

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-7-36-40>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЯ СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ «НАМОРАЖИВАНИЯ»

© Владимир Иванович Кадошников¹, Екатерина Владимировна Куликова¹, Марина Викторовна Андросенко¹, Роман Рафаэлевич Дема¹, Сергей Павлович Нефедьев¹, Олег Рафикович Латыпов^{1*}, Екатерина Федоровна Романенко²

¹ Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова; Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина 38; *e-mail: latolegraf@list.ru

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»; Россия, 119049, Москва, Ленинский пр. 4.

*Статья поступила 9 ноября 2018 г. Поступила после доработки 18 апреля 2019 г.
Принята к публикации 23 апреля 2019 г.*

Представлены результаты исследования структуры покрытий, полученных методом «намораживания» с предварительной подготовкой поверхности, включающей нанесение подслоя способом плакирования гибким инструментом (ПГИ) (вращающейся цилиндрической металлической щеткой). Влияние технологических параметров на качество формируемого покрытия исследовали, анализируя структуру границы раздела системы сталь — медь и микротвердости медного слоя и стального сердечника. Упругонапряженные состояния в приповерхностном слое сердечника и в медном покрытии оценивали методом рентгеновской тензометрии способом наклонной съемки. Влияние подслоя из таких материалов, как медь, латунь, олово, оловяносвинцовый сплав, на сцепление основного медного покрытия с сердечником после «намораживания» исследовали с помощью адгезиметра. Также провели фрактографический анализ разрушенных поверхностей покрытий. Приведены данные по распределению металлов в приграничных зонах соединения сталь — медь. Структуру зон на наличие интерметаллидов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Camscan и рентгеноспектрального микроанализатора Link exL. Разработанная методика нанесения покрытия методом «намораживания» с предварительным нанесением подслоя способом ПГИ относительно проста и малоэнергоемка. Она позволяет исключить экологически вредные и затратные гальванические операции.

Ключевые слова: биметалл; сталемедная проволока; нанесение покрытия; плакирование; поверхность.

STUDY OF THE STRUCTURE OF COATING OF THE COPPER-CLAD STEEL WIRE OBTAINED BY “FREEZING-OUT” METHOD

© Vladimir I. Kadoshnikov¹, Ekaterina V. Kulikova¹, Marina V. Androsenko¹, Roman R. Dema¹, Sergei P. Nefedev¹, Oleg R. Latupov^{1*}, Ekaterina F. Romanenko²

¹ Nosov State Technical University; pr. Lenina 38, Magnitogorsk, 455000, Russia; *e-mail: latolegraf@list.ru

² National University of Science and Technology “MISIS”, Leninsky pr. 4, Moscow, 119049, Russia

Received November 9, 2018. Revised April 18, 2019. Accepted April 23, 2019.

The results of studying the structure of the coating obtained by “freezing-out” method with a preliminary surface preparation including application of the underlayer or precoat by cladding with a flexible tool (CFT) are presented. The CFT procedure consists in coating with a rotating cylindrical metal brush. The developed technology of coating using “freezing-out” with the preliminary application of the precoat makes it possible to exclude harmful and labor-consuming galvanic operations. The effect of technological parameters on the quality of CFT-formed coating, i.e., the structure of the interface between the steel-copper system and data of durometric measurements of the microhardness of the copper layer and the steel core were analyzed. Elastic-stress states in the surface layer of the core and in the copper coating were determined using X-ray tensometry by the method of oblique survey. The effect of the underlayer of various materials (copper, brass, tin, tin-lead alloy) on the adhesion of the main copper coating to the core after “freezing-out” copper was studied using an adhesimeter. A fractographic analysis of the destroyed coating surfaces was also carried out. The distribution of metals in the border zones of the steel-copper compound is determined. Camscan scanning electron microscope and X-ray microanalyzer Link exL are used to examine the zone structure for the presence of intermetallic compounds. The developed “freezing-out” pro-

cedure with a preliminary application of the undercoat by CFT method is environmentally friendly, easy to use and low-power-consuming technology.

Keywords: bimetal; steel-copper wire; coating; cladding; surface.

Введение

Биметаллическая сталемедная проволока широко применяется во многих отраслях промышленности [1]. Ее производят металлургическим способом, методами оборачивания стального сердечника медной лентой с последующей прокаткой в роликовых калибрах, гальванического осаждения и др. Один из существенных недостатков формируемого при этом покрытия на проволоке — сравнительно невысокая прочность сцепления медного слоя с поверхностью.

