

Г. В. Кирик, д-р техн. наук, президент, П. Е. Жарков, канд. техн. наук, академик УТА, генеральный конструктор (концерн «NCSMAS», г. Сумы, Украина); В. Б. Тарельник, д-р техн. наук, профессор, Е. В. Коноплянченко, канд. техн. наук, доцент (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

## Новый способ оребрения труб теплообменных аппаратов компрессорных установок

Представлен новый способ оребрения труб теплообменных аппаратов, включающий электроэрозионное легирование наружной поверхности трубы, отличающийся тем, что легирование проводится полностью по всей наружной поверхности трубы или частично (в виде колец) медным, бронзовым или стальным электродом при энергиях разряда 0,01–0,5 Дж на воздухе и 0,01–6,8 Дж в защитной среде аргона или графитовым электродом при энергиях разряда 0,01–6,8 Дж.

**Ключевые слова:** электроэрозионное легирование, теплообменный аппарат, поверхностный слой, качество, шероховатость.

Представлений новий спосіб оребрення труб теплообмінних апаратів, що включає електроерозійне легування зовнішньої поверхні труби, яке відрізняється тим, що легування проводиться повністю по всій зовнішній поверхні труби або частково (у вигляді кілець) мідним, бронзовим або сталевим електродом за використанням енергій розряду 0,01–0,5 Дж на повітрі та 0,01–6,8 Дж в захисному середовищі аргону або графітовим електродом – енергія розряду 0,01–6,8 Дж.

**Ключові слова:** електроерозійне легування, теплообмінний апарат, поверхневий шар, якість, шорсткість.

A new method heat exchangers tube finned, included tube outer surface electroerosive alloying, characterized in that the alloying is conducted entirely over the entire outer surface of the tube or in part (as a ring) by copper, bronze or steel electrode at the discharge energy of 0.01 to 0.5 J. on air and of 0.01 to 6.8 J. in a protective atmosphere of argon or graphite electrode during discharge energy 0.01–6.8 J.

**Keywords:** electroerosive alloying, heat exchanger, the surface layer, the quality, the roughness.

### Введение

Необходимость передачи тепла от одного теплоносителя к другому возникает во многих отраслях техники: в энергетике, в химической, металлургической, нефтяной, пищевой и других отраслях промышленности.

В современных условиях работы промышленности первостепенным является вопрос энергосбережения. В числе основных направлений в энергосбережении снижение стоимости сжатого воздуха.

Работоспособность, надежность и экономичность большинства компрессорных установок существенно связана с отводом теплоты от сжимаемых сред. Совершенство системы охлаждения во многом определяет технический уровень компрессорной установки в целом. Развитие современных технологий обработки и соединения металлов и композиционных материалов позволяет создавать компактные высокоэффективные и надежные

конструкции теплообменных аппаратов (ТА) для компрессорных машин [1–4].

Конструкции ТА, эффективность теплообмена в них, способы его интенсификации и подходы к моделированию теплообменных процессов могут быть различными. При этом основной задачей усовершенствования процессов должно быть повышение надежности работы ТА.

Повышение эффективности работы и качества ТА, как и снижение их себестоимости является актуальной научно-прикладной задачей.

### 1 Анализ основных достижений и публикаций

Известны кожухотрубчатые водяные и воздушные трубчатые ТА компрессорных установок в которых для увеличения эффективности теплообмена применяют оребрение наружной поверхности труб. Оребрение поверхности

гладкой трубы позволяет увеличить площадь теплообмена в 7–20 раз в зависимости от площади оребрения. Известны различные способы оребрения наружной поверхности трубы [5].

Накатка ребер в стенке монослойной или биметаллической трубы является наиболее производительным способом оребрения [6]. Навивка на трубу с одновременной приваркой с помощью радиочастотной контактной сварки металлической ленты также является производительным процессом оребрения и, кроме того, позволяет формировать оребрение с разрезами и отгибами на ребрах. Другие способы оребрения требуют применения пайки для образования металлической связи между трубой и оребрением.

