

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОРЦЕВОЙ ЧАСТИ МЕДНЫХ ГАЗО-КИСЛОРОДНЫХ КАМЕР ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

В.М. Илюшенко<sup>1</sup>, Т.Б. Майданчук<sup>1</sup>, А.Н. Бондаренко<sup>1</sup>, Е.П. Лукьянченко<sup>1</sup>,  
Т.Е. Ударцева<sup>2</sup>, Д.И. Андрейчук<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>НАУ. 03058, г. Киев, просп. Космонавта Комарова, 1. E-mail: post@nau.edu.ua

<sup>3</sup>«МЗ Днепросталь». 49051, г. Днепр, ул. Днепросталевская, 4. E-mail: dmitriy.andreychuk@ips.interpipe.biz

Применяемые для интенсификации процесса плавки металла в электропечах медные газокислородные камеры часто выходят из строя из-за сверхсложных условий эксплуатации. Выполнен комплекс исследований деградированного металла медных камер, позволивший определить возможные причины растрескивания меди на торцевой части детали. Выбрана принципиальная технология восстановления изношенных медных деталей гелиево-дуговой наплавкой с использованием специальной присадочной металлопорошковой проволоки. Восстановленные детали прошли лабораторные и заводские испытания. Данная ремонтная технология обеспечивает продление ресурса работы камер дуговой сталеплавильной печи на 75...85 %. Библиогр. 8, табл. 3, рис. 6.

*Ключевые слова:* дуговая сталеплавильная печь; медные газо-кислородные камеры; дефекты; восстановление; дуговая наплавка; сварочные материалы

В настоящее время в мире выплавка стали, в основном, производится в кислородных конвертерах и дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Мартеновский способ производства стали в нынешних условиях неконкурентоспособен, что подтверждается практически полным выводом из эксплуатации мартеновских печей. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что за последние 20 лет доля производства электростали выросла с 30 до 45 %, причем удельный вес ее в мире повышается и будет увеличиваться, прежде всего, за счет развивающихся стран [1].

С целью интенсификации плавки в ДСП применяют вспомогательные средства и приемы, которые обеспечивают дополнительный ввод тепла в электропечь. В конструкциях дуговых сталеплавильных печей это достигается с помощью использования лито-сварных медных водоохлаждаемых узлов (рис. 1, а), состоящих из джетбокса, съемной панели джетбокса, камеры и сопла (рис. 1, б). Через медную камеру подается смесь кислорода (максимальный расход 2200 м<sup>3</sup>/ч) и природного газа (425 м<sup>3</sup>/ч). Корпус камеры имеет каналы для водяного охлаждения с рабочим давлением 6...8 атм.

В процессе эксплуатации в сверхсложных условиях работы данные детали изнашиваются в результате теплового, химического и механического воздействий. Характерными дефектами камер яв-

ляются: образование по всей рабочей поверхности сетки глубоких трещин (рис. 2, а); следы от механического воздействия (рис. 2, б); локальное выгорание меди на торцевой части камеры (рис. 2, в) вплоть до сквозных прожогов стенок водоохлаждающих каналов (рис. 2, г), что приводит к появлению течей. При наличии протеканий камеры выбраковываются и подлежат замене на новые.

В настоящее время в научно-технической литературе каких-либо данных о возможности ремонта медных изделий с подобными дефектами как в Украине, так и за рубежом нет.

Учитывая высокую стоимость и дефицитность таких изделий, приобретаемых за рубежом, задача продления ресурса их эксплуатации является весьма актуальной.

С целью выяснения причин возникновения глубоких трещин на торцевой части камеры выполнен комплекс металлографических исследований металла, взятого из разных участков выбракованной детали; сделаны химический и газовый анализ меди; определены ее механические свойства при различных температурах испытаний.

Металлографические исследования образцов металла, вырезанных из торцевой (рабочей) и хвостовой частей камеры, показали характерную для литой меди крупнокристаллическую структуру (рис. 3, а, б).

