

УДК 669.018.54

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

МИЩЕНКО В.Г.<sup>1\*</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ТУТЫК В.А.<sup>2\*</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ГРЕЧКА А.В.<sup>3\*</sup>, *асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра прикладной физики, Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, 69600, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 228-75-31, e-mail: [mishchen@vandex.ru](mailto:mishchen@vandex.ru) ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

<sup>2\*</sup> Кафедра физики, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38(0562) 47-44-74, e-mail: [tutkva@ua.fm](mailto:tutkva@ua.fm) ORCID ID: 0000-0001-9548-7621

<sup>3\*</sup> Кафедра прикладной физики, Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, 69600, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 228-75-31, e-mail: [aleksandra-grechka@vandex.ua](mailto:aleksandra-grechka@vandex.ua) ORCID ID: 0000-0002-9220-1437

**Аннотация. Цель.** Для повышения долговечности и безотказной работы электрических печей сопротивления требуется обеспечить надежную работу его наиболее важного элемента – нагревателя. В качестве материала для элементов сопротивления используются жаростойкие стали и сплавы, широкое применение среди них находят железохромалюминиевые сплавы: фехрالی и хромали. Для повышения срока службы нагревателей необходимо повышение качества поверхности нагревателей и, следовательно, технологических и служебных свойств. **Методика.** В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на процесс образования плотных окисных пленок, проанализированы дефекты, которые наблюдаются на поверхности проволоки, применяемой для изготовления нагревательных элементов электрических печей сопротивления. Показано, что обеспечение образования плотного, прочно сцепленного слоя защитных окисных пленок типа шпинелей  $FeO \cdot (Al_2O_3, Cr_2O_3)$  на поверхности металла, играет большую роль в повышении коррозионной стойкости. **Результаты.** При исследовании поверхностного слоя проволоки марок X15Ю5, X20Н80 установлено, что на поверхности металла присутствуют дефекты, образовавшиеся в процессе производства проволоки в заводских условиях. В статье проводится сравнительный анализ поверхности проволоки из стали 03Х23Ю5Т до обработки пароплазменным разрядом и после обработки в течение 30 секунд и 6 минут. **Научная новизна.** Исследователями широко изучалось влияние реактивных легирующих элементов Ca, Ce, La, Y, на свойства защитных окисных пленок: адгезионную способность оксидного слоя, его пластичность и скорость роста. Однако взаимосвязь между качеством поверхности проволоки для нагревателей и технологическими, эксплуатационными свойствами не была установлена. **Практическая значимость.** Срок службы печи до капитального ремонта напрямую связан со сроком службы нагревательных элементов, следовательно, увеличение срока службы нагревателя является важной задачей, как с технической, так и с экономической точки зрения. Выявлена и обоснована необходимость использования совместного комплексного модифицирование с дополнительной обработкой ППП для повышения технологических и эксплуатационных свойств сплавов Fe-Cr-Al.

*Ключевые слова:* сплавы на основе Fe-Cr-Al; окисная пленка; нагреватель; жаростойкость; долговечность

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ НАГРІВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

МИЩЕНКО В.Г.<sup>1\*</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ТУТИК В.А.<sup>2\*</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ГРЕЧКА А.В.<sup>3\*</sup>, *асп.*

<sup>1\*</sup> Кафедра прикладної фізики, Запорізького національного університету, вул. Жуковського, 66, 69600, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 228-75-31, e-mail: [mishchen@vandex.ru](mailto:mishchen@vandex.ru) ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

<sup>2\*</sup> Кафедра фізики, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38(0562) 47-44-74, e-mail: [tutkva@ua.fm](mailto:tutkva@ua.fm) ORCID ID: 0000-0001-9548-7621

<sup>3\*</sup> Кафедра прикладної фізики, Запорізького національного університету, вул. Жуковського, 66, 69600, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 228-75-31, e-mail: [aleksandra-grechka@vandex.ua](mailto:aleksandra-grechka@vandex.ua) ORCID ID: 0000-0002-9220-1437

