



(10) **DE 11 2015 002 677 T5** 2017.03.09

(12)

## Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der  
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2015/186095**  
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)  
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2015 002 677.0**  
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/IB2015/054239**  
(86) PCT-Anmeldetag: **04.06.2015**  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **10.12.2015**  
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: **09.03.2017**

(51) Int Cl.: **C23C 28/00 (2006.01)**  
**F16D 65/12 (2006.01)**

(30) Unionspriorität:  
**62/008,826**                      **06.06.2014**      **US**

(71) Anmelder:  
**National Research Council of Canada, Ottawa,  
Ontario, CA**

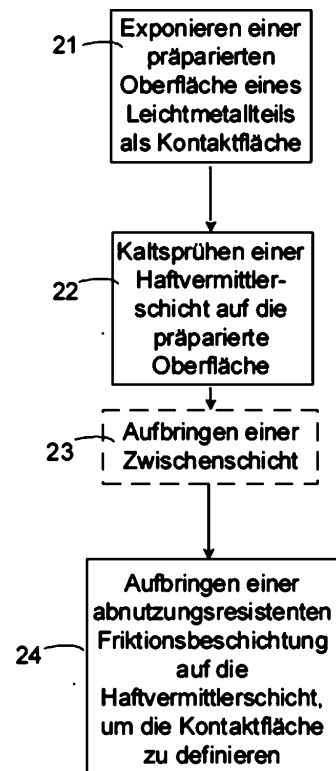
(74) Vertreter:  
**Glück · Kritzenberger Patentanwälte PartGmbH,  
93049 Regensburg, DE**

(72) Erfinder:  
**Poirier, Dominique, Boucherville, Quebec, CA;  
Irissou, Eric, Longueuil, Quebec, CA; Legoux,  
Jean-Gabriel, Repentigny, Quebec, CA; Gallant,  
Danick, Saguenay, Quebec, CA**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Doppellagenmetallbeschichtung eines Leichtmetallsubstrats**

(57) Zusammenfassung: Eine abnutzungsresistente Friktionsbeschichtung (WRFC) kann auf ein Leichtmetallsubstrat aufgebracht werden durch Aufbringen einer kaltgasdynamisch gesprühten Haftvermittlerschicht, welche mehr Eisen enthält als irgendein anderes einzelnes Element, direkt auf eine Oberfläche des Substrats, und thermisches Sprühen der WRFC-Schicht auf die Haftvermittlerschicht auf eine Dicke von wenigstens 500 µm. Die Korrosionsbeständigkeit, Adhäsion, thermische Zyklusresistenz und Abnutzungsresistenz wurden nachgewiesen.



## Beschreibung

### Technisches Feld der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft generell Eisen enthaltende Beschichtungen auf Leichtmetallsubstraten und insbesondere solche Beschichtungen, die dick sind und starke Adhäsion und Abnutzungsbeständigkeit insbesondere bei Bremssteilen aufweisen.

### Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Die meisten Versuche, bei der Produktion eisenbasierter abnutzungsbeständiger Friktionsbeschichtungen (WRFCs) auf Leichtmetallsubstraten (z. B. Al, Al-Legierungen, Mg, Mg-Legierungen und ihre metallischen Matrixzusammensetzungen und dergleichen) haben eine Lichtbogen-Sprühabscheidung verwendet, obwohl auch andere thermische Sprüh-(Luftplasma, Plasma, Hochgeschwindigkeits-sauerstoffbrennstoff, Flammsprühen) Systeme verwendet worden sind, und sicherlich wohlbekannt sind. Während metallbasierte Beschichtungen üblicherweise eine gute Abnutzungsbeständigkeit aufweisen, scheint es Probleme bei der Adhäsion der Beschichtung zu geben, insbesondere wenn die Beschichtungen dick sind und/oder das beschichtete System Hitzezyklen unterworfen ist. Unglücklicherweise befinden sich viele Fälle, wo WRFCs benötigt werden, an Abnutzungsoberflächen von bewegten Teilen, wie zum Beispiel Friktionsbremsoberflächen und Bremsklötze bzw. Pads, wobei eine starke Hitzeerzeugung stattfindet, die abrupt zu thermischen Zyklen führt und wobei dicke Eisenbeschichtungen gewünscht werden für eine bessere Hitzeabschirmung, um die Temperaturen zu verringern, welchen das Leichtmetallsubstrat ausgesetzt ist.

**[0003]** Bei vielen WRFCs ist es wünschenswert, für Teile, die aus Leichtmetall gebildet werden, mit dicken eisenbasierten Beschichtungen versehen zu werden, welche die Teile von übermäßiger Hitze schützen, welche adäquate tribologische Oberflächen bereitzustellen für die Friktionserfordernisse der Oberflächen, welche für die Ableitung von Hitze homogen durch das gesamte Teil sorgen, und widerstandsfähig gegen Abnutzung und Korrosion sind. Während es einen Bedarf für Bremssteile in Automobil- und anderen Anwendungen gibt und einen Wunsch nach leichten Bremssteilen, die Aluminium oder Magnesium statt Metallgussbremsen verwenden, sind bislang die Beschichtungen nicht in der Lage, den Umgebungsanforderungen einer Bremse zu entsprechen.

**[0004]** So lehrt zum Beispiel Weiss 1981 „Friction and Adhesion Investigations of Metal Coatings on Aluminium Alloys“ die Anwendung eines Lichtbogensprühens von Eisen mit geringen Bestandteilen an

Cr, C, Ni, Mn und Si auf Al-Rotoren, um drei Typen von Beschichtungen zu formen, die durch die Brinell 30 Härte wie folgt klassifiziert wurden: 2500–2700; 3000–3400; und 3800–4400. Während diese Beschichtungen offensichtlich eine gute Anhaftung zeigten, ist zu bemerken, dass: „Ein unterschrittener Schwalbenschwanz an den Kanten hat sich als nützlich herausgestellt und in einigen Fällen als notwendig für die Adhäsion.“ und „Dünnere (als 0,9 mm) gesprühte Beschichtungen hinterlassen eine zu geringe Bearbeitungsmöglichkeit zum Feinschleifen und weniger zufriedenstellende Adhäsionsbedingungen wurden gefunden für dickere (als 1,2 mm) Beschichtungen.“ „Eine weitere Entwicklung ist notwendig in diesem Fall für Bremscheiben wegen der relativ dünnen Abnutzungsbeschichtung.“ Die Bildung von hinterschnittenen Eigenschaften ist zeit- und kostenaufwendig bei der Bearbeitung eines Teils. Es ist erwartet, dass Korrosion ein Problem bei diesen Beschichtungen bildet und es ist zu erwarten, dass diese die lichtbogengesprühten Beschichtungen und ihre Adhäsion beeinträchtigen. Dies würde eine Verwendung einer derartigen Technologie über längere Zeit in den meisten Betriebsbedingungen unmöglich machen. Diese Offenbarung bestätigt auch die Tatsache, dass gewünscht ist, Friktionsbremsbeschichtung auf Aluminiumrotoren herzustellen.

**[0005]** Die US 6,290,032 ('032) von Patrick et al. lehrt ein Lichtbogendrahtspritzen einer Sprühbeschichtung bestehend aus Al und einem Stahl auf Aluminiumlegierung. Um eine Delamination zu vermeiden, lehrt das Patent eine grundsätzliche Aufrauung der Oberflächen oder Nuten. Die Ablösung bei Korrosion oder thermischen Zyklen könnte ein Problem bleiben, wenn ein hohes Massenverhältnis von Eisen/Stahl verwendet wird, wie es gewünscht werden könnte. Die Kosten bei der Produktion eines Substrats mit einer Oberflächenaufrauung in dem Maße, wie es in **Fig. 3B** der '032 gezeigt ist, könnte eine kommerzielle Anwendung dieser Erfindung verhindert haben und die Tiefe der Nut, die erforderlich ist, um eine adäquate Anhaftung für die Ausführungsform der **Fig. 3A** zu schaffen, könnte eine Maschinenbearbeitung für einen längeren Zeitraum erfordern, was die Zeit und die Kosten der Produktion erhöhen. Das gemischte Al und der rostfreie Stahl könnte auch nicht zufriedenstellende tribologische Eigenschaften, oder Lebensdauer, aufweisen und man würde eine schlechte Korrosionsresistenz erwarten.

**[0006]** Die US 5,407,035 ('035) von Cole et al. mit dem Titel „Composite Disk Brake Rotor and Method of Making“ zeigt die Anwendung von einer oder mehreren Beschichtungen auf einem aufgerauten Leichtmetallbremsscheibenrotor durch elektrisches Lichtbogensprühen in Co-Abscheidung von eisenbasiertem Material und gepulvertem Graphit, um eine Eisenmatrixkompositbeschichtung zu bilden, gefolgt von einer Oberflächenhitzebehandlung der ge-

bildeten Beschichtung, um das Graphit zu lösen und auszufällen, und Bilden eines simulierten Gusseisens zum Erhöhen der Dichte der Beschichtung und zum Beseitigen von Restspannungen. Fig. 3 der '035 zeigt, dass eine Zwischenschicht oder Lage 23 verwendet werden kann, die entweder als thermische Barriere agiert oder zur Verbesserung der chemischen Bindung zwischen der äußeren Beschichtung 22 und dem Leichtmetallrotor dient und um die Abweichung in der thermischen Expansion zwischen dem Rotor und der Beschichtung zu kompensieren. In Spalte 3, Zeilen 29–39 lehrt Cole et al. unterschiedliche Zusammensetzungen für die Zwischenbeschichtung (Ni/Graphit, Al/Gusseisen, Ni/Graphit Al, Ni basierte Legierungen), die durch elektrisches Lichtbogensprühen, Plasmasprühen oder Drahtlichtbogenschweißen aufgebracht werden.

**[0007]** Ein anderer Stand der Technik, der die Lichtbogensprühabscheidung von eisenbasierten Beschichtungen auf Aluminium lehrt, ist ein Papier mit dem Titel „Wear of Thermal Spray Deposited Low Carbon Coatings on Aluminium Alloys“ von Edrisy et al., Wear 251 (2001) 1023–1033. Diese Druckschrift behandelt nicht die Ablösung der Beschichtung.

