И. Титова, Э.С. Каган, И.Ф. Семернина, А.А. Сорокин, С.А. Бочаров, А.Б. Родичев, М.А. Салтыкова; заявитель и патентообладатель ООО «ОМЗ-Спецсталь». № 2004114058/02; заявл. 06.05.2004; опубл. 20.04.2006.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INNOVATIVE TECHNOLOGY OF OBTAINING CATHODE RODS FOR ELECTROLYZERS

Dovzhenko Nikolay Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Phone: (8391) 293-78-46. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru.

Sidelnikov Sergey Borisovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Arkhipov Gennadiy Viktorovich – Project Director of «RUSAL ETC» Ltd., Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Konstantinov Igor Lazarevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: ilcon@mail.ru.

Dovzhenko Ivan Nikolaevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Lopatina Ekaterina Sergeevna – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-36-75. E-mail: eslopatina@mail.ru.

Voroshilov Denis Sergeevich – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sibdrug@mail.ru.

Feskov Evgeniy Valeryevich – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Abstract. This article presents the results of a research on development of technologies aimed at obtaining billets for cathode electrolyzer rods from St3 steel clad with M1 copper on one side. It is shown that an integrated application of metal forming and diffusion welding ensures obtainment of these products. This article presents modeling results of hot steel-copper billet rolling and defines parameters of deformation conditions of billet reduction.

Keywords: Steel, copper, technological processes, modeling, diffusion welding, rolling, structure.

References

1. Baranov I.B. *Kholodnaya svarka plastichnykh metallov* [Cold welding of ductile metals, 3 ed.]. Leningrad, 1969. 208 p.
 2. Frolov V.A. [and others]. *Svarka. Vvedenie v spetsial'nost': uchebnoe posobie* [Welding. Introduction to Specialty: study guide]. Moscow: Intemet Engineering, 2004. 293 p.
 3. Ryabov V.R., Rabkin D.M., Kurochko R.S., Strizhevskaya L.G. *Svarka raznorodnykh metallov i splavov* [Welding dissimilar metals and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 239 p.
 4. Ilchenko N.I., Didenko S.Yu., Neklyudov I.M., Bondarenko S.L. Receive with hot rolling in vacuum layered and composite materials such as copper-steel, and the study of their properties. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology]. 2003, no. 3, pp. 158-160.
 5. Garbus N.A. Investigation of the diffusion and mechanical strength of steel-copper bimetals. *Trudy Irkutskogo gorno-metallurgicheskogo instituta. Vypusk 8* [Proceedings of the Irkutsk Mining and Metallurgical Institute, issue 8]. Irkutsk, 1956.
 6. Golovanenko S.A., Ustimenko V.A., Meandrov L.V. *Proizvodstvo bimetallov* [Production of bimetals]. Moscow: Metallurgy, 1966. 153 p.
 7. Guzev N.V., Semenov A.P., Kocharmin S.P. *Sposob svarki davleniem* [A method of pressure welding]. Patent no. 1145562 RF.
 8. Nikgolov M.B., Rodionov V.N. *Sposob izgotovleniya diffuzionnoj svarkoj preimushhestvenno sloistykh konstruktsij* [A method of manufacturing a diffusion welding advantageously stratified construction]. Patent no. 1178014 RF.
 9. Chernov N.K., Kazantseva M.T. *Sposob izgotovleniya plakirovannykh metallicheskikh materialov* [A method of manufacturing clad metal materials]. Patent no. 1543733 RF.
 10. Fedyanin V.S. *Sposob svarki давлением* [A method of pressure welding]. Patent no. 2010689 RF.
 11. Nikitenko E.N., Baykov E.V., Manshilin A.G., Labetskiy A.V., Zavertyaev A.V., Dmitrov L.N. *Sposob plakirovaniya dvuslojnogo bimetta* [A method of clad two-layer bimetal]. Patent no. 2025237 RF.
 12. Sitnikov I.V. *Sposob izgotovleniya sloistykh izdelij* [A method of manufacturing layered products]. Patent no. 2056960 RF.
 13. Lukashkin N.D., Borisov A.P., Kokhan L.S. *Sposob polucheniya ploskikh bimetallicheskikh materialov* [A method for producing of flat bimetallic material]. Patent no. 2082575 RF.
 14. Shcherbo Y.A., Sitnikov I.V., Polyakov G.A., Andreev A.V., Andreeva Y.B., Kazarinov O.G. *Sposob izgotovleniya bimetallicheskoy provoloki* [A method of manufacturing a bimetallic wire]. Patent no. 2099166 RF.
 15. Durynin V.A., Titova T.I., Kagan E.S., Semenina I.F., Sorokin A.A., Bocharov S.A., Rodichev A.B., Saltykova M.A. *Sposob izgotovleniya paketov dlya proizvodstva krupnogabaritnykh plakirovannykh listov* [A method of manufacturing a package for the production of large-sized cladded sheets]. Patent no. 2274528 RF.
-

Инновационные технологии получения катодных стержней для электролизеров / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Архипов Г.В., Константинов И.Л., Довженко И.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Феськов Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4. С. 21–26.

Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Arkhipov G.V., Konstantinov I.L., Dovzhenko I.N., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Feskov E.V. Innovative technology of obtaining cathode rods for electrolyzers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 4, pp. 21–26.