**Анотація. Мета.** Для підвищення довговічності і безвідмовної роботи електричних печей опору потрібно забезпечити надійну роботу його найбільш важливого елемента – нагрівача. В якості матеріалу для елементів опору використовуються жаростійкі сталі і сплави, широке застосування серед них знаходять залізохромалюмінієві сплави: фехралі і хромалі. Для підвищення терміну служби нагрівачів необхідно підвищення якості поверхні нагрівачів і, отже, технологічних і службових властивостей. **Методика.** У статті розглянуті основні фактори, що впливають на процес утворення щільних окисних плівок, проаналізовано дефекти, які спостерігаються на поверхні дроту, що застосовується для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей опору. Показано, що забезпечення утворення щільного, міцно зчепленого шару захисних

окисних плівок типу шпінелей  $\text{FeO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3)$  на поверхні металу, грає велику роль у підвищенні корозійної стійкості. **Результати.** При дослідженні поверхневого шару дроту марок X15Ю5, X20H80 встановлено, що на поверхні металу присутні дефекти, що утворилися в процесі виробництва дроту в заводських умовах. У статті проводиться порівняльний аналіз поверхні дроту зі сталі 03X23Ю5Т до обробки пароплазмовим розрядом і після обробки протягом 30 секунд і 6 хвилин. **Наукова новизна.** Науковцями широко вивчався вплив реактивних легуючих елементів Ca, Ce, La, Y, на властивості захисних оксидних плівок: адгезійну здатність оксидного шару, його пластичність і швидкість росту. Однак взаємозв'язок між якістю поверхні дроту для нагрівачів і технологічними, експлуатаційними властивостями не був встановлений. **Практична значимість.** Термін служби печі до капітального ремонту безпосередньо пов'язаний з терміном служби нагрівальних елементів, отже, збільшення терміну служби нагрівача є важливим завданням, як з технічної, так і з економічної точки зору. Виявлено та обґрунтовано необхідність використання спільного комплексне модифікування з додатковою обробкою ІІІР для підвищення технологічних та експлуатаційних властивостей сплавів Fe-Cr-Al.

*Ключеві слова:* сплави на основі Fe-Cr-Al; окисна плівка; нагрівач; жаростійкість; довговічність

## THE EFFECT OF THE SURFACE QUALITY OF THE MATERIAL ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF THE HEATING ELEMENTS

MISHCHENKO V.G.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
TUTYK V.A.<sup>2\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
GRECHKA A.V.<sup>3\*</sup>, *postgraduate.*

<sup>1\*</sup> Department of applied physics, Zaporizhia National University, Zhukovskogo str., 66, 69600, Zaporizhia, Ukraine, тел. +38 (061) 228-75-31, e-mail: [mishchen@vandex.ru](mailto:mishchen@vandex.ru) ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

<sup>2\*</sup> Department of physics, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina avenue, 4, 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine, тел. +38(0562) 47-44-74, e-mail: [tutkva@ua.fm](mailto:tutkva@ua.fm) ORCID ID: 0000-0001-9548-7621

<sup>3\*</sup> Department of applied physics, Zaporizhia National University, Zhukovskogo str., 66, 69600, Zaporizhia, Ukraine, тел. +38 (061) 228-75-3, e-mail: [aleksandra-grechka@vandex.ua](mailto:aleksandra-grechka@vandex.ua) ORCID ID: 0000-0002-9220-1437

**Abstract. Purpose.** To improve durability and trouble-free operation of electric furnaces it is required to ensure reliable operation of their most important element – heater. As a material for heating elements heat-resistant steels and alloys shall be used. Extensive application among them find Fe-Cr-Al alloys. To increase durability of the heaters it is required to improve surface quality of the heaters and, consequently, technological and service properties. **Methodology.** The article describes the main factors which affect the process of formation of dense oxide films, analyzed defects that are observed on the surface of the wire, used for manufacture of heating elements of electric resistance furnaces. It shows that ensuring formation of dense and adherent scale of protective oxide films such as spinels  $\text{FeO}(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3)$  on metal surface, plays an important role in improvement of corrosion resistance. **Findings.** During the study of the surface layer of wires X15Ю5, X20H80 it was found that on the surface of the metal there were defects formed during the factory production of the wires. The article presents a comparative analysis of the surface of steel wire 03X23Ю5Т before vapor-plasma discharge treatment and after the treatment which lasted for 30 seconds and 6 minutes. **Originality.** Researchers have extensively studied the effect of reactive alloying elements Ca, Ce, La, Y, on the properties of protective oxide films: adhesive capacity of the oxide layer, its plasticity and growth rate. However, the relation between quality of the surface of the wire for the heaters and technological, operational properties has not been established. **Practical significance.** Service life of a furnace before the overhaul is directly connected with the service life of heating elements. Consequently, increasing the service life of the heater is an important issue, both from technical and economical points of view. Necessity for use of joint integrated modification with additional vapor-plasma discharge treatment for improvement of technological and operational properties of Fe-Cr-Al alloys is identified and justified.

*Key words:* Fe-Cr-Al alloys; oxide film; a heater; heat resistance; durability

### Введение

Электрические печи сопротивления косвенного действия являются одними из самых распространенных печей применяемых в металлургии, машиностроении и химической промышленности. Срок службы печи до капитального ремонта напрямую связан со сроком службы нагревательных элементов, следовательно, увеличение срока службы нагревателя является важной задачей, как с технической, так и с экономической точки зрения. Одним из основных условий, обеспечивающих продолжительность службы нагревателя, является температурный цикл,

как комбинация времени нагрева печи, выдержки при заданной температуре, охлаждения и нового нагрева. Поэтому при проектировании электрических печей сопротивления основным является вопрос правильного выбора материала для нагревательных элементов, который обеспечивал бы заданную температуру в конкретных условиях работы печи. [4]

### Цель

Целью работы является изучение возможных способов повышения качества поверхности нагревателей системы Fe-Cr-Al и, следовательно, технологических и служебных свойств.

### Методика и материалы исследования

Для печей работающих при температуре близкой 1400°С применяются сплавы на основе железо-хром-алюминия: фехрали и хромали. Высокая жаростойкость этих сплавов обусловлена образованием на поверхности металла защитных окисных пленок типа шпинелей  $FeO \cdot (Al_2O_3, Cr_2O_3)$ , которые обладают низкой диффузионной проницаемостью, хорошими защитными свойствами и способностью предотвращать дальнейшее окисление металла. Но следует отметить, что высокая жаростойкость может быть достигнута лишь при условии соблюдения сплошности, т.е. в том случае, когда вся поверхность сплава покрыта защитной пленкой. Основными факторами, влияющими на процесс образования плотных окисных пленок, являются качество поверхности и свойства окалины. Под качеством поверхности следует понимать наличие дефектов, неметаллических включений, некачественное удаление технологических смазок и др., а также шероховатость поверхности нагревателя. Наличие дефектов и неметаллических включений на поверхности нагревателей приводит к электрохимической неоднородности металла, и интенсификации процессов возникновения и протекания локальной коррозии. Часто нагреватель выходит из строя из-за местных перегревов задолго до достижения предельного срока эксплуатации из-за состояния материала. В процессе эксплуатации физико-химические свойства материала нагревателя претерпевают существенные изменения вызванные окислением: обеднение сплава алюминием, вследствие этого со временем в составе окалины увеличивается количество хрома и железа, что приводит к высокотемпературной язвенной коррозии, которая представляет собой локальное интенсивное окисление металла с образованием преимущественно окислов железа  $Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$ . [1, 5, 6, 9]

Авторами [10] показано, что при эксплуатации стали 03X22Ю5ФБч возникали случаи быстрого окисления нагревателей и выхода их из строя (рис. 1). При наличии NaCl на поверхности нагревателей из сплавов системы Fe–Cr–Al ионы хлора, находясь на границе металл – окалина, способствуют интенсивному продвижению фронта окисления вглубь проволоки. При этом происходит локальное перегревание проволоки, процесс окисления интенсифицируется, прочность стали снижается и происходит коробление нагревателя и, как следствие, преждевременный выход нагревателя из строя. При этом состояние поверхности остальной части оставалось хорошим. За 500 часов эксплуатации диаметр проволоки практически не изменился.