В.М. Илюшенко — <https://orcid.org/0000-0002-9047-8512>; Т.Б. Майданчук — <https://orcid.org/0000-0002-2826,-8514>;

Е.П. Лукьянченко — <https://orcid.org/0000-0001-7678-5965>

© В.М. Илюшенко, Т.Б. Майданчук, А.Н. Бондаренко, Е.П. Лукьянченко, Т.Е. Ударцева, Д.И. Андрейчук, 2019

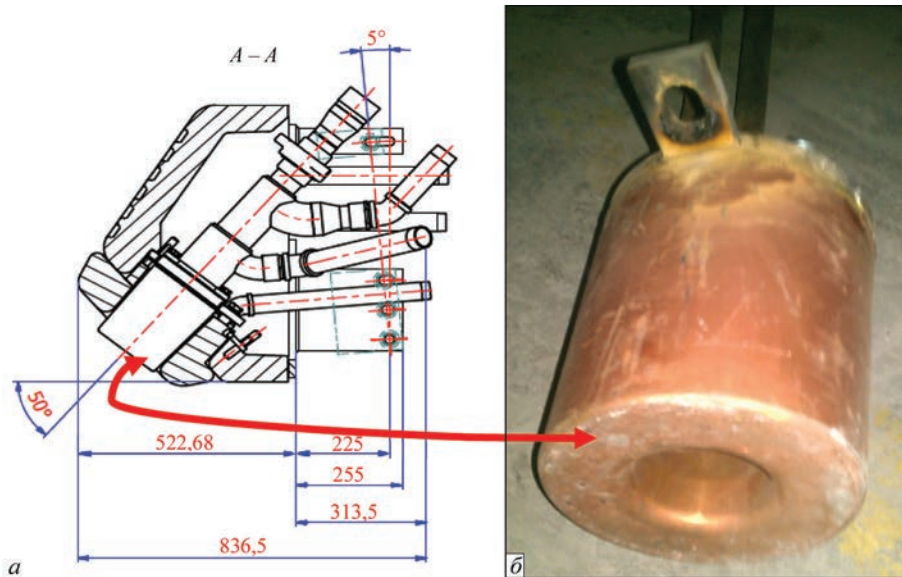


Рис. 1. Конструкція медного водоохлаждаемого узла (а) и внешний вид газо-кислородной камеры (б)

На макрошлифе образца из торцевой части четко видна сетка трещин по границам зерен. Эти трещины берут начало с поверхности металла и распространяются в медь на глубину до 10 мм (рис. 3, а). В то же время на темплетях из хвостовой части камеры таких трещин не наблюдается (рис. 3, б).

По результатам химического (с применением рентген-флуоресцентного анализатора X-Ray Spectrometer: X'Unique II фирмы Philips) и газового (с использованием анализаторов RH-402 и RO-316

фирмы «Лесо») анализов, приведенных в табл. 1, исследуемую медь можно отнести к раскисленным маркам типа М2р или М3р (ДСТУ 859–2003). Из многолетней практики известно, что такая медь обладает удовлетворительной свариваемостью и детали из нее ремонтпригодны. Анализируя возможные причины образования трещин в поверхностном слое медных камер, высказано предположение об отрицательном влиянии на прочностные свойства меди при повышенных температурах легкоплавких примесей как контролируемых (Ві,



Рис. 2. Внешний вид дефектов медных камер после эксплуатации: а — сетка глубоких трещин; б — следы от механического воздействия; в — локальное выгорание меди на торцевой части камеры; г — сквозные прожоги стенки водоохлаждающих каналов



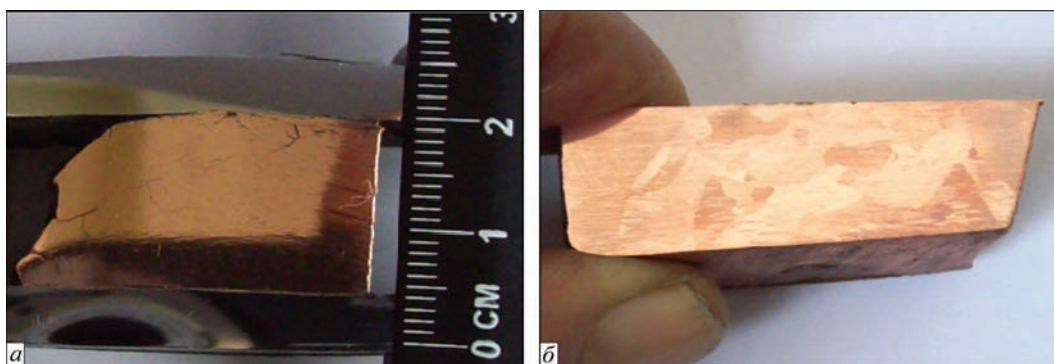


Рис. 3. Макрошлифы металла, вырезанные из торцевой (а) и хвостовой (б) частей камеры

