

Wendel GmbH, Dillenburg

In Kooperation mit

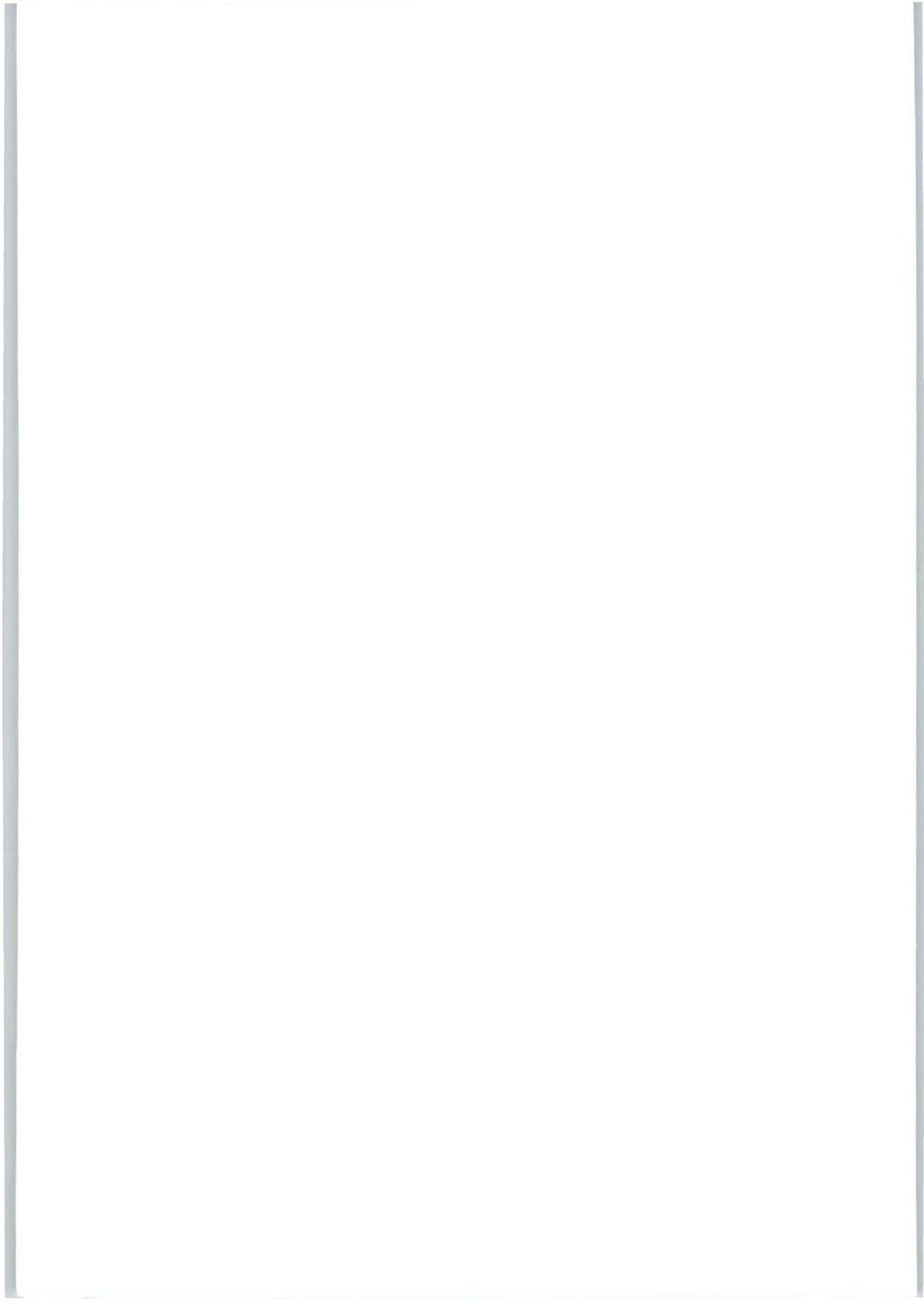
Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau, Labor
Werkstofftechnik

Einfaches umweltfreundliches Beschichten von Bauteilen zum Verschleißschutz

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert von der
Deutschen Bundestiftung Umwelt
unter dem Az: 22123

Dipl.-Ing. Eckhard Voß (Wendel GmbH)
Prof. Dr. Jürgen Peterseim, Dipl.-Ing. Holger Albrecht (FH Münster)

Dillenburg, Münster, 26. Juli 2007



Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|----|--------------|---------|-------------|-------------|---------------------|
| Az | 22123 | Referat | 21/0 | Fördersumme | 170.000,00 € |
|----|--------------|---------|-------------|-------------|---------------------|

Antragstitel Einfaches umweltfreundliches Beschichten von Bauteilen zum Verschleißschutz

Stichworte Verfahren; Beschichtung, Bauteil

| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 24 Monate+6 Monate | 1.11.2004 | 30.4.2007 | Abschluss |

Zwischenberichte: alle 6 Monate Kurzbericht

Bewilligungsempfänger **Wendel GmbH**
Am Güterbahnhof
35683 Dillenburg

Tel **02771/906-133**

Fax **0277/906-106**

Projektleitung

Dipl.-Ing. Voß

Bearbeiter

Kooperationspartner Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Maschinenbauteile sind im betrieblichen Einsatz häufig besonderer Verschleißbeanspruchung ausgesetzt, welche die Lebensdauer der Teile vorzeitig begrenzt. Schutzschichten auf solchen Bauteilen, welche den Verschleißangriff reduzieren, werden häufig mit Verfahren aufgebracht, die aufgrund der Emissionen und des Ressourcenverbrauchs zu Umweltbelastungen führen. Generelles Ziel des beantragten Vorhabens war, ein Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, derart beanspruchte Maschinenbauteile auf eine deutlich weniger umweltbelastende, einfache und kostengünstige Art mit einer verschleißhemmenden gut haftenden überwiegend metallischen Beschichtung zu versehen, ohne dass dafür eine aufwändige Beschichtungsanlage mit den damit verbundenen Umweltbelastungen benötigt wird und auch die Beschichtung von geometrisch komplexen Bauteilen, z.B. mit Hinterschneidungen, erlaubt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die entwickelte Technologie beruht darauf, dass durch eine neuartige Kombination zweier völlig unterschiedlicher Verfahren der metallische Beschichtungswerkstoff, der eine sog. selbstfließende Legierung darstellt, wie sie aus dem Bereich des thermischen Spritzens bekannt ist, in Pulverform gemischt mit einem Email als Schlicker aufgebracht und in einem nachfolgenden Brennvorgang in herkömmlichen Wärmebehandlungsanlagen zu einer porenfreien dichten Schicht mit metallurgischer Bindung zum Grundwerkstoff umgewandelt wird. Der Schichtauftrag erfolgt dabei durch einfache Verfahren wie Tauchen, Streichen oder Handspritzen mit Hilfe von Druckluft. Das Email übernimmt dabei die wesentliche Aufgabe, eine anfängliche Haftung zwischen den Metallpulverpartikeln untereinander und zum Substrat auch auf schrägen Flächen zu gewährleisten, bevor bei höheren Temperaturen während des Einbrennvorganges die metallurgische Bindung zum Grundmaterial erfolgt. Die Aufgabe der Entwicklung eines Emails mit angepassten Eigenschaften sowie die Optimierung der Auftragsverfahren übernimmt dabei der Bewilligungsempfänger, der eng mit dem Kooperationspartner bei der Charakterisierung und Prüfung der Schicht sowie bei der Schichtherstellung zusammenarbeitet.

Ergebnisse und Diskussion

Aufbauend auf konventionell eingesetzten Emailen wurde durch Anpassung der Emaillezusammensetzung eine Serie neuer Schichtsysteme entwickelt. Dabei werden die Emailen in Pulverform zusammen mit einer pulverförmigen Einschmelzlegierungen auf Basis von NiCrBSi unter Zugabe von Wasser in Form eines Schlickers gemischt und aufgetragen. Sie bilden durch Glühung im Vakuumofen eine festhaftende harte Schicht. Die Entwicklung orientierte sich dabei an folgen vier Kriterien: Erzielung einer Schichthärte wie sie thermische Spritzschichten erreichen, Ausbildung einer glatten Oberfläche, Erzielung eines dichten Schichtgefüges und Einstellung einer Fließfähigkeit des Schlickers, die zu einem guten Umfließen auch komplex geformter Bauteile führt. Zum Abschluss des Vorhabens wurden Schichtsysteme realisiert, mit denen sich Härtewerte über 750HV einstellen lassen, welche ein dichtes Gefüge mit vereinzelt Emailleinschlüssen aufweisen und eine auf den jeweiligen Anwendungsfall ausgebildete Oberfläche aufweisen. Der Schlicker erlaubt das Auftragen durch Streichen, kann aber bei entsprechender Eigenschaftseinstellung auch zum Tauchen des Bauteiles eingesetzt werden.