Оребрение, образованное накаткой или приваркой гладкой ленты, формирует ламинарные пограничные слои охлаждающего воздуха, что снижает коэффициент теплообмена. Разрезы и отгибы

на ребрах разрушают пограничный слой и повышают коэффициент теплоотдачи на 20–25 %. Однако такое оребрение эффективно работает при чистом охлаждающем воздухе. При наличии паров масла и запыленности разрезы зарастают и эффективность теплообменника значительно снижается. Следует отметить как недостатком перечисленных способов оребрения является то, что они применимы для труб диаметром более 16 мм. Это обстоятельство препятствует созданию малогабаритных компактных трубчатых теплообменников из труб малого диаметра.

Наиболее близким к предлагаемому способу является способ оребрения труб проволоочной спиралью. В данном случае поток охлаждающего воздуха, перемещаясь в лабиринте проволоочного оребрения, многократно разрывается, турбулизируется, что значительно интенсифицирует теплообмен. Коэффициент теплопередачи зависит от многих факторов: материала и диаметра проволоки, диаметра проволоочной спирали, шага навивки спирали на трубу. Это дает возможность рационального конструирования оребрения в зависимости от назначения теплообменника.

Недостатками такого способа оребрения труб ТА являются: большие энергозатраты; высокая стоимость; технологическая сложность изготовления; низкая технологичность конструкции; работоспособность и долговечность спирального проволоочного оребрения определяется надежностью его закрепления на поверхности трубы; необходимость изменения состава припоя для соединения проволоочного спирального оребрения со стальными трубами в зависимости от материала проволоки и трубы, а также условий работы ТА; способ не применяется для труб диаметром меньше 6 мм.

Известен способ электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), все более широко применяющийся в промышленности для повышения износостойкости и твердости поверхности деталей машин, в том числе и работающих в условиях повышенных температур и агрессив-

ных сред, для повышения жаро- и коррозионной стойкости, а также для восстановления изношенных поверхностей деталей машин при ремонте и др.

ЭЭЛ поверхности это процесс перенесения материала на обрабатываемую поверхность искровым электрическим разрядом. Метод имеет ряд специфических особенностей:

- материал анода (легирующий материал) может образовывать на поверхности катода (легируемая поверхность) чрезвычайно прочно сцепленный с поверхностью слой покрытия. В этом случае не только отсутствует граница раздела между нанесенным материалом и металлом основы, но происходит даже диффузия элементов анода в катод;

- процесс легирования может происходить так, что материал анода не образует покрытия на поверхности катода, а диффузионно обогащает эту поверхность своими составными элементами;

- легирование можно осуществлять в строго указанных местах (радиусом от долей миллиметра и более), не защищая при этом остальную поверхность детали;

- технология электроэрозионного легирования металлических поверхностей очень проста, а необходимая аппаратура малогабаритна и транспортабельна [8].

Характерной особенностью ЭЭЛ является увеличение шероховатости поверхности обрабатываемого изделия. Причем, чем больше энергия разряда при ЭЭЛ, тем больше параметр шероховатости.

Следует отметить, что с ростом шероховатости поверхности увеличивается площадь поверхности изделия [9], что приводит к увеличению площади теплообмена.

Согласно [10] варьируя режимами легирования, можно в широких пределах изменять шероховатость поверхности ( $Rz$ ) от 1 до 200 мкм и более, предлагается применять этот метод для оребрения труб ТА.

Таким образом, целью данной работы является повышение качества теплообменных аппаратов за счет совершенствования технологии оребрения труб методом ЭЭЛ.

## 2 Методика и результаты исследований

Для простоты восприятия процесса проиллюстрируем изменение площади поверхности теплообмена, в зависимости от шероховатости, на примере гармонической функции

$$f(x) = \frac{Ra}{2} \sin(x), \text{ где высота пи}$$

ков и впадин микронеровностей соответствует шероховатости  $Ra$  в мкм. На рис. 1 представлена зависимость изменения длины дуги