Зависимость коррозионной стойкости металла от шероховатости поверхностей обусловлена тем, что у шероховатых поверхностей большая площадь соприкосновения с корродирующей средой. Кроме того, при остроочерченных профилях дна впадин между микронеровностями, чем выше высота последних, тем в большей степени разрушение

металла в этих впадинах под действием коррозии, проникающей вглубь металла. [6, 11]

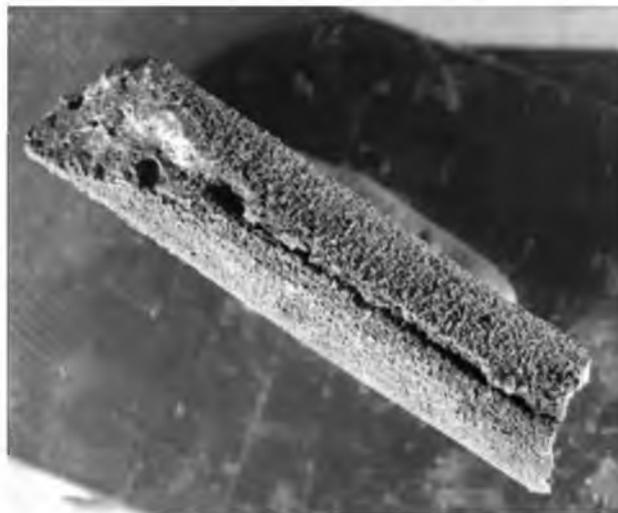


Рис. 1 - Вид проволоки из стали 03X22Ю5ФБч после выхода нагревателей из строя [10] / wire Type steel ABC after the release of the heaters of the system [10]

Авторами [2] отмечается чувствительность хромистых ферритных сталей к надрезу. На практике эта чувствительность приводит к разрушению при наличии дефектов поверхности: царапин, рисок, следов обработки.

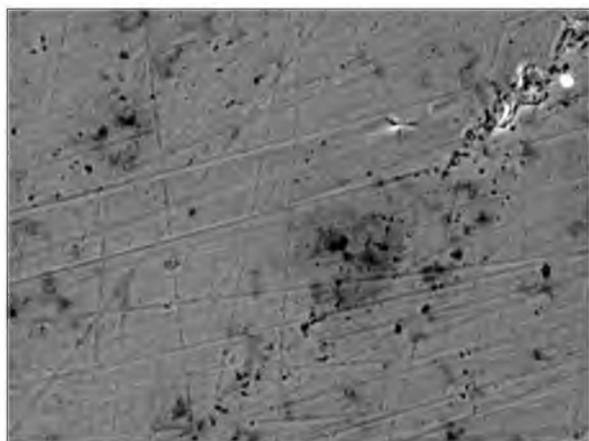
Эффективным способом повышения жаростойкости является также повышение однородности структуры стали. Предотвращая в структуре стали возникновение карбидов и нитридов хрома на стадии выплавки и переплава металла, а также рафинируя металл или модифицируя его элементами, которые обладают большим сродством к углероду, азоту и сере можно существенно повысить его эксплуатационные свойства. [8]

Влияние неметаллических фаз на свойства стали определяется, как известно, не только их составом и количеством, но главным образом их распределением, величиной и формой. Для уменьшения количества неметаллических фаз в твердой стали желательнее, чтобы в жидкой стали они имели малый удельный вес, низкую температуру плавления и низкую вязкость, что способствует всплыванию их на поверхность и удалению из стали. [3]

### Результаты

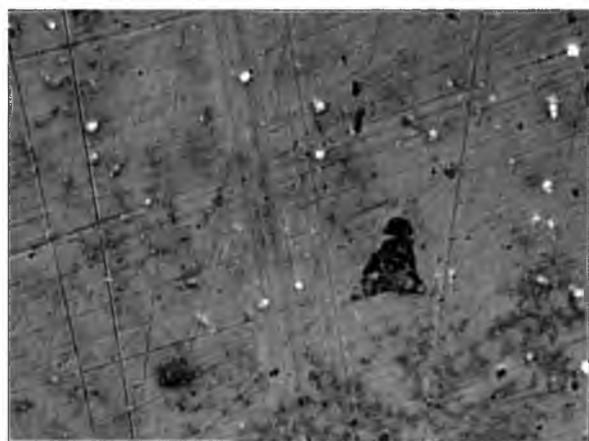
Для структурного исследования образцов использовался метод просвечивающей микроскопии на электронном микроскопе JSM-6510 с разделительной способностью в высоком вакууме до 3 нм. На установке были исследованы образцы проволоки марок X15Ю5, X20H80, на поверхности образцов наблюдаются такие дефекты: рис. 2, а – участки, не подвергшиеся волочению и грубые неметаллические включения – фториды, остатки окалины на поверхности волоченого прутка; рис. 2, б

– треугольные неметаллические включения, раздробленные, мелкие неметаллические включения – оксиды; рис. 3, а – беспорядочно расположенные неметаллические включения – оксиды и нитриды TiN, NiO<sub>2</sub>; рис. 3, б – остатки технологической смазки NaCl. Также на поверхности всех образцов присутствуют механические повреждения в виде рисок, царапин, надрезов и т.п., отпечатков на поверхности.