**[0008]** Eine Maschinenübersetzung der WO2013038788, insbesondere der japanischen Veröffentlichungsnummer 2013-064173, Anmelde-nummer 2011-202682 von Terada Daisuke et al. wurde studiert, und während die Maschinenübersetzung eine andere Zusammensetzung zur Verbesserung der „Ablösungsresistenz“ und „Abrasionsresistenz“ einer thermischen Sprühbeschichtung (elektrische Sprühbeschichtungsverfahren und Plasmasprayverfahren werden erwähnt, als auch Pulver-, Draht- und Stangenzuführungen) vorzuschlagen scheint, ist es vernünftigerweise klar, dass die „peeling resistance“, auf die sich das Dokument bezieht, eine Abnutzungsbeständigkeit oder Abrasionsbeständigkeit ist. Die Adhäsion wird offensichtlich in der Anwendung nicht erläutert. Es ist betont, dass Zylinderbohrungsflächen (die fragliche Anwendung) im Gegensatz vieler WRFCs nicht hoher Friktion, Korrosion und thermischen Schocks unterworfen sind, so dass kein Vorschlag dahin geht, die Beschichtung dick zu machen.

**[0009]** Es ist angemerkt, dass alle oben genannten Druckschriften die Lichtbogenabscheidung vorzuziehen scheinen und jede beschäftigt sich mit der mechanischen Verzahnung und/oder Zusammensetzung der Beschichtung, um die Beschichtung zu produzieren oder lässt das Ablösen oder die Korrosion unberücksichtigt.

**[0010]** Die US 6,949,300 von Gillispie et al. zeigt eine kinetische Gassprühbeschichtung von Al oder Al-Legierungsoberflächen, wobei ihre Beschichtungen aus 4 grundsätzlichen Metallkomponenten be-

stehen, die möglicherweise Spuren von anderen Metallen aufweisen, unter welchen Eisen aufgeführt ist. Die Beschichtung wird beschrieben zur Schaffung eines Korrosionsschutzes für Wärmetauscher.

**[0011]** Es ist generell bekannt in dem Feld von dynamischem Kaltgassprühen, dass derartige Beschichtungen generell eine höhere Dichte haben und eine geringe Porosität, und dass sie dazu tendieren, eine bessere Korrosionsresistenz als lichtbogengesprühete Beschichtungen zu schaffen. Kaltgasdynamisch gesprühete Beschichtungen zeigen generell eine gute Beschichtungsanhaftung und eine gute Korrosionsresistenz (siehe Davis, J. R., Handbook of Thermal Spray Technology, 2004, ASM International, 347 p., und Irissou et al., Review on Cold Spray Process and Technology: Part I-Intellectual Property, JTST 17 (2), Dezember 2008, Seiten 495–516). Jedoch sind die tribologischen Eigenschaften von kaltgasdynamisch gesprüheten Metallagen nicht zufriedenstellend für die Abnutzungsbeständigkeit und Friktionsanwendungen.

**[0012]** Es verbleibt ein Bedarf nach Leichtmetallteilen, die zuverlässig und kostengünstig mit Abnutzungsflächen beschichtet werden, um Rotor- und Statorteile von Bremsen zu bilden, Friktionsflächen von Kupplungen und andere tribologische Beschichtungen, oder für Oberflächen, die anderweitig thermischen Schocks und thermischen Zyklen ausgesetzt sind, wie sie verwendet werden in Schwer-, Mittel- und Leichtmaschinen, und für subterrane, Unterwasser, Land- und Wasseroberflächen, Luft- und Raumfahrtfahrzeuganwendungen. Insbesondere sind leichte Teile wichtig für sich schnell bewegende oder rotierende Teile oder für Bremsflächen, die kinetische Energie absorbieren, wobei das leichte Gewicht wichtig ist.

#### Zusammenfassung der Erfindung

**[0013]** Der Anmelder hat eine Lösung für dieses lange bestehende Problem entdeckt, welches nicht eine teure Präparation der Leichtmetallsubstratoberfläche erfordert und welches eine verbesserte Anhaftung dicker Eisenbeschichtungen bereitstellt. Der Anmelder hat gezeigt, dass Zweilagenschichtungen, die bestehen aus mehr Eisen als irgendeinem anderen Element, auf Leichtmetallsubstraten abgeschieden werden können, um eine korrosionsresistente, abnutzungsresistente Friktionsbeschichtung (WRFCs) zu bilden, die gute Abnutzungseigenschaften aufweist (konstanter Friktionskoeffizient und lange Lebensdauer) und gute Adhäsion, auch unter thermischen Zyklen. Die Lösung umfasst die Verwendung einer kaltgasdynamischen Sprühbeschichtung zwischen einer thermisch gesprüheten WRFC und der Oberfläche des zu schützenden Teils. Vorzugsweise kann die Haftvermittlerschicht bestehen aus einem eisenbasierten Material, wobei die Haftvermitt-

lerschicht weiterhin zu der thermischen Abschirmung der Friktionsbremsbeschichtung beiträgt. Nachfolgend wird eine Doppellagenbeschichtung verstanden als eine Beschichtung, die zumindest 2 ausgeprägte bzw. individuelle Lagen aufweist, wobei eine Duplexbeschichtung als zwei ausgeprägte Lagen verstanden wird und eine Triplexbeschichtung verstanden wird als drei ausgeprägte Lagen umfassend, wobei die Lagen ausgeprägt sind durch ihre Morphologie, Dichte oder Zusammensetzung.

**[0014]** Demgemäß ist ein Verfahren vorgesehen für die Abscheidung einer WRFC auf einem Leichtmetallsubstrat. Das Verfahren umfasst: Aussetzen einer Oberfläche des Leichtmetallsubstrats (vorzugsweise wird ein Hinterschneiden oder eine extreme Aufräumung nicht erfordert und auch eine Standardaufräumung ist nicht notwendig); Aufbringen einer kaltgasdynamischen Sprühhaftvermittlerschicht (vorzugsweise enthaltend mehr Eisen als irgendein anderes einzelnes Element) direkt auf die Oberfläche; und thermisches Sprühen der WRFC-Beschichtung auf die Haftvermittlerschicht auf eine Dicke von wenigstens 300 µm über dem Substrat.

**[0015]** Die thermische Sprühbeschichtung kann den Betrieb eines thermischen Sprühbrenners und eine Ausgangsmaterialzufuhr umfassen, um das Beschichtungsmaterial einer Flamme/Plasma des thermischen Sprühbrenners zuzuführen, zum zumindest teilweisen Schmelzen und Beschleunigen des Materials in Richtung auf die Haftvermittlerschicht. Die Ausgangsmaterialzufuhr kann eine Drahtzufuhr sein. Der Betrieb des thermischen Sprühbrenners kann die Steuerung eines Lichtbogens umfassen, um eine Plasmafahne zu bilden. Die Ausgangsmaterialzufuhr kann ein Beschichtungsmaterial zuführen zum Abscheiden einer Beschichtung bestehend aus mehr Eisen als irgendeinem anderen Material.

**[0016]** Die thermische Sprühschicht kann direkt auf der Haftvermittlerschicht abgeschieden werden oder das Verfahren kann weiterhin umfassen die Anwendung einer oder mehrerer Zwischenschichten auf die Haftvermittlerschicht vor dem thermischen Sprühen. Jede Zwischenschicht kann aufgebracht werden durch thermisches Sprühen oder Kaltgasdynamisches Sprühen, so dass nur das Kaltgasdynamische Sprühen und das Lichtbogenbrennersprühen benötigt werden für die Abscheidung. Zum Beispiel kann jede Lage hergestellt werden durch Sprühen wenigstens einer kaltgasdynamischen Sprühlage (inkl. der Haftvermittlerschicht), gefolgt von wenigstens einer thermischen Sprühlage, mit wenigstens einer finalen thermischen Sprühlage, die die WRFC definiert, oder durch Alternieren zwischen Kaltgasdynamischem Sprühen und thermischem Sprühen. Die Anwendung einer oder mehrerer Zwischenschichten kann umfassen die Variierung eines thermischen Sprüh- oder kaltgasdynamischen Sprühparameters

während der Beschichtung, um eine Zwischenschicht zu produzieren, die eine abgestufte Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Dichte aufweist. In gleicher Weise kann das Aufbringen der Haftvermittlerschicht die Variation eines kaltgasdynamischen Sprühparameters während des Sprühens umfassen, um eine Haftvermittlerschicht zu produzieren, die eine abgestufte bzw. sich ändernde Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Dichte aufweist.

**[0017]** Die Anwendung der Haftvermittlerschicht kann umfassen kaltgasdynamisches Sprühen eines Ausgangsmaterialpulvers bestehend aus mehr Eisen als irgendeinem anderen Element. Das Ausgangsmaterialpulver kann zum Beispiel 80 Gew.-% oder mehr eines Stahlpulvers enthalten, und kann nur Stahlpulver enthalten oder pulverisierten Stahl und pulverisierte Additive von Stahl.

**[0018]** Das Aussetzen der Oberfläche an dem Substrat kann umfassen das Aufräumen des Leichtmetallsubstrats, beispielsweise durch Strahlen, Sandstrahlen, Schleifen oder Abtragen, aber dies ist nicht notwendig. Vorzugsweise kann die Oberfläche präpariert werden alleine durch Reinigen, was wesentliche Kosten vermeidet und Defekte reduziert, die von Schleifmittel resultieren, das üblicherweise während einiger dieser Aufräumungsprozesse in der Oberfläche eingebettet wird.

**[0019]** Entsprechend wird auch ein Maschinenteil geschaffen, welches Teil ein strukturelles Teil aufweist, welches aus einem Leichtmetall oder Kompositmaterial mit einer Abnutzungsoberfläche für einen Friktionskontakt mit einem zweiten Teil aufweist. Die Abnutzungsoberfläche hat die folgende Struktur: eine dichte metallische Haftvermittlerschicht mit einer Mikrostruktur, die konsistent ist mit der Bildung durch kaltgasdynamisches Sprühen, welche direkt auf das strukturelle Teil aufgetragen wird; und eine abnutzungsresistente Friktionsbeschichtung (WRFC), die auf der Haftvermittlerschicht aufgebracht wird, und eine Mikrostruktur aufweist, die konsistent ist mit der Bildung durch thermisches Sprühen; wobei die WRFC direkt auf die Haftvermittlerschicht aufgebracht wird oder auf eine Zwischenschicht; die Abnutzungsoberfläche besteht aus mehr Eisen als irgendeinem anderen Element (in Masseanteilen) und hat eine Dicke größer als 300 µm.