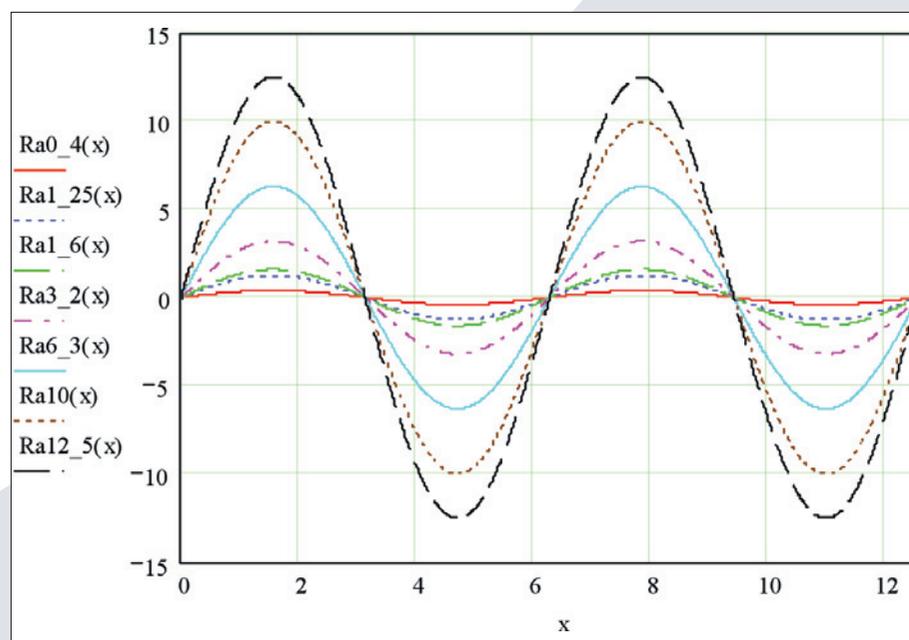


Рис. 1. Схема увеличения длины кривой в зависимости от увеличения шероховатости поверхности

кривой в диапазоне шероховатости  $Ra: 0,4-12,5 \text{ мкм}$ .

В этом случае аналитическая зависимость, определяющая длину дуги кривой на участке  $l$  записывается в виде

$$\int_0^l \sqrt{1 + \left[ \frac{d}{dx} \left( \frac{Ra}{2} \sin(x) \right) \right]^2} dx. \quad (1)$$

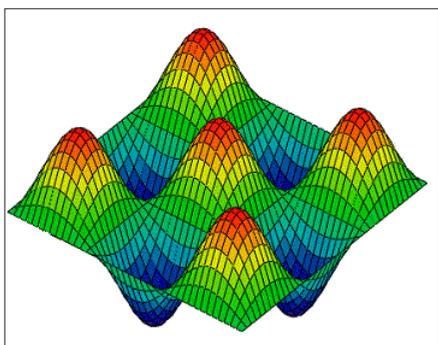
Соответственно площадь поверхности теплообмена (рис. 2) определяется как произведение длин дуг граничных кривых на участке  $l \times l$ :

$$\int_0^l \sqrt{1 + \left[ \frac{d}{dx} \left( \frac{Ra}{2} \sin(x) \right) \right]^2} dx \times \int_0^l \sqrt{1 + \left[ \frac{d}{dy} \left( \frac{Ra}{2} \sin(y) \right) \right]^2} dy. \quad (2)$$

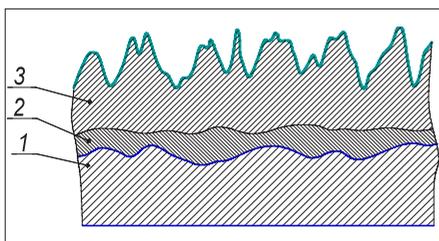
Специфические особенности метода ЭЭЛ позволяют для достижения поставленной цели использовать различные варианты.

Первый вариант (рис. 3).

На поверхность трубы (1) методом ЭЭЛ, наносится сплошной слой



**Рис. 2. Схема определения площади поверхности теплообмена в зависимости от ее шероховатости**



**Рис. 3. Структура поверхностного слоя трубы после ЭЭЛ сплошным слоем металлическим электродом**

покрытия из необходимого металла (3). При этом между нанесенным металлом и деталью образуется переходной слой (2), представляющий собой взаимное диффузионное проникновение элементов анода (легирующего электрода) и катода (трубы). Покрытия можно наносить варьируя энергией разряда в диапазоне  $0,036-6,8 \text{ Дж}$ . С ростом энергии разряда увеличивается толщина наносимого слоя покрытия и шероховатость поверхности, при этом, толщина слоя может изменяться, в зависимости от характера взаимодействия анода и катода (установки с ручным вибратором, типа «Элитрон 52-А» и механизированные установки с многоэлектродными головками, типа «Элитрон-347» или «ЭИЛ-9»), в первом случае от  $0,01$  до  $0,25 \text{ мм}$  и во втором случае от  $0,05$  до  $2,0 \text{ мм}$ , а высота микронеровностей ( $Rz$ ) при этом изменяется, соответственно, от  $8,5$  до  $155,8 \text{ мкм}$  и от  $20$  до  $200 \text{ мкм}$ .

Согласно [11], благодаря возможности нанесения методом ЭЭЛ

покрытия методом ЭЭЛ. В качестве материала анода использовали медь и бронзу марки Бр010Ц1,5Н.

ЭЭЛ проводили на установках с ручным вибратором моделей «УИЛВ-8» и «Элитрон-52А», а также механизированной установке модели «УИЛ-9».

Ниже в табл. 1 приведены режимы работы установки электроэрозионного легирования «УИЛВ-8» и соответствующие им толщина слоя и высота микронеровностей  $Rz$  [12], а также коэффициент увеличения площади поверхности  $k$  при легировании медью и бронзой образцов из Стали 20 с исходной шероховатостью поверхности  $Rz = 1 \text{ мкм}$ .

Следует отметить, что начиная с 15 режима, когда энергия разряда составляет  $0,56 \text{ Дж}$ , электроды как из меди, так и бронзы, начинают более интенсивно окисляться, что приводит к снижению качества обрабатываемой поверхности.

Повысить качество формируемых слоев, при использовании

**Таблица 1. Электроэрозионное легирование Стали 20 электродами из меди и бронзы на установке «УИЛВ-8»**

№ режима	Энергия разряда, Дж	Толщина слоя, мм		Высота микронеровностей ( $Rz$ ), мм		Коэффициент увеличения площади поверхности ( $k$ )	
		Медь	Бронза	Медь	Бронза	Медь	Бронза
1	0,01	0,01	0,01	2	3	1,3	1,8
3	0,02	0,015	0,02	3	4	1,8	2,5
6	0,03	0,02	0,03	5	7	3,4	5,7
8	0,04	0,025	0,04	8	10	7,1	10,4
9	0,13	0,035	0,05	10	12	10,4	14,5
11	0,28	0,05	0,07	13	15	16,8	21,9
12	0,35	0,07	0,08	15	17	21,9	27,8
13	0,42	0,09	0,11	16	19	24,7	34,3
14	0,49	0,11	0,13	17	21	27,8	41,6
15	0,56	0,13	0,15	23	27	49,7	67,9
16	0,63	0,14	0,17	27	30	67,9	83,5

покрытия с использованием большой гаммы материалов (возможно применение любых токопроводящих материалов), можно в широких пределах изменять механические, термические, электрические и другие свойства легируемых поверхностей труб.

Для проведения экспериментальной проверки полученных данных были выбраны образцы из Стали 20, на которые наносились

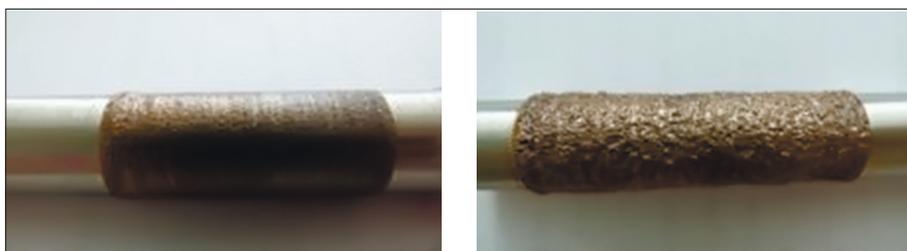
больших энергий разряда, можно путем применения защитной среды аргона [13].

Ниже в табл. 2 приведены данные по шероховатости и толщине покрытий из меди и бронзы в зависимости от энергии разряда, полученные при ЭЭЛ Стали 20 на установке модели «Элитрон-52А» в защитной среде аргона.

ДюрOMETрический анализ показывает, что при легировании

Таблица 2. Электроэрозионное легирование Стали 20 электродами из меди и бронзы на установке модели «Элитрон-52А» в защитной среде аргона

Энергия разряда, Дж	Толщина слоя, мм		Высота микронеровностей ( $Rz$ ), мм		Коэффициент увеличения площади поверхности ( $k$ )	
	Медь	Бронза	Медь	Бронза	Медь	Бронза
0,9	0,15	0,18	16	18	24,7	31
2,83	0,17	0,35	23	25	49,7	58,4
3,4	0,21	0,53	27	31	67,9	89,1
6,8	0,23	1,5	39	67	140	410



а) б)

Рис. 4. Участки трубы с покрытиями из бронзы, нанесенными на механизированной установке модели «УИЛ-9»: а) энергией разряда  $W_p = 1,41$  Дж; б) энергией разряда  $W_p = 2,83$  Дж

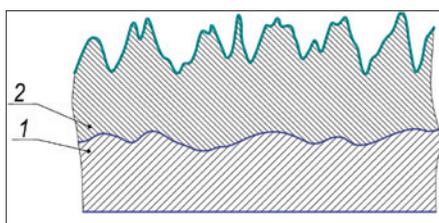


Рис. 5. Структура поверхностного слоя трубы после ЭЭЛ сплошным слоем графитовым электродом

Стали 20 медью и бронзой, как на воздухе, так и в среде аргона, микротвердость на поверхности слоя составляет соответственно 850–900 МПа и 1050–1150 МПа. По мере углубления она плавно увеличивается до микротвердости зоны термического влияния (2500–3000 МПа) и затем переходит в микротвердость основного металла 1750–1800 МПа. Толщина зоны термического влияния зависит от режима легирования и составляет, например, для энергии разряда 0,56 Дж на воздухе 50 мкм, а в среде аргона 40 мкм [14].

На рис. 4 изображены участки трубы диаметром 10 мм из Стали 20 с покрытиями из бронзы марки БрО10Ц1,5Н, нанесенными на механизированной установке модели «УИЛ-9» с энергией разряда  $W_p = 1,41$  Дж (а) и  $W_p = 2,83$  Дж (б).

#### Второй вариант (рис. 5).

Как отмечалось выше метод ЭЭЛ имеет ряд специфических особенностей, одной из которых является то, что процесс легирования может происходить без переноса материала анода на поверхность катода. При этом происходит диффузионное насыщение поверхности детали составными элементами (элементом) анода, например, при ЭЭЛ графитовым электродом.

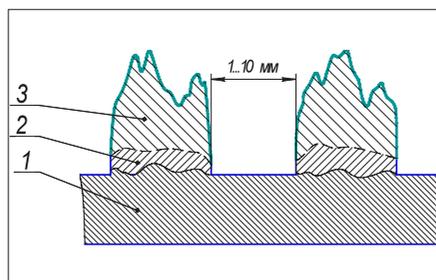


Рис. 6. Структура поверхностного слоя трубы после ЭЭЛ отдельными участками в виде колец (1, 2, 3 – см. рис. 5)

Известен способ цементации стальных деталей методом ЭЭЛ, когда анодом является графит. Метод имеет ряд достоинств, основными из которых являются:

- достижение 100 % сплошности упрочнения поверхностного слоя;

- повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов;
- легирование можно осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали;
- отсутствие объемного нагрева детали и связанных с этим приводок и короблений;
- простота применения технологии;
- гибкая привязка к имеющемуся оборудованию;
- процесс упрочнения не требует специальной подготовки и высокой квалификации рабочего.