25µm

а



25µm

б

Рис. 2 – Поверхностный слой проволоки марки X15IO5 / The surface of wire in X15IO5 alloy

Для устранения вышеперечисленных недостатков изучали возможность применения обработки пароплазменным разрядом (ППР) проволоки и ленты из сплавов типа Fe-Cr-Al. Обработка ППР позволяет очистить поверхность от технологической смазки, сглаживает микрорельеф, повышает коррозионную стойкость поверхности, снижает шероховатость. [7]

Сравнительный анализ поверхностей до и после обработки ППР свидетельствует о том, что поверхность проволоки до ее обработки неровная с беспорядочно расположенными раковинами и углублениями, которые характеризуются значительными выпуклостями и вогнутостями. На

поверхности металла, также наблюдаются цвета побежалости и окалина с различной окраской от желтого до синего (рис. 4).

После обработки ППР поверхность приобрела металлический блеск, уменьшилась глубина и количество раковин и механических неровностей. (рис. 5, 6)



25µm

а



10µm

б

Рис. 3 – Поверхностный слой проволоки марки X20H80 / The surface of wire in X20H80 alloy

#### Научная новизна и практическая значимость

Работы авторов [9, 12, 13] посвящены изучению влияния так называемых реактивных легирующих элементов Ca, Ce, La, Y, на адгезионную способность оксидного слоя, его пластичность и скорость роста.

Не одна из упомянутых выше публикаций не останавливается на степени влияния качества поверхности проволоки для нагревателей на эксплуатационные свойства.

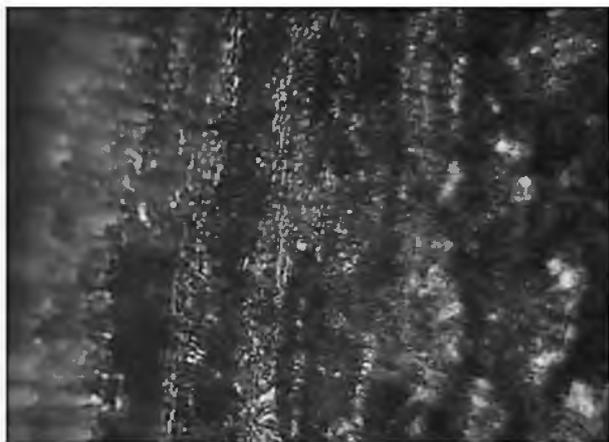


Рис. 4 – Исходная поверхность проволоки из стали 03X23Ю5Т /  
The original surface of wire in 03X23Ю5T alloy

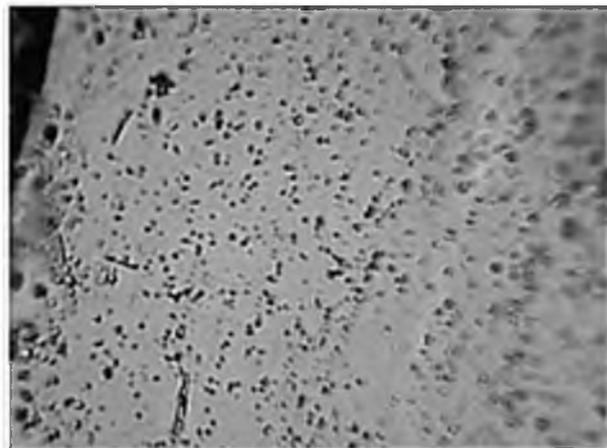


Рис. 6 – Поверхность проволоки из стали 03X23Ю5Т, обработанная в течении 6 мин /  
The surface of wire in 03X23Ю5T alloy processed within 6 min