Bereits während der Projektlaufzeit ergab sich die Möglichkeit eines Transfers der Entwicklungsergebnisse in die industrielle Praxis. Es konnte in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen in zwei Anwendungsfällen eine Beschichtung von Bauteilen durchgeführt werden, welche in einem Fall bereits mit sehr gutem Erfolg im betrieblichen Einsatz getestet wurden, in zweiten Fall beginnt zum Projektende die betriebliche Testphase.

Durch die erfolgreiche Entwicklung dieser Beschichtungsrechnologie ergeben sich unter umwelttechnischen Aspekten u.a. folgende Vorteile:

- Reduzierung von Emission, z.B. an CO₂, durch Einsparung des Einsatzes von Brenngasen,
- Verringerung von Instandhaltungskosten und Neufertigung durch höhere Bauteilstandzeit, damit Einsparung an Ressourcen im Rohstoffbereich und an Betriebsmitteln,
- Verminderung von Verlusten der Einsatzwerkstoffe, da im Gegensatz zum Auftragen durch Thermisches Spritzen eine praktisch 100%-ige Ausnutzung des Schichtwerkstoffes erfolgt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Während der Projektlaufzeit wurden zwei Patentanmeldungen zu der entwickelten Technologie beim Deutschen Patentamt eingereicht.

Fazit

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Es wurde ein Schichtsystem auf der Basis speziell hierfür ausgelegter Emailen zusammen mit Einschmelzhartlegierungen entwickelt. Dieser Werkstoff kann in Form eines wässrigen Schlickers durch einfaches Aufstreichen oder durch Tauchen auf das Bauteil aufgetragen werden. Durch Glühen in einem herkömmlichen Vakuumofen bildet der Schlicker eine feste beständige, gut haftende Schicht hoher Härte. Die Härte kann dabei diejenige klassischer Thermischer Spritzschichten erreichen und auch übersteigen. Erste Anwendungen dieser Beschichtungstechnik befinden sich im industriellen Test.

Der Einsatz dieser Technologie bietet Vorteile bezüglich der Verringerung von Emissionen und Ressourcenverbrauch im Vergleich zu Konkurrenzverfahren.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen..... | 5 |
| 2 | Verzeichnis von Abkürzungen und Definitionen | 7 |
| 3 | Zusammenfassung | 8 |
| 4 | Einleitung | 10 |
| 5 | Experimentelles | 14 |
| 5.1 | Eingesetzte Werkstoffe..... | 14 |
| 5.2 | Beschichten der Substrate..... | 15 |
| 5.3 | Einschmelzen | 16 |
| 5.4 | Eingesetzte Analyseverfahren | 17 |
| 6 | Ergebnisse und Auswertung..... | 21 |
| 6.1 | Entwicklung einer angepassten Emaille | 21 |
| 6.1.1 | Emalleauswahl in ersten orientierenden Versuchen..... | 21 |
| 6.1.2 | Weiterentwicklung der Emaille | 26 |
| 6.2 | Einfluss der Parameter Einschmelztemperatur und Emailleanteil..... | 29 |
| 6.3 | Einfluss der Einschmelzlegierung..... | 33 |
| 6.4 | Untersuchung verschiedener Grundwerkstoffe | 36 |
| 6.5 | Ergänzende Prüfungen..... | 38 |
| 7 | Beschichtung erster Bauteile für Anwendungstests..... | 41 |
| 8 | Fazit | 44 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 45 |

1 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

| | |
|--|----|
| Abb. 1: Probe mit getrocknetem Schlicker | 15 |
| Abb. 2: Beschichtung durch Tauchen von Testteilen | 16 |
| Abb. 3: Typischer Zeit-Temperatur-Verlauf für den Einschmelzvorgang | 17 |
| Abb. 4: Typische Oberflächenausbildungen | 18 |
| Abb. 5: Beispielhaftes Gefüge einer eingeschmolzenen Probe | 18 |
| Abb. 6: Verschleißapparat | 19 |
| Abb. 7: Drei-Punkt-Biegeversuch (nach DIN 50111)..... | 20 |
| Abb. 8: Schichthärte der ersten Versuchsauftragungen mit konventionellen Emaillen..... | 22 |
| Abb. 9: Schichthärte bei Variation der Einschmelztemperatur bei 5 min. Einschmelzdauer | 23 |
| Abb. 10: Schichthärte bei Variation der Einschmelztemperatur bei 25 min. Einschmelzdauer | 23 |
| Abb. 11: Härte der Schicht bei Einsatz der neu entwickelten Emaillezusammensetzungen | 25 |
| Abb. 12: Oberfläche einer Schicht aus Ton | 26 |
| Abb. 13: Schliff durch eine Schicht aus Metallpulver Ton und Metallpulver | 26 |
| Abb. 14: Entwicklung der Schichthärte | 27 |
| Abb. 15: Exemplarische Darstellung der Entwicklung der Schichtoberfläche | 28 |
| Abb. 16: Exemplarische Darstellung der Entwicklung des Schichtgefüges | 28 |
| Abb. 17: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 10% Emaile-Anteil | 29 |
| Abb. 18: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 20% Emaile -Anteil | 30 |
| Abb. 19: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 30% Emaile-Anteil | 31 |
| Abb. 20: Härteverlauf für unterschiedliche Einschmelztemperaturen und Emaile-Anteile | 32 |
| Abb. 21: Ausbildung der Gefüge für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 30% Emaile-Anteil | 32 |
| Abb. 22: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 10% Emaile-Anteil für Amdry 770 und Amdry 780 (Emaile 0605-034; 25 min) | 33 |
| Abb. 23: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 30% Emaile-Anteil für Amdry 770 und Amdry 780 (Emaile 0605-034; 25 min) | 34 |
| Abb. 24: Ausbildung der Gefüge für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 10% Emaile-Anteil für Amdry 770 und Amdry 780 (Emaile 0605-034; 25 min) | 35 |
| Abb. 25: Härteverlauf für unterschiedliche Einschmelztemperaturen und Emaile-Anteile für Amdry 770 und Amdry 780 | 36 |
| Abb. 26: Beschichtete Scheibe aus dem Grundwerkstoff 1.2379 | 37 |
| Abb. 27: Querschliff im Übergang einer beschichteten Gussplatte aus GGG40 | 37 |
| Abb. 28: Auf Zug beanspruchte Schicht im Biegeversuch; 30° Biegewinkel | 38 |
| Abb. 29: Durch Tauchen beschichtetes Zahnrad | 40 |
| Abb. 30: Mischerelement mit Innenbeschichtung | 41 |
| Abb. 31: Beschichtete Einzelelemente des Mixers | 42 |
| Abb. 32: Rohrbogen mit Innenbeschichtung | 43 |

Tabellen

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Eingesetzte Metallpulver..... | 14 |
| Tabelle 2: Typische Zeit-Temperatur-Parameter für den Einschmelzvorgang..... | 16 |
| Tabelle 3: Eingesetzte Emailen der ersten Versuchsserie..... | 21 |
| Tabelle 4: Übersicht über die Entwicklung der Emailen 0605-xxx (1 –11)..... | 24 |
| Tabelle 5: Ergebnisse von Strahlverschleißtests..... | 39 |

2 Verzeichnis von Abkürzungen und Definitionen

Liegen nicht vor.

3 Zusammenfassung

Die Lebensdauer von Maschinenbauteilen ist im betrieblichen Einsatz häufig durch starke Verschleißbeanspruchung begrenzt. Schutzschichten auf solchen Bauteilen, welche den Verschleißangriff reduzieren, werden häufig mit Verfahren aufgebracht, die aufgrund der Emissionen und des Ressourcenverbrauchs zu Umweltbelastungen führen. Generelles Ziel des durchgeführten Vorhabens war, ein Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, derart beanspruchte Maschinenbauteile auf eine deutlich weniger umweltbelastende, einfache und kostengünstige Art mit einer verschleißhemmenden gut haftenden überwiegend metallischen Beschichtung zu versehen, ohne dass dafür eine aufwändige Beschichtungsanlage mit den damit verbundenen Umweltbelastungen benötigt wird und auch die Beschichtung von geometrisch komplexen Bauteilen, z.B. mit Hinterschneidungen, erlaubt.