**[0020]** Das Leichtmetall oder Kompositmaterial wird gebildet mit einem wesentlichen Bestandteil (so wie z. B. mehr als 50 Mol-%, oder mehr als 60 Mol-%, oder mehr als 80 Mol-%) des Leichtmetalls, wie zum Beispiel Al oder Mg. Die hier beschriebenen Beispiele betreffen alle Al und seine Legierungen, jedoch ist es klar für den Fachmann, dass Mg sehr ähnliche Eigenschaften wie Al hat, solange es die Bildung von Haftbeschichtungen durch kaltgasdynamisches Sprühen betrifft, und es wird anerkannt, dass in sehr seltenen

Fällen, wenn überhaupt, Beschichtungen, die durch kaltgasdynamisches Sprühen auf Aluminium erzeugt worden sind, nicht in gleicher Weise gebildet werden auf Mg (und vice versa). Die Dichten, Korrosionsbeständigkeiten, Haftverhalten und thermische Schockresistenz der kaltgasdynamisch gesprühten Metalle auf Feststoffen variieren üblicherweise nicht aufgrund der Tatsache, ob das Substrat Al oder Mg war (oder entsprechend auf ihren Legierungen).

**[0021]** Wenn Al, eine Al-Legierung oder ein Zusammensetzung von Al und einer Legierung von Al verwendet wird, kann diese weiterhin ein oder mehrere der folgenden Elemente enthalten: Si, Mg, Cu, Li, Zn, Fe, Ni, Cr, Mn, Ti. Wenn eine Zusammensetzung von Al verwendet wird, kann diese eine Metallmatrixzusammensetzung sein, welche nicht-anatatisches Titan aufweist, wie zum Beispiel ein Rutiltitanpulver, welches in die Schmelze eingerührt wird mit Spuren von Ca, gemäß der Lehre der parallelen PCT/CA2014/000102 des Anmelders. Die Metallmatrixzusammensetzung kann folgende Elemente aufweisen: SiC, Aluminium, Wolframcarbid, Borcarbid, Bornitrid, zum Beispiel in der Form von Whiskern, Fasern, Schnüren, Nanotubes, Stangen, Platten, Scheiben, Kugeln oder Kuben, und können Abmessungen haben im Makro-, Mikro- oder Nano-Bereich.

**[0022]** Die WRFC besteht vorzugsweise aus einer Art von Stahl, die mehr Eisen als irgendein anderes Element enthält, und kann wenigstens 80 Gew.-% oder mehr eines ersten Stahls enthalten. Der erste Stahl kann enthalten oder bestehen aus Eisen, Kohlenstoff und einem oder mehreren der folgenden Elemente: Ni, Cr, Mn, Al, Mo, N. Die Haftvermittlerschicht kann bestehen aus einem Typ von Stahl, der mehr Eisen als irgendein anderes Element enthält. Der zweite Stahl kann bestehen aus Eisen, Kohlenstoff und einem oder mehreren der folgenden Elemente: Ni, Cr, Mn, Al, Mo, N.

**[0023]** Die WRFC kann eine Mikrostruktur aufweisen, die konsistent ist mit der Bildung durch einen Drahtlichtbogensprühbrenner. Als solche wird die WRFC interlamellare Fehlstellen, Oxide und Eigenschaften aufweisen, die die Bildung ausgehärterter Tropfen („Splats“) in den dünnen Lagen zeigen, von ungeschmolzenen oder teilweise geschmolzenen Partikeln. Die in der WRFC vorhandenen Oxide werden natürlich gebildet während des Sprühens in Luft und versehen die WRFC mit der notwendigen Härte und Abnutzungswiderstandsfähigkeit. Die WRFC kann direkt auf die Haftvermittlerschicht aufgebracht werden oder es können eine oder mehrere Zwischenschichten vorgesehen sein. Jede Zwischenschicht kann eine Mikrostruktur aufweisen, die konsistent mit der Anwendung thermischen Sprühbrennens oder kaltgasdynamischen Sprühens. Die Abnutzungsfläche kann bestehen aus einer oder mehreren kaltgasdynamisch gesprühten Schichten,

die beschichtet sind mit einer oder mehreren thermisch gesprühten Lagen. Die Haftvermittlerschicht oder die Zwischenschicht kann in ihrer Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Dichte abgestuft sein, variierend als Funktion des Abstandes von dem Teil.

**[0024]** Eine Kopie der Ansprüche wird nachfolgend als Referenz beigefügt.

**[0025]** Weitere Merkmale der Erfindung werden beschrieben oder werden ersichtlich im Zusammenhang mit der nachfolgenden detaillierten Beschreibung.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0026]** Um die Erfindung klarer zu verstehen, werden nun Ausführungsbeispiele detailliert mittels eines Ausführungsbeispiels mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben. In diesen zeigen:

**[0027]** Fig. 1a, b, c schematische Darstellungen dreier Ausführungsformen von Teilen, die eine Abnutzungsoberfläche in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung aufweisen, insbesondere eine Duplex-, Triplex- und abgestufte Haftvermittlerschicht;

**[0028]** Fig. 2 ein schematisches Blockdiagramm, welches die grundsätzlichen Schritte in einem Verfahren zum Herstellen eines Teils mit einer Abnutzungsoberfläche in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der Erfindung zeigt;

**[0029]** Fig. 3 eine mikroskopische Querschnittsaufnahme einer Duplexbeschichtung (Haftvermittlerschicht/WRFC) in Übereinstimmung mit einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

**[0030]** Fig. 4 ein Säulendiagramm, das die anfängliche Bindungsstärke und die Anzahl von Zyklen vor der Absplitterung der Duplexbeschichtung der Fig. 3 in Verbindung mit einer kaltgasdynamisch gesprühten Beschichtung und einer lichtbogengesprühten Beschichtung zeigt;

**[0031]** Fig. 5 ein Säulendiagramm, welches die Abnutzungsraten der Duplexbeschichtung der Fig. 3 im Vergleich mit einer kaltgasdynamisch gesprühten Beschichtung und einer lichtbogengesprühten Beschichtung zeigt, als auch Bulk-rostfreier Stahl und Grauguss;

**[0032]** Fig. 6a, b, c Fotografien mit den Vergleichen der Duplexbeschichtung der Fig. 3 mit kaltgasdynamisch gesprühten und lichtbogengesprühten Beschichtungen nach einem Korrosions-(Salzsprühen) Test; und

**[0033]** Fig. 7 eine Duplexbeschichtung der Fig. 3 nach dem Testen auf einem Scale-Dynamometer.

## Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele

**[0034]** Hier wird ein Verfahren zum Herstellen einer Abnutzungsschicht bereitgestellt durch die Lehre, wie eine abnutzungsresistente Friktionsbeschichtung (WRFC) an einem Leichtmetallsubstrat angehaftet werden kann. Hier bezieht sich der Ausdruck "Leichtmetallsubstrat" auf ein Substrat, welches besteht aus einem wesentlichen Anteil eines leichten, strukturellen Metalls wie zum Beispiel Al oder Mg und ausdrücklich mehr des leichten, strukturellen Metalls als irgendein Schwermetall in der metallischen Phase des Substrats. Die Metallphase bezieht sich auf das gesamte Substrat ausgenommen irgendwelche Bewehrungszusätze. Der wesentliche Anteil würde wenigstens 25 Mol-% betragen und beträgt üblicherweise mehr als 35 Mol-%, oder mehr als 40 Mol-%, und für manche Materialien kann er notwendigerweise mehr als 50 Mol-% betragen, jedoch enthält er alle Materialien, die klassifiziert werden als Al-Legierungen oder Mg-Legierungen und alle Metallmatrixzusammensetzungen irgendeiner dieser Legierungen. Üblicherweise beträgt die Metallphase selber wenigstens 65 Gew.-% einer oder mehrerer Leichtmetalle oder Legierungen. Hier enthält eine Metalllegierung nicht weniger als 30 Gew.-% des spezifizierten Metalls und hat nicht eine einzelne Metallbeigabe in einer höheren Konzentration als das spezifizierte Metall.

**[0035]** Die Fig. 1a), b) und c) sind drei schematische Darstellungen einer Doppellagenbeschichtung in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Fig. 1a) zeigt schematisch eine Duplexbeschichtung mit einer kaltgasdynamischen Sprühhaftvermittlerschicht **10** und einer thermisch gesprühten WRFC **12**, auf einem Leichtmetallsubstrat **11**. Um als Abnutzungsfläche zu dienen, ist es wünschenswert, dass die WRFC **12** einen Friktionskoeffizienten (CoF) zwischen 0,1 und 0,7, insbesondere zwischen 0,3 und 0,5, aufweist, und der CoF sollte stabil sein und aufgrund der Temperatur um nicht mehr als 0,1 variieren und auch nicht mit der Abnutzung variieren.

**[0036]** Üblicherweise müssen WRFCs auch korrosionsbeständig sein und können thermischen Zyklen unterworfen sein. Um der hohen Oberflächentemperatur die beim Bremsen auftritt zu widerstehen, und das zu vernünftigen Kosten, wird eine eisenbasierte Beschichtung bevorzugt, obwohl die WRFC **12** prinzipiell nicht aus Eisen bestehen muss, selbst wenn die Duplexbeschichtung als Ganze aus mehr Eisen besteht als irgendeinem anderen Element (in Masseanteilen). Das heißt, WRFCs, die aus teurem Wolframcarbid (zum Beispiel) bestehen, können verwendet werden, wo dies kommerziell sinnvoll ist. Eine geeignete Korrosionswiderstandsfähigkeit ist favorisiert durch Vorsehen von wenigstens 40 Gew.-% Eisen (vorzugsweise im unoxidierten Sta-

tus), gemessen durch Atomemissionsspektroskopie (vorzugsweise im unoxidierten Status). Vorzugsweise haben unterschiedliche Stähle ausgezeichnete tribologische Eigenschaften für die Produktion von WRFCs und sind ökonomisch. Dementsprechend werden stahlbasierte WRFCs bevorzugt und die Beschichtung kann enthalten oder bestehen aus nur Stahl, wie zum Beispiel folgende Stahlqualitäten: rostfreier Stahl der Serie 200, 300 oder 400. Die WRFC **12** hat eine Mikrostruktur, die konsistent ist mit einer thermischen Sprühabscheidung, wie zum Beispiel Sprühen mit einem Plasmabrenner oder einer Verbrennungsflamme, die gesprüht ist mit einer drahtbasierten oder pulverbasierten Rohmaterialzuführung. Als solche wird die WRFC interlamellare Fehlstellen, Oxide oder Eigenschaften haben, die die Bildung von ausgehärteten Tröpfchen („Splats“) in dünnen Lagen zeigt, von ungeschmolzenen oder teilweise geschmolzenen Partikeln. Oxide, die in stahlbasierten WRFCs präsent sind, sind üblicherweise gebildet in natürlicher Weise während des Sprühens, wenn dies in Luft durchgeführt wird, und sie verleihen der WRFC eine Härte, die für die Abnutzungsresistenz benötigt wird.

**[0037]** Die Dicke der WRFC **12** wird ausgewählt für die Verwendung als Abnutzungsfläche. Eine Abnutzungsrate während einer erwarteten Benutzungszeit wird ausgewählt, um eine erwartete Lebensdauer für die Abnutzungsfläche zu schaffen. Für manche Materialien kann die Beschichtung 50 µm oder weniger betragen, jedoch allgemein würde die Aufbringung einer gleichförmigen Beschichtung schnell resultieren in einer Dicke von wenigstens 100 µm und öfters dicker (wie zum Beispiel 150–1500 µm, oder insbesondere 200–900 µm).

**[0038]** Die Haftvermittlerschicht **10** ist vorgesehen, um die WRFC **12** mit dem Leichtmetallsubstrat **11** zu verbinden. Die Haftvermittlerschicht **10** hat eine Mikrostruktur, die konsistent ist mit Kalt(gasdynamischer)Sprühabscheidung: Sie hat eine hohe Dichte, mit geringer Mikroporosität von den interlamellaren Eigenschaften; und sie besteht aus länglichen Splats, die herrühren aus der Deformation und Abscheidung von festen/ungeschmolzenen Pulverpartikeln. Die Haftvermittlerschicht **10** hat vorzugsweise eine Dicke, die ausreichend ist, um das Substrat vor Oxidation zu schützen und hat eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit. Eine Dicke von 200 µm stellte sich als ausreichend heraus, um dies zu verwirklichen, und es wird angenommen, dass eine geringere Dicke für die meisten Stähle nicht ausreichend ist.

**[0039]** Das Leichtmetallsubstrat **11** kann gebildet werden aus Al, Al-Legierung, Mg, Mg-Legierung oder einer Metallverbindung mit einer metallischen Phase von Al oder Al-Legierung, oder Mg oder Mg-Legierung. Eine metallische Matrixzusammensetzung kann Bewehrungen umfassen in Form anderer Me-

talle, Cermet oder einer Keramik (wie zum Beispiel einem Metalloxid, Nitrid, Borid oder Carbid) zumindest in der Nähe der Abnutzungsbeschichtung. Natürlich kann das Substrat **11** teilweise in anderen Bereichen aus anderen Materialien bestehen. Insbesondere kann das Substrat bestehen aus einem Al-Titan MMC, wie es beschrieben ist in der vorher genannten parallelen Anmeldung des Anmelders, welches gebildet werden kann in einer Weise, dass es eine im Wesentlichen metallische Al-Oberfläche bereitstellt, auch wenn der Körper mehr Rutiltitan als Al enthält. Vorzugsweise hat das Teil eine Stärke und Steifheit, die geeignet ist für die Verwendung bei hohen Temperaturen, oder bei thermisch zyklischen Anwendungen, auch moderat hohen Drücken.

**[0040]** Zusammen haben die Haftvermittlerschicht und die WRFC vorzugsweise eine Dicke von wenigstens 300 µm, besser 400 µm, 450 µm, 500 µm oder mehr. Üblicherweise würde die gesamte Zweilagenschicht eine Dicke von weniger als 5 mm aufweisen und üblicherweise weniger als 2,5 mm oder 2 mm. Eine minimale Dicke wird bevorzugt, um das Substrat thermisch abzuschirmen und eine übermäßige Dicke wird generell vermieden, um eine lange Abscheidungszeit und Kosten zu vermeiden.

**[0041]** Die Ausführungsform der **Fig. 1b**) addiert weiterhin eine Zwischenschicht **15** zu der Ausführungsform der **Fig. 1a**), um eine Triplexbeschichtung zu bilden. Die Zwischenschicht **15** kann in geeigneter Weise gebildet werden durch kaltgasdynamisches Sprühen oder thermisches Sprühen. So können zum Beispiel die gleichen Brenner verwendet werden, um die Triplexbeschichtung abzuschneiden, die auch für die Duplexbeschichtung der **Fig. 1a** benutzt wurden. Die Zwischenschicht **15** kann in an sich bekannter Weise aufgebracht werden entweder durch die Brenner, durch Variation einer Zufuhrquelle, oder irgendeines anderen Sprühparameters. Die Zwischenschicht **15** kann insbesondere reich an Eisen sein und in erster Linie als thermische Abschirmungslage dienen, insbesondere wenn die WRFC **12** nicht hauptsächlich aus Eisen besteht. Eine Vielzahl von abnutzungsresistenten Oberflächen ist bekannt, um auf Gusseisen angewandt zu werden, um Bremsbeschichtungen herzustellen, die einfach aufgebracht werden können, wenn die Zwischenschicht **15** eine ausreichende Dicke aufweist, um eine thermisch und chemisch ähnliche Oberfläche zu dem Eisenguss des Standes der Technik zu präsentieren. Vorzugsweise resultiert selbst eine relativ dicke Zwischenschicht **15** darin, dass das Teil ein geringeres Gewicht hat als ein vergleichbares Gusseisenteil. Die Zwischenschicht **15** kann vorzugsweise aus Metallen bestehen und möglicherweise aus ihren Oxiden und wird vorzugsweise abgeschieden durch thermisches Sprühen oder alternativ durch vakuumbasierte Beschichtungstechniken.

**[0042]** Während oben angenommen wurde, dass unterschiedliche Brenner benötigt werden für die Haftvermittlerschicht und die WRFC, wird darauf hingewiesen, dass eine Annäherung zwischen thermischen Sprüh(insbesondere HVOF)brennern und kaltgasdynamischen Sprüheinrichtungen stattfindet. High Velocity Air Fuel (HVOF) und „Warmsprüh“-Varianten des HVOF (mit einem Pulverausgangsmaterial höheren Schmelzpunktes) schließen den Spalt zwischen dem, was früher als eigenständige individuelle Sprühprozesse betrachtet wurden. Demgemäß können HVOF, HVOF und Warmsprühbrenner, die alle hier beschrieben wurden, als kaltgasdynamische Sprühbrenner betrachtet werden in dem Ausmaß, dass sie dichte, oxidfreie Beschichtungen wie Kaltsprüh-Brenner erzeugen.

**[0043]** Innerhalb der nächsten 20 Jahre ist es völlig plausibel, dass ein einzelner Brenner sowohl eine effektive kaltgasdynamisch gesprühte Haftvermittlerschicht oder dergleichen erzeugen kann, und eine thermisch gesprühte WRFC, insbesondere wenn metallbasierte Ausgangsmaterialien mit höherem und niedrigerem Schmelzpunkt verwendet werden. Was generell erforderlich ist, ist ein Brenner, der betrieben werden kann, um einem Sprühstrahl eine ausreichende Geschwindigkeit zu verleihen, um die Haftvermittlerschicht mit der gewünschten Dichte, vorzugsweise mit einer begrenzten Oxidation, zu produzieren, und ohne das Ausgangsmaterial zu schmelzen und einen thermischen Sprühprozess, der das Ausgangsmaterial schmilzt, um eine Oxidation der so gesprühten Stahlbeschichtung zu erhöhen.

**[0044]** **Fig. 1c**) differiert von der Ausführungsform der **Fig. 1a**) darin, dass die Haftvermittlerschicht **10** schematisch als abgestufte Schicht dargestellt ist. Wie es an sich bekannt ist, ist es möglich, abgestufte Beschichtungen abzuschneiden, um die Unterschiede zwischen den thermischen und mechanischen Eigenschaften der Schnittstellen zwischen den Schichten zu minimieren. Zum Beispiel, wenn die Haftvermittlerschicht **10** in Richtung auf das Substrat mehr Al aufweist und in einem größeren Abstand von dem Substrat mehr Eisen, hat die Beschichtung eine stabilere metallurgische Verbindung mit dem Substrat und dies kann die Adhäsion an dem Substrat verbessern. Die Techniken für die Abstufung können eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Änderung in der Zusammensetzung des Zufuhrmaterials oder der Morphologie umfassen oder können erhalten werden durch Änderung der Zufuhrleistung oder anderer Sprühparameter wie Plasmafahrentemperatur, Pulverzufuhr und Abstand. Es gibt eine große Vielzahl von Teilen, auf denen Abnutzungsflächen gewünscht oder erforderlich sind: zum Beispiel Bremsen aller Größen, Formen und Typen, Kupplungen, Drücker, Rollenlager-schichten. Während die Teile bestehen können aus Greifwerkzeugen wie zum Beispiel Schraubstöcken oder Klemmen, kann es insbesondere wertvoll sein,

den Anforderungen zu genügen für leichte Werkzeuge, die thermischen Schocks ausgesetzt sind (verursacht durch die Interaktion der Oberfläche mit einer anderen oder zum Beispiel durch eine externe Hitzequelle). Diese können eine große Vielzahl von Formen aufweisen, jedoch werden am häufigsten Platten, Scheiben oder Trommeln verwendet, und Backen oder Klötze unterschiedlicher Formen können auf einen größeren Bereich von Teilen angewendet werden, wie zum Beispiel Bremssätteln.

**[0045]** Fig. 2 ist eine schematische Darstellung eines Verfahrens zum Herstellen eines Teils mit einer Abnutzungsfläche in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Das Verfahren beinhaltet das Exponieren einer präparierten Oberfläche des Teils, um als Substrat **11** für eine Abnutzungsfläche in Schritt **21** zu dienen. Das Präparieren der Oberfläche beinhaltet eine Reinigungsprozedur, um Öl, Schmutz und Staub zu entfernen durch Verwendung unterschiedlicher Methoden, die an sich bekannt sind, wie zum Beispiel eines Lösungsmittels oder Wischens oder Eintauchens in Industrieseife, jedoch beinhaltet es vorzugsweise nicht eine Aufrauung der Oberfläche durch Ätzen, Sandstrahlen, Bestrahlen, und extreme Formen der Oberflächenpräparation sind nicht erforderlich. Sandstrahlen oder Bürsten sind geringere, kostengünstige Aufrautechniken, welche bevorzugt werden können vor, während oder nach dem Reinigen, um die Adhäsion in einigen Fällen zu verbessern. Im Schritt **22** wird auf die Oberfläche eine kaltgasdynamisch gesprühte Haftvermittlerschicht **10** aufgebracht. Die Haftvermittlerschicht **10** kann mehr Eisen erhalten als irgendein anderes einzelnes Element und wird direkt auf die Al-Oberfläche aufgebracht. Es liegt im Bereich des technischen Fachwissens, um folgende Parameter auszuwählen: die Ausgangsmaterialien für das kaltgasdynamische Sprühen enthaltend: Stähle, oder Kombinationen von Stahl, Eisen oder korrosionsresistenten Materialien; und geeignete hochgeschwindigkeitsthermische Sprühtechniken, wie zum Beispiel kaltgasdynamisches Sprühen, Warmsprühen oder HVOF und Sprühparameter. Optional kann die Haftvermittlerschicht **10** abgestuft sein, vorzugsweise mit einer hohen Dichte an der Schnittstelle mit dem Leichtmetall, für eine gute Adhäsion und für eine Korrosionsresistenz und eine harte, und weniger weiche, Oberfläche, um eine WRFC zu tragen.

**[0046]** Im Schritt **23** beinhaltet das Verfahren optional eine Zwischenschicht. Die Zwischenschicht kann bestehen aus Metallen und ihren Oxiden und ist vorzugsweise abgeschieden durch ein thermisches Sprühverfahren oder eine vakuumbasierte Beschichtungsabscheidungstechnik, wie zum Beispiel ein Vakuumabscheidungsverfahren. Schließlich wird in Schritt **24** eine WRFC **12** aufgebracht, um eine Abnutzungsfläche mit einer gewünschten Friktionsoberfläche zu schaffen. Andere Typen von Materialparti-

keln, wie zum Beispiel Carbide (WC, CrC, SiC) oder Oxide ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ), können verwendet werden oder gemischt mit Stahlpulver, um die Abnutzungsbeständigkeit, die Depositionseffizienz oder die Adhäsionseigenschaften bei vernünftigen Kosten zu verbessern.

**[0047]** Die Haftvermittlerschicht kann vorzugsweise dienen, um die WRFC an dem Substrat **11** zu befestigen für die Verwendung in einer Bremsumgebung, selbst wenn die Dicke der Beschichtung 1 mm oder mehr beträgt.

#### Beispiele

**[0048]** Fig. 3 zeigt eine elektronenmikroskopische Querschnittsansicht einer Duplex (Haftvermittler/WRFC)-Beschichtung auf einem Aluminium A356 Substrat, in Übereinstimmung mit einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Das A356 Substrat erscheint dunkel und hat offensichtlich eine raue Kontaktfläche (wo die A356 Oberfläche mit der kaltgesprühten SS316 Lage zusammentrifft), was evident ist durch das stückweise gekurvte Profil an der Schnittstelle A356/SS316 im Querschnitt. Die Schnittstelle ist typischerweise eine kaltgesprühte oder warmgesprühte Beschichtung. Die Energie der Partikel, die mit der weichen Oberfläche kollidieren, erlaubt eine substanzielle Deformation des Substrats, was zu einer gekraterten Schnittstelle führt. Die Haftvermittlerschicht ist eine kaltgasdynamisch gesprühte Beschichtung bestehend aus rostfreiem Stahl SS316L. Die kaltgasdynamisch gesprühte Haftvermittlerschicht zeigt eine gute Adhäsion an dem Substrat und agiert wegen seiner geringeren Porosität als eine Barriere zum Verbessern der Resistenz gegenüber Blisterkorrosion an der Haftvermittler/Substratschnittstelle. Die WRFC zeigte gute Abnutzungseigenschaften. Die mikroskopische Aufnahme zeigt eine typische Mikrostruktur. Eine Toplage, die als dunkelste Fläche erscheint, wird hergestellt durch ein Epoxidharz, das verwendet wird zum Trennen und Polieren des Querschnitts, wie es Standard ist. In der WRFC ist eine längliche Porosität und wellenartige Deformationen sichtbar und die Regionen dunkleren Graus korrespondieren mit den Oxiden.

**[0049]** Solche Beschichtungen wurden hergestellt gemäß dem folgenden Prozess: Maschinenbehandelte A356AL-Scheiben wurden für die Versuche verwendet. Die kaltgasdynamisch gesprühte Haftvermittlerschicht wurde direkt auf die Al-Pucks gesprüht (es wurde keine Oberflächenrauenbehandlung durchgeführt, und keine Reinigung wurde durchgeführt, weil die Pucks gerade maschinenhergestellt wurden) in zwei Lagen mit einem Kinetiks 4000 kaltgasdynamischen Sprühsystem erhalten von CGT GmbH<sup>TM</sup>, um eine Dicke von ungefähr 300  $\mu\text{m}$  zu erreichen. Der kaltgasdynamische Sprühprozess verwendete diese Sprühparameter: Das Pulver war ein



FE101 von Praxair TM; die Pulverzufuhr rate betrug 20 g/min; die N<sub>2</sub>-Gastemperatur betrug 700°C; der N<sub>2</sub>-Gasdruck betrug 40 bar; der Standoff-Abstand betrug 8 cm; die Durchlaufgeschwindigkeit des Roboters betrug 300 mm/s; und der Stufenschritt betrug 2 mm. Die WRFC-Beschichtung von etwa 500 µm Dicke wurde hergestellt mit einem Sulzer Metco Smart-Arc TM mit folgenden Sprühparametern: Draht = 80 T von Praxair, der Strom betrug 100 A; der Luftdruck betrug 4,14 bar; Standoff = 15,2 cm; die Durchlaufgeschwindigkeit des Roboters betrug 750 mm/s und der Stufenschritt betrug 6 mm.

**[0050]** Die Beurteilung unterschiedlicher Duplex-Beschichtungen (variiere Beschichtungszusammensetzung des rostfreien Strahls, Dicke und Sprühparameter) zeigte hervorragende thermische Zykluswiderstandsfähigkeit der Duplex-Beschichtungen. **Fig. 4** ist ein Säulendiagramm, das die anfängliche Adhäsion als auch die thermische Zykluswiderstandsfähigkeit einer typischen Duplex-Beschichtung zeigt. Als Referenz zeigt das Säulendiagramm die Bindungsstärke und Anzahl der Zyklen vor der Abtrennung einer kaltgasdynamisch gesprühten Beschichtung als auch einer lichtbogengesprühten Beschichtung. Drei Muster wurden getestet pro Beschichtungstyp. Die kaltgasdynamisch gesprühte Beschichtung hat eine anfängliche Adhäsion, die die adhäsive Stärke (von ~77 MPa) überschritt, die für den Zugtest verwendet wurde, welche repräsentiert ist durch den Pfeil in der Darstellung. Sowohl die kaltgasdynamisch gesprühte und Duplex-Beschichtungen widerstanden 5000 thermischen Zyklen bis 550°C ohne Abtrennung und somit wurde ihr Limit nicht erfasst. Die lichtbogengesprühte Beschichtung widerstand einer 25% Ablösung über 600 Zyklen. Der Zugtest, der verwendet wurde, um die Adhäsionsstärke festzustellen, wurde durchgeführt in Übereinstimmung mit ASTM C633, und der thermische Zyklustest wurde durchgeführt mit einer hauseigenen Laseranlage. In dieser thermischen Zyklusanlage wurden die beschichteten Muster sukzessive aufgeheizt durch einen YAG-Laser und herabgekühlt durch Luftzug, der durch die Bewegung des Musterhalters erzeugt wurde. Drei Muster sind an dem Musterhalter angebracht. Sobald das erste Muster aufgeheizt ist, wird es zu der Abkühlregion bewegt, während das nächste Muster aufgeheizt wird. Alle Prozesseinrichtungen sind somit stationär und umschlossen in einer Kammer angeordnet, die mit Schließtüren und geschwärzten Scheiben für eine sichere Handhabung des Lasers versehen ist. Die Überwachung und Steuerung des Prozesses wird durchgeführt mit der Labview-Software (National Instrument, Austin, USA) von einem Computer außerhalb der Kammer. Ein Muster wurde zuerst aufgeheizt von der beschichteten Oberfläche mit einem 2 kW CW YAG-Laser (Rofin Sinar, Hamburg, Deutschland), dessen Leistung auf 1300 W einjustiert wurde, um die gewünschte Heizrate von 50–55°C/s zu erhalten. Nach einer

Heizzeit von 4 s wurde das Muster dann schnell mechanisch zur Kühlzone bewegt, wo Druckluft direkt auf die beschichtete Oberfläche geführt wurde. Die 4 s Aufheizung resultierten in einer Oberflächentemperatur, die nie 500°C überschritt. Die natürliche Kühlung fand in einer Standby-Zone statt und die Musterhalterstelle wurde reinitialisiert, um einen neuen Zyklus zu starten.

**[0051]** Die Duplex-Beschichtungen boten eine Gleitabnutzungsfestigkeit gleich oder besser der, die mit üblichem Gusseisen erzielt wurden und die wesentlich besser war als Bulk SS 304 oder kaltgasdynamisch gesprühte SS 316 Beschichtungen. Der Friktionskoeffizient lag fest bei ungefähr 0,45, was typisch ist für Gusseisenscheiben.

**[0052]** **Fig. 5** ist ein Säulendiagramm, welches die Abnutzungsraten der Duplex-Beschichtung der **Fig. 3** zeigt im Vergleich mit einer kaltgasdynamisch gesprühten Beschichtung und einer lichtbogengesprühten Beschichtung, als mit auch Bulk-rostfreiem Stahl und Grauguss. Eine Falex Multispecimen TM-Abnutzungstestanlage wurde verwendet, um die Abnutzungsperformance der entwickelten Beschichtungen mit einer Stift-auf-Scheibe-Kontaktkonfiguration zu evaluieren. Teststifte wurden gebrochen von einer Bremsscheibe. Die Kontaktflächendimensionen der Pins waren 5 mm × 5 mm mit einer Länge von ungefähr 13 mm. Das Abschneiden der Testpins wurde so durchgeführt, dass die Abnutzungsfläche parallel mit der originalen Bremsklotzoberfläche war. Die Testscheiben hatten Durchmesser von 86,36 mm und eine Dicke von 10,16 mm. Das folgende Testprotokoll stellte sich als am besten geeignet heraus, basierend auf einer Serie von vorläufigen Tests hinsichtlich der Effekte der Gleitgeschwindigkeit (1 bis 4 m/s), der Normallast (1 bis 4 MPa), des Abnutzungsbahndurchmessers (38,1 bis 63,5 mm) und der insgesamten Gleitdistanz (2.500 m bis 200.000 m): Geschwindigkeit = 1 m/s; Last (offensichtlicher Kontaktdruck) = 4 MPa; Gesamtgleitdistanz = 48.000 m; und Abnutzungsbahndurchmesser = 63,5 mm.

**[0053]** Die Abnutzungsrate der Testscheiben wurde ausgedrückt in Volumenabnahme pro Gleitdistanz, mm<sup>3</sup>/m, und wurde erzielt durch Gewichtsverlustmessung und geschätzte Materialdichte. Die Skalierung, die verwendet wurde für die Gewichtsverlustmessung, ist akkurat bis auf 0,01 mg.

**[0054]** Das Aussetzen der Beschichtungen in einem zyklischen Korrosionstest zeigte, dass die Duplex-Beschichtungen hervorragende Korrosionsbeständigkeit aufweisen verglichen mit (nur) lichtbogengesprühten WRFCs. Um den Effekt der meisten Korrosionsverhältnisse zu simulieren, wie sie bei Bremscheiben auftreten, wurde im Laboratorium ein zyklischer Korrosionstest durchgeführt, inspiriert durch Standard ISO 14993. Ein Zyklus der verwendeten zy-

klischen Korrosionsmessmethode wurde wie folgt definiert: Schritt 1. Salzsprühen mit 5% NaCl bei  $34 \pm 3^\circ\text{C}$  (100% RH) (3 Stunden lang); Schritt 2. Trocknen bei  $59 \pm 6^\circ\text{C}$  und  $27 \pm 7\%$  RH (5 Stunden lang); Schritt 3. Befeuchten bei  $487^\circ\text{C}$  und  $> 95\%$  RH (= Luftfeuchtigkeit) (4 Stunden lang).

**[0055]** Die lichtbogengesprühten WRFCs trennten sich nach 24 Zyklen ab, wobei die Ablösung deutlich vorher begann, wohingegen die Duplex-Beschichtung 120 Zyklen widerstand, der Dauer des gesamten Tests. Die Duplex-Beschichtung zeigte keine Anzeichen von Ablösung oder Abtrennung nach dem zyklischen Korrosionstest und zeigte minimale Spuren von Korrosion. **Fig. 6a** zeigt ein Foto der Duplex-Beschichtung nach 120 Zyklen. **Fig. 6b** zeigt ein Foto der kaltgesprühten SS 316 nach 120 Zyklen. **Fig. 6c** zeigt ein Foto eines Teils der lichtbogengesprühten WRFC nach dem Fehler nach 24 Zyklen. Es wird angenommen, dass ein typischer Bremsrotor für ein Fahrzeug eine ringförmige Oberfläche hat.

**[0056]** Schließlich wurde die Duplex-Beschichtung einem Scale-Dynamometer unterworfen, um aktuelle Bremsbedingungen zu simulieren. Der Friktionstest umfasste eine Vielzahl von Stopps mit unterschiedlichen Charakteristiken (Länge, Abbremsrate etc.), um die unterschiedlichen Bremskonditionen zu simulieren, wie auch thermische Schocks. Die folgenden Daten wurde aufgenommen bei 50 Hz während jedes Stopps; die interne Aluminiumtemperatur (mittels eines Thermokopplers, der 0,5 mm unterhalb der beschichteten Oberfläche der Scheibe montiert war); die Musterkontaktoberflächentemperatur (mittels eines Infrarotsensors); die auf die Klötze aufgebrachte Kraft; das resultierende Moment an den Klötzen; und die Geschwindigkeit der Scheibe. Die Beschichtungen zeigten sehr stabile Abnutzungscharakteristiken mit einem durchgehend konstanten Friktionskoeffizienten von ungefähr 0,35. Diese Resultate sind konsistent mit dem Stift-auf-Scheibe-Laboratoriumsabnutzungstest. Übliche Bremsmaterialien für die Stifte, Stift-auf-Scheibe-Tests bestätigte, dass der Friktionskoeffizient, der in dem Fall bei 0,42 gemessen wurde, über 600 min um 10% variierte (nach anfänglichem Einlaufen).

**[0057]** **Fig. 7** zeigt die Duplex-Beschichtung nach dem Testen auf einem Scale-Dynamometer. Es kann gesehen werden, dass die Beschichtung weiterhin solide ist und an dem Substrat anhaftet.

**[0058]** Andere Vorteile und Anwendungen, welche der Struktur inhärent sind, sind für den Fachmann offensichtlich. Die hier beschriebenen Beispiele sind illustrativer Natur und sollen den Schutzbereich der Erfindung, wie sie beansprucht ist, nicht beschränken. Variationen der vorangehenden Ausführungsformen sind für den Fachmann offensichtlich und durch

den Erfinder beabsichtigt, um durch die folgenden Ansprüche umfasst zu werden.

### Patentansprüche

1. Ein mechanisches Teil mit einem strukturellen Element, welches aus einem Leichtmetallsubstrat besteht, das eine Abnutzungsfläche für einen Friktionskontakt mit einem zweiten Teil aufweist, wobei die Abnutzungsfläche folgende Struktur aufweist: eine dichte metallische Haftvermittlerschicht mit einer Mikrostruktur, die konsistent ist mit der Bildung durch kaltgasdynamisches Sprühen, direkt aufgebracht auf das strukturelle Element; und eine abnutzungsresistente Friktionsbeschichtung (WRFC), die auf die Haftvermittlerschicht aufgebracht ist und eine Mikrostruktur aufweist, die konsistent ist mit der Bildung durch thermisches Sprühen, wobei die WRFC direkt auf die Haftvermittlerschicht aufgebracht ist oder auf eine Zwischenschicht, wobei die Abnutzungsfläche aus mehr Eisen (Fe) als irgendeinem anderen Element in Masseanteilen besteht, und eine Dicke von mehr als 300  $\mu\text{m}$  aufweist.
2. Das mechanische Teil des Anspruchs 1, in welchem das Leichtmetallsubstrat eine metallische Phase von 60 Gew.-% oder mehr eines Leichtmetalls wie Al oder Mg aufweist, mit optional einem oder mehreren der folgenden Elemente: Si, Cu, Li, Zn, Fe, Ni, Cr, Mn, Ti.
3. Das mechanische Teil des Anspruchs 2, wobei die metallische Phase Al oder eine Al-Legierung ist.
4. Das mechanische Teil des Anspruchs 2, wobei das Leichtmetallsubstrat ein zusammengesetztes Metallmatrixmaterial ist, wobei die metallische Phase seine Metallmatrix ist.
5. Das mechanische Teil von Anspruch 1, 2 oder 3, bei welchem: die Abnutzungsfläche aus wenigstens 40 Gew.-% Fe besteht, die Abnutzungsfläche aus mehr Stahl in Gewichtsanteilen besteht als irgendeinem anderen Ausgangsmaterial; mehr Stahl in Gewichtsanteilen als irgendein anderes Ausgangsmaterial, wobei der Stahl Fe und C enthält, und eins oder mehrere der folgenden Bestandteile Ni, Cr, Mn, Al, Mo; die Haftvermittlerschicht aus wenigstens 40 Gew.-% Fe besteht; die Haftvermittlerschicht dahingehend abgestuft ist, dass ihre Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Dichte als Funktion des Abstandes von dem Teil variiert; die Haftvermittlerschicht wenigstens 200  $\mu\text{m}$  dick ist; die Haftvermittlerschicht und die WRFC aus zwei unterschiedlichen Stählen bestehen, wobei einer über-

wiegend in der Haftvermittlerschicht vorgesehen ist und einer überwiegend in der WRFC;  
 die WRFC aus mindestens 40 Gew.-% Fe besteht;  
 die WRFC eine Mikrostruktur aufweist, die konsistent ist mit der Bildung durch einen drahtlichtbogenthermischen Sprühbrenner;  
 die WRFC zumindest 100 µm dick ist,  
 die WRFC zumindest 250 µm dick ist,  
 die WRFC zumindest 500 µm dick ist,  
 die WRFC weniger als 5 mm dick ist;  
 die WRFC direkt auf die Haftvermittlerschicht aufgebracht ist;  
 die Haftvermittlerschicht und die WRFC, wobei wenigstens eine Zwischenschicht vorgesehen ist, und jede Zwischenschicht eine Mikrostruktur aufweist, die konsistent ist mit der Aufbringung durch einen thermischen Sprühbrenner oder durch kaltgasdynamisches Sprühen;  
 die Haftvermittlerschicht und die WRFC, wobei wenigstens eine Zwischenschicht vorgesehen ist, und die Zwischenschicht abgestuft ist, dahingehend, dass ihre Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Dichte als eine Funktion des Abstandes von dem Teil variiert;  
 eine oder mehrere kaltgasdynamische gesprühte Schichten und eine oder mehrere thermisch gesprühte Schichten; oder  
 eine oder mehrere kaltgasdynamisch gesprühte Schichten, die von einer oder mehreren thermisch gesprühten Schichten abgedeckt ist/sind.

6. Verfahren zum Abscheiden einer abnutzungsresistenten Friktionsbeschichtung (WRFC) auf einem Leichtmetallsubstrat, welches Verfahren umfasst:  
 Exponieren einer präparierten Oberfläche auf dem Substrat;  
 Aufbringen einer kaltgasdynamisch gesprühten Haftvermittlerschicht, die mehr Eisen enthält als irgendein anderes einzelnes Element, direkt auf die präparierte Oberfläche; und  
 thermisches Sprühen der WRFC-Beschichtung auf die Haftvermittlerschicht auf eine Dicke von wenigstens 300 µm über dem Substrat.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei welchem das thermische Sprühen das Betreiben eines thermischen Sprühbrenners (TS) und einer TS-Ausgangsmaterialzufuhr umfasst, um Beschichtungsmaterial einer Plasmafahne des thermischen Sprühbrenners zuzuführen, zum zumindest teilweise Aufschmelzen und Beschleunigen des Materials in Richtung auf die Haftvermittlerschicht.

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei welchem der thermische Sprühbrenner ein Drahtlichtbogen, Plasma, HVOF, Warmsprüh- und Flammensprühapparat ist;  
 die Plasmafahne ein Lichtbogen ist und die TS-Ausgangsmaterialzufuhr eine Drahtzufuhr ist; oder

das TS-Ausgangsmaterial aus wenigstens 40 Gew.-% Eisen besteht.

9. Verfahren nach Anspruch 6, bei welchem das Aufbringen der kaltgasdynamischen gesprühten Haftvermittlerschicht das Betreiben eines Kalt-sprüh-(CS), Warmsprüh- und eines HVOF-Sprühbrenners zum Beschleunigen eines CS-Ausgangsmaterials umfasst, um die Beschichtung durch eine Kollision unter hoher Deformation des CS-Ausgangsmaterials im Wesentlichen als ein Feststoff bereitzustellen.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, bei welchem die WRFC direkt auf die Haftvermittlerschicht aufgebracht wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, weiterhin umfassend das Aufbringen einer oder mehrerer Zwischenschichten auf die Haftvermittlerschicht vor dem thermischen Sprühen der WRFC.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei welchem jede Zwischenschicht aufgebracht wird durch thermisches Sprühen oder kaltgasdynamisches Sprühen; jede Schicht hergestellt wird durch wenigstens eine kaltgasdynamische gesprühte Beschichtung gefolgt von wenigstens einer thermisch gesprühten Beschichtung, wobei die letzte zumindest eine thermische Sprühbeschichtung die WRFC ist; oder  
 Aufbringen einer oder mehrerer Zwischenschichten umfassend die Abwechslung eines thermischen Sprüh- und kaltgasdynamischen Sprühparameters während der Beschichtung, um eine Zwischenschicht zu produzieren, die eine abgestufte Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Dichte aufweist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 12, bei welchem das Aufbringen der Haftvermittlerschicht die Variation eines Sprühparameters während des Beschichtens umfasst, um eine Haftvermittlerschicht mit einer abgestuften Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Dichte herzustellen.

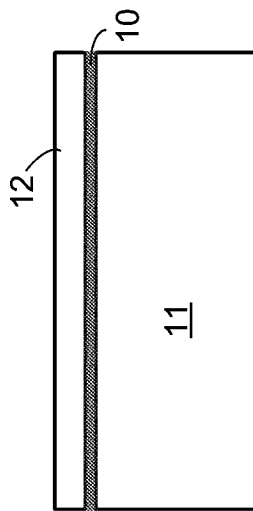
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 13, bei welchem das Exponieren einer präparierten Oberfläche auf dem Substrat nicht ein Schleifen, Sandstrahlen, Ätzen oder Abtragen der Oberfläche umfasst.

15. Eine Bremse umfassend ein strukturelles Teil bestehend aus Al oder einer Al-Legierung mit einer Oberfläche, die eine doppelagige Beschichtung mit einer exponierten abnutzungsresistenten Friktionsbeschichtung (WRFC) trägt, worin eine dichte metallische Haftvermittlerschicht bestehend aus mehr Eisen als irgendeinem anderen Element in Masseanteilen unter der WRFC angeordnet ist, wobei die Haftvermittlerschicht eine Mikrostruktur aufweist, die kon-

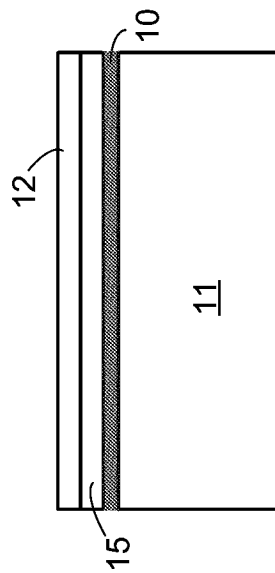
sistent ist mit der Bildung durch kaltgasdynamisches  
Sprühen.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

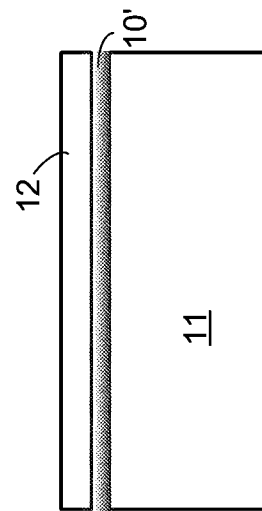
Anhängende Zeichnungen



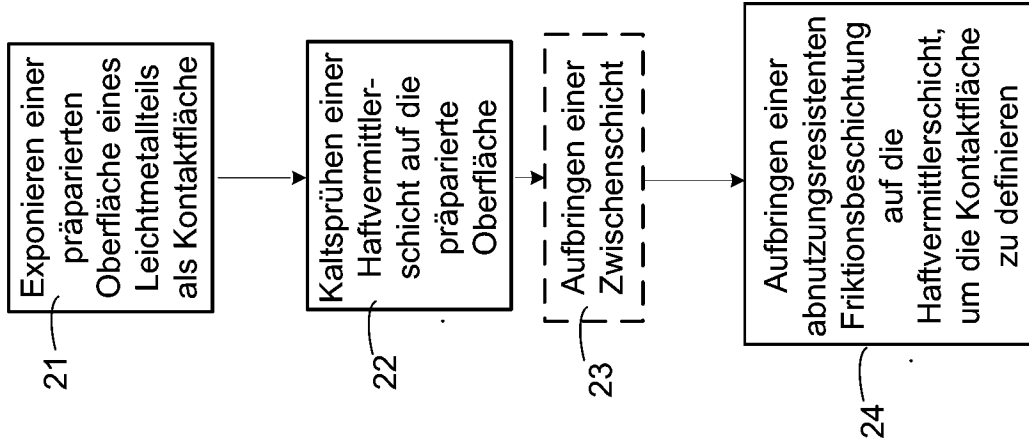
**FIG. 1a)**



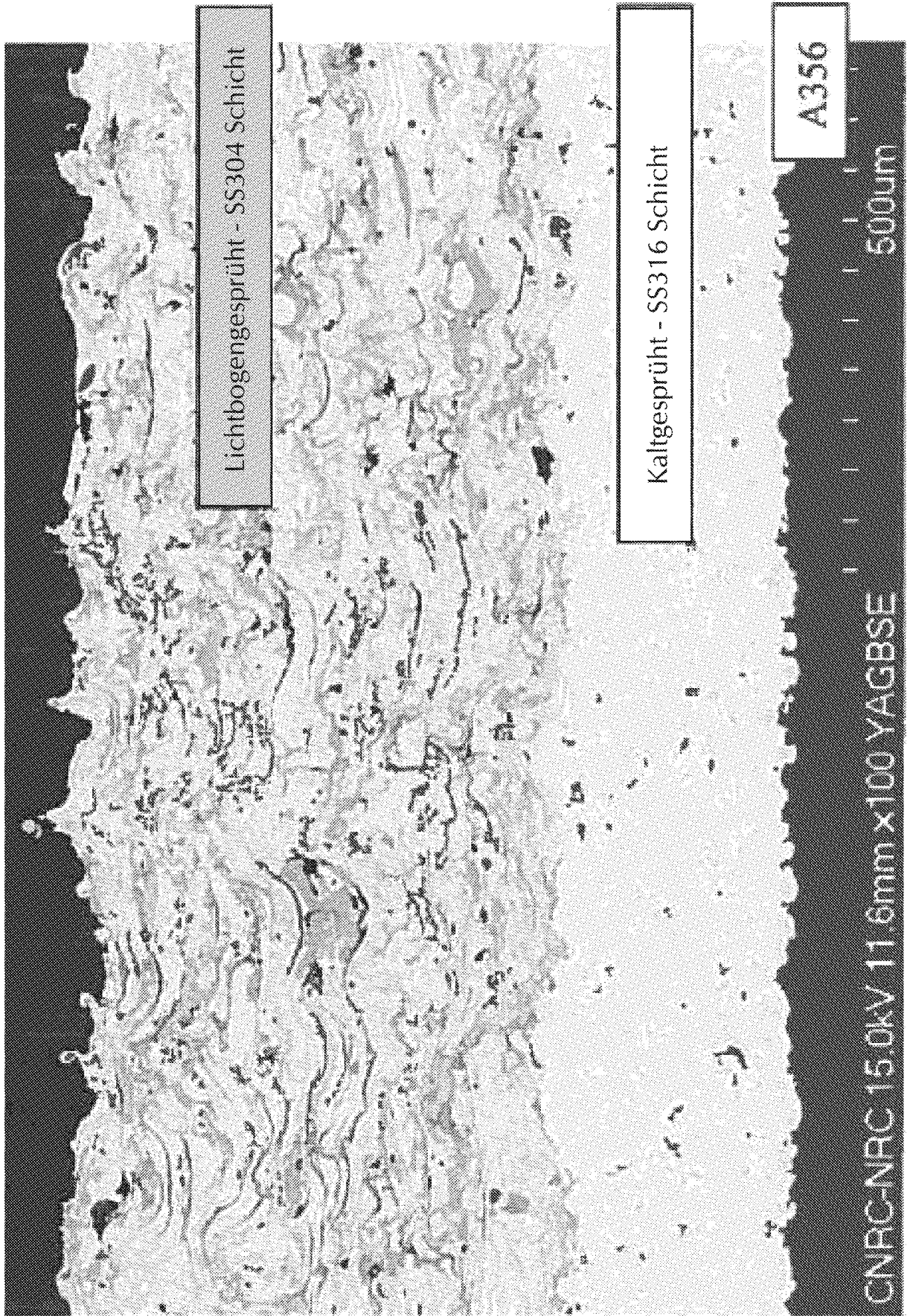
**FIG. 1b)**



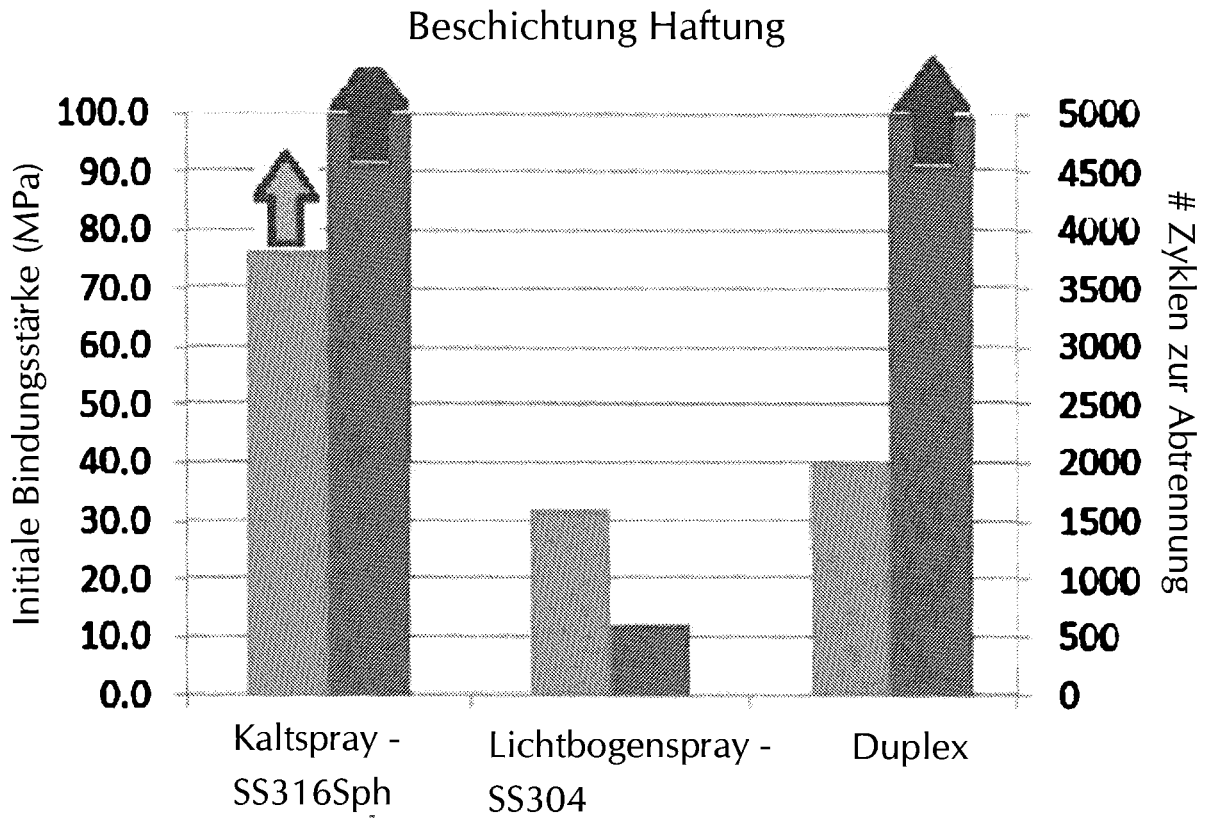
**FIG. 1c)**



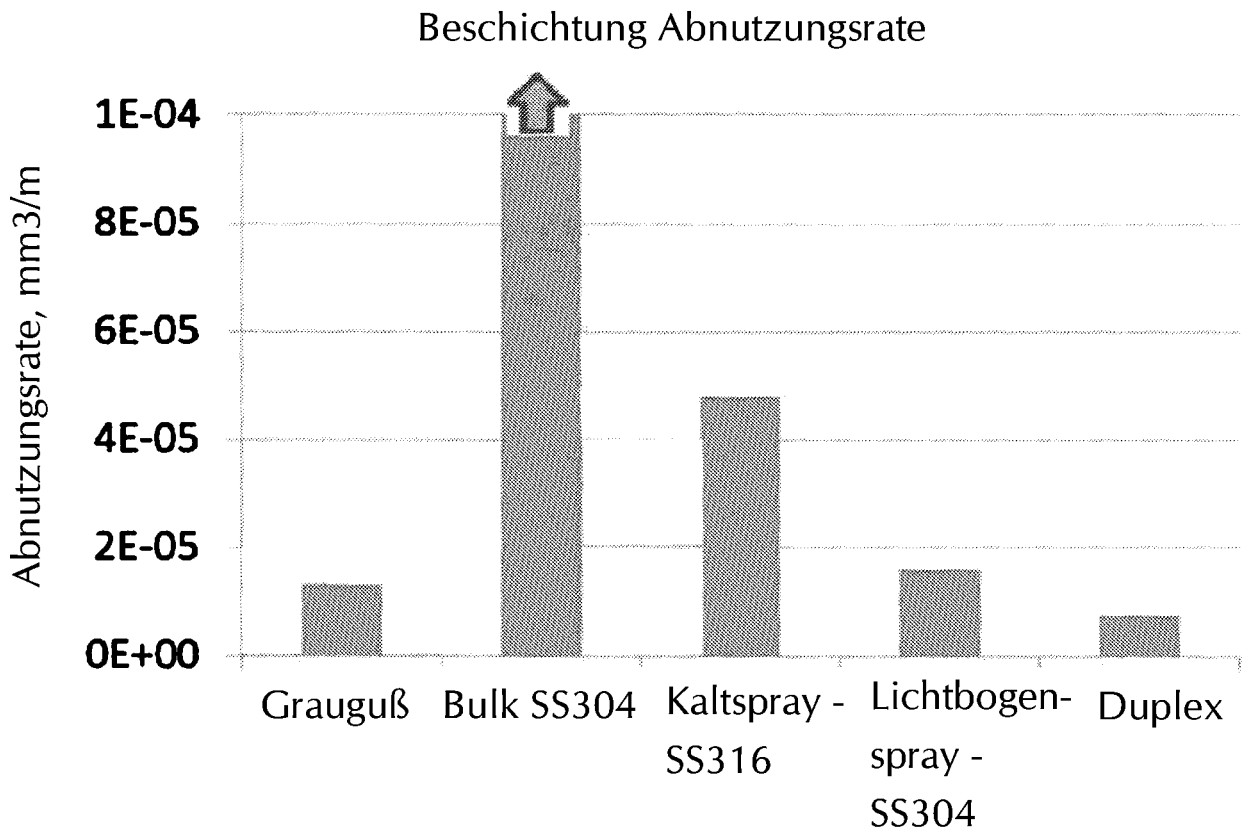
**FIG. 2**



**FIG. 3**



**FIG. 4**

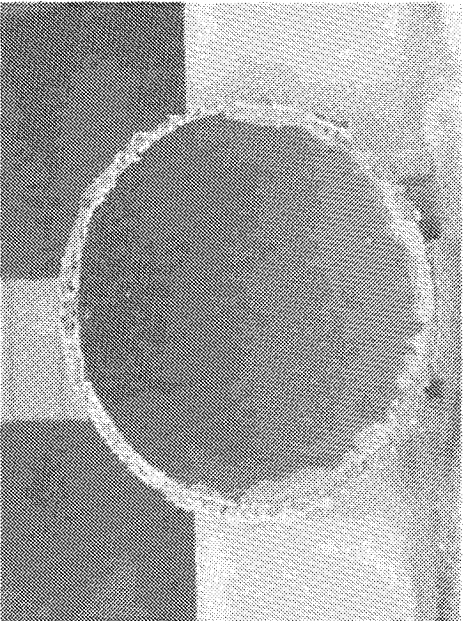


**FIG. 5**



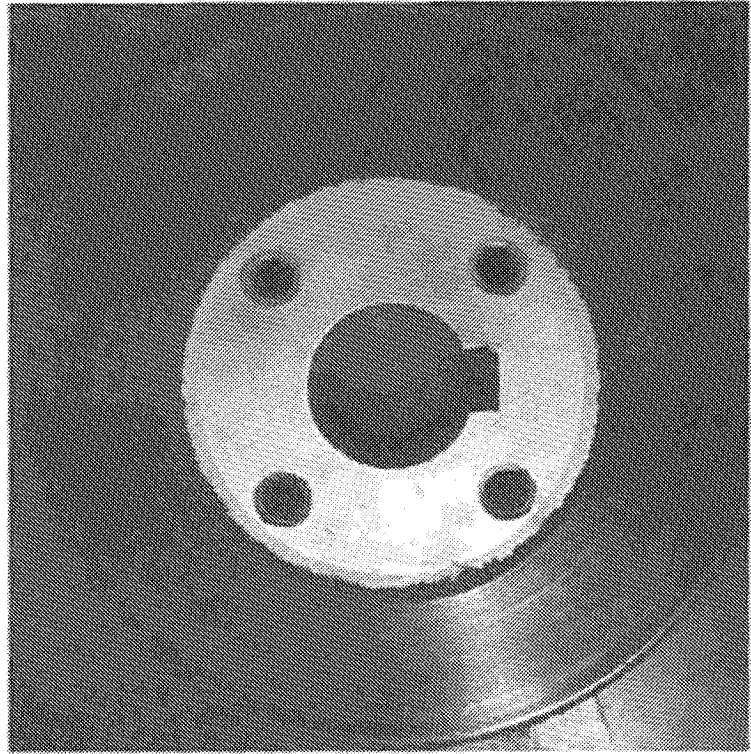
Lichtbogenspray SS-304 - 24

Zyklen  
**FIG. 6c**

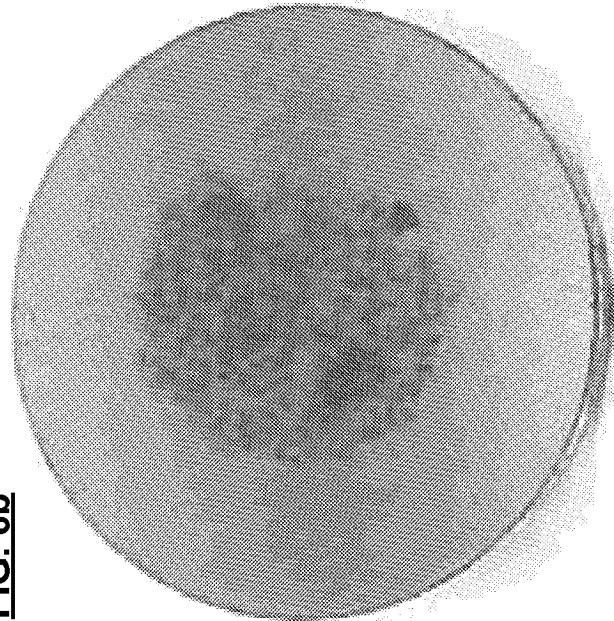


Kaltspray SS-316- 120 Zyklen

**FIG. 6b**



**FIG. 7**



Duplex - 120 Zyklen

**FIG. 6a**