Цель работы — исследование структуры покрытия сталемедной проволоки, полученного методом «намораживания», с учетом нанесения тонкого подслоя способом плакирования гибким инструментом (ПГИ).

Методика и оборудование

Исследовали покрытия биметаллической проволоки, произведенной путем пропускания сердечника через расплав меди. Суть метода заключается в следующем. При кратковременном контакте сердечника с расплавом меди на поверхности первого образуется медный слой, который при остывании кристаллизуется. Поэтому такой способ условно называли методом «намораживания» [2, 3].

Схема линии производства биметаллической проволоки (рис. 1) включает участки (стадии производства): 1) размотка; 2) подготовка поверхности сердечника под покрытие; 3) нанесение покрытия; 4) смотка сердечника с покрытием.

Один из основных факторов, влияющих на силу сцепления покрытия с сердечником, — качество подготовки поверхности сердечника [4–6]. В нашем случае поверхность готовили путем обработки вращающимися металлическими щетками (метод ПГИ) с одновременным формированием на ней тонкого слоя предварительного покрытия (подслоя). Нанесение подслоя необходимо для улучшения процесса соединения медной оболочки с сердечником при изготовлении биметаллической проволоки методом «намораживания». Принципиальная схема подготовки поверхности сердечника приведена на рис. 2 [7–12]. Метод ПГИ относится к термомеханическим способам модификации поверхности на финишной стадии обработки изделия.

Результаты и их обсуждение

Исследование медного подслоя, нанесенного способом ПГИ. На поверхность сердечника (про-

волок) из стали марки 70 наносили покрытие (подслой) металлической щеткой. В качестве материала покрытия применяли медь марки М1.

Структура сформированного покрытия приведена на рис. 3. Видно, что по всей длине сердечника формируется равное по толщине предварительное покрытие толщиной 10–15 мкм. Металлографическим анализом внутренние границы в структуре предварительного покрытия не выявили.

Микротвердости сердечника и подслоя определяли дюрометрическим методом.

Микротвердость подслоя в зависимости от режима обработки составила 140–270 HV_{200} . При его нанесении на «мягких» режимах обработки

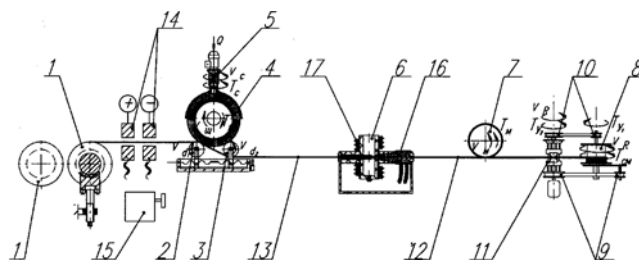
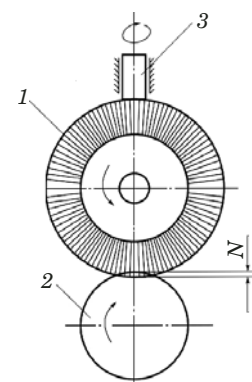


Рис. 1. Схема линии производства биметаллической проволоки: 1 — размотчик; 2, 3 — барабан; 4 — металлическая щетка; 5 — подача слитка для нанесения подслоя методом ПГИ; 6 — устройство для нанесения покрытия методом «намораживания»; 7 — сматыватель проволоки; 8 — моталка; 9, 10 — ременная передача; 11 — укладчик проволоки; 12 — биметаллическая проволока; 13 — сердечник биметаллической проволоки; 14 — стыкосварочная машина; 15 — наждак; 16 — кристаллизатор; 17 — индуктор

Fig. 1. Scheme of the bimetallic wire production line: 1 — decoiler; 2, 3 — spool; 4 — metal brush; 5 — ingot delivery for CFT-precoating; 6 — device for coating by the “freezing-out” method; 7 — winder; 8 — wire reel; 9, 10 — belt drive; 11 — wire stacker; 12 — bimetallic wire; 13 — bimetallic wire core; 14 — butt welding machine; 15 — emery; 16 — mold; 17 — inductor