При цементации стальных деталей методом ЭЭЛ с увеличением энергии разряда и времени легирования толщина упрочненного слоя увеличивается. При этом возрастает и шероховатость поверхности. Так при ЭЭЛ углеродом среднеуглеродистой легированной Стали 40Х ( $Ra = 0,5$  мкм) с производительностью 5 мин/см<sup>2</sup> при энергии разряда 6,8 Дж толщина слоя повышенной твердости составляет более 1,15 мм. Шероховатость поверхности при этом соответствует  $Ra = 11,7–14,0$  мкм [15].

На рис. 6 схематично изображена структура поверхностного слоя трубы, обработанного методом ЭЭЛ графитовым электродом.

Экспериментальная проверка проводилась путем исследования поверхностных слоев, сформированных в результате ЭЭЛ углеродом (графитовым электродом), хромоникелевой коррозионной стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т. Результаты исследований приведены в табл. 3. Для сравнения в таблице приведены результаты шероховатости поверхности после легирования Стали 12Х18Н10Т электродом из твердого сплава марки Т15К6.

Таблица 3. Результаты исследования поверхностного слоя Стали 12Х18Н10Т после ЭЭЛ на установке марки «Элитрон-52А»

	Энергия разряда, Дж							
	0,036	0,1	0,31	0,5	1,41	2,83	3,4	6,8
Производительность ЕЕЛ, 1 мин/см <sup>2</sup>								
Толщина слоя при ЭЭЛ графитом, мкм	5	12	20	30	55	75	80	90
Зона повышенной твердости* при ЭЭЛ графитом, МПа	3000**– 8000***	3000–9000	3000–9000	3000–8000	3000–9000	5250–8000	4600–9000	3300–8000
Ra при ЭЭЛ графитом, мкм	0,8	0,8	0,8	0,8–0,9	0,8–0,9	2,5–3,5	8,3–8,5	11,9–14
Ra при ЭЭЛ Т15К6, мкм	2,0	2,6	3,0	6,3	6,3–7,2	10,0	12,5	25
Производительность ЕЕЛ, 5 мин/см <sup>2</sup>								
Толщина слоя при ЭЭЛ графитом, мкм	10	15	25	35	56	80	100	315
Зона повышенной твердости* при ЭЭЛ графитом, МПа	3000–9000	3000–10000	3000–10000	3000–9000	2900–11000	4000–11500	3500–9000	4000–10000
Ra при ЭЭЛ графитом, мкм	1,0	1,2	1,2	1,0–1,2	1,6–2,0	2,9–3,7	5,3–,5	11,7–14
Ra при ЭЭЛ Т15К6, мкм	3,2	3,2	3,2–6,3	6,3	6,3–8,2	10,0–12,5	12,5–25	30–50

\* Зона повышенной твердости – поверхностный слой детали, которая имеет максимальную микротвердость на поверхности и снижается по мере углубления к микротвердости основы металла.

\*\* Минимальная твердость в нижнем участке слоя.

\*\*\* Максимальная твердость на поверхности слоя.

### Третий вариант (рис. 6).

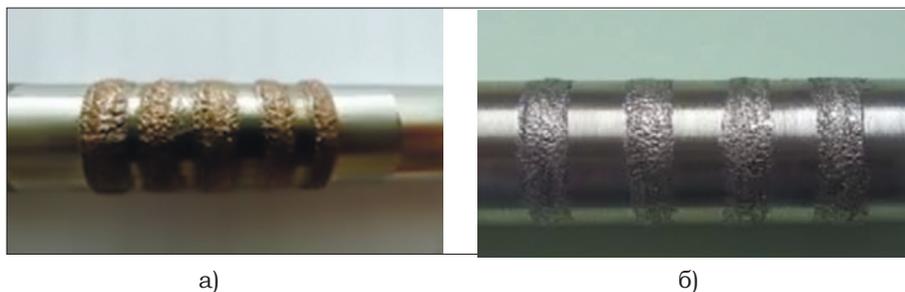
Специфической особенностью метода ЭЭЛ является и то, что легирование можно осуществлять в строго указанных местах не защищая при этом другие участки поверхности от воздействия процесса. На рис. 6 схематично изображена структура поверхностного слоя трубы, обработанного методом ЭЭЛ с нанесенным покрытием в виде отдельных колец. При этом толщина нанесенного слоя, в зависимости от материала анода и способа легирования, может достигать 2-х и более мм. Ширина колец и расстояний между ними может изменяться, в зависимости от технологической, конструкционной и экономической необходимости от 1 до 10 мм и более. На рис. 7 изображены участки трубы диаметром 10 мм из Стали 20 с покрытиями из бронзы марки БрО10Ц1,5Н и Стали 12Х18Н10, нанесенными в виде колец на механизированной установке модели «УИЛ-9».