Der technologische Ansatz beruht darauf, dass durch eine neuartige Kombination zweier völlig unterschiedlicher Verfahren der metallische Beschichtungswerkstoff, der eine sog. selbstfließende Legierung darstellt, wie sie aus dem Bereich des thermischen Spritzens bekannt ist, in Pulverform gemischt mit einem Email als wässriger Schlicker aufgebracht und in einem nachfolgenden Brennvorgang in herkömmlichen Wärmebehandlungsanlagen zu einer porenfreien dichten Schicht mit metallurgischer Bindung zum Grundwerkstoff umgewandelt wird. Der Schichtauftrag erfolgt dabei durch einfache Verfahren wie Tauchen oder Streichen. Das Email übernimmt dabei die wesentliche Aufgabe, eine anfängliche Haftung zwischen den Metallpulverpartikeln untereinander und zum Substrat zu gewährleisten, bevor bei höheren Temperaturen während des Einbrennvorganges die metallurgische Bindung zum Grundwerkstoff erfolgt.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Es wurde ein Schichtsystem auf der Basis speziell hierfür ausgelegter Emailen zusammen mit Einschmelzhartlegierungen entwickelt. Dieser Werkstoff kann in Form eines wässrigen Schlickers durch einfaches Aufstreichen oder durch Tauchen auf das Bauteil aufgetragen werden. Durch Glühen in einem herkömmlichen Vakuumofen bildet der Schlicker eine feste beständige, gut haftende Schicht hoher Härte. Die Härte kann dabei je nach Anwendungsfall in einem weiten Bereich eingestellt werden. Sie kann diejenige klassischer Thermischer Spritzschichten erreichen und auch übersteigen. Beschichten lassen sich sowohl ebene Flächen als auch räumliche Bauteile, wobei die Beschichtung sowohl Innen, z.B. bei Medien führenden Rohren, als auch auf der Außenfläche erfolgen kann.

Bereits während der Projektlaufzeit ergab sich die Möglichkeit eines Transfers der Entwicklungsergebnisse in die industrielle Praxis. Es konnte in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen in zwei Anwendungsfällen eine Beschichtung von Bauteilen durchgeführt werden, welche in einem Fall bereits mit sehr gutem Erfolg im betrieblichen Einsatz getestet wurden, in zweiten Fall beginnt zum Projektende die betriebliche Testphase.

Während der Projektlaufzeit wurden zwei Patentanmeldungen zu der entwickelten Technologie beim Deutschen Patentamt eingereicht.

Durch die erfolgreiche Entwicklung dieser Beschichtungstechnologie ergeben sich unter umwelttechnischen Aspekten u.a. folgende Vorteile:

- Reduzierung von Emission, z.B. an CO₂, durch Einsparung des Einsatzes von Brenngasen,
- Verringerung von Instandhaltungskosten und Neufertigung durch höhere Bauteilstandzeit, damit Einsparung an Ressourcen im Rohstoffbereich und an Betriebsmitteln,
- Verminderung von Verlusten der Einsatzwerkstoffe, da im Gegensatz zum Auftragen durch Thermisches Spritzen eine praktisch 100%-ige Ausnutzung des Schichtwerkstoffes erfolgt.

4 Einleitung

Ausgangssituation

Maschinenbauteile sind im betrieblichen Einsatz häufig besonderer Verschleißbeanspruchung ausgesetzt, welche die Lebensdauer der Teile vorzeitig begrenzt. Schutzschichten auf solchen Bauteilen, welche den Verschleißangriff reduzieren, werden häufig mit Verfahren aufgebracht, die aufgrund der Emissionen und des Ressourcenverbrauchs zu Umweltbelastungen führen.

Technisch genutzte Verfahren zur Erzeugung verschleißbeständiger Schichten auf Bauteilen setzen in der Regel den Einsatz einer spezialisierten Beschichtungsanlage voraus, für die folgende Umweltaspekte zutreffen:

Verbrauch an Ressourcen: Beschichtungsanlagen benötigen Betriebsmittel wie z.B. elektrische Energie oder Brennstoffe, die häufig nur mit einem eingeschränkten Wirkungsgrad die eingebrachte Energie in der jeweils nutzbaren Form zur Verfügung stellen. So besitzt z.B. eine CO₂-Laseranlage zur Werkstoffbearbeitung, wie sie zur Laserbeschichtung eingesetzt wird, einen Wirkungsgrad von wenigen Prozent.

Emissionen: Zum anderen sind die Anlagen Quellen von Emissionen in Form von Abgasen, flüssigen oder gelösten Abfallprodukten oder auch Lärm. Thermische Beschichtungsanlagen setzen groß dimensionierte Filteranlagen ein, um die Verbrennungsprodukte sowie Feinststäube, die beim Beschichtungsprozess entstehen, abzufangen und deren Emission in die Umwelt zu vermeiden. Hochgeschwindigkeitsflammspritzenanlagen wie HVOF erzeugen hohe Lärmpegel, die eine wirksame Schalldämmung notwendig machen. Für die Herstellung von Hartchromschichten werden aggressive Elektrolyte eingesetzt, die Chrom in seiner sechswertigen Form beeinhaltend müssen, zudem kann es durch die notwendigen hohen Stromdichten zu starker Gasentwicklung kommen, die gesundheitsgefährdende Substanzen freisetzen kann, so dass Verchromungsanlagen mit entsprechenden Schutzeinrichtungen ausgerüstet sein müssen.

Das in dem durchgeführten Vorhaben entwickelte Verfahren arbeitet ohne eine solche Anlage. Damit spricht es beide umweltrelevanten Aspekte an. Die genannten Probleme treten bei der dem Vorhaben zugrundeliegenden Vorgehensweise nicht oder in deutlich abgeschwächter Form auf, da der Auftrag über einfaches Tauchen oder Aufstreichen erfolgt und die Wärmebehandlung konventionelle Techniken nutzt, wie sie z.B. in Härtereien eingesetzt werden.

Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens war, ein Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, Maschinenbauteile, die im betrieblichen Einsatz starker Verschleißbeanspruchung unterworfen sind, auf eine einfache, kostengünstige und weniger umweltbelastende Art mit einer verschleißhemmenden gut haftenden Beschichtung zu versehen, ohne dass dafür eine aufwändige Beschichtungsanlage benötigt wird. Vielmehr erfolgt der Schichtauftrag durch einfache Auftragsverfahren wie Tauchen oder Streichen,

gefolgt von einem Einbrennvorgang. Das Verfahren sollte es auch erlauben, Bauteile mit relativ komplexer Geometrie zu beschichten, die mit anderen Verfahren aufgrund schwieriger Geometrielemente wie z.B. Hinterschneidungen nur sehr schwer oder gar nicht beschichtet werden können, so dass das Verfahren auch für Bauteile unterschiedlichster Größe und Geometrie angewendet werden kann. Die Schichten sollten dabei eine hohe Härte von über 60 HRC bei Schichtdicken von ca. 100µm bis über 1mm mit hohem Widerstand bei abrasiver Beanspruchung und trotzdem ausreichender Duktilität verbinden. Ergänzt werden soll das Eigenschaftsspektrum durch eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit.

Dies soll dadurch erfolgen, dass der Beschichtungswerkstoff in Pulverform gemischt mit einem Email als Bindemittel als Schlicker aufgebracht und in einem nachfolgenden Brennvorgang in herkömmlichen Wärmebehandlungsanlagen zu einer porenfreien dichten Schicht mit metallurgischer Bindung zum Grundwerkstoff umgewandelt wird.