Рис. 2. Схема обработки изделия методом ПГИ: 1 — вращающаяся металлическая щетка; 2 — обрабатываемое изделие; 3 — брусок из материала покрытия; N — натяг (степень сближения осей щетки и обрабатываемого изделия)

Fig. 2. The process of coating the workpiece using CFT: 1 — rotating metal brush; 2 — workpiece; 3 — a bar of coating material; N — tension (closeness of the brush and workpiece axes)



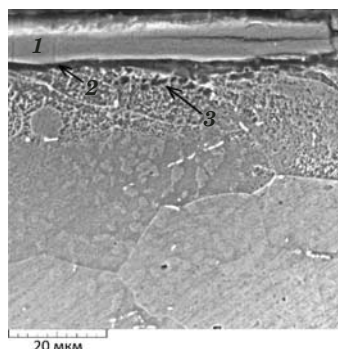


Рис. 3. Структура медного покрытия на поперечном микрошлифе сердечника: 1 — медное покрытие (предварительный слой); 2 — промежуточная зона; 3 — упрочненный слой (наклеп)

Fig. 3. The structure of the copper coating on the transverse microsection of the core: 1 — copper coating (precoat); 2 — intermediate zone; 3 — hardened layer (strain hardening)

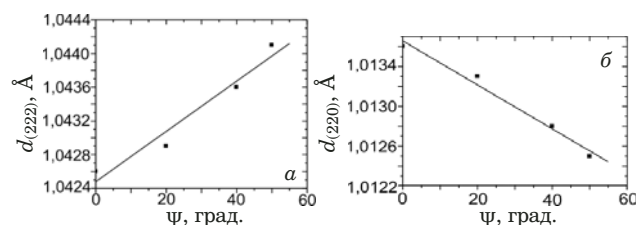


Рис. 4. Зависимость межплоскостных расстояний d_{222} плакированного медного покрытия (а) и d_{220} стальной подложки (б) от угла наклона съемки

Fig. 4. Dependence of the interplanar distances d_{222} of the clad copper coating (a) and d_{220} steel substrate (b) on the inclination angle of shooting

(натяг $N = 0,5 - 0,8$ мм) покрытие формировалось на деформированной поверхности сердечника без образования промежуточной зоны. Напротив, обработка на более «жестких» режимах ($N = 1,8 - 2,0$ мм) приводила к ее появлению. При этом поверхностный слой металла-основы (сердечника), находящийся непосредственно под покрытием, оказывался заметно наклепан (среднее значение микротвердости — $310 HV_{200}$). Это объясняется тем, что поверхностный слой сердечника подвергался интенсивному ударно-фрикционному воздействию металлического ворса щетки.

Напряжения σ_ϕ в сформированном плакированном слое определяли методом рентгеновской тензометрии с использованием способа наклонной съемки [13]. Окончательно σ_ϕ рассчитывали по формуле:

$$\sigma_\phi = \frac{E}{1 + \mu} \frac{d_\psi - d_0}{d_0},$$

где E — модуль упругости (для меди и железа — 122 и 220 ГПа соответственно); μ — коэффициент Пуассона (принимали равным 0,3); ϕ — угол

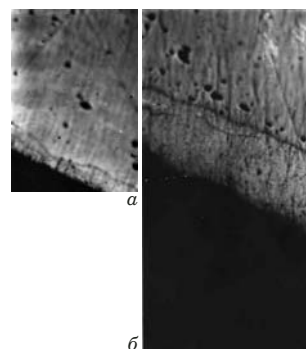


Рис. 5. Структура слоя медного покрытия, нанесенного на сердечник методом ПГИ при «мягких» (а) и «жестких» (б) режимах обработки

Fig. 5. The structure of the copper coating layer deposited on the core using CFT method: a — “soft” coating mode; b — “hard” treating mode

наклона; d_ψ — межплоскостное расстояние для дифракционных линий (222) (плакированная медь) и (220) (стальная подложка), снятых под углами $\psi = 20, 40$ и 50° (при $\psi = 0^\circ - d_0$).

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости межплоскостных расстояний, определенных по линиям (222) для плакированной меди и (220) для стальной подложки, от угла ψ при наклонной съемке.

