

## СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОСТОЙКИХ ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ $\text{NiCrCoAlY/ZrO}_2$ ДЛЯ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2011 Ю. П. Тарасенко, И. Н. Царева, О. Б. Бердник, Я. А. Фель

Нижегородский филиал Учреждения Российской академии наук  
Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, НПЦ «Трибоника»,  
г. Нижний Новгород

В работе приведены результаты исследований структуры, физико-механических свойств и жаростойкости комбинированного жаростойкого покрытия  $\text{NiCrCoAlY/ZrO}_2$ , полученного методом газоплазменного напыления с использованием плазмотрона усовершенствованной конструкции. Покрытия внедрены в составе ремонтно-восстановительной технологии продления ресурса рабочих и направляющих лопаток турбины энергетических установок.

*Газоплазменное напыление, жаростойкие покрытия, интерметаллидные фазы, диоксид циркония, высокотемпературная газовая коррозия, турбинные лопатки газотурбинных двигателей.*

### Введение

Жаростойкие покрытия предназначены для защиты от высокотемпературной газовой коррозии рабочей поверхности турбинных лопаток газотурбинных двигателей различного назначения. Исследованные в данной работе газоплазменные комбинированные покрытия, состоящие из жаростойкого интерметаллидного покрытия системы «NiCrCoAlY» и теплозащитного покрытия на основе диоксида циркония, используются в составе ремонтно-восстановительной технологии для продления ресурса длинноразмерных турбинных лопаток энергетических газотурбинных установок тепловых электростанций.

В настоящее время традиционными методами нанесения жаростойких покрытий являются электронно-лучевой и ионноплазменный. Однако возможности данных методов ограничены габаритами вакуумных камер установок. Поэтому для крупногабаритных деталей, в частности длинноразмерных лопаток газотурбинных двигателей энергетического оборудования, перспективным является метод порошкового газоплазменного напыления.

В данной работе для нанесения покрытий использован метод газоплазменного напыления, модифицированный за счет использования плазмотрона ПНК-50 усовершенствованной конструкции, выполненного по линейной схеме с секционированной ме-

жэлектродной вставкой, которая служит для фиксации длины дуги между катодом и анодом. Таким образом достигается стабилизация параметров плазменной струи, увеличение напряжения дуги и повышение мощности плазмотрона. Регулируя силу тока, расход и состав плазмообразующего и защитного газов, можно изменять структуру и физико-механические характеристики покрытия.

### Методика исследований

Исследования выполнены на образцах из жаропрочного никелевого сплава ЭИ 893 с жаростойким интерметаллидным подслоем системы «NiCoCrAlY», полученным из порошковой смеси марки ПНХ20К20Ю13-1 (40/80), и термобарьерным покрытием  $\text{ZrO}_2$ , формируемым из порошка двуокиси циркония, стабилизированного окисью иттрия. Технологические параметры напыления приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы газоплазменного напыления

Покрытие	№ режима	Ид, А	U, В	P <sub>в</sub> , атм	P <sub>атм</sub> , атм
NiCoCrAlY	1	180	260	6,2	5
	2	190	180	1,8	5
	3	100	180	1,8	5
ZrO <sub>2</sub>	1	190	220	2	0,1
	2	200	240	2	0,1

Дериватографические исследования порошковой смеси выполнены на дериватографе

NETZSCH STA 449F1. Фазовый состав порошков и покрытий исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М» с применением  $\text{Cu-K}\alpha$ -излучения (в геометрии по Бреггу-Брентано). Металлографические исследования покрытий проводили на оптическом микроскопе «НЕ-ОФОТ-32» и растровом электронном микроскопе «VEGA/TESCAN».

Плотность и пористость покрытий определяли методом гидростатического взвешивания на весах VIBRA HT по ГОСТ 18898-89. Измерения твердости по Виккерсу проводили на поверхности покрытия с помощью ультразвукового твердомера МЕТ-У1. Адгезионную прочность оценивали методом микроиндентирования границы раздела «покрытие-подложка» при нагрузке 2 Н (на микротвердомере ПМТ-3).

Испытания на жаростойкость проводили на образцах без покрытия, на образцах с интерметаллидным подслоем «NiCoCrAlY» и образцах с комбинированным жаростойким покрытием «NiCoCrAlY/  $\text{ZrO}_2$ ». Образцы, выдержанные в растворе соли (84 % морской соли + 16 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в течение суток), подвергали высокотемпературному изотермическому окислению в печи на воздухе при температуре  $850^\circ\text{C}$  в течение 500 часов. Жаростойкость оценивали по относительному изменению массы методом взвешивания на аналитических весах через каждые 50 часов. По результатам испытаний построены усредненные (серии из 3 образцов) графические зависимости относительного изменения массы от времени испытания.

### Результаты исследований

В работе приведены результаты исследований структуры и физико-механических свойств покрытий системы NiCoCrAlY/ $\text{ZrO}_2$ , полученных при варьировании технологических параметров процесса газоплазменного напыления (ток дуги, напряжение, дистанция, давление плазмообразующего газа).

При разработке жаростойкого подслоя была выбрана порошковая смесь марки ПНХ20К20Ю13 с дисперсностью частиц 40-80 мкм. Данный материал относится к системе «Ni-Al» и отличается от класса термореагирующих порошков тем, что получен методом порошковой металлургии с использованием вакуумного спекания и последую-

щего дробления и поэтому в своем составе уже имеет сформированную интерметаллидную фазу. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что фазовый состав порошковой смеси представляет собой интерметаллидное соединение NiAl ( $\beta$ -фаза). После газоплазменного напыления по режиму №1 (рис. 1) покрытие, полученное из данной порошковой смеси, по фазовому составу отличается от исходного порошка, а именно, содержит два интерметаллидных соединения: NiAl ( $\beta$ -фаза) и  $\text{Ni}_3\text{Al}$  ( $\gamma'$ -фаза). Образование  $\gamma'$ -фазы в покрытии является результатом протекания фазового превращения  $\beta \rightarrow \gamma'$  (в соответствии с диаграммой фазовых состояний системы «Ni-Al») вследствие высокотемпературного воздействия плазменного потока. Дериватографические исследования показали, что данный фазовый переход начинается при  $900^\circ\text{C}$ .

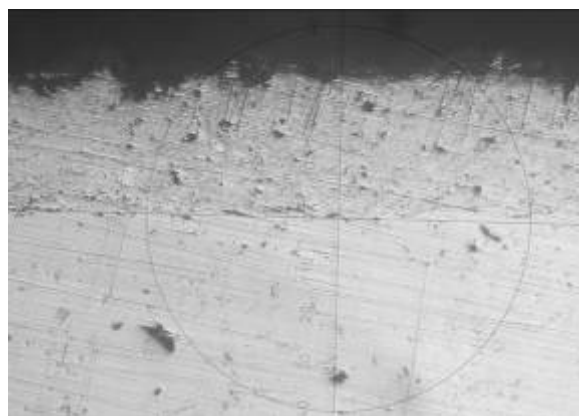


Рис. 1. Микрофотография интерметаллидного подслоя «NiCoCrAlY» ( $\times 500$ )

Были апробированы технологические режимы №2 и 3 (см. табл. 1) с пониженными значениями напряжения дуги и давления плазмообразующего газа при максимальном и минимальном значениях тока дуги. Рентгеноструктурным анализом установлено, что фазовый состав покрытий, формирующихся при данных режимах, представляет собой интерметаллидную  $\gamma'$ -фазу ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ), что свидетельствует о полном протекании вышеуказанного фазового превращения. Уменьшение давления плазмообразующего газа приводит к увеличению времени нахождения порошковой смеси в плазменном потоке, а следовательно, к повышению температуры нагрева порошка. На основании результатов рентге-

нофазового анализа был выбран режим №1, обеспечивающий формирование покрытия с максимальным содержанием  $\beta$ -фазы для достижения максимальной жаростойкости.

Электронно-микроскопические исследования показали, что подслоя системы NiCoCrAlY имеет слоистую микроструктуру (рис. 2).



Рис. 2. Микроструктура интерметаллидного подслоя «NiCoCrAlY» (1000)

Вытянутая форма формирующихся зерен обусловлена высокой кинетической энергией частиц, осаждающихся на подложку при воздействии высокоэнергетической плазмы. Границы зерен покрытия окаймлены оксидной фазой. Анализ распределения элементного состава показал, что на границах зерен наблюдается синхронный всплеск интенсивности рефлексов кислорода, алюминия и хрома (рис. 3).

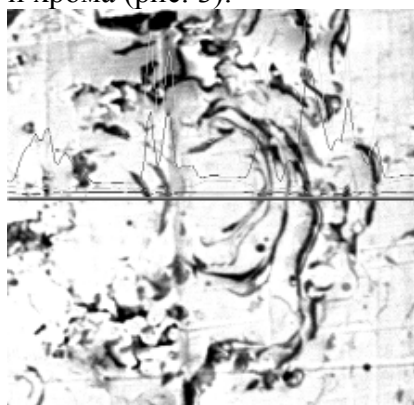


Рис. 3. Микроструктура и распределение элементного состава в интерметаллидном подслое «NiCoCrAlY»

Данный факт указывает на протекание окислительных процессов, сопутствующих формированию интерметаллидного покрытия, с образованием оксидов алюминия и хрома. В подслое имеются включения ка-

пельной фазы, формирующейся до осаждения на подложку (рис. 3). Испытания границы раздела «материал-подслой» методом микроиндентирования показали удовлетворительную адгезионную прочность покрытия. При индентировании границы раздела не наблюдалось отслоений, сколов и трещин, а также искажений формы отпечатка.

Использование плазмотрона усовершенствованной конструкции позволило повысить энергетические характеристики газоплазменного процесса и получить интерметаллидный подслей повышенной плотности ( $\rho=7,9$  г/см<sup>3</sup>) и микротвердости ( $H_{\mu}=770$ кгс/мм<sup>2</sup>).

При разработке технологии напыления термобарьерного газоплазменного покрытия была выбрана порошковая смесь марки ЦрОИ-7 (40/90). По фазовому составу порошок представляет собой совокупность ZrO<sub>2</sub> с тетрагональным типом кристаллической решетки и небольшим количеством остаточной фазы моноклинного типа. Фазовый состав формируемого из данной порошковой смеси керамического покрытия представляет собой совокупность тетрагональной и кубической фаз. Установленное фазовое превращение обусловлено термическим воздействием плазменного потока. Кроме того, под действием высокоэнергетической плазмы происходит оплавление граней частиц порошка и, как следствие, формирование микроструктуры поверхности покрытия ZrO<sub>2</sub> со сфероидальной формой зерен (рис. 4).

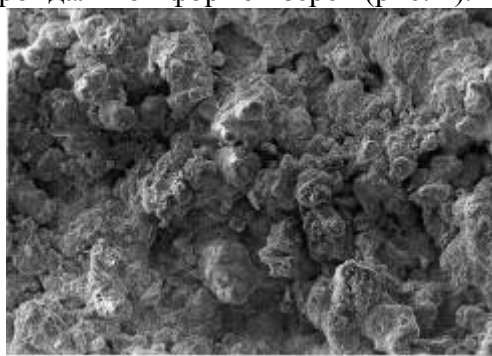
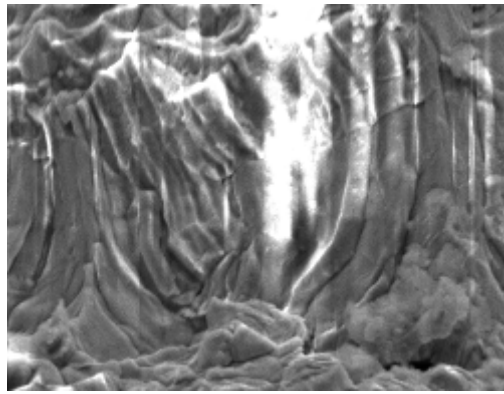
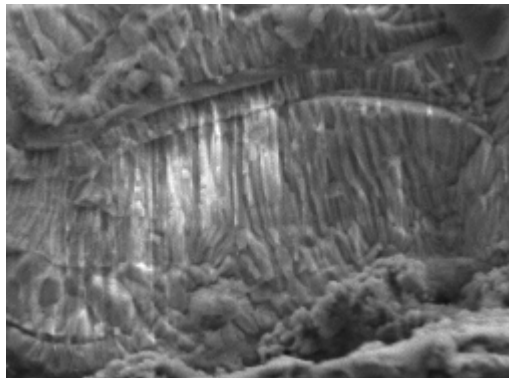


Рис. 4. Микроструктура поверхности покрытия диоксида циркония

В субструктуре (рис. 5) видны столбчатые субзерна размером ~100 - 200 нм в поперечном сечении, которые сформировались под действием высокоэнергетического плазменного потока. Межзеренная пористость имеет дисковую форму.



а



б

Рис. 5. Столбчатая структура покрытия  $ZrO_2$  ( $\times 1000$ )

На рис. 6 показана послойная структура комбинированного жаростойкого покрытия «NiCoCrAlY/ZrO<sub>2</sub>» (толщиной ~200 мкм). Граница раздела «подложка-покрытие» - четкая, на ней не наблюдается дефектов типа сколов, несплошностей и отслоений.

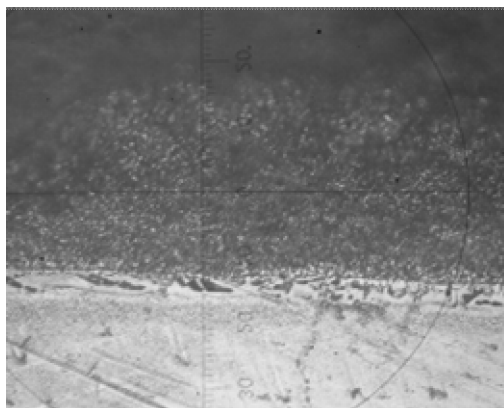


Рис. 6. Послойная структура комбинированного жаростойкого покрытия «NiCoCrAlY/ZrO<sub>2</sub>»

Физико-механические характеристики (твердость, плотность, общая пористость, закрытая и открытая пористость) покрытия диоксида циркония, нанесенного при разных технологических режимах, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические характеристики газоплазменного термобарьерного покрытия  $ZrO_2$

№ режима	HV, кгс/мм <sup>2</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	П <sub>з</sub> , %	П <sub>о</sub> , %
1	930	7,10	9,5	8	1,5
2	725	6,75	---	---	---

Выявлена тенденция снижения плотности и твердости покрытия при увеличении тока и напряжения дуги. Установлен оптимальный режим газоплазменного напыления (ток дуги  $I = 190$  А, напряжение 220 В, давление плазмообразующего газа (воздух)  $P_B=2$  атм, давление транспортирующего газа (аргон)  $P_{Ar}=0,1$  атм), обеспечивающий формирование керамического покрытия  $ZrO_2$  с общей пористостью  $P=9,5\%$ , плотностью  $\rho = 7,1$  г/см<sup>3</sup> и твердостью  $H_V=930$  кгс/мм<sup>2</sup>.

По результатам высокотемпературных (при 850°C в течение 500 часов) сравнительных испытаний (рис. 7) наибольшее окисление материала, сопровождающееся ростом и отслоением окислов, установлено на образцах без покрытия. Нанесение интерметаллидного подслоя «NiCoCrAlY» способствует повышению жаростойкости материала поверхности с образованием стабильных окислов.

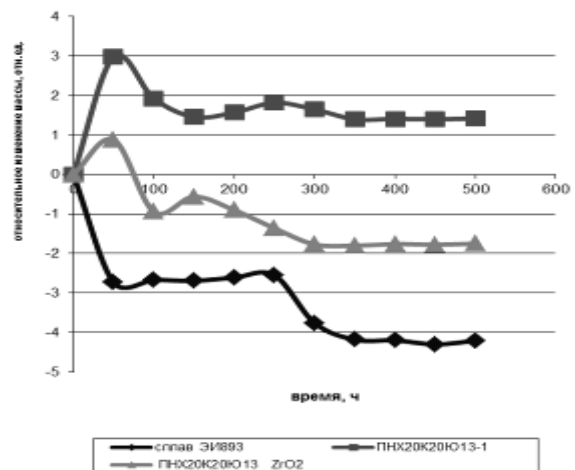


Рис. 7. Относительное изменение массы образцов в зависимости от времени испытаний

Изучены закономерности протекания высокотемпературной газовой коррозии в интерметаллидном подслое по механизму фазовых превращений: NiAl ----- Ni<sub>3</sub>Al ----- Ni-тв. раствор + (NiO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Наибольшая стабильность с точки зрения окислительных

процессов установлена на образцах с комбинированным покрытием NiCoCrAlY/ZrO<sub>2</sub> с сохранением микроструктуры слоев и их целостности.

Разработанные жаростойкие покрытия внедрены в ОАО «Якутская энергоремонтная компания» для защиты новых рабочих лопаток 1 ступени ротора турбины ГТЭ-45, а также в составе ремонтно-восстановительных технологий с целью продления срока службы направляющих и рабочих лопаток турбин энергетических установок ГТЭ-35 и ГТЭ-45. В настоящее время лопатки с разработанными покрытиями находятся в эксплуатации.

### **Выводы**

1. В результате модификации технологии газоплазменного напыления посредством использования плазмотрона ПНК-50 усовершенствованной конструкции разработано термобарьерное покрытие диоксида циркония, сформированное на подслое системы NiCoCrAlY с интерметаллидным фазовым составом и слоистой микроструктурой зерен.

2. Установлен оптимальный режим газоплазменного напыления подслоя NiCoCrAlY (с технологическими параметрами: ток дуги  $I = 170-190$  А, напряжение дуги 260 В, давление плазмообразующего газа (воздух)  $P_B = 6,2$  атм, давление транспортирующего

газа (аргон)  $P_{Ar} = 5$  атм), обеспечивающий формирование покрытия с низкой пористостью (общая пористость  $\Pi = 5,7$  %) и высокими значениями плотности ( $\rho = 7,9$  г/см<sup>3</sup>), микротвердости ( $H_\mu = 770$  кгс/мм<sup>2</sup>) и адгезионной прочности.

3. Установлен оптимальный режим газоплазменного напыления керамического покрытия (с технологическими параметрами: ток дуги  $I = 190$  А, напряжение дуги 220 В, давление плазмообразующего газа (воздух)  $P_B = 2$  атм, давление транспортирующего газа (аргон)  $P_{Ar} = 0,1$  атм), обеспечивающий формирование ZrO<sub>2</sub> с общей пористостью  $\Pi = 9,5$  %, плотностью  $\rho = 7,1$  г/см<sup>3</sup> и твердостью  $H_V = 930$  кгс/мм<sup>2</sup>.

