

Lichtbogenspritzen der Komposita mit Pulverbenutzung

Dr. tech., Prof. A.N. Dubovoj, dr. tech, Dozent A.A. Karpetschenko, dr. tech, Dozent
S.A. Prokudin (Nationaluniversität für Schiffbau „Admiral Makarow“, Nikolaev,
Ukraine)

Die Beschreibung der modernisierten Baugruppe des Lichtbogenspritzers zur Kompositabeschichtung mit Pulverbenutzung. Die optimalen Aufspritzungs- und Glühbehandlungsmodi sind angegeben, sowie Verschleißwiderstand, Haftspannung und Wärmeleitfähigkeit der verbundenen Lichtbogenbeschichtungen.

Schlüsselbegriffe: Lichtbogenbeschichtung, Lichtbogenanlagen, Sprühdüse, verbundene metallpolymere, metallkeramische und Glasmittelbeschichtungen, Glühbehandlung, Härte, Verschleißwiderstand, Haftspannung, Wärmeleitfähigkeit.

In Friktionseinheiten unterschiedlicher Anlagen und Mechanismen benutzt man immer häufiger Komposita und verbundene Beschichtungen, die durch Methoden der Pulvermetallurgie, Plasma-, Gasplasma- und Detonationsaufstäubung produziert werden. Trotzdem ist Erhalt der Komposita durch Pulvermetallurgie ziemlich energieaufwendig und braucht wesentliche Kosten.

Die Komposita, die durch Plasma- und Detonationsmethoden erhalten werden, benutzt man normalerweise zur Verstärkung oder Erneuerung der Verschleißoberflächen, das deren Betriebsdauer mehrfach erhöht.

Ausgewählte Beschichtungsmethode hängt von deren Solleigenschaften ab, die einerseits durch Beschichtungszusammensetzung und andererseits durch Aufspritzungsparameter bestimmt werden. In der Regel, versteht man unter den Hauptkriterien die Beschichtungsaufwände, einschließlich Energieaufwände und Verbrauchsmaterialkosten.

Vergleichende Aufwandschätzung der unterschiedlichen gasdichten Beschichtungen zeigt, dass die Lichtbogenbeschichtung 3-10mal billiger ist. Wärmewirkungsgrad dieses Prozesses beträgt 0,7-0,9, das in der Kombination mit den einfachen Anlagen seine breite Anwendung findet.

Meist breit wurde Lichtbogenspritzen bei korrosionsfesten Zink- und Aluminiumbeschichtungen unterschiedlicher Konstruktionen und Einrichtungen verwendet. Es werden auch Lichtbogenbeschichtungen aus unterschiedlichen Stahllarten und Bronzen als die verschleißfesten verwendet. Pseudolegierte Beschichtungen aus Stahl und Kupfer, sowie Kupfer und Zinn und anderen Kombinationen sind auch zukunftssicher.

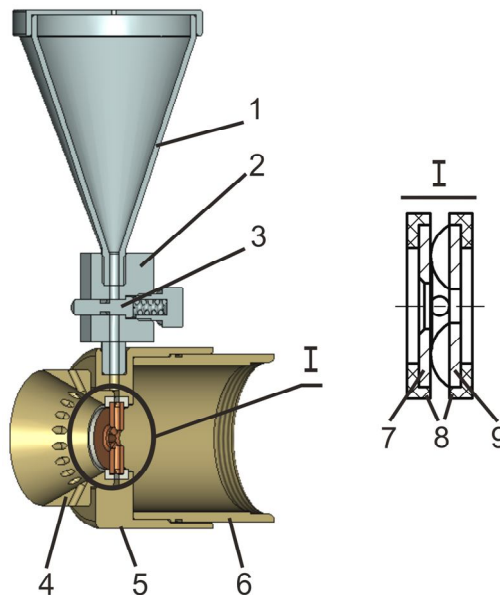
Einer der wesentlichsten Nachteile dieser Methode besteht in der Anwendung ausschließlich des Leitungsdrahts als Spritzmaterial. Die Benutzung des Pulverdrahts zum Erhalt der **kompositorischen** Lichtbogenbeschichtungen ließ die Liste der Beschichtungszusammensetzungen wesentlich erweitern, dabei steigt deren Wert, und solche Beschichtungen besitzen geringe mechanische Eigenschaften und hohe Porosität. Es ist unmöglich, bei Verwendung des Pulverdrahts, Metallpolymerbeschichtung zu bekommen, weil die Struktur des Polymerkomponenten wegen der hohen Temperatur der Lichtbogenentladung beeinträchtigt wird.