Таблица 1. Химический состав и газовый анализ исследуемой меди, мас. %

Материал	P	Fe	Zn	Cu	[O]	[H]
Образец, вырезанный из частей камеры: хвостовой	0,044	0,040	0,015	Остальное	0,0101	0,00034 0,00047
торцевой	0,041	0,045	0,012		0,0094	0,00031 0,00025

Таблица 2. Механические свойства исследуемой меди, полученные при различных температурах испытаний

Температура, °C	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
20	172,6...174,4	46,3...53,0
350	105,6...117,0	40,8...41,7
750	4,8...5,6	10,6...11,4

Pb, Sb, S), так и неконтролируемых (Se, Te). Как показал анализ, в представленных для ремонта камерах обнаружено наличие до 0,0033 % селена, растворимость которого в меди ничтожно мала (приблизительно 0,001 % при 500 °C) [2]. Поэтому при таких его концентрациях возможно образование хрупкой эвтектики Cu–Cu<sub>2</sub>Se, ухудшающей пластичность меди и ее свариваемость [3].

Как следует из табл. 1, содержание кислорода и водорода в образцах, вырезанных из торцевой и хвостовой частей, практически одинаково.

Результаты механических испытаний при различных температурах приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, прочностные характеристики исследуемого металла при 20 °C прак-

тически идентичны таковым для литой меди [4]. Однако уже при температуре больше 350 °C исследуемая медь охрупчивается. Анализируя полученные данные, механизм образования трещин в торцевой части камер, на наш взгляд, следующий. Наличие в меди 0,0033 % селена, который является поверхностно-активным элементом с низкой температурой плавления (217 °C) и при кристаллизации расплавленной меди, вследствие малого коэффициента распределения, концентрируется по границам зерен, что приводит к эффекту адсорбционного снижения пластичности и прочности и при наличии растягивающих напряжений к образованию микротрещин [5]. Эти трещины в дальнейшем распространяются по толщине металла (рис. 4), чему способствуют термо-деформационные условия работы медных камер ДСП.

Наличие в меди 0,04 % P и 0,044 % Fe (см. табл. 1) снижает ее теплопроводность [4]. Поскольку торец камеры находится внутри печи, где температура достигает 1600...1800 °C, снижение теплопроводности приводит к перегреву поверхности

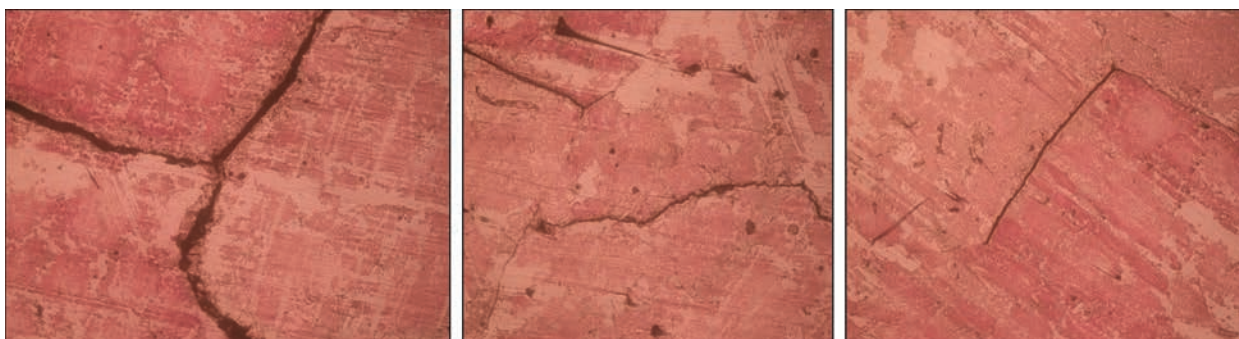


Рис. 4. Внешний вид микротрещин различной формы и размеров в рабочей части камеры (×100)

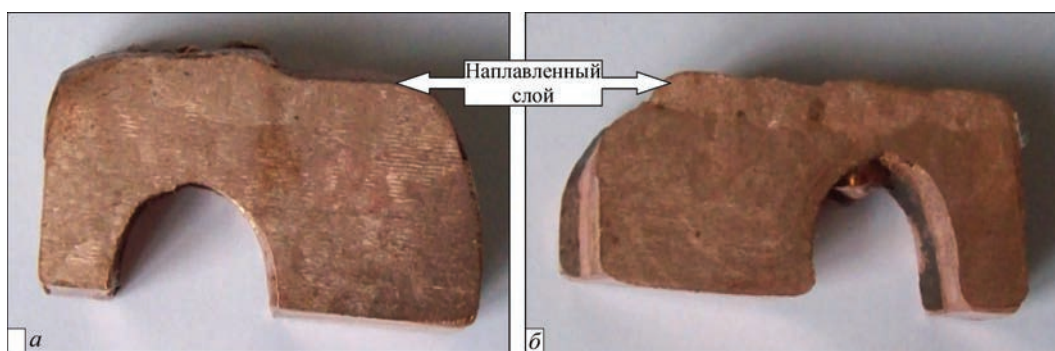


Рис. 5. Внешний вид наплавленных участков: а — гелиево-дуговая наплавка; б — покрытыми электродами

Таблица 3. Режимы наплавки медных камер различными дуговыми способами

Способ наплавки	Диаметр электрода/присадочной проволоки	Ток, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, м/ч
Ручная дуговая	3,0	150...220	23...25	5...8
	4,0	250...300	24...26	5...8
Гелиево-дуговая	3,5	150...350	14...17	2...5

камеры, что ускоряет ее разрушение. Так как при эксплуатации через сопло камеры подается смесь кислорода и природного газа, границы зерен и уже образовавшиеся трещины могут также обогащаться кислородом и водородом. Все это в дальнейшем приводит к межкристаллитной коррозии и разрушению торцевой части камеры, вплоть до появления течей водоохлаждающих каналов.

Известно, что для ремонта медных изделий металлургического оборудования используют различные сварочные технологии: плазменно-дуговые [6], сварку трением с перемешиванием [7], метод электродуговой металлизации [8]. Однако данные технологии требуют специального оборудования [7], используются для восстановления больших площадей [6] и нерациональны при исправлении локальных дефектов, а также применяются для восстановления поверхностных слоев минимальной толщины [8]. Поэтому для разработки технологии ремонта камер в лабораторных условиях ИЭС им. Е.О. Патона использовали наиболее рациональные, на наш взгляд, способы — гелиево-дуговую наплавку вольфрамовым электродом с применением специальной присадочной проволоки Св.ПП-АНМ-1 и наплавку покрытыми электродами марки АНЦ-3М. Опыты проводили на образцах, вырезанных из рабочей части камеры. Поверхность тщательно зачищали абразивным кругом. Перед наплавкой неплавящимся электродом в гелии проводили предварительный подогрев до температуры, равной 0,25...0,50 температуры плавления меди.

Внешний вид макрошлифов опытных наплавки представлен на рис. 5. Применяемые при наплавке режимы приведены в табл. 3.

На макрошлифах дефектов в виде пор, трещин, шлаковых включений не выявлено. Проверка наплавленных образцов «керосиновой пробой» на герметичность показала отсутствие течи в обоих случаях. Однако наплавка покрытыми электродами вызывает определенные трудности при устранении сквозных прожогов и выгоревших участков с толщиной стенок менее 2,0 мм. Большое газовыделение затрудняет визуальный контроль в процессе заварки дефектов. К тому же, поскольку наплавка выполняется в несколько слоев, требуется тщательное удаление шлака перед нанесением следующего слоя.



Рис. 6. Внешний вид восстановленной камеры ДСП

Учитывая эти недостатки, выбрана технология восстановления изношенных медных деталей гелиево-дуговой наплавкой. С помощью разработанной технологии восстановлены герметичность и геометрические размеры медных камер ДСП (рис. 6), которые прошли испытания на герметичность при давлении 10 атм как в лабораторных условиях, так и в заводских перед установкой их на печь.

Проверка эксплуатационных свойств отремонтированных камер в количестве 6 шт. в рабочих условиях сталеплавильной печи свидетельствует о продлении ресурса их работы на 75...85 %. При этом уже имеется опыт повторного восстановления выбракованных камер.

### Выводы

1. Определены основные дефекты на торцевой части медной камеры ДСП после эксплуатации (механические повреждения, локальное выгорание меди, сетка глубоких трещин).

2. Показано, что использование дуговых способов заварки дефектов позволяет восстанавливать герметичность и форму камер ДСП.

3. Эксплуатационная проверка восстановленных камер показала, что по работоспособности они находятся на уровне новых.