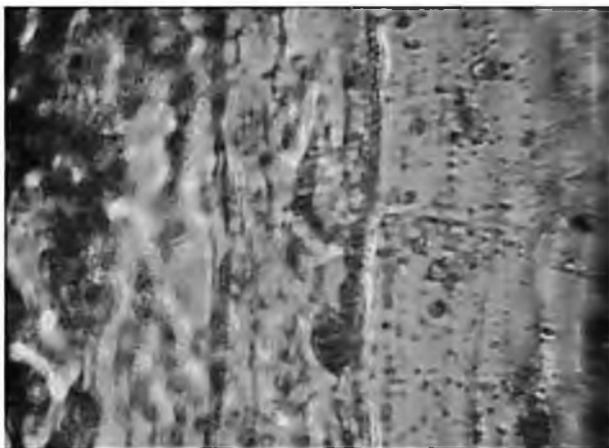


Рис. 5 – Поверхность проволоки из стали 03X23Ю5Т, обработанная в течении 30 с /  
The surface of wire in 03X23Ю5T alloy processed within 30 s

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Влияние алюминия на структуру и физические свойства сплавов Fe-Cr-Al / Н. Б. Пугачева, Е. О. Экземплярва, С. М. Задворкин. // Металлы. – 2006. – № 1. – С. 68 – 75.

Pugacheva N. B., Ekzemplarova E. O., Zadvorkin S. M. Vliyanie alyuminiya na strukturu i fizicheskie svoystva splyavov Fe-Cr-Al [Effect of aluminium on the structure and physical properties of Fe-Cr-Al alloys] // Metally [Russian metallurgy]. – 2006. – Issue № 1. – p. 68 – 75.

<http://elibrarv.ru/item.asp?id=9189680>

2. Коломбье Л. Нержавеющие и жаропрочные стали / Л. Коломбье, И. Гохман ; пер. с фр. А. М. Ладогина. – М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1958. – 479 с.

Kolomb'ye L., Gokhman I. Nerzhavayushchie i zharoprochnye stali [Stainless and heat resisting steels]. – Moscow. : Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po chernoy i tsvetnoy metallurgii [State

scientific and technical publishing literature on ferrous and non-ferrous metallurgy publ.], 1958. – 479 p.

<http://www.twirpx.com/file/1584393/>

3. Меськин В. С. Основы легирования стали / Меськин Вениамин Семенович. – М. : Металлургиздат, 1959. – 688 с.

Mes'kin V. S. Osnovy legirovaniya stali [Fundamentals of steel alloying] / Mes'kin Veniamin Semenovich. – Moscow : Metallurgizdat [Metallurg publ.], 1959. – 688 p.

<http://www.twirpx.com/file/899854/>

4. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч.2 / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Александров и др.]. – СПб. : Профессионал, 2006. – 916 с.

Ostrovskiy G. M., Abiev R. Sh., Aleksandrov V. M. and other. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy. Ch.2 [The new handbook chemist and technologist. Processes and apparatus of chemical technologies. Part 2]. – St. Petersburg. : Professional publ., 2006. – 916 p.

[http://www.naukaspb.ru/spravochniki/ht\\_6\\_1.htm](http://www.naukaspb.ru/spravochniki/ht_6_1.htm)

5. Пат. 2344192 Российская федерация, МПК С 22 С 38/28. Железо-хромо-алюминиевый сплав / Хаттендорф Х., Кольб-Телипе А. ; заявитель и патентообладатель

Тиссенкрупп ФДМ ГМБХ – № 2006141845/02 ; заявл. 23. 04. 05 ; опубл. 20. 01. 09 , Бюл. № 2

Pat. 2344192 Russian Federation, МПК S 22 S 38/28. Zhelezo-khromo-alyuminievyy splay [Fe-Cr-Al alloy] / Hattendorf H., Kolb-Telieps A. ; inventors and assignees Thyssenkrupp FDM GMBH – № 2006141845/02 ; filed 23. 04. 05 ; publ. 20. 01. 09 , Appl. No 2

<http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=2R7J9RGB1VFBE8A8Q9MP&GotoDoc=1&Query=1>

6. Ромашкин А. Н. Влияние неметаллических включений на стойкость стали к коррозии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : URL : [http://steelcast.ru/corrosion\\_resistance](http://steelcast.ru/corrosion_resistance) – Название с экрана.