Die vorliegende Arbeit bezweckt Erarbeitung der kompositorischen Beschichtungen durch Lichtbogenspritzen mit Pulverbenutzung.

Zum Erhalt der kompositorischen Beschichtungen durch Lichtbogenspritzen wurde die Kappe des Spritzkopfes der Lichtbogenanlage modernisiert, das ermöglicht, die Beschichtungen mit Pulvermaterial durch dessen Einbringung in Hochtemperaturbereich der Lichtbogenentladung zu schaffen.

Bei Strahlung der Druckluft aus der Düse entsteht intensives Einspritzen der Außenluft in den Strahl. So, wenn man in die Düsenöffnung in der Kappe des Spritzkopfes das aufzuspritzende Pulver hält, wird es in den aus der Düsenöffnung laufenden Luftstrahl eingesaugt werden. Der aus der Düsenöffnung laufende Luftstrom ist turbulent, das gute Vermischung der Pulverteilchen mit Schmelzflusstropfen und dadurch gleichmäßige Verteilung der Pulverteilchen in der Beschichtung ermöglicht.

Die Modernisierung der Lichtbogenanlage bestand in der Erarbeitung der Baugruppe zur kontinuierlichen Zufuhr des Pulvermaterials in den Hochtemperaturbereich der Lichtbogenentladung (Abb. 1) [1, 2].



**Abb. 1. Schema der modernisierten Kappe des Spritzkopfes der Lichtbogenanlage
(die Bezeichnungen - im Text)**

Da Pulverzufuhr des Pulvermaterials in den Strom des Metallschmelzflusses zu richten ist, war Einspritzkopf konstruktiv geändert. Vor der Hauptbronzendüse 9 wird zusätzliche Bronzendüse 7 mit breiterer Öffnung als die der Hauptdüse installiert. In der Hauptdüse 9 gibt es acht Schlitzen, die den Raum zwischen der zusätzlichen Düse 7 und Hauptdüse 9 erreichen und sich senkrecht der Achse des Gasstroms befinden. Düsen 7 und 9 sind in die Isolationseinlagen 8 montiert, die an die Kappe 5 mit dem Schutzschirm 4 befestigt ist. Pulvermaterial läuft aus dem Trichter 1 in die Dosieranlage 2. Bei Betätigung des Bedienunghebels 3, läuft Pulver durch Injektion aus der Dosieranlage 2 in den Raum zwischen der zusätzlichen Düse 7 und Hauptdüse 9. Zur Regelung der Pulverzufuhr dient Anschlussstück 6. Beim Durchlauf durch zusätzliche Düse 7 und Lichtbogen zwischen beiden Drahtelektroden richtet sich das Pulver an die zu beschichtete Oberfläche, indem es sich mit Dichtluftstrom und Schmelzflußteilchen vermischt.

Bei Regelung der Pulverzufuhr und Drahtgeschwindigkeit kann man kompositorische Beschichtungen mit unterschiedlicher Pulverkonzentration bekommen.

In den Versuchen benutzte man vollgezogenen Draht ISO 9001, CE, TÜV AWS A5.18 ER70S-6, Durchmesser 1,2mm und Pulver (Kornklasse 40...80 mkm):

Polymerpulver, Al_2O_3 , ZrO_2 , und Verpackungsglasbruch, dessen chemische Zusammensetzung in der Tabelle 1 angegeben ist.