Werkstoffkundliche Basis

Wenn für Bauteile verschleißhemmende Beschichtungen gefordert sind, die eine ausreichende Abtragsreserve besitzen müssen, d.h. eine hinreichende Schichtdicke, kommt neben dem Auftragsschweißen vor allem das Thermische Spritzen als Beschichtungsverfahren in Frage. Bei den thermischen Spritzverfahren wird der dem Spritzgerät zugeführte Spritzwerkstoff erhitzt und in Form von Partikeln mit hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche des zu beschichtenden Bauteiles geschleudert. Beim Auftreffen bilden die heißen Partikel Fladen, die sich miteinander verzahnen und allmählich eine Schicht mit der gewünschten Dicke aufbauen. Die Dichte der Schicht hängt vom Schichtwerkstoff, der Auftreffenergie und -temperatur ab. Die Haftfestigkeit der Schicht hängt von denselben Faktoren ab, außerdem noch von der Oberflächenbeschaffenheit der Unterlage, die stets sauber und ausreichend aufgeraut sein muß.

In Abhängigkeit von den verarbeiteten Werkstoffen und den eingesetzten Spritzverfahren sind die Schichten mehr oder weniger porös. Die herstellbaren Schichtdicken liegen im Bereich von 10 µm bis hin zu mehreren Millimetern. Die Haftung thermisch gespritzter Schichten beruht vorwiegend auf mechanischer Verklammerung, wobei die Haftfestigkeit verfahrensabhängig mehr als 100 MPa betragen kann. Die Temperaturbelastung des Bauteils während des Beschichtens ist von den unterschiedlichen Verfahren und deren Parametern abhängig. Begrenzung der Substraterwärmung auf unter 100° C ist möglich, i.a. erwärmt sich das Bauteil nicht über 300 °C.

Eine wichtige Gruppe der Beschichtungsmaterialien sind die selbstfließenden Legierungen. Die selbstfließenden Legierungen werden in einem zweistufigen Prozess eingesetzt. In der ersten Stufe erfolgt die Beschichtung des Bauteiles mit herkömmlichen Beschichtungsverfahren. Dies ergibt eine Schicht mit verfahrenstypischer Porosität. In einem zweiten Schritt wird das Bauteil mit der Schicht in den Temperaturbereich von ca. 1000 - 1200°C erwärmt, zwischen Solidus- und Liquidustemperatur (durch Flammeinschmelzung, Induktives Einschmelzen, Ofeneinschmelzung, Lasereinschmelzen). Dabei wird die Schicht angeschmolzen und füllt die Poren, so dass eine 100% dichte Beschichtung erreicht wird.

Hier setzt das durchgeführte Vorhaben an.

Der Vorgang des Beschichtens wird dadurch deutlich vereinfacht, dass auf den Einsatz einer Beschichtungsanlage verzichtet wird. Vielmehr wird der Beschichtungswerkstoff in der konventionellen Pulverform mit einem Email als Binder gemischt, so dass ein Schlicker entsteht, der mit einfachen Verfahren wie Tauchen oder Streichen aufgetragen wird. Dabei können auch Geometrien beschichtet werden, die mit einem Verfahren wie dem thermischen Spritzen, das auf eine Sichtlinie zwischen Quelle und Bauteil angewiesen ist und einen möglichst senkrechten Auftragswinkel benötigt, nicht oder nur unvollständig bearbeitet werden können.

An das Bindemittel werden dabei einige Anforderungen gestellt. Es dient im wesentlichen dazu, eine anfängliche Haftung zwischen den Metallpulverpartikeln untereinander und zum Substrat auch auf schrägen Flächen zu gewährleisten. Dazu muss es eine thermische Beständigkeit bis in einen Temperaturbereich aufweisen, in dem die Bindungs- und Haftungsprozesse der Metallpulverpartikel einsetzen, ca 600°C. In der fertig wärmebehandelten Schicht darf der Binder entweder nicht mehr vorhanden sein oder in einer solchen Menge und Verteilung vorliegen, dass er die gewünschten Eigenschaften der Schicht nicht negativ beeinflusst oder auch mit dem Metall reagieren, so dass er die gewünschten Eigenschaften verstärkt. Aufgrund dieser Anforderungen ist daran gedacht, als Bindemittel ein Email zu verwenden, das, als eigenständige Schicht, etliche der geforderten Eigenschaften aufweist. Emails für Stahlsubstrate werden üblicherweise im Temperaturbereich von 700 bis 900 °C eingebrannt. Da das Metallpulver bei ca. 200°C höheren Temperaturen eingeschmolzen wird, ist das Verhalten des Emails in diesem Bereich von hoher Bedeutung. Es muss gewährleistet sein, dass z.B. keine starken Zersetzungsreaktionen auftreten, die zu einer Gas- oder Flüssigkeitsbildung derart führen, dass die entstehende Metallschicht Risse oder Poren entwickelt.

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung wird in dem Arbeitsplan konkretisiert, der sich in 9 Arbeitspunkte gliedert. Das Vorhaben hat einen Umfang von 24 Monaten. Es teilt sich auf in zwei Phasen. In Phase 1, die mit 15 Monaten Dauer angesetzt wird, erfolgt die Entwicklung der grundsätzlichen Technik. In Phase 2 von 9 Monaten Dauer werden anwendungsnahe Bauteilbeschichtungen, Bauteiltests und technologische Prüfungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Phase wirken auf die grundsätzliche Technologie zurück, so dass auch in dieser Phase wieder Arbeitspunkte aus dem ersten Abschnitt aufgegriffen werden müssen.

Die einzelnen Arbeitspunkte umfassen:

Arbeitspaket 1, Herstellung von Probekörpern Dies umfasst die Festlegung und Herstellung von Probegeometrien, die Optimierung der Mischungsaufbereitung und –zusammensetzung, die Optimierung des Wärmebehandlungsprofils und die Erarbeitung der Technologie zum Aufbringen der Schicht auf das Bauteil.

Arbeitspaket 2, Struktur- und Oberflächenanalyse: Hierin wird die Schichtstruktur metallografisch untersucht und die Oberfläche der Schicht beurteilt.

Arbeitspaket 3, Mechanische Prüfungen: Die mechanischen Prüfungen umfassen als Standardprüfung die Härtemessung, daneben werden über die Herstellung von Biegeproben Aussagen zur Schichthaftung gewonnen und zusätzlich orientierend Hinweise zur Schlagfestigkeit erhalten. Ebenso sollten Messungen zur Verschleißbeständigkeit durchgeführt werden.

Arbeitspaket 4, Grundwerkstoffe: Es erfolgt eine Überprüfung der Eignung verschiedener Stähle als Grundwerkstoff.

Arbeitspaket 5, Beschichtung von Bauteilen: Ausgewählte Bauteile wie z.B. Rohre werden auf ihren Funktionsflächen beschichtet. Dies stellt neue Anforderungen im Vergleich zu den Testteilen.

Arbeitspaket 6, Prüfung der Bauteile im Betrieb: Die beschichteten Bauteile werden unter realen Einsatzbedingungen geprüft.

Arbeitspaket 7, Prüfung der Bearbeitbarkeit: Orientierend werden Aussagen zur Bearbeitbarkeit gewonnen (Spanende Bearbeitung, Schleifbarkeit, Schweißbarkeit)

Arbeitspaket 8, Rückwirkung von Betriebsergebnissen: Ergebnisse aus den Einsatztests wirken auf die Optimierung von Schichtzusammensetzung und Aufbringung zurück.

Arbeitspaket 9, Auswertung und Bewertung:

5 Experimentelles

5.1 Eingesetzte Werkstoffe

Substrate für die Härte- und Verschleißmessung sowie die Biegeversuche

Als Substrate für die überwiegend eingesetzten Proben wurden Platten mit den Maßen 8x25x80 mm³ aus einfachem Baustahl S235JR verwendet. Diese dienen der allgemeinen Schichtbeurteilung, der Härtmessung und konnten auch für Verschleißversuche eingesetzt werden, da die Abmessungen an die Verschleißapparatur angepasst waren.

Für den Drei-Punkt-Biegeversuch wurden Flachproben mit den Abmessungen 2x15x100 mm³ eingesetzt.

Neben diesen Standardproben wurden im Rahmen der Überprüfung der Eignung verschiedener Grundwerkstoffe auch Substrate aus Eisenguss oder aus einem Werkzeugstahl verwendet.

Vorbehandlung der Substrate

Alle Substrate mussten einer einfachen Vorbehandlung unterzogen werden. Die Substrate müssen metallisch rein sein und eine gewisse Rauigkeit aufweisen, damit der Schlicker auf der Oberfläche haftet, und nach dem Einschmelzen eine gute Anbindung an das Substrat gewährleistet ist.

Dieses wurde durch Sandstrahlen mit Korund (EKF120) erreicht.