### Выводы

Применение нового способа оребрения труб ТА методом ЭЭЛ имеет ряд преимуществ перед существующими. Основные из них: небольшие энергозатраты; невысокая стоимость; простота изготовления; высокая технологичность конструкции; экономия цветного и высоколегированного металла; работоспособность и долговечность оребрения не зависит от надежности его закрепления на поверхности трубы; отсутствие необходимости изменения состава припоя для соединения проволочного спирального оребрения со стальными трубами в зависимости от материала проволоки и трубы, а также условий работы ТА; способ можно применять для труб диаметром от 1 мм и выше.

### Список литературы:

1. Андреев В. А. Теплообменные аппараты для вязких жидкостей. Основы расчета и проектирования / В. А. Андреев. – Л.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Антуфьев В. М. Сравнительные исследования теплоот-



**Рис. 7. Покрытия трубы из стали 20:** а) материал колец бронза толщиной 2,0 мм и энергия разряда  $W_p = 1,41$  Дж; б) материал колец Сталь 12Х18Н10 толщиной 1,0 мм и энергия разряда  $W_p = 2,83$

дачи и сопротивления ребристых поверхностей / В. М. Антуфьев // Энергомашиностроение. – 1961. – № 2. – С. 9–11.

3. Аснис А. Е. Повышение прочности сварных конструкций / А. Е. Аснис, Г. А. Иващенко. – К.: Наукова думка, 1985. – 256 с.

4. Аснис А. Е. Повышение прочности сварных конструкций / Аснис А. Е., Иващенко Г. А., Андерсон Я. Э. // Автоматическая сварка. – 1982. – № 4. – С. 48–51.

5. Радзиевский В. Н. Теплообменные аппараты компрессорных установок. Исследования, конструкция, технология / [Радзиевский В. Н., Кирик Г. В., Лавренко А. М., Котов А. М.]. – Сумы: Издательство «Слобожаничина», 2007. – 318 с.

6. Зубков Н. Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев / Н. Н. Зубков // Новости снабжения. – 2005. – № 4. – С. 23–25.

7. Радзиевский В. Н. Особенности конструкции и технологии оребрения труб проволочной спиралью для воздушных теплообменников / [Радзиевский В. Н., Ткаченко Г. Г., Гарцунов Ю. Ф., Котов А. М.] // Труды XIII Междунар. науч.-технич. конф. по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке». – Сумы, 2004. – С. 126–133.

8. Лазаренко Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко. – М.: Машиностроение, 1976. – 46 с.

9. Иценко А. А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами / А. А. Иценко. – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 250 с.

10. Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей. Пат. 104664. Україна. МПК В 23Н 9/00 / [Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Иценко А. О. и др.]. Заявл. 14.08.12; Опубл. 25.02.2014. Бюл. № 4. – 5 с.

11. Гитлевич А. Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / [Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревутский В. М.]. – Кишинев: Штинца, 1985. – 196 с.

12. Коноплянченко Е. В. Обеспечение надежности эксплуатации роторных машин совершенствованием технологии изготовления их подшипниковых узлов / Коноплянченко Е. В., Яременко В. П., Тарельник Н. В. // Вісник Харківського національного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – 2012. – Випуск 151. – С. 213–221.

13. Лазаренко Н. И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде / Н. И. Лазаренко // В кн. Электроискровая обработка металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – Вып. 1. – С. 70–94.

14. Тарельник В. Б. Повышение качества подшипников скольжения: монография / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Антошевский Б. – Сумы: Издательство «МакДен», 2006. – 160 с.

15. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Беловус А. В.; Заявл. 05.10.2006; Опубл. 10.04. 2008, Бюл. № 31. – 3 с.