Tabelle 1

Chemische Zusammensetzung des Glasses

Chemische Zusammensetzung	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O_2	SO_3
Gehalt, %	61,92	11,64	1,52	0,77	7,05	4,06	10,43	2,3	0,26

Vor der kompositorischen Beschichtung wurde die Unterlage entfettet und strömungsabrasiv bearbeitet. Als Schleifmittel gilt Elektrokorund.

Nach der Beschichtung mit der modernisierten Lichtbogenanlage wurden folgende Beschichtungen erhalten (Abb. 2): ER70S-6 – Polymer, ER70S-6 – Al_2O_3 , ER70S-6 – ZrO_2 , ER70S-6 – Glas.

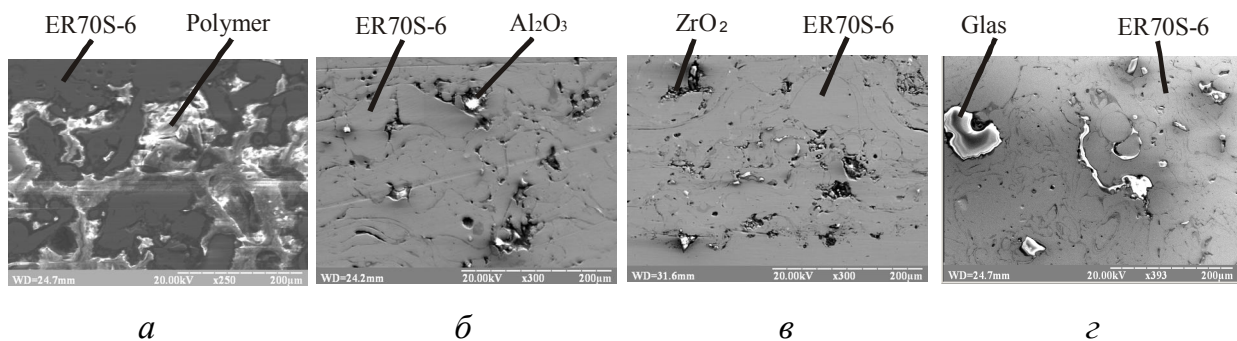


Abb. 2. Mikrostruktur der kompositorischen Beschichtungen: *a* – ER70S-6 – Polymer ; *b* – ER70S-6 – Al_2O_3 ; *c* – ER70S-6 – ZrO_2 ; *d* – ER70S-6 – Glas.

Alle Phasen in den kompositorischen Beschichtungen wurden mit Mikrohärtemesser identifiziert. Mikrohärte des Metallmatrixes aus ER70S-6 in allen kompositorischen Beschichtungen beträgt 1900 MPa, und Mikrohärte der Füllmittel in entsprechenden Komposita beträgt: Polymer – 150 MPa, Al_2O_3 – 16104 MPa und ZrO_2 – 12880 MPa, Glas– 5850 MPa.

Mit Hilfe von metallographischer Computeranalyse sind die Höchstgrenzen des Füllstoffvolumens für modernisierte Lichtbogenanlage durch Regelung der technologischen Kennwerte des Lichtbogenspritzens der Komposita festgestellt: in

Metallpolymerbeschichtungen– 40 %; in metallkeramischen Beschichtungen Al_2O_3 – 11,5 % und ZrO_2 – 14 %, in Metallglasbeschichtungen – 19,5 %.

Wir haben festgestellt, dass die Porösität der kompositorischen Metallpolymerbeschichtungen von 13% bis 7 % sinkt, Wärmeleitfähigkeit sinkt dabei um 46 % im Vergleich zur ungefüllten Beschichtung aus ER70S-6, das es solche Beschichtungen nicht nur als korrosionsfeste, sondern auch als wärmedichte Beschichtungen unterschiedlicher Konstruktionen und Einrichtungen anzuwenden ermöglicht.

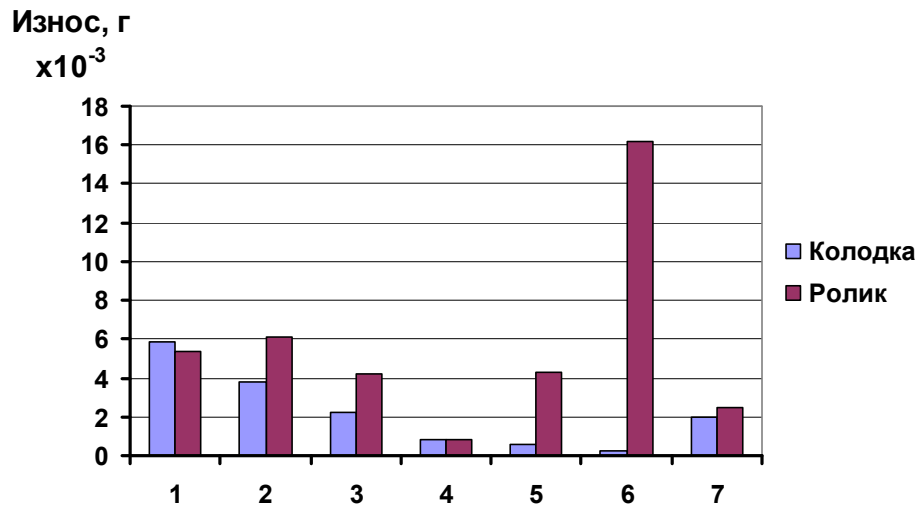
Es ist bekannt, dass die hohe Verschleißfestigkeit schaffendes optimales Oxidverhältnis der Komposita $Me + \text{Al}_2\text{O}_3$, $Me + \text{ZrO}_2$ 5...10 % beträgt. So sind zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit der Reibpaarungen die metallkeramischen mit Al_2O_3 und ZrO_2 gefüllten, durch modernisierte Lichtbogenanlage aufgetragenen Lichtbogenbeschichtungen perspektiv.

Für Bestimmung des optimalen Glasverhältnisses in der Metallglasbeschichtung sind die Versuche der Verschleißfestigkeit und Haftfestigkeit durchgeführt. Verschleißfestigkeit der Metallglasbeschichtung bestimmte man nach dem Schema Rolle-Backe zu folgenden Bedingungen: Umfangsgeschwindigkeit 0,8 m/sek., Flächendruck 5 MPa, Ölverbrauch TURBO DIESEL 15W-40 vorbehalten die begrenzte Schmierung, betrug 30 Tropfen/Min., die gelaufene Strecke nach dem Einlaufen ist 10 Km. Verschleißgrad wurde nach dem Masseverlust gemessen.

Die kompositorischen Metallglasbeschichtungen wurden auf die Backen aufgebracht. Die Rollen waren aus dem qualitativen Kohlenstoffstahl 1.1193, nach der Wärmebehandlung HRC 30...32 hergestellt. Zum Vergleich der Verschleißfestigkeit der Metallglasbeschichtungen mit Bronze, ist Verschleißgrad der Bronze CuAl10Fe2-C (CC331G), in gleichen Bedingungen festgestellt.

Ergebnisanalyse der Verschleißfestigkeit der Metallglasbeschichtungen mit Glasgehalt 5-17 % (Abb. 3) zeigte, dass, die Beschichtung mit 17 % der Glasphase 8-fach weniger Verschleißgrad als Bronze CuAl10Fe2-C hat, trotzdem fällt der katastrophale Rollenverschleiß auf. Die beste Verschleißfestigkeit zeigt die Reibpaarung mit Metallglasbeschichtung (Glasphasengehalt ist 11%), die 6,9-fach

wenigeren Gesamtverschleiß als Reibpaarung mit ungefüllter Beschichtung aus **ER70S-6** und 2,8-fach weniger Verschleiß als Bronzenbeschichtung hat.