Romashkin A. N. Vliyaniye nemetallicheskih vkluyucheniyy na stoykost' stali k korrozii [Effect of non-metallic inclusions on the corrosion resistance of steel] [Electronic resource]. – Access mode : URL : [http://steelcast.ru/corrosion\\_resistance](http://steelcast.ru/corrosion_resistance) – Title screen

7. Саф'ян П. П. Формування структури та корозійних властивостей поверхневого шару труб відповідального призначення з аустенітних сталей при обробці пароплазмовим розрядом : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.01, «Матеріалознавство» / П. П. Саф'ян. – Дніпропетровськ, 2014. – 20 с.

Saf'yan P. P. Formuvannya strukturi ta korozivnykh vlastivostey poverhneвого шарu trub vіdpovidal'nogo pryznachennya z austenitnih staley pri obrobtі paroplazmovim rozryadom [Regularities of structure formation, corrosion resistance properties and surface quality of austenite steel tubes depending on the parameters of steam and plasma charge] : avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk : spets. 05.02.01, «Materialoznavstvo» [candidate of technical sciences degree on the specialty 05.02.01 – science of materials] / P. P. Saf'yan. – DnIpropetrovsk, 2014. – 20 p.

[http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis64r\\_81/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=fullw&S21ALL=%28<%2E>A%3DCaф'ян%24<%2E>%29&FT\\_REQUEST=&FT\\_PREFIX=&Z21ID=&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis64r_81/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21FMT=fullw&S21ALL=%28<%2E>A%3DCaф'ян%24<%2E>%29&FT_REQUEST=&FT_PREFIX=&Z21ID=&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20)

8. Семенова И. В. Коррозия и защита от коррозии / Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. ; под

ред. И. В. Семеновой — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с. – ISBN 5-9221-0246-X.

Semenova I. V. Korroziya i zashchita ot korrozii [Corrosion and corrosion protection] / Semenova I. V., Florianovich G. M., Khoroshilov A. V. – Moscow : FIZMATLIT, 2002. – 336 p.

<http://www.twirpx.com/file/1202750/>

9. Сплавы для нагревателей / [Л. Л. Жуков, И. М. Племянникова, М. Н. Миронова и др.]. – М. : Металлургия, 1985. – 144 с.

Zhukov L. L., Plemyannikova I. M., Mironova M. N. and other. Splay dlya nagrevateley [The alloys for heaters]. – Moscow : Metallurgiya [Metallurgy], 1985. – 144 p.

<http://www.twirpx.com/file/42617/>

10. Экономлегированные жаростойкие стали для нагревателей термических печей / В. Г. Мищенко, И. Н. Лазечный, В. Ю. Лякишев. // Нови матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 2. – С. 63 – 68.

Mishchenko V. G., Lazechnyy I. N., Lyakishev V. Yu. Ekonomlegirovannyye zharostoykie stali dlya nagrevateley termicheskikh pechey [Economically alloyed high-temperature steels for heat-treatment furnace heaters] // Novi materiali i tekhnologii v metallurgii ta mashinobuduvanni [New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering]. – 2010. – Issue № 2. – pp. 63 – 68.

<http://elibrary.ru/item.asp?id=21043966>

11. Diffusion and growth mechanism of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> scales on ferritic Fe-Cr-Al alloys / K. Messaoudi, A. M. Huntz, B. Lesage. // Materials science and engineering: A. – 2000. – № 247. – p. 248–262.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509397007119>

12. Spontaneous deformation during the high temperature oxidation of Fe-20Cr-5Al-(0, 0.06)La alloy thin strip / Kee Sun Lee, Kyu Hwan Oh, Hyung Yong Ra. // Materials science and engineering: A. – 2000. – № 278. – p. 77–81.

<http://elibrary.ru/item.asp?id=12397859>

13. Wrinkling of  $\alpha$ -alumina films grown by thermal oxidation. Quantitative studies on single crystals of Fe-Cr-Al alloy / V. K. Tolpygo, D. R. Clarke. // Acta mater. – 1998. – № 46. – p. 5153 – 5166.

<http://elibrary.ru/item.asp?id=15525270>

*Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. Г. И. Слынько (Украина); д-ром.физ.-мат.наук, проф. С. В. Лоскутовым (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015