Durch die Korngröße EKF 120, die im Mittel eine Größe von 109µm besitzt, raut die Oberfläche ausreichend auf.

Wird das Substrat nicht richtig vorbehandelt, ist eine optimale Schichtanbindung nicht gegeben. Im ungünstigsten Fall löst sich die Schicht nach dem Einschmelzen wieder vom Substrat ab.

Schichtwerkstoffe

Die Schicht ist aus einer Mischung aus einer metallischen Komponente, einer Einschmelzlegierung auf Basis von NiCrBSi, und einem Emaille-Pulver aufgebaut, die zum Auftragen mit Wasser zu einem Schlicker angerührt wird.

Für die Metall-Komponente wurden verschiedene Pulver des Herstellers SulzerMetco eingesetzt, die sich in Ihrem Fließverhalten, dem Einschmelztemperaturbereich und auch der Partikelgröße unterscheiden (Tabelle 1).

| Legierungsbestandteil [%] | Metco 15E | Metco 15F | Amdry 770 | Amdry 780 |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Bor | 3,5 | 3,5 | 3 | 3,2 |
| Chrom | 17 | 17 | 7 | / |
| Eisen | 4 | 4 | 3 | / |
| Kohlenstoff | 1 | 1 | / | / |
| Nickel | 70,5 | 70,5 | 82,5 | 92,3 |
| Silizium | 4 | 4 | 4,5 | 4,5 |

Tabelle 1: Eingesetzte Metallpulver

Die Variation der Emaillepulver war sehr viel umfangreicher. Da zu Anfang des Vorhabens nur Standardemaillen zur Verfügung standen, bestand ein wesentlicher Arbeitsumfang darin, die Emaillezusammensetzung so zu modifizieren, dass sie für den gedachten Anwendungsfall optimale Ergebnisse liefert. Daher wurden sehr viele Emailen entwickelt. Auf eine Auflistung aller Emailen wird an dieser Stelle verzichtet, auf die speziellen Aspekte wird bei der Diskussion der Ergebnisse eingegangen.

Neben der Zusammensetzung der Emaille und des Metallpulvers war eine weitere offene Frage, welches Mischungsverhältnis zwischen Metall und Emaille sich als gut erweisen würde. Daher wurde dieses Verhältnis auch variiert, wobei das Metall immer den größeren Anteil darstellt.

5.2 Beschichten der Substrate

Aufstreichen des Schlickers

Nach dem Vorbehandeln der Substrate wird der Schlicker auf die Substrate aufgetragen. Dazu werden in einem Messbecher die einzelnen Gewichtsanteile der verschiedenen Pulver auf einer Feinwaage, die eine Genauigkeit von 10^{-4} Gramm hat, abgewogen. Danach wird das Pulver-Gemisch mit H_2O versetzt und mit einem Spatel verrührt. Nachdem das Metall-Schlicker-Gemisch gut vermengt ist, wird es auf die Substratoberfläche geschüttet. Anschließend wird es mit dem Spatel gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt, bis die Substratoberfläche gleichmäßig benetzt ist.

Nach dem Auftragen muss der noch feuchte Schlicker trocknen, bis er zu einer festen Masse erstarrt. Danach ist es möglich, die Proben entweder von Hand mit einer Acetylen-Sauerstofflamme, im Kammerofen unter Schutzgas-Atmosphäre oder im Vakuumofen einzuschmelzen. Bild 1 zeigt eine Probe mit angetrocknetem Schlicker.



Abb. 1: Probe mit getrocknetem Schlicker

Tauchen von Bauteilen

Eine weitere Möglichkeit, die Bauteile zu beschichten, besteht darin, die Substrate oder die Bauteile zu tauchen.

Hierfür benötigt man eine größere Menge des Schlicker-Gemisches. Aus diesem Grund sollten diese Tauchversuche erst durchgeführt werden, wenn gesichert ist, dass dieses Gemisch auch im Spatelauftrag gute Ergebnisse liefert.

Im Vergleich zum Spatel-Auftrag wird hier jedoch im Verhältnis mehr Wasser beigemischt, um die Viskosität des Schlickers herabzusetzen. Nur so wird eine ausreichende Bauteilbenetzung ohne zusätzliches Verstreichen des Gemisches erzielt. Abb. 2 zeigt das Tauchen einfacher Testteile.

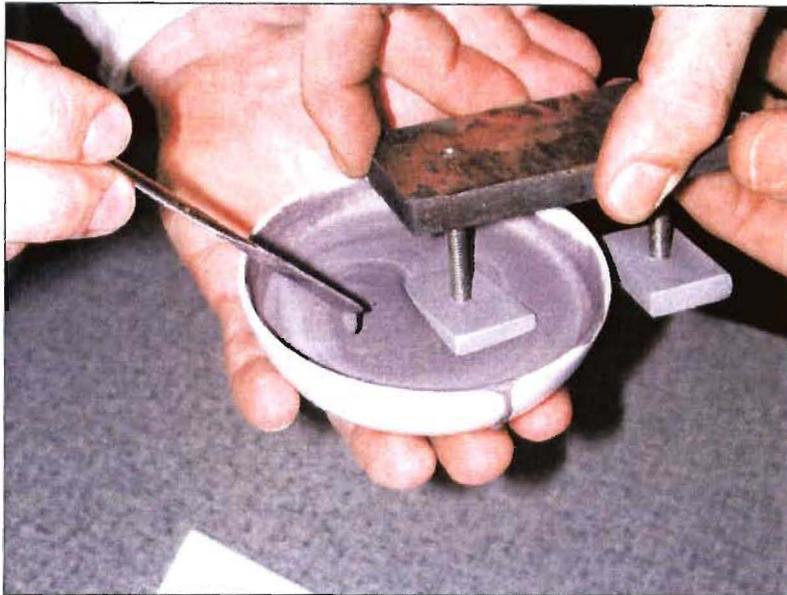


Abb. 2: Beschichtung durch Tauchen von Testteilen

5.3 Einschmelzen

Eingeschmolzen wurden die Testteile und auch spätere Bauteile im Vakuumofen, nachdem sich in ersten Tests gezeigt hatte, dass das Einschmelzen mit der Flamme recht schwierig ist, insbesondere zur Erzielung gleichmäßiger Schichten und beim Schutzgaseinschmelzen die Oxidation des Pulvers nicht ausreichend gut unterdrückt werden konnte

In der nachfolgenden Tabelle Tab. 2: Zeit Temperatur-Parameter sind alle Zeit-Temperaturverläufe dokumentiert. Die Basis für diese Aufwärm- bzw. Einschmelzkurven bilden Informationen des Herstellers Sulzer-Metco.

| Phase | Vorgang |
|-------|--|
| 1 | Aufheizen mit 20° pro Minute auf 800°C |
| 2 | 30 Minuten Halten der Temperatur zum Temperatenausgleich |
| 3 | Aufheizen mit 5° pro Minute auf 1050°C |
| 4 | 25 Minuten Halten der Temperatur |
| 5 | Abkühlen mit 10° pro Minute auf 800°C |

Tabelle 2: Typische Zeit-Temperatur-Parameter für den Einschmelzvorgang

Damit ein eindeutiger Zeit-Temperatur-Verlauf dokumentiert werden konnte wurde der Temperaturverlauf durch das Messdatenerfassungsprogramm CatMan 4.5 aufgenommen und als Excel-Datei abgespeichert. In der nachfolgenden Abb. 3 ist ein Zeit-Temperatur-Verlauf eines Einschmelzvorgangs zu sehen.

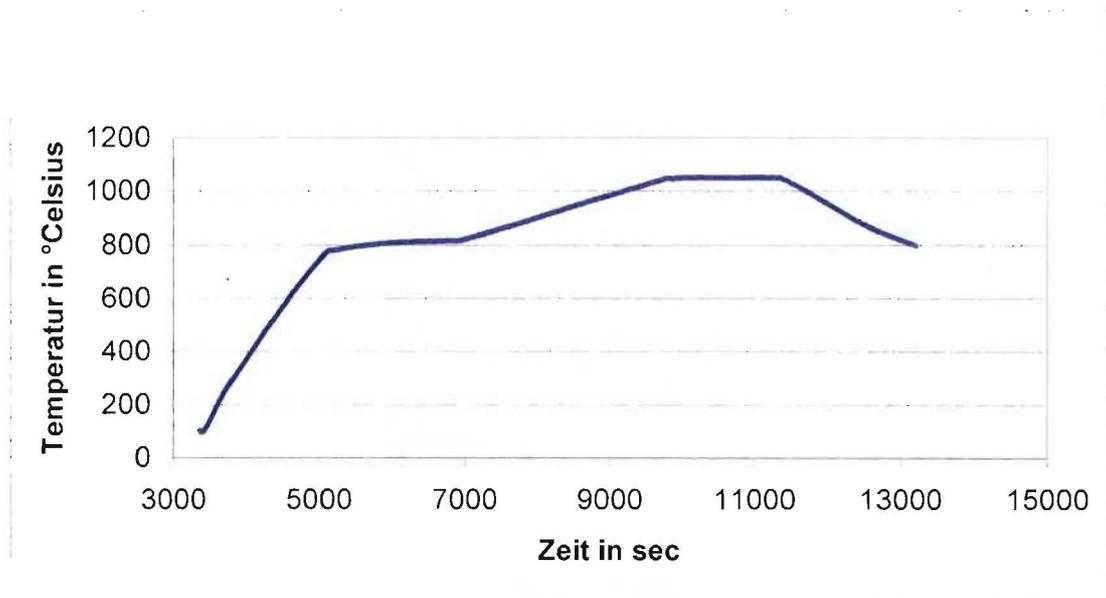


Abb. 3: Typischer Zeit-Temperatur-Verlauf für den Einschmelzvorgang

5.4 Eingesetzte Analyseverfahren

Um die eingeschmolzenen Schichten zu analysieren und miteinander vergleichen zu können, wurden die folgenden Analyseverfahren angewandt.

- Makroskopisch visuelle Analyse der Schicht
- Mikroskopisch visuelle Analyse der Schicht
- Verschleißmessung
- Härtemessung
- Biegeprüfung

Makroskopisch visuelle Analyse

In einer ersten Betrachtung der Oberfläche werden die Schichten begutachtet. Abb. 4 zeigt typische Ausbildungen der Oberfläche. Durch die makroskopische Analyse ist ein schnelles Analysieren der Schicht möglich, um einen ersten Rückschluß auf die Qualität der Schicht zu ziehen und so darüber zu entscheiden, wie mit dem Proben weiter verfahren werden soll. Anschließend wurde eine metallografische Analyse im Querschliff durchgeführt.

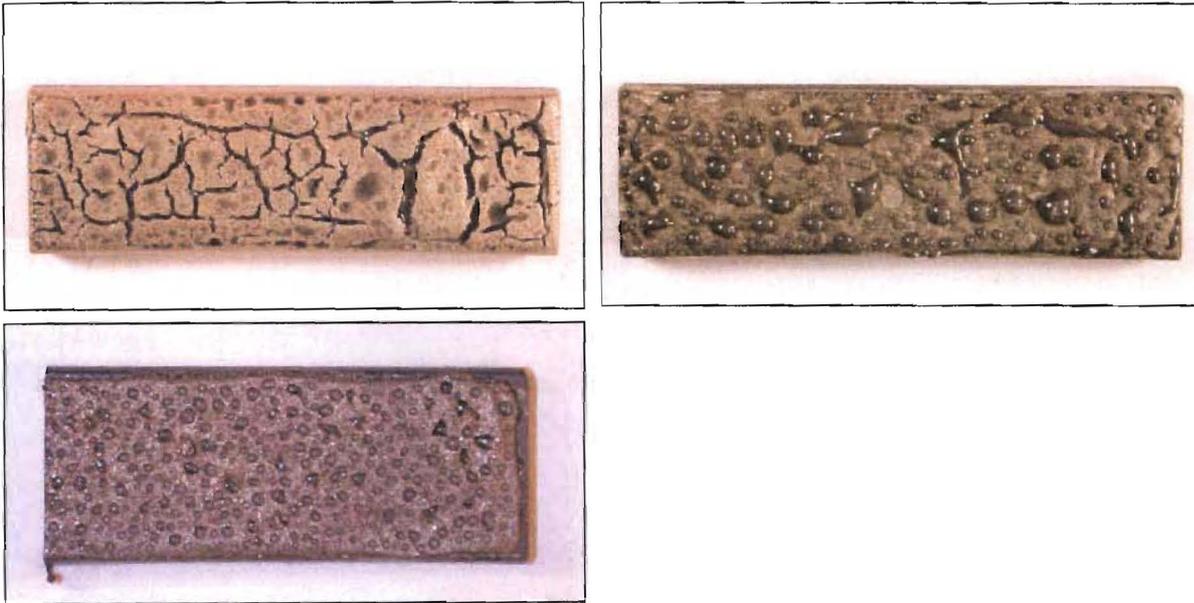


Abb. 4: Typische Oberflächenausbildungen

Metallografische Analyse

Die Proben wurden auf übliche Weise präpariert, d.h. ein Abschnitt abgetrennt, in Gießharz eingebettet, geschliffen und poliert.

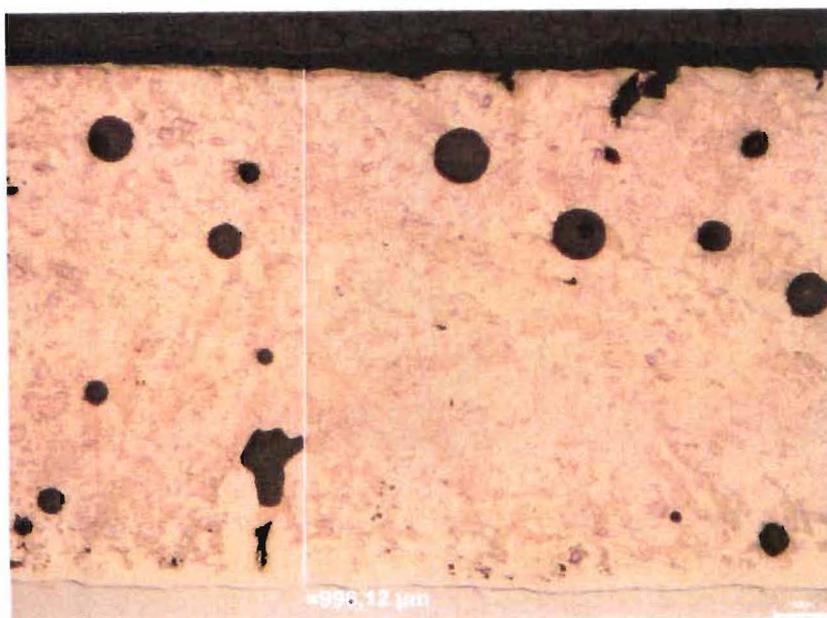


Abb. 5: Beispielhaftes Gefüge einer eingeschmolzenen Probe

Härtemessung

In der Literatur wird die Schichthärte üblicherweise in Rockwell angegeben; aufgrund der Schichtdicke und der Welligkeit der Oberfläche der Proben wurde hier auf die Härtemessung nach Vickers zurückgegriffen. Gewählt wurde die Belastung HV5, damit war gewährleistet, dass sich die aufbaubedingte Inhomogenität der Schicht nicht nachteilig in einer zu großen Streuung der Messwerte äußerte, was bei geringeren Belastungen der Fall wäre.

Die Messungen wurden an einer Prüfeinrichtung der Fa. Zwick durchgeführt, die mit einem Computerarbeitsplatz verbunden ist. Die Härte-Eindrücke wurden mit einer Mikroskop-Kamera in 20-facher Vergrößerung in Echtzeit an den PC übertragen und dort über die Software (TestExpert V9.01) ausgewertet. Damit ein objektives Ergebnis entsteht, wurden mindestens drei Eindrücke vermessen, um einen Mittelwert bestimmen zu können. Die Messpunkte sind zufällig in der Schicht verteilt.

Verschleißmessung

Für die Beurteilung der Schichten im Hinblick auf unterschiedliche Anwendungen ist nicht die Härte allein maßgebend, sondern häufig die Verschleißbeständigkeit, welche nur im Falle des Abrasivverschleißes als wesentlichem Mechanismus mit der Härte in Korrelation gebracht werden kann. Für die Verschleißmessung wurde in diesem Projekt das Verfahren des Strahlverschleißes angewandt.

Bei diesem Verfahren wird die Oberfläche der Proben durch einen Partikelstrahl unter einem definierten Winkel für eine bestimmte Zeit beansprucht. Als Maß für den Verschleißabtrag diente der Massenverlust, der auf der Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von 0,1 mg bestimmt wurde.

Als Ergebnis dient der Mittelwert aus drei Wägungen.

Abb. 6 zeigt eine Aufsicht auf die Verschleißapparatur.

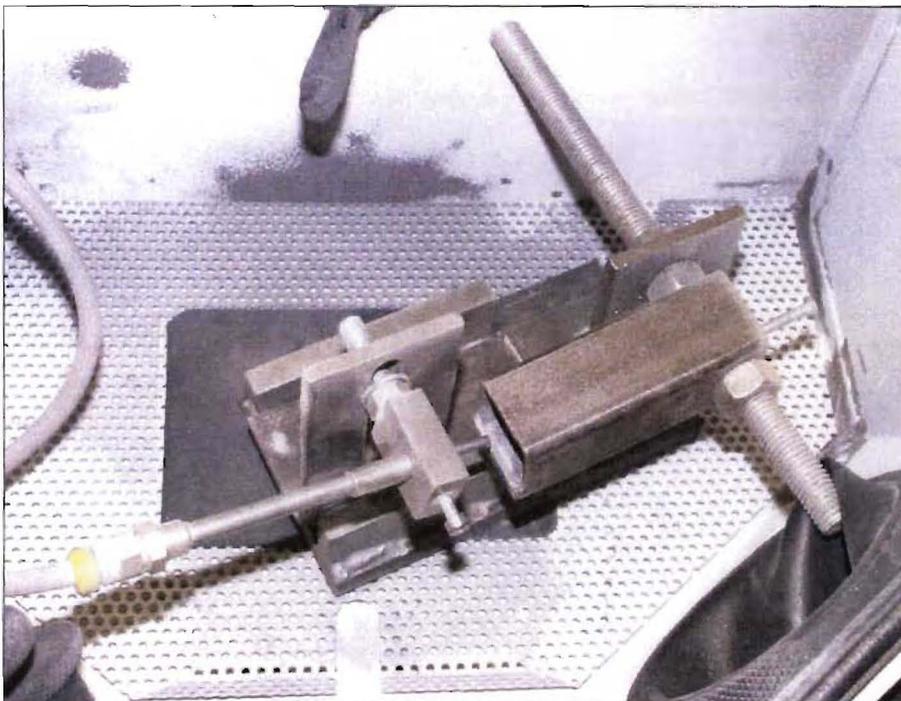


Abb. 6: Verschleißapparatur

Biegeprüfung

Die 3-Punkt-Biegeprüfung ist nach DIN 50111 genormt.

Hierbei wird ein definierter Probekörper in die Biegevorrichtung eingespannt, und anschließend durch Herunterfahren des zentralen Stempels bis zu einem bestimmten Winkel α gebogen.

Dabei wird die Probe auf der unteren Fläche auf Zug und an der oberen Fläche auf Druck beansprucht.

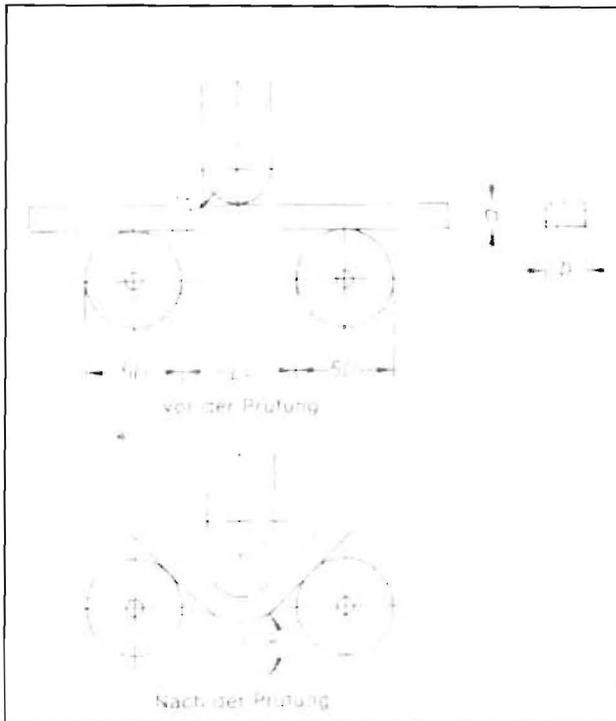


Abb. 7: Drei-Punkt-Biegeversuch (nach DIN 50111)

Kontrolliert werden sollte bei diesem Versuch die Neigung der Schicht zur Rissbildung bei Zug- und bei Druckspannung. Dazu wurden die Probestreifen einseitig beschichtet und in jeder der beiden möglichen Orientierungen (Schicht oben oder unten, d.h. im Druck- oder im Zugbereich) bis zu den vorgegebenen Winkeln (in diesem Fall 30°, 60° und 90°) gebogen.

6 Ergebnisse und Auswertung

6.1 Entwicklung einer angepassten Emaille

6.1.1 Emailleauswahl in ersten orientierenden Versuchen

Erste Versuche

Zu Anfang der Untersuchungen standen herkömmliche Emailen als einer der Werkstoffpartner zur Verfügung. Vorversuche waren entsprechend auch mit Standardemailen durchgeführt worden. Da klar erkennbar war, dass die Emaille für die spezielle Funktion, welche sie in der Schicht übernehmen sollte, angepasst werden musste, wurde folgendes Vorgehen festgelegt: Für eine erste Untersuchungsserie wurden 12 Emailen der Fa. Wendel ausgesucht. Unter Verwendung der Einschmelzlegierung Metco 15E sind Testbeschichtungen auf den Probeblechen bei jeweils gleichen Mischungsverhältnissen und identischen Einschmelzparametern hergestellt worden. Diese Schichten wurden dann in Bezug auf ihre Härte und grundsätzliche Schichtausbildung bewertet. Hieraus konnten dann Schlüsse auf die Zusammensetzung derjenigen Emaille gezogen werden, welche als Basis für die weiteren Entwicklungen verwendet werden sollte. Zielwerte für die Härte waren dabei die beim Flammstritzen erreichbaren Härtewerte von ca. 60HRC entsprechend ca. 700HV. Tabelle 3 zeigt die verwendeten 12 Emailen.

| Typ | Wärmeausdehnungs- koeffizient $AK * 10^{-7/K}$ | Glastemperatur $T_g [^{\circ}C]$ | Erweichungs- temperatur $T_E [^{\circ}C]$ |
|----------|--|-------------------------------------|---|
| MT 7512 | 849 | 207 | 565 |
| MT 7520 | 318 | 307 | 815 |
| G 7407 | 369 | 377 | 405 |
| 6S400R | 482 | 404 | 441 |
| 6S6725 | 276 | 413 | 446 |
| G 7282 | 377 | 448 | 479 |
| W 7385/3 | 275 | 461 | 511 |
| T 7372 | 289 | 471 | 513 |
| G 7283 | 324 | 484 | 517 |
| BR 7689 | 318 | 496 | 530 |
| MW 7530 | 360 | 518 | 744 |
| MW 7526 | 188 | 667 | 836 |

Tabelle 3: Eingesetzte Emailen der ersten Versuchsserie

Das Einschmelzen erfolgte jeweils bei 1050°C und einer Haltedauer von 25 Minuten im Schutzgasofen unter Argon-Atmosphäre. Fünf Emails ergaben eine gute Oberfläche und auch ein gut verschmolzenes Gefüge. Die übrigen Emails führten zu teilweise sehr rissigen Oberflächen, schlechter

Benetzung oder schlechtem Einschmelzen der Metalllegierung. Somit konnten aus der ersten Serie von Emails fünf Güten bestimmt werden, die gute Ergebnisse ergaben und mit denen weitergearbeitet werden konnte. Hieraus wurden dann vier Emailen mit den Bezeichnungen G7282, G7283, G7407 und 6s6725 zur weiteren Verfolgung ausgesucht. Diese hatten zufriedenstellende Schichtgüten ergeben, wobei bereits Härten bis zu 650 HV erreicht wurden (Abbildung 8; angegeben ist jeweils die Spanne in den Messungen).

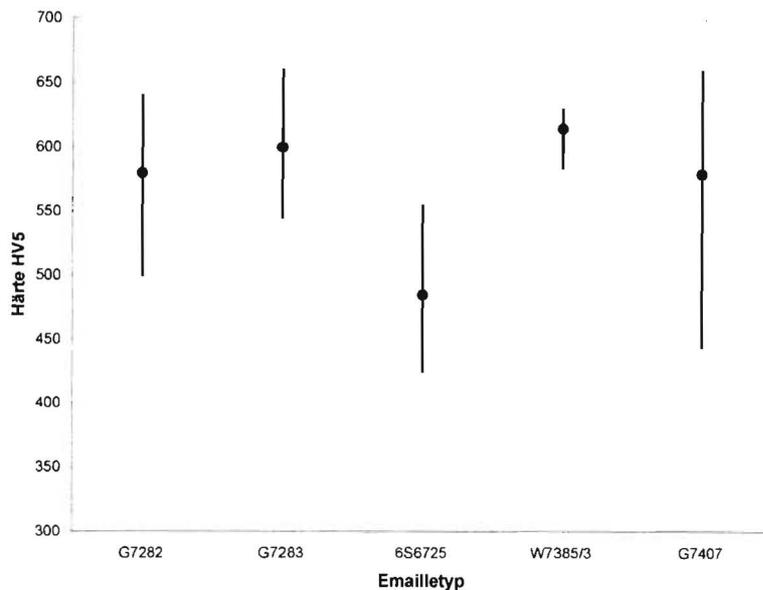


Abb. 8: Schichthärte der ersten Versuchsauftragungen mit konventionellen Emailen

Daraufhin war das folgende weitere Vorgehen festgelegt worden:

- Variation der Wärmebehandlungsparameter beim Einschmelzen mit dem Ziel der Optimierung
- Analyse der Ergebnisse im Hinblick auf Optimierung der Emailzusammensetzung
- Optimierung des Mischungsverhältnisses Metall/Email

Variation der Wärmebehandlungsparameter beim Einschmelzen

Zur Optimierung der Temperaturführung und zur weiteren Auswahl einer oder mehrerer zu verwendender Emailen wurden die vier verbleibenden Emailen in einem Metall-Schlicker-Gemisch angesetzt und mit unterschiedlichen Zeit-Temperatur-Parametern eingeschmolzen. Dabei wurde zur notwendigen Verbesserung der Schichthomogenität ein Vakuumofen eingesetzt, wie auch für alle weiteren Versuche.

Zur Optimierung wurde die Haltedauer bei Maximaltemperatur im Bereich 5 bis 25 Minuten und die Maximaltemperatur von 1030°C bis 1070°C variiert. Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die erhaltenen Härteverläufe. Die Diagramme illustrieren die grundsätzliche Problematik bei der Optimierung dieses zweikomponentigen Schichtaufbaus. Die beiden Komponenten Emaille und Metall besitzen unterschiedliche Eigenschaften und Eigenschaftsänderungen in den verschiedenen Temperaturbereichen, welche innerhalb eines Zyklus durchfahren werden. Während das

Emailepulver relativ früh erweicht nimmt das Metall erst im Bereich über 1000°C teigigen bzw. flüssigen Zustand an. Das Verhalten der Emaille in diesem Temperaturbereich ist schwer vorhersagbar. Zusätzlich sind Reaktionen zwischen den beiden Komponenten zu erwarten, da z.B. Elemente wie Bor oder Chrom in beiden Phasen auftreten und somit auch die Zusammensetzung der beiden Komponenten ändern können. Dies kann im Falle des Metalls die Ausbildung und Menge der

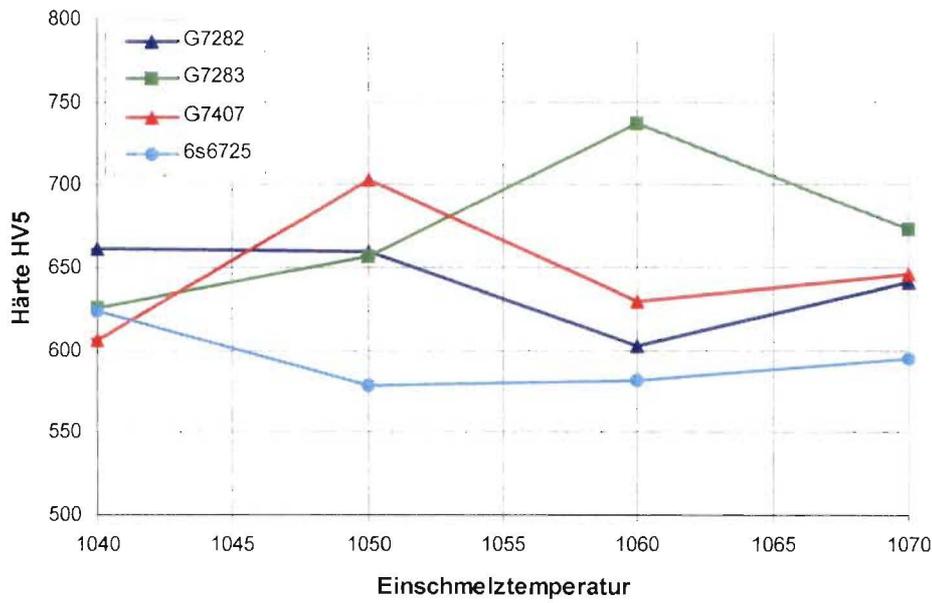


Abb. 9: Schichthärte bei Variation der Einschmelztemperatur bei 5 min. Einschmelzdauer

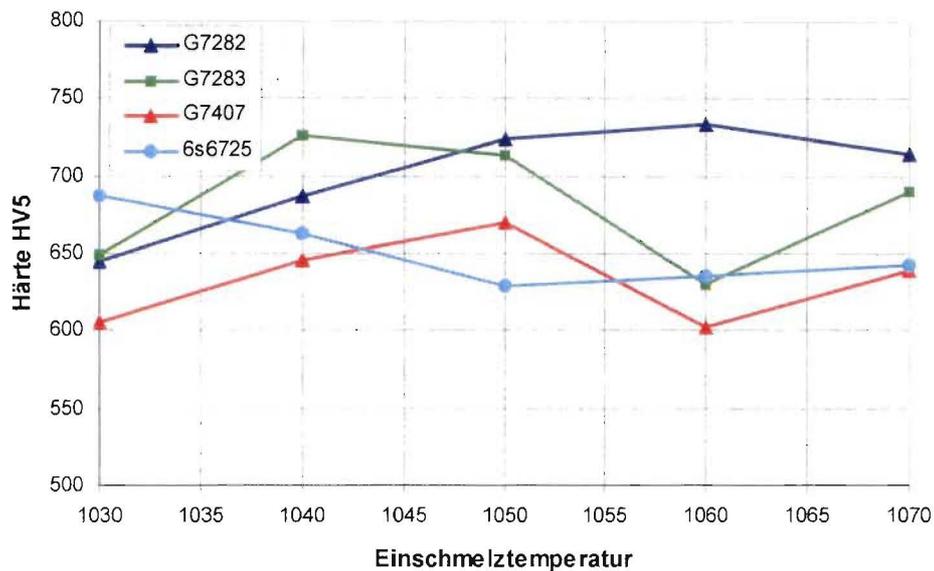


Abb. 10: Schichthärte bei Variation der Einschmelztemperatur bei 25 min. Einschmelzdauer

Hartphasen und damit die Härte des Gesamtsystems beeinflussen. Aufgrund der für die Emaille sehr hohen Temperatur ist auch die selektive Abgabe von Elementen durch Verdampfen denkbar. Diese

Aspekte führen insgesamt dazu, dass eine Optimierung in hohem Maße auf die empirischen Ergebnisse angewiesen ist.

Die beiden Diagramme zeigen sehr individuelle Verläufe für jede der vier Emailen, wobei nicht in jedem Fall ein eindeutiger bester Temperaturbereich zu identifizieren ist. Interessant ist jedoch, dass auch sehr kurze Haltezeiten von nur 5 Minuten offensichtlich eine ausreichende Ausbildung der Hartphasen ermöglichen. Die erreichten Härtewerte liegen dabei in dem Zielbereich von über 700HV. Aus diesen ersten Versuchen ergab sich, dass die beiden Emailen G7282 und G7283 potentiell geeignet waren. Aus produktionstechnischen Bedingungen kam für eine Weiterverfolgung jedoch nur die Emaille G7283 in Frage, die somit als Basis für weitere Optimierungen der Emaillezusammensetzung ