

Beschichtung mit gefilterten Lichtbogenverdampfern

Filtered arc deposition

Erich Bergmann und Vladimir Gorokovsky

Zusammenfassung

Eine Einführung in die Bedeutung der Transportprozesse bei Beschichtungen führt zur Definition des Phasenwandlers als Überbegriff für Filter für die Lichtbogenverdampfer. Einer kurzen Übersicht über Filtervarianten folgt eine Darstellung der industriellen Lösung, der rechteckigen Plasmaleitkammer. Einige Anwendungsbeispiele und ein qualitativer Vergleich mit anderen Verfahren ergänzen die Darstellung.

Summary

An introduction into the importance of transport processes in coating technology leads to the definition of the phase-modulator as the general concept for filters for cathodic arc evaporators. A short review of historical filter variants is followed by a description of the industrial solution, the rectangular plasma guide chamber. Examples of applications and a comparison with other coating technologies conclude the article.

1 Einleitung

Jeder Beschichtungsprozess läuft in drei Etappen ab, die in Bild 1 dargestellt sind.

Christian Weissmantel hatte immer wieder daran erinnert, dass dieser Ablauf auch der Ausgangspunkt für das Verständnis und die Beurteilung von PVD-Verfahren ist und die Bücher von ihm und seinem Freund

Ron Bunshah folgen auch diesem Aufbau. PVD-Verfahren sind Verfahren, wo der Schichtwerkstoff auf physikalischem Weg in die Transportphase eingebracht und aus ihr abgeschieden wird. Wir kennen und nützen drei Arten der Dampfbildung:

- Verdampfen
- Zerstäuben
- Schälén

Zum Schälén verwendet man Laserstrahlen, zum Zerstäuben im Allgemeinen Edelgas oder neuerdings Metallionen. Die Energie für das Verdampfen kann auf mannigfache Weise in das Gut eingebracht werden:

- Thermisch
- Durch Elektronenbeschuss aus Hochspannungselektronenstrahlen oder aus Lichtbögen
- Eine Kombination der beiden Effekte am Kathodenfußpunkt eines Lichtbogens.

Zu den Einzelheiten der einzelnen Dampferzeuger und ihrer Wirkungsweise gibt es eine Fülle einschlägiger Literatur, die auch eine ausführliche Beschreibung liefert.

Der Niederschlag des Schichtwerkstoffes ist im einfachsten Fall eine Kondensation aus der Dampfphase. Bei reaktiven plasmaunterstützten Verfahren, wie sie in der Hartstoffbeschichtung verwendet werden, trägt eine Fülle von Einzelprozessen zur Schichtbildung bei. Sie wurden ebenfalls von Christian Weissmantel vollständig beschrieben. Ihre Wichtung, das heißt der Mix der Einzelprozesse bestimmt Aufbau und mithin Einsatzqualität der Schicht. Er wird bestimmt von

- Elektrischen Feldern in Oberflächennähe,
- Temperatur,
- Metallurgie der Schichtstoffkomponenten
- Metallurgie der Werkstückoberfläche
- Phasenzusammensetzung des Schichtwerkstoffes

Die Phasenzusammensetzung des Schichtwerkstoffes bezieht sich auf die Oberflächennähe, wobei Nähe natürlich der Größenordnung der mittleren freien Weglänge entspricht.

Phasenzusammensetzung bedeutet Phasenzusammensetzung, das heißt Anteil an

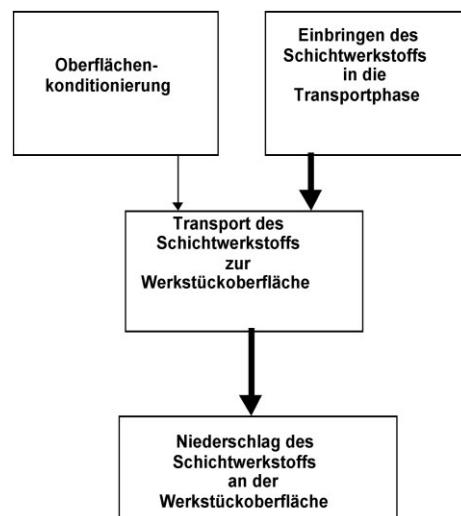


Bild 1: Prinzipschema Beschichtung

- Atomen
- Ionen
- Molekülen
- Radikalen
- Häufchen
- Tröpfchen

Jeweils bezogen auf die einzelnen chemischen Komponenten des Schichtwerkstoffs.

Da es auf diesem Gebiet mehr stark vereinfachende Modelle (Moychan&Demchichin, Thornton, Musil, Messier, etc.) als grundlegende Untersuchungen gibt, zählt das Beherrschen dieses Vorgangs in einem Anwendungsfall zum engsten Know-How des Anwenders.

Inhalt dieses Beitrags ist aber die zweite Etappe des Beschichtungsprozesses, der Transport des Schichtwerkstoffs zu den Werkstückoberflächen.

Die traditionellen PVD-Verfahren nutzen die molekulare Strömung für den Transport des Schichtwerkstoffs zur Werkstückoberfläche. Bei Aufdampfverfahren im Druckbereich unter 0.1 Pa ist die Bedingung für molekulare Strömung

$$\frac{\text{Abstand Dampferzeuger} - \text{Werkstückoberfläche}}{\text{mittlere freie Weglänge des Schichtwerkstoffdampfs}}$$

leicht zu erfüllen. Später zeigten Mattox, Schiller und Bunshah, danach Windows und Savvides, dass es sinnvoll ist im Bereich zwischen Dampferzeuger und Werkstück ein Plasma aufrechtzuerhalten und wenigstens einen Teil des Transports als Plasmastromung zu betreiben. Das Ionenplattieren war erfunden. Zum Ionenplattieren gibt es zahlreiche theoretische Untersuchungen insbesondere von der Gruppe in Limoges, mit der Weissmantel eng zusammengearbeitet hat und von Allen Mathews.

Nachdem in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts die ersten Ansätze, einfach mit dem Druck hochzugehen an der schlechten Ausbeute gescheitert waren, gibt es inzwischen zahlreiche erfolgreiche Gruppen, die Feinvakuumbeschichtungsverfahren mit laminarer Strömung entwickeln (z. B. IST, Engemann, Bardos, Belkind) Da man inzwischen den Grobvakuumbereich und den Atmosphärendruck erreicht hat spielt auch turbulente Strömung vermehrt eine Rolle beim Transport in PVD-Verfahren.

Eine radikale Weiterentwicklung des Ansatzes von Mattox und Schiller besteht darin, den Transport des Schichtwerkstoffs

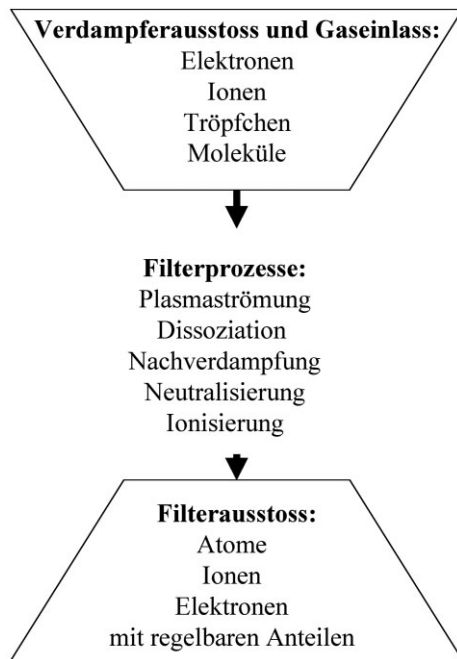


Bild 2: Prinzipschema Phasenwandler

vom Dampferzeuger zum Werkstück zur systematischen Veränderung der Phasenzusammensetzung zu verwenden. Das bedeutendste Beispiel dafür ist die **Beschichtung mit gefilterten Lichtbogenverdampfern.**

Ausgangspunkt dafür ist die Phasenzusammensetzung eines kathodischen Lichtbogenverdampfers. Diese Quelle liefert

- Elektronen
- Einfach und mehrfach ionisierte Metallionen
- Metalltröpfchen

Welcher Anteil der neutralen Atome, die etwa 10% ausmachen, von der Verdampferoberfläche oder von den Tröpfchen-

oberflächen stammen, ist nicht klar, und ist sicher auch werkstoffabhängig. Ein Phasenwandler als Transportprozess (Filter) lässt sich durch das Schema in Bild 2 beschreiben:

2 Filtervarianten und ihre historische Entwicklung

Ursprünglich war der alleinige Zweck der Filter, die „Makropartikel“, Tröpfchen und feste Teilchen aus dem von der Quelle emittiertem Plasmastrom zu filtern.

Die Namensgebung ist irreführend. Niemand konnte bisher zeigen, dass eine Verdampferquelle mehr feste Teilchen emittiert als eine Beschichtungskammerwand. Im Gegenteil, Rick Welty konnte das naheliegende beweisen und zeigen, dass große Tröpfchen in einem bestimmten Durchmesserbereich durch Abfuhr der Verdampfungswärme erstarren und dann natürlich vom Werkstück abrallen, also nicht gefiltert werden müssen. In der Beschichtungspraxis sind Makroteilchen Tröpfchen mit einem Durchmesser von 0.1 - 10 µm. In allen anderen Labors beginnt bekanntlich die Makrowelt bei 0.1 mm.

Magnetische Makropartikelfilter wurden ursprünglich von Aksenov in den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelt. Ihre Funktionsweise ist einfach: In einem axialen magnetischen Feld führen die Elektronen eine Schraubenbewegung um die Feldlinien aus. Sie folgen dabei auch gebogenen Feldlinien, wie sie von Viertelkreis oder S-förmigen Spulen erzeugt werden. Ihr Radius ist durch ihre Radialgeschwindigkeit und die magnetische Feldstärke bestimmt. Bei einer gegebenen Axialgeschwindigkeit kann man sie so

Tabelle 1:

Technologie	Maximale erzielte Tröpfchenreduktion	Dampfausbeute	Industrialisierungsstand
Gesteuerter Funken	3/4	100 %	aufgegeben
Kontrollierter Funken	1/2	100 %	Stand der Technik
Gejagter Funken	3/4	80 %	HTC 3000
Direkter Filter	3/4	50 %	Kobelco, Ion Bond, Powerbaby
90 ° Bogenfilter	100 %	2-4 %	Axenov, DIARC, CSIRO
Gejagter Funken im Graben	100 %	12 %	Vapor Tech
LAFAD	100 %	40 %	Arcomac

durch gewundene Rohre führen. Ionen winden sich auch um die magnetischen Feldlinien aber mit einem Radius der dem (Atomgewicht $\times 1836$) fachen des Elektronenradius entspricht. Das ist meist wesentlich mehr als der Rohrdurchmesser. Da Plasmen aber elektrisch neutral bleiben müssen, müssen die Ionen - unzureichendes Magnetfeld hin oder her - den Elektronen folgen und werden so ebenfalls durch das Rohr geführt. Tröpfchen werden vom Plasma kaum beeinflusst und fliegen träge geradeaus. Die klassischen Filter sind daher 90° , 45° , 30° gekrümmte Rohre oder S, die mit Spulen umwickelt sind. In der Praxis haben sich diese Systeme nicht bewährt, da sie hohe Verluste an Plasma durch Nebeneffekte aufweisen.

Man kann nämlich die Effizienz eines Filters sehr einfach definieren als:

$$\eta_{\text{Filter}} = \frac{\text{Metallionen, die den Filter passieren}}{\text{Metallionen, die vom Verdampfer emittiert werden}}$$

Bei allen soeben erwähnten Filtern liegt diese Effizienz im Bereich von 1 - 5%.

Verbesserungen erzielt man mit offenen Spulen.

Ein Durchbruch wurde durch die Entwicklung von elektrostatischen (IWS) und elektromagnetischen (Arcomac) Filtern

erzielt. Letztere erreichen einen Wirkungsgrad von etwa 80%, was einer Gesamtmetallausbeute von etwa 40% entspricht (Der Rest sind gefilterte „Makroteilchen“).

Die folgende Tabelle vergleicht die einzelnen Strategien zur Tröpfchenreduktion (Tab. 1).

3 Die industrielle Lösung

Die industrielle Lösung, die unter dem Namen LAFAD™ für Large Area Filtered Arc Deposition system vertrieben wird, verwendet 2 oder 4 gegenüberstehende Verdampfer, die durch eine Blende voneinander abgeschirmt sind und an einer Plasmaleitkammer mit rechteckigem Querschnitt angebracht sind. Diese ersetzt die alten Rohre und Spulen.

Bei diesem System werden die von den gegenüberliegenden Verdampferbänken emittierten Plasmaströme im rechten Winkel umgeleitet und direkt auf den ebenfalls rechteckigen Kammerflansch geführt. Die Kammer enthält den üblichen Drehtisch mit einfach-, zweifach-, und dreifach Drehung für Schaftwerkzeuge oder andere Bauteile. Sie ist in Bild 3 dargestellt.

Die Quelle eignet sich daher auch als Nachrüstung für Anlagen, die mit recht-

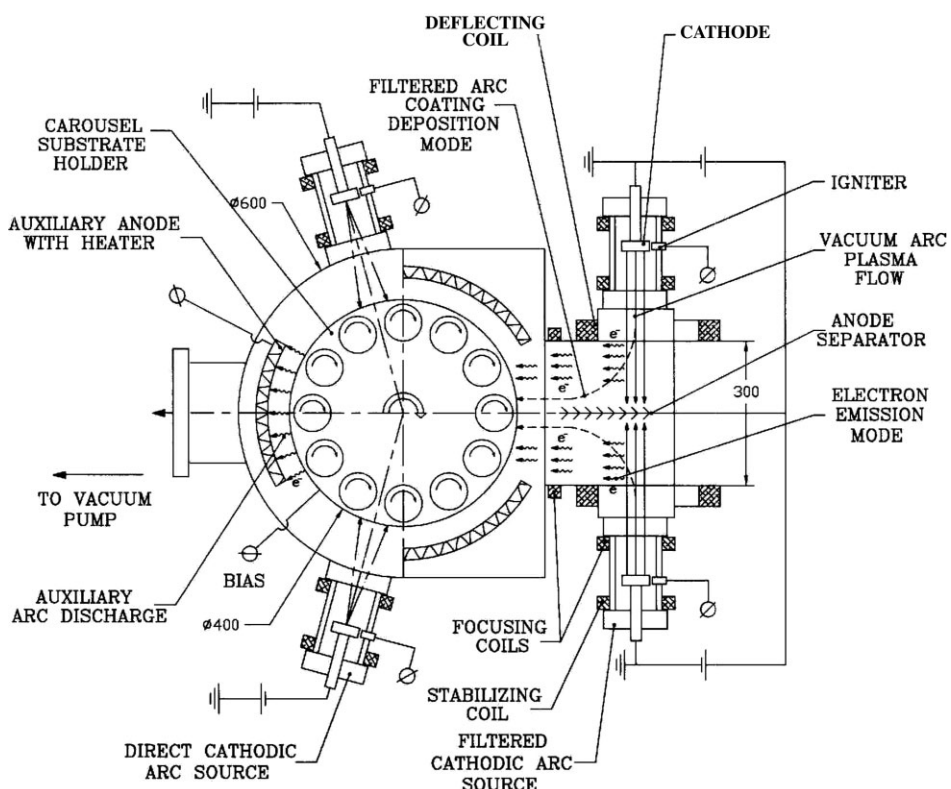


Bild 3: Aufbau LAFAD™ -Anlage



Bild 4: LAFAD™ 200

eckigen planaren Magnetrons oder spritzenden Funkenverdampfern ausgerüstet sind.

Bild 4 zeigt eine mit dieser neuen Quelle ausgerüstete Anlage LAFAD™ 200.

Ein weiterer Vorteil dieses Systems sind die breiten Steuermöglichkeiten. Die Plasmaleitkammer ist eben nicht ein einfacher Filter sondern ein regelbarer Phasenswandler. Er bietet die folgenden Möglichkeiten:

- Elektronenstrahlquelle mit hoher Leistung
- Teilweise neutralisierte Ionenstrahlen
- Unabhängiger Betrieb der beiden Verdampferbänke zur Herstellung von Mehrlagenschichten und Gradientenschichten.
- Herstellung von TiAlN aus Titan und Aluminiumtargets

Auch die Beschichtungsleistung entspricht den Leistungen der Beschichtungsanlagen mit ungefilterten Funkenquellen oder Magnetrons.

Die LAFAD™ 200 Anlage ist mit einem Drehtisch von 500 mm Durchmesser ausgerüstet. Die Beschichtungshöhe für eine gleichmäßige Beschichtung beträgt in dieser Anlage 300 mm. Die Beschichtungsrate entspricht $2 \mu\text{m}$ Titanaluminiumnitrid/Stunde bei Einfachdrehung mit einer Quelle. Die LAFAD™ 200 Anlage kann mit einer oder 2 Quellen ausgerüstet werden und erzielt dann $4 \mu\text{m}$ Titanaluminiumnitrid/Stunde.

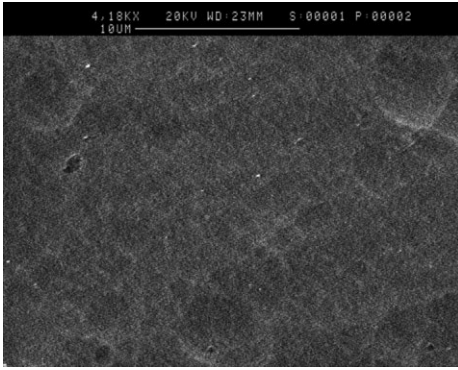


Bild 5: REM-Aufnahme einer aus Titan- und Aluminiumquellen abgeschiedenen 3 µm dicken Titanaluminiumnitridschicht.

Bei der größeren Anlage, LAFAD™ 500 beträgt die Beschichtungshöhe 600 mm bei unveränderter Beschichtungsrate.

4 Schichtabscheidung

Die Anlage eignet sich zur einfachen defektfreien Abscheidung von Metall-, Hartstoff-, Oxid-, und Kohlenstoffschichten.

Bild 5 zeigt eine Rasteraufnahme einer 3 µm dicken Titanaluminiumnitridschicht.

Aber die Hartstoffbeschichtung von Schneidwerkzeugen ist nur eine Anwendung. Eine Vielzahl von anderen Anwendungen wie anspruchsvoller Korrosionsschutz, Optik oder Mikroelektronik sind zur Zeit in Entwicklung und Produktion. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick Beispiele von erfolgreichen LAFAD™-beschichtungen (Tab. 2)

Bild 6 zeigt eine AFM-Aufnahme einer auf Silizium abgeschiedenen Kupferschicht.

Bild 7 zeigt beschichtete Turbinenschaufeln.

5 Vergleich mit anderen Dampfquellen

Zur Zeit kann der Anwender zwischen mehreren Varianten zur Abscheidung von Hochleistungsschichten wählen. Die folgende Tabelle gibt einen groben Vergleich der Vor- und Nachteile der einzelnen Beschichtungsquellen (Tab. 3).

6 Schlussfolgerung

Nach langen Irrwegen ist der Technologie des gefilterten Funkens der industrielle Durchbruch geglückt. Dies eröffnet zahlreiche Beschichtungsmöglichkeiten, bei der die Phasenzusammensetzung des Dampfes für die Qualität der Schicht von Bedeutung ist.

Tabelle 2:

Anwendung	Schichtsystem	Leistung
Bauteilbeschichtung	TiN + DLC	5 µm dicke Beschichtung auf Al-Si Gelenken. Reibkoeffizient < 0.1; Reibkoeffizient auf Stahlteilen < 0.02
Wärmedämmschichten für Turbinenschaufeln	Aluminiumoxid + Ni-CrAlY	Mehrfachschicht 20-25 µm thick, mit gleichmäßiger, mikrokristalliner Struktur. Schichtdickenschwankung über der gesamten Oberfläche < 40 %.
Schneidwerkzeuge	Aluminiumoxid auf TiN auf Hartmetall	Aluminiumoxidschichtstärke 0.5 µm, Microhärte = 250 GPa, Standzeiten ~ 2-3 fach als konventionelle TiAlN Mehrfachbeschichtung
Schneidwerkzeuge	TiAlSiN auf Hartmetall	Mehrfach und Einfachschichten verschiedener Architekturen auf Schaftwerkzeugen.
Siliziumwafer	As doped Si	Leitfähige funktionale ~500- 100 Å, Rauigkeit ~100 Å Rz.
Siliziumwafer	Kupfer	Siehe Bild
Hard Disk Antrieb	DLC	Mikrohärte = 25-90 GPa, Elektrischer Widerstand = 10 ⁻⁶ -10 ⁻¹⁰ Ω-cm.

Tabelle 3:

Beschichtungsquellen	Tröpfchendichte	Argongehalt	Ionisierung Schichtstoff	Streuvermögen	Haftungstechnologie	Kosten	
			Gasionisierung			Investition	Betrieb
Ionenplattieren	✓	✗		~	~	✓	✓
Direkter Funke	✗	✓	80 % (Ti) 3-5 % Stickstoff	✓	✓	✓	~ (Targets)
Kathodenzerstäubung (Magnetron)	✓	✗	5-10 % (Ti) 3-5 % Stickstoff	~	~	DF + 50 %	✓
Kathodenzerstäubung (UBM)	✓	✗	40 % (Ti) 5-10 % Stickstoff	~	~	DF + 50 %	✓
Gefilterter Funke (LAFAD)	✓	✓	100 % (Ti) 30-40 % Stickstoff	~	✓	DA + 50 %	✓
Gepulste Kathodenzerstäubung	✓	~	70 % (Ti) 3-5 % Stickstoff	✓	✓	DF + 100 %	~ (Targets)

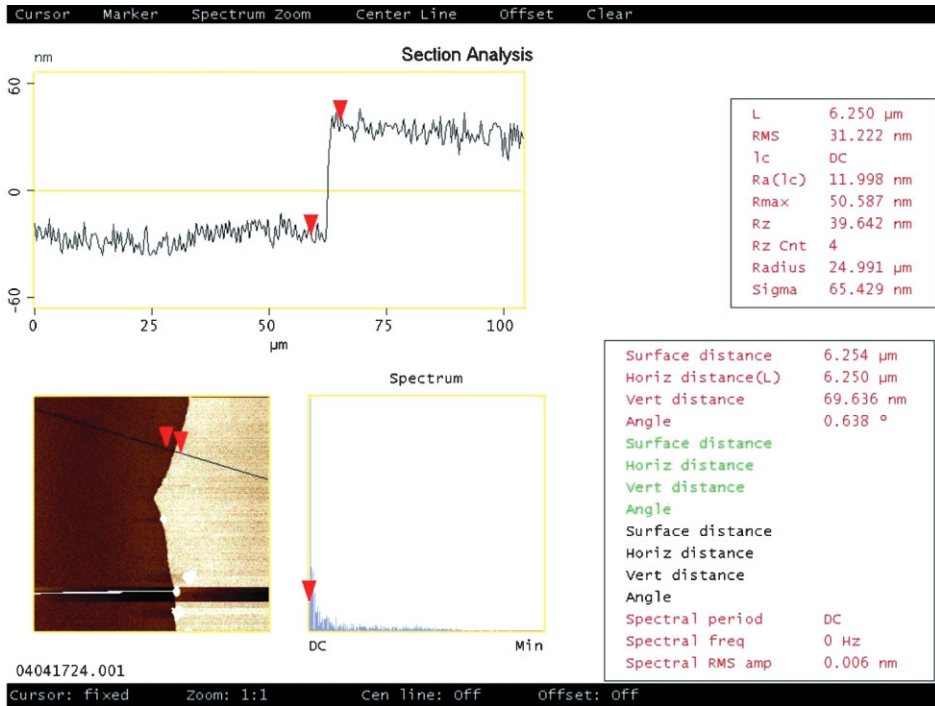


Bild 6: Kupferbeschichtung von Silizium. AFM-Bild und Profildarstellung. Das Profil zeigt, dass die Beschichtung mit gefiltertem Funken die Substratraugigkeit nicht verändert.

Kurzbiographien

Erich Bergmann promovierte 1970 an der Universität Graz in Festkörperphysik. In den folgenden 8 Jahren war er am Battelle-Institut in Genf auf dem Gebiet der Brennstoffzellenentwicklung und der Vakuumbeschichtung tätig. Danach baute er für die Schweizer Uhrenindustrie das erste dekorative Beschichtungszentrum auf. 1984 bis 1994 war er Entwicklungsleiter für Hartstoffbeschichtung der Balzers AG. Da-

nach gründete er die keller & bergmann gmbh und später die bestcoating sàrl. Seit 1994 ist er Professor für Werkstoffkunde an der Fachhochschule Genf. Erich Bergmann ist Autor, Mitautor oder Erfinder von mehr als 60 wissenschaftlichen Veröffentlichungen, mehreren Büchern und etwa 20 Patenten.

Vladimir Gorokhovskij war während 20 Jahren wissenschaftlicher Leiter für die Entwicklung von Verfahren und Anlagen

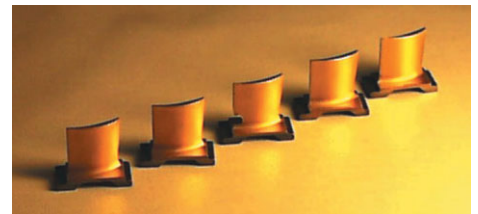


Bild 7: Beschichtete Turbinenschaufeln, 30 μm Titanitridmehrlagenschicht

für die Oberflächenbehandlung mit Lichtbogenplasmen und für die Entwicklung neuer Werkstoffe und Beschichtungen am Institut für superharte Werkstoffe der ukrainischen Akademie der Wissenschaften in Kiev. 1992 gründete er in Kanada Arcomac Plasma Processing Lab. Er entwickelte zahlreiche patentierte PVD und PACVD Verfahren. 2001 gründete er die Arcomac Surface Engineering in Bozeman und nahm einen Ruf an die Universität Montana an. Vladimir Gorokhovskij ist Mitautor von mehr als 80 Veröffentlichungen und ist in mehr als 20 Patenten als Erfinder benannt.

Autoren

Erich Bergmann

Ecole d'Ingénieurs de Genève HES, 4, route de la prairie CH-1201 Genève, bergmann@EIG.UNI-GE.CH

Vladimir Gorokhovskij

Arcomac Surface Engineering, 151 Evergreen Drive, Bozeman, MT 59715, arcomac@qwest.net