Verschleiß, g x 10⁻³

□ - Rolle

■ - Backen

Рис. 3. Histogramm zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit der Beschichtungen aus **ER70S-6** mit unterschiedlichem Glasgehalt:

1 – Beschichtung aus **ER70S-6**; 2 – 5 %; 3 – 8 % (об.); 4 – 11 %;
5 – 14 %; 6 – 17 %; 7 – **CuAl10Fe2-C**.

Haftfestigkeit der Beschichtung mit der Grundlage (Abb. 4), die durch “Stiftausdehnen” bestimmt wird, steigt entsprechend der Erhöhung des Glasgehalts in der Beschichtung, und dann sinkt. Erhöhung der Haftfestigkeit ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Beschichtung der Grundlage durch hohe kinetische Energie und Scherbenform der nicht durchgeschmolzenen Glasteilchen aktiviert wird, die auf die Grundlagenfläche stießen, und sich beim Zusammenstoß mit fixierten plastischen Metallteilchen diese Metallteilchen in die Rauigkeiten der Oberfläche und tieferen Schichten eindringen lassen.

Haftfestigkeitsminderung hat mit weiterer Erhöhung des Glasphasengehalts zu tun, das im Endeffekt zu Verkleinerung des tatsächlichen Kontaktbereichs der Metallteilchen mit Grundlage führt.

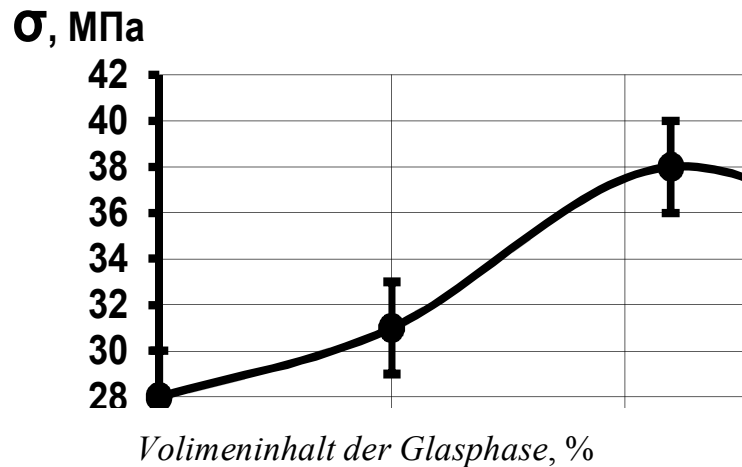


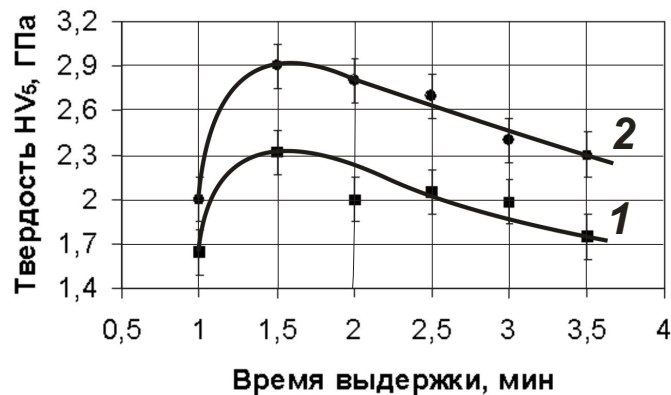
Abb. 4. Die Änderungen der Haftfestigkeit bezogen auf Glasinhalt in der Beschichtung

Versuchsergebnisse der Haftfestigkeit und Rauigkeiten ließen schlussfolgern, dass optimaler Glasphaseninhalt in den Metallglasbeschichtungen 8 – 14 % beträgt, dabei weisen solche Beschichtungen maximale Verschleißfestigkeit und Haftfestigkeit mit der Grundlage auf.

Optimale Bedingungen zum Aufbringen der Metallglasbeschichtungen mit Glasphaseninhalt 8 – 14 %, sind versuchsweise mit Regressionsgleichung berechnet und sehen folgenderweise aus: Stromstärke 100 A, Spannung 30 V, Luftdruck 0,5 Mpa, Pulververbrauch 25 g/Min, Spritzenabstand 100 mm.