### Список литературы

1. Белковский А. Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В. (2003) Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций. *Бюллетень «Черная металлургия»*, 3, 72–88.
2. Massalsky T. V. (1986, 1987) Binary alloy phase diagrams. *American Society for Metals*. Vol. 1–2. Ohio, Metals Park.
3. Илюшенко В.М., Лукьянченко Е.П. (2013) *Сварка и наплавка меди и медных сплавов*. Киев, Международная ассоциация «Сварка».
4. Смирягин А. П., Смирягина Н.А., Белова А.В. (1974) *Промышленные цветные металлы и сплавы*. Москва, Металлургия.

5. Аношин В.А., Илюшенко В.М. (2018) Влияние поверхностно-активных элементов на образование кристаллизационных трещин. *Автоматическая сварка*, 10, 17–26.
6. Кожемякин В.Г., Шаповалов В.А., Бурнашев В.Р. и др. (2015) Восстановление поверхностного слоя медной плиты кристаллизатора МНЛЗ с использованием плазменно-дуговой технологии. *Современная электрометаллургия*, 3, 23–26.
7. Григоренко Г.М., Адеева Л.И., Туник А.Ю. и др. (2015) Использование метода сварки трением с перемешиванием для восстановления изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. *Автоматическая сварка*, 5–6, 60–64.
8. Радюк А.Г., Горбатюк С.М., Герасимова А.А. (2011) Использование метода электродуговой металлизации для восстановления рабочих поверхностей узких стенок толстоственных слябовых кристаллизаторов. *Металлургия*, 6, 54–57.

### References

1. Belkovsky, A.G., Kats, Ya.L., Krasnyansky, M.V. (2003) State-of-the-art and tendencies of development of steel production technology in arc steelmaking furnaces and their structures. *Bulleten Chyorn. Metallurgiya*, 3, 72–88 [in Russian].
2. Massalsky, T.V. (1986, 1987) Binary alloy phase diagrams. *American Society for Metals*, Vol. 1–2. Ohio, Metals Park.
3. Ilyushenko, V.M., Lukyanchenko, E.P. (2013) *Welding and surfacing of copper and copper alloys*. Kiev, IAW [in Russian].
4. Smiryagin, A.P., Smiryagina, N.A., Belova, A.V. (1974) *Commercial nonferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Anoshin, V.A., Ilyushenko, V.M. (2018) Effect of surface-active elements on the formation of solidification cracks. *The Paton Welding J.*, 10, 14–21.
6. Kozhemyakin, V.G., Shapovalov, V.A., Burnashev, V.R., Botvinko, D.V. (2015) Restoration of surface layer of MCCB mould copper plate by using plasma-arc technology. *Sovrem. Elektrometall.*, 3, 23–26 [in Russian].
7. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2015) Application of friction stir welding method for repair and restoration of worn-out copper plates of MCCB moulds. *The Paton Welding J.*, 5–6, 55–58.
8. Radyuk, A.G., Gorbatyuk, S.M., Gerasimova, A.A. (2011) Application of method of electric arc metallizing for restoration of working surfaces of narrow walls of thick-wall slab moulds. *Metallurgiya*, 6, 54–57 [in Russian].

## ВІДНОВЛЕННЯ ТОРЦЕВОЇ ЧАСТИНИ МІДНИХ ГАЗО-КИСНЕВИХ КАМЕР ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

В.М. Ілюшенко<sup>1</sup>, Т.Б. Майданчук<sup>1</sup>, А.М. Бондаренко<sup>1</sup>, Є.П. Лук'яненко<sup>1</sup>, Т.Є. Ударцева<sup>2</sup>, Д.І. Андрійчук<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>НАУ. 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1. E-mail: post@nau.edu.ua  
<sup>3</sup>«МЗ Дніпросталь». 49051, м. Дніпро, вул. Дніпросталівська, 4. E-mail: dmitriy.andreychuk@ips.interpipe.biz

Мідні газокисневі камери, що застосовуються для інтенсифікації процесу плавки металу в електropечях, часто виходять з ладу через надскладні умови експлуатації. Виконано комплекс досліджень деградованого металу мідних камер, що дозволив визначити можливі причини розтріскування міді на торцевій частині деталі. Обрана принципова технологія відновлення зношених мідних деталей гелієво-дуговим наплавленням з використанням спеціального присадкового металопорошкового дроту. Відновлені деталі пройшли лабораторні та заводські випробування. Дана ремонтна технологія забезпечує продовження ресурсу роботи камер дугової сталеплавильної печі на 75...85 %. Бібліогр. 8, табл. 3, рис. 6.