Видно, что при увеличении ψ межплоскостные расстояния меняются различным образом. Это свидетельствует о различии упругонапряженных состояний подложки и плакированного медного покрытия. Результаты расчетов показывают, что в плакированном слое меди сформированы растягивающие, а в поверхностном слое стальной подложки — сжимающие остаточные напряжения. Их значения составляют 225 и -280 МПа соответственно. Это подтверждает возникновение эффекта «наклепа» поверхностного слоя сердечника при обработке его ворсом щетки на «жестких» режимах.

Металлографический анализ структуры соединения проводили на оптическом металлографическом микроскопе Epityp-2 и структурном анализаторе «ЭПИКВАНТ». На поперечных шлифах (рис. 5) видно, что в обоих случаях формируются прочные и бездефектные покрытия. При этом «мягкие» режимы обработки по сравнению с «жесткими» приводят к формированию более толстого покрытия.

Влияние подслоя из различных материалов на сцепление с сердечником. При получении биметаллических соединений стремятся к тому, чтобы проявился эффект «смачивания» поверхности стального сердечника. Для этого обеспечивают такие условия, при которых атомы расплавленной меди вступают в непосредственный контакт с поверхностными атомами твердой стальной основы. Однако при пропуске сер-

дечника через медный расплав их сцепление оказывается недостаточным, что объясняется образованием в соединении хрупких интерметаллидов [14].

В качестве материала подслоя при исследовании его влияния на сцепление медной оболочки с сердечником при «намораживании» меди использовали медь, латунь, олово и оловяносвинцовый сплав. В качестве сердечника — стальные прутки диаметром 15 и длиной 50 мм из стали марки 70. Материал расплава — медь марки М1. Медь плавил в индукторе в графитовых стаканах. Температуру жидкой меди измеряли с помощью термопары (состав: платина – платина/родий 10 %). Пруток, на поверхность которого предварительно наносили подслоя способом ПГИ, покрывали основным слоем меди в канале шамотного кирпича (рис. 6).

Качество сцепления сформированного слоя с основой оценивали, определяя адгезионную прочность. Испытания проводили при помощи адгезиметра отрывного типа PosiTest AT. Установили, что наибольшей силой сцепления медного подслоя со стальной основой сердечника обладают образцы с оловянным и латунным покрытиями.

Фрактографические исследования разрушенных после разрыва поверхностей покрытия показали, что у образцов, обработанных щеткой, сцепление находится на уровне шероховатости поверхности. В случае медного, латунного и оловяносвинцового покрытий фиксировали наличие очагов сцепления меди с основой на атомарном уровне. У образцов с оловянным покрытием сцепление меди с основой на атомарном уровне наблюдали по всей поверхности сердечника.

На рис. 7 представлены структуры поверхности разрыва и границы раздела сталь – медь образца, полученного методом «намораживания».

Распределение металлов в зоне взаимодействия расплавленной меди со стальной основой исследовали на растровом сканирующем элек-

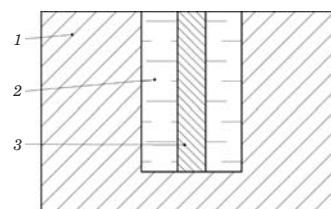


Рис. 6. Схема нанесения основного слоя меди: 1 — шамотный кирпич; 2 — расплав меди; 3 — прут (сердечник)

Fig. 6. Scheme of depositing the main copper layer: 1 — fireclay bricks; 2 — copper melt; 3 — rod (core)

тронном микроскопе Camscan и рентгеноспектральном микроанализаторе Link exL. Анализ микроструктуры на границе медь — стальная подложка показал отсутствие зоны интерметаллических соединений, что свидетельствует о правильно подобранном режиме нанесения покрытия.

На рис. 8 приведены спектрограммы, снятые на расстоянии 3 мкм в обе стороны от границы раздела медь — сталь. С помощью количественного рентгеноспектрального анализа выявили, что содержание меди в материале сердечника составляет не более 1, а железа в медном покрытии — не более 2 %, что свидетельствует об образовании диффузионной зоны. При этом на расстоянии более 50 мкм от границы раздела содержание железа в медной оболочке снижается до нуля.