Zur weiteren Besserung der physisch-mechanischen Charakteristika sind optimale Bedingungen der vorrekristallisierenden Wärmebehandlung der Lichtbogenbeschichtungen aus **ER70S-6** und des Kompositums **ER70S-6** – Glas, festgestellt, die in der Anheizung bis 500 °C, 1,5 Min. Lagerung und weiterer Luftabkühlung bestand. Solche Wärmebehandlung bessert die physisch-mechanischen Charakteristika und Gebrauchseigenschaften wegen Zerkleinerung der Substruktur im Beschichtungsmaterial [3, 4].

Abb. 5 zeigt Härteänderungen der Lichtbogenbeschichtungen abhängig von Lagerungszeit bei der Temperatur 500 °C, die der primären Rekristallisationstemperatur entsprechen.



Härte, HV₅, GPa

Lagerungszeit, Min.

Рис. 5. Abhängigkeit der Härte der Lichtbogenbeschichtungen von Lagerungszeit bei Wärmebehandlung (500 °C):

1 – Lichtbogenbeschichtung aus Draht ER70S-6;

2 – Lichtbogenbeschichtung aus Kompositum ER70S-6 – Glas

Härte der Lichtbogenbeschichtungen aus Draht ER70S-6 beträgt nach der Aufspritzung 1,64 GPa. Nach der Wärmebehandlung 500 °C, die der primären Rekristallisationstemperatur dieses Materials entspricht, wird maximaler Härtewert 2,32 GPa nach der Lagerung 1,5 Minuten festgestellt, das die Härte im Aufspritzungszustand um 41 % überschreitet.

Die Härte des Metallmatrixes in der Metallglasbeschichtung aus dem Kompositum ER70S-6 – Glas, beträgt nach dem Aufspritzen 2 GPa. Mikrohärtigkeit der Glasphase beträgt 5850 MPa. Nach der Wärmebehandlung 500 °C, wird maximaler Härtewert 2,9 GPa auch nach der kurzzeitigen Lagerung 1,5 Minuten beobachtet, das die Härte im Aufspritzungszustand um 45 % überschreitet. Mikrohärtigkeit der Glasphase hat sich nach der Wärmebehandlung nicht geändert.

Diese Erscheinung ist solcherweise zu erklären: es ist bekannt, dass die Deformationsgröße beim Aufspritzen 90...95 %, und Abkühlungsgeschwindigkeit der

deformierten Teilchen $10^6 \dots 10^8$ °C/Sek., wegen der hohen Auftreffgeschwindigkeit der Teilchen mit der festen Oberfläche betragen, das dynamische Rekristallisierung hindert. Kurzzeitige Lagerung bei Temperatur der primären Rekristallisierung verursacht nicht die Entwicklung der Strukturelementen, sondern führt zur Bildung der Substrukturelementen, deren Größe die Härtesteigerung fördert und mit Hilfe vom optischen metallographischen Mikroskop nicht festgestellt wird. Röntgenstrukturanalyse der Lichtbogenbeschichtungen aus Draht **ER70S-6** hat gezeigt, dass der Anzahl der Kristallphasen in diesen Beschichtungen mindestens 99 % beträgt. In dieser Zusammensetzung kann man Kristallisierung der amorphen Phase in obigen Versuchen ausschließen.

Einfluß der Wärmebehandlungsdauer bei Temperatur der primären Rekristallisierung auf Substruktur der aufgespritzten Lichtbogenbeschichtungen aus Draht **ER70S-6** wurde nach der Erweiterung der kohärenten Streuung der Röntgenstrahlungen eingeschätzt (Tabelle 1).