*Ключові слова:* дугова сталеплавильна піч; мідні газо-кисневі камери; дефекти; відновлення; дугове наплавлення; зварювальні матеріали



## RESTORATION OF END PART OF COPPER GAS-OXYGEN CHAMBERS OF ARC STEEL-MELTING FURNACES

V.M. Ilyushenko<sup>1</sup>, T.B. Maidanchuk<sup>1</sup>, A.N. Bondarenko<sup>1</sup>, E.P. Lukianchenko<sup>1</sup>, T.E. Udartseva<sup>2</sup>, D.I. Andreichuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

<sup>2</sup>National Aviation University. 1 Kosmonaut Komarov Prosp., 03058, Kyiv, Ukraine. E-mail: post@nau.edu.ua

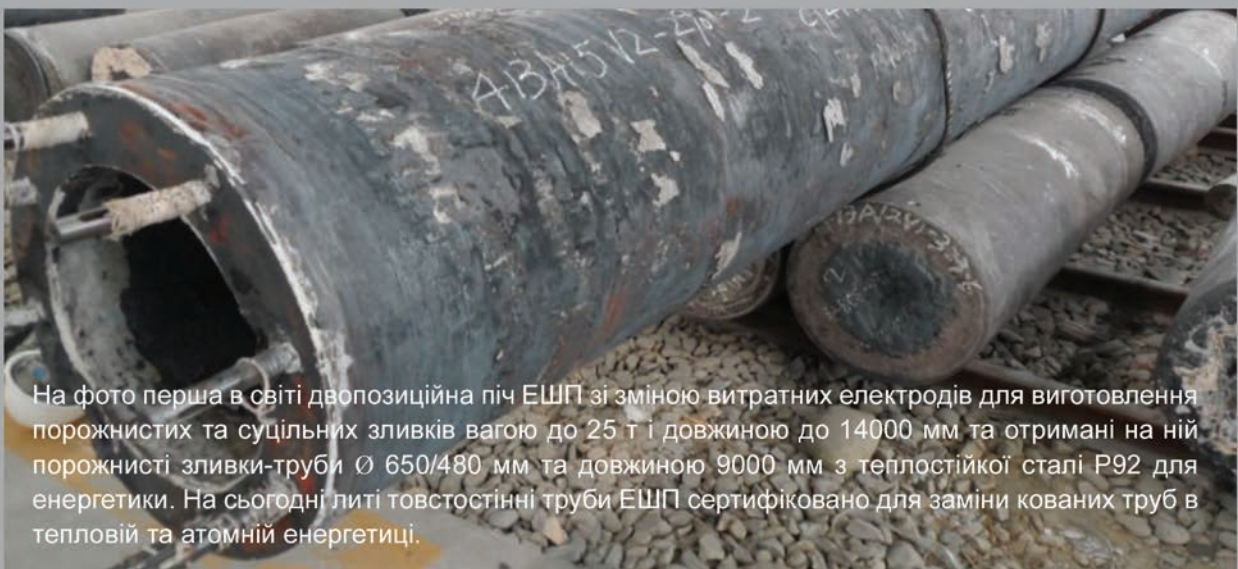
<sup>3</sup>«MZ Dneprostal». 4 Dneprostalevskaya Str., 49051, Dnepr, Ukraine. E-mail: dmitriy.andreychuk@ips.interpipe.biz

The copper gas-oxygen chambers, applied for intensification of the process of metal melting in electric furnaces often fail, because of highly complex operating conditions. A set of investigations of the degraded metal of copper chambers was performed, which allowed determination of the possible causes for copper cracking in the end portion of the part. Basic technology of restoration of worn copper parts by helium-arc surfacing using special metal-cored filler wire was selected. The restored parts have passed laboratory and plants testing. This repair technology ensures extension of the operating life of chambers of arc steel-melting furnace by 75...85 %. Ref. 8, Tabl. 3, 6 Fig.

*Key words:* arc steel-melting furnace; copper gas-oxygen chambers; defects; restoration; arc surfacing; welding consumables

Поступила в редакцію 30.07.2019

## ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕШП ПОРОЖНИСТИХ ТА СУЦІЛЬНИХ ЗЛИВКІВ З ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ



На фото перша в світі двопозиційна піч ЕШП зі зміною витратних електродів для виготовлення порожнистих та суцільних зливок вагою до 25 т і довжиною до 14000 мм та отримані на ній порожнисті зливки-труби  $\varnothing$  650/480 мм та довжиною 9000 мм з теплостійкої сталі Р92 для енергетики. На сьогодні литі товстостінні труби ЕШП сертифіковано для заміни кованих труб в теплової та атомній енергетиці.