Заключение

Проведенные исследования медного покрытия, полученного методом ПГИ, показали, что микротвердость формируемого подслоя составляет 140 – 270 HV_{200} . При этом при «жестких» режимах обработки ($N = 1,8 - 2,0$ мм) образуется промежуточная зона, а приповерхностный слой сердечника подвергается наклепу. Твердость наклепанного слоя в среднем — 310 HV_{200} . Выявле-

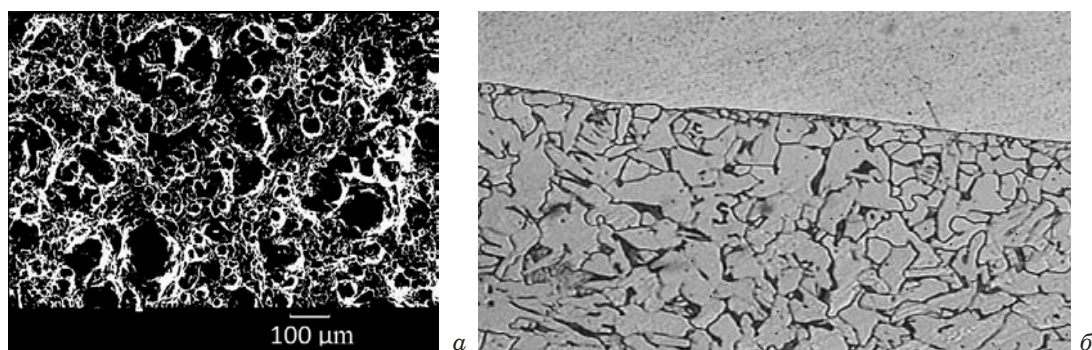


Рис. 7. Структуры поверхности разрыва (а) и границы раздела сталь – медь (б) образца, полученного методом «намораживания»

Fig. 7. Structures of the rupture surface (а) and steel — copper interface (b) (both obtained by the “freezing-out” method)

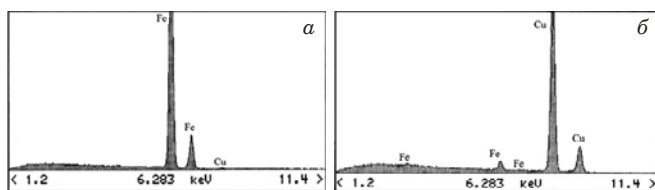


Рис. 8. Спектрограммы распределений меди в железе (а) и железа в меди (б) на расстоянии 3 мкм в обе стороны от границы раздела

Fig. 8. Spectrograms of the distribution of copper in iron (a) and iron in copper (b) at a distance of 3 μm to both sides of the interface

но различие в упругонапряженных состояниях приповерхностного слоя сердечника и медного подслоя (сжимающие остаточные напряжения в сердечнике и растягивающие в подслое). Значения напряжений — -280 и 225 МПа соответственно.

При исследовании влияния подслоя на сцепление основного покрытия, полученного методом «наморачивания», со стальным сердечником установили, что наибольшей силой сцепления обладают образцы с оловянным подслоем. Анализ разрушенных поверхностей контакта в таких образцах показал, что разрыв, который можно характеризовать как пластичный излом, проходит по медной оболочке.

Полученные данные по распределению металлов в приграничных зонах соединения медь — сталь свидетельствуют об отсутствии интерметаллидов в соединении. Поэтому обработка поверхности сердечника способом ПГИ достаточно эффективна перед нанесением основного покрытия методом «наморачивания».