Tabelle 1

Kennwerte der Struktur der Lichtbogenbeschichtungen aus Draht **ER70S-6** vor und nach der Wärmebehandlung

Beschichtungsmaterial	Wärmebehandlung	Physische Erweiterung der Abbildungen, Grad.		Erweiterung der kohärenten Streuung D, nm
		(110)	(220)	
Beschichtung aus ER70S-6	Ohne Wärmebehandlung	1,15	0,98	106
	500 °C, 1,5 Min.	1,25	1,05	62
	500 °C, 20 Min.	1,12	0,88	118

Aus den angegebenen Werten in der Tabelle 1 ist es ersichtlich, dass die Erweiterung der kohärenten Streuung nach der vorrekristallisierenden Wärmebehandlung, die Maximalhärte schafft, 1,7-fach weniger ist, als im Zustand nach dem Aufspritzen (Ohne Wärmebehandlung). Bei Dauerverlängerung bis 20 Minuten, erhöht sich Erweiterung der kohärenten Streuung im Vergleich zum Zustand nach dem Aufspritzen (Ohne Wärmebehandlung), und die Härte sinkt bis 1,6 GPa.

Gemäß der Strukturanalyse der Metallglasbeschichtungen, liegen neue Kristallphasen vor und nach der Wärmebehandlung nicht vorhanden. Alle untersuchten Metallmatrixe haben Kristallstruktur $\alpha\text{-Fe}$, die Teilchen der Glasphase sind amorph, das Intensitätsabfall der Grundgipfel und erhöhter Hintergrund der erhaltenen Diffraktionsbilder nachweisen.

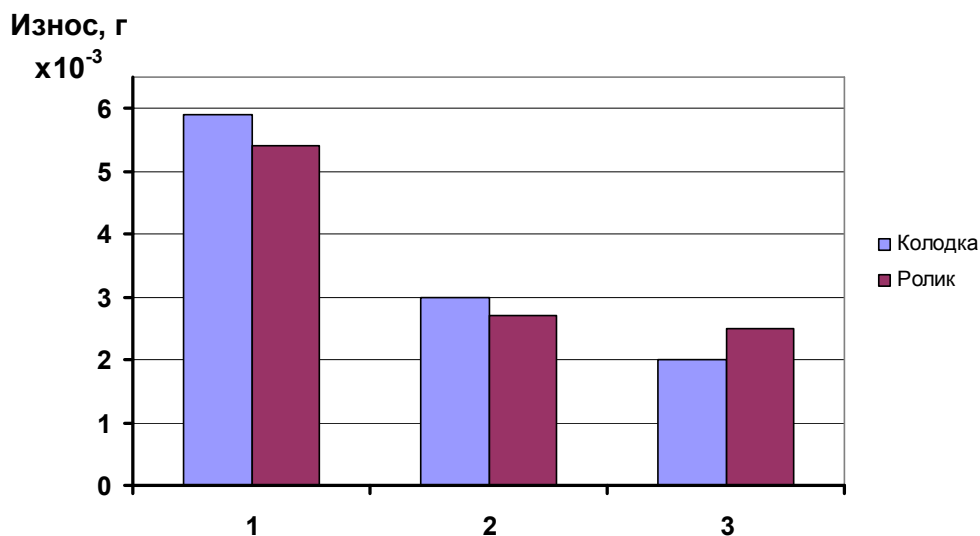
So wird die theoretische Voraussetzung nachgewiesen, dass kurzzeitige Lagerung der Muster mit aufgetragenen Lichtbogenbeschichtungen bei der Temperatur der primären Rekristallisation mit der nachfolgenden Luftabkühlung zur Erhöhung der Beschichtungshärte dank der vorrekristallisierenden Zustandsfixierung der Metallgrundlage der Beschichtung führt.

Zur Feststellung des Einflusses der vorrekristallisierenden Wärmebehandlung der Beschichtungen aus Draht **ER70S-6** auf Gebrauchseigenschaften ist Wärmeleitkoeffizient bestimmt und Abnutzungsversuche durchgeführt.

Die Bedingungen der Abnutzungsversuche vor und nach der vorrekristallisierenden Wärmebehandlung der Beschichtungen sind den Versuchsbedingungen der Metallglasbeschichtungen ähnlich.

Versuchsanalyse der Verschleißfestigkeit der Lichtbogenbeschichtungen vor und nach der vorrekristallisierenden Wärmebehandlung der Beschichtungen (Abb. 6), zeigte, dass Verschleißfestigkeit der wärmebehandelten Beschichtung 1,9-fach höher, als die ohne Wärmebehandlung ist. Verschleißfestigkeit der wärmebehandelten Beschichtung ist 1,5-fach weniger, als die im Vergleich zur wärmebehandelten Bronze **CuAl10Fe2-C**.

Meßergebnisse der Wärmefähigkeit der Lichtbogenbeschichtungen aus Draht **ER70S-6** vor und nach der vorrekristallisierenden Wärmebehandlung, haben gezeigt, dass die Wärmefähigkeit der behandelten Beschichtungen um 35 % sinkt.



Verschleiß, g x10⁻³

□ - Rolle

■ - Backen

Abb. 6. Histogramm zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit der Beschichtungen:

1 – Beschichtung aus **ER70S-6** ohne Thermobehandlung; 2 – Beschichtung aus

ER70S-6 mit Thermobehandlung 500 °C, Auslagerung 1,5 Min., Luftkühlung;

3 – **CuAl10Fe2-C**

Uns auf unsere Versuchsergebnisse beziehend, können wir schlussfolgern, dass die Verkleinerung der Strukturteile der Beschichtung und Verwendung in der Beschichtungszusammensetzung der Teilchen mit der niedrigen Wärmeleitfähigkeit (Al₂O₃, ZrO₂, стекло)_ deren Anwendung nicht nur als verschleißfeste, sondern auch als wärmebeständige Beschichtungen ermöglicht.

ZUSAMMENFASSUNG

1. Die modernisierte metallisierende Lichtbogenanlageэлектродуговой ermöglichte erst die kompositorische Beschichtungen durch Einführung in den Hochtemperaturbereich des Pulverspritzers, dank Injektion zwischen den Haupt- und

Nebendüsen zu erhalten. Optimalbedingungen der Aufbringung der Metallglasbeschichtungen sind festgestellt, die deren maximale Verschleißfestigkeit und Haftfähigkeit ermöglichen.

2. Optimale Bedingungen der vorrekristallisierenden Wärmebehandlung der Lichtbogenbeschichtungen aus Draht **ER70S-6** und Kompositum **ER70S-6** – Glas, sind festgestellt, die in der Anheizung bis 500 °C, 1,5 Min. Lagerung und weiterer Luftabkühlung besteht. Die vorgeschlagene Wärmebehandlung erhöht die Härte um 40-45% , die Verschleißfestigkeit - 1,9-fach und vermindert Wärmeleitungskoeffizient um 35% wegen Zerkleinerung der Substruktur im Beschichtungsmaterial.

LITERATURVERZEICHNIS:

1. *Pat. 83603 Ukraine. Lichtbogenspritzer* / O.M. Dubowyj, A.A. Karpetschenko, C.M. Schumow. – Antr. 25.06.2007, veröffentlicht am 25.07.2008, Anzeigebblatt Nr. 14.

2. *Pat. 30382 Ukraine zum Gebrauchsmuster. Lichtbogenspritzer* / O.M. Dubowyj, A.A. Karpetschenko, C.M. Schumow. – Antr. 29.10.2007, veröffentlicht am 25.02.2008, Anzeigebblatt Nr. 4.

3. *Pat. 88755 Ukraine. Beschichtungsverfahren* / O.M. Dubowyj, T.A. Jankowez, A.A. Karpetschenko, O.O. Shdanow. – Antr. 23.03.2009, veröffentlicht am 10.11.2009, Anzeigebblatt Nr. 21.

4. *Pat. 43984 Ukraine zum Gebrauchsmuster. Lichtbogenspritzen der Beschichtungen* / O.M. Dubowyj, T.A. Jankowez, A.A. Karpetschenko, O.O.Shdanow. – Antr.. 21.04.2009, veröffentlicht am 10.09.2009, Anzeigebblatt Nr. 17.