4. Комбинированные покрытия системы NiCoCrAlY/ZrO<sub>2</sub> способствуют повышению жаростойкости поверхности жаропрочных никелевых сплавов и могут быть использованы для повышения ресурса работы рабочих и направляющих лопаток турбин газотурбинных двигателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

## **STRUCTURE AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT RESISTANT GAZOPLAZMENNYYH COATING NiCrCoAlY/ZrO<sub>2</sub> FOR TURBINE BLADES OF GAS TURBINE ENGINES**

© 2011 Y. P. Tarasenko, I. N. Tsareva, O. B. Berdnik, Y. A. Fehl

Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences  
Institute of engineering sciences A.A. Blagonravova, NPE «Tribonika», Nizhny Novgorod

In the results of research structure, physico-mechanical properties and heat-resistance characteristics of combined heat-resistant coatings NiCrCoAlY/ZrO<sub>2</sub> obtained by gas evaporation method using plasma torch Coverage introduced improved design, consisting of repair or replacement work and technology extension resource guide vanes of turbine power plants.

*Flame spraying, heat-resistant coatings, intermetallidnye phase, zirconium dioxide, high-temperature gas corrosion, turbine blades of gas turbine engines.*

**Информация об авторах**

**Тарасенко Юрий Павлович**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией «Трибофизика» Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-01-79. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Область научных интересов: поведение материалов в экстремальных условиях, технологии нанесения полифункциональных покрытий, определение надежности работы и продление ресурса деталей ГТД.

**Царева Ирина Николаевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-03-01. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Область научных интересов: поведение материалов в экстремальных условиях, технологии нанесения полифункциональных покрытий.

**Бердник Ольга Борисовна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской Академии Наук Института машиноведения им.А.А. Благонравова РАН (г.Нижний Новгород). Тел.: (831) 432-03-01. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Область научных интересов: исследование покрытий на основе интерметаллидной фазы и керамики, изучение объемных свойств сплавов, разработка технологий восстановительной термообработки металлов для повышения ресурса изделий.

**Фель Яков Абрамович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Учреждения Российской академии наук Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-03-01. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Область научных интересов: Нанесение и анализ многослойных жаростойких, теплозащитных покрытий на основе интерметаллидной фазы и керамики, разработка технологий восстановительной термообработки металлов.

**Tarasenko Yuriy Pavlovich**, Candidate of Phisic and Matematik Sciences, Head of Laboratory, the Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of mechanical engineering, A.A. Blagonravov RAS (Nizhny Novgorod). Phone: (831) 432-01-79. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Area of research: behaviour of materials in extreme conditions, technologies of regenerative heat treatment, application of modified Polyfunctional coatings, heat by intermetallic basis and based on ceramics, the definition of reliability and the extension of the resource details GTD.

**Tsareva Irina Nikolaevna**, Candidate of Phisic and Matematik Sciences, senior researcher, the Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of mechanical engineering, A.A. Blagonravov RAS (Nizhny Novgorod). Phone: (831) 432-03-01. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Area of research: an analysis of the behaviour of materials in the production environment, the development of technologies of regenerative heat treatment. Study of modified Polyfunctional Titanium Nitride coatings, as well as multi-layer coating on heat, heat by intermetallic basis and based on ceramics.

**Berdnik Olga Borisovna**, Candidate of technical Sciences, senior researcher of the Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of mechanical engineering, A.A. Blagonravov RAS (Nizhny Novgorod). Phone: (831) 432-03-01. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Area of research: multi-layer heat, thermal coatings based on by intermetallic phases and ceramics. Study of volumetric properties of alloys. Development of technologies of regenerative heat treatment of metals to improve resource products.

**Fehl Yakov Abramovich**, Candidate of Phisic and Matematik Sciences, senior researcher of the Nizhny Novgorod branch Institutions of the Russian Academy of Sciences Institute of mechanical engineering, A.A. Blagonravov RAS (Nizhny Novgorod). Phone: (831) 432-03-01. E-mail: [tribonikanpc@mail.ru](mailto:tribonikanpc@mail.ru). Area of research: Marking and analysis of multilayer heat, thermal coatings based on by intermetallic phases and ceramics. Development of technologies of regenerative heat treatment of metals.