ЛИТЕРАТУРА

- Потапов И. Н., Лебедев В. Н., Кобелев А. Г. и др. Слоистые металлические композиции. — М.: Металлургия, 1986. — 217 с.
- Кадошников В. И. Модель формирования покрытия на поверхности стальной при взаимодействии с расплавом меди / Черные металлы. 2006. № 12. С. 10 – 13.
- Кадошников В. И., Вдовин К. Н., Куликова Е. В. Модель образования корочки покрытия на поверхности сердечника при прохождении его через расплав / Вестник МГТУ. 2004. № 4(8). С. 10 – 14.
- Ямпольский А. М. Меднение и никелирование. — Л.: Машиностроение, 1977. — 57 с.
- Кардонина Н. Г., Россина А. С., Юровских А. С. Защитные покрытия. — Екатеринбург: Изд-во урал. ун-та, 2014.
- Кадошников В. И., Вдовин К. Н., Кадошников И. Д. и др. Подготовка поверхности металлических изделий перед нанесением покрытий / Процессы и оборудование металлургического производства. 2002. С. 56 – 65.
- Кадошников В. И., Вдовин К. Н., Куликова Е. В. и др. Проектирование нового способа изготовления сталемедной композиции. — Магнитогорск: МГТУ, 2006. — 107 с.
- Кадошников В. И., Вдовин К. Н., Куликова Е. В. и др. Проектирование устройства для подготовки поверхности сердечника механическим способом / Вестник МГТУ. 2006. № 1(13). С. 19 – 22.
- Belevskii L. S., Kadoshnikov V. I., Ismagilov R. R., et al. Improving the performance of metallic components by frictional plating / Steel in Translation. 2011. Vol. 41. N 2. P. 175 – 178.
- Белевский Л. С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. — Магнитогорск: Лицей РАН, 1996. — 231 с.
- Белевский Л. С., Исмагилов Р. Р., Кадошников В. И. и др. Улучшение служебных характеристик металлических изделий способом фрикционного плакирования / Станочный парк. 2011. № 11. С. 30 – 32.
- Басинюк В. Л., Леванцевич М. А., Максимченко Н. Н. и др. Улучшение триботехнических свойств и снижение шума зубчатых передач плакированием функциональных покрытий на рабочий профиль сопрягаемых зубьев / Трение и износ. 2013. Т. 34. № 6. С. 575 – 582.
- Кривоглаз М. А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах. — Киев: Наук. думка, 1983. — 408 с.
- Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. — Киев: Вища школа, 1976. — 424 с.
- Potapov I. N., Lebedev V. N., Kobelev A. G., et al. Laminated metal compositions. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 217 p. [in Russian].
- Kadoshnikov V. I. Model of the formation of the coating on the surface of the steel in the interaction with the molten copper / Chern. Metally. 2006. N 6. P. 10 – 13 [in Russian].
- Kadoshnikov V. I., Vdovin K. N., Kulikova E. V. Model of the formation of a coating crust on the surface of the core as it passes through the melt / Vestnik MGTU. 2004. N 4(8). P. 10 – 14.
- Yampolsky A. M. Copper plating and nickel plating. — Leningrad: Mashinostroenie, 1977. — 57 p. [in Russian].
- Kardonina N. G., Rossina A. S., Yurovskikh A. S. Protective coatings. — Yekaterinburg: Izd. Ural. Univ., 2014 [in Russian].
- Kadoshnikov V. I., Vdovin K. N., Kadoshnikova I. D., et al. Surface preparation of metal products before coating / Proiz. Oborud. Metallurg. Proizv. 2002. P. 56 – 65 [in Russian].
- Kadoshnikov V. I., Vdovin K. N., Kulikova E. V., et al. Designing a new method for the manufacture of steel-copper composition. — Magnitogorsk: MGTU, 2006. — 107 p. [in Russian].
- Kadoshnikov V. I., Vdovin K. N., Kulikova E. V., et al. Designing a device for preparing the surface of the core mechanically / Vestnik MGTU. 2006. N 1(13). P. 19 – 22 [in Russian].
- Belevskii L. S., Kadoshnikov V. I., Ismagilov R. R., et al. Improving the performance of metallic components by frictional plating / Steel in Translation. 2011. Vol. 41. N 2. P. 175 – 178.
- Belevskii L. S. Plastic deformation of the surface layer and the formation of the coating when applied with a flexible tool. — Magnitogorsk: Litsei RAN, 1996. — 231 p. [in Russian].
- Belevskii L. S., Ismagilov R. R., Kadoshnikov V. I., et al. Improving the performance characteristics of metal products by friction cladding / Stanoch. Park. 2011. N 11. P. 30 – 32 [in Russian].
- Basinyuk V. L., Levantsevich M. A., Maksimchenko N. N., et al. Improving tribological properties and reducing noise by cladding functional coatings on the working profile of mating gear teeth / Trenie Iznos. 2013. Vol. 34. N 6. P. 575 – 582 [in Russian].
- Krivoглаz M. A. Diffraction of X-rays and neutrons in non-ideal crystals. — Kiev: Nauk. Dumka, 1983. — 408 p. [in Russian].
- Bagryansky K. V., Dobrotina Z. A., Khrenov K. K. Theory of welding processes. — Kiev: Vishcha shkola, 1976. — 424 p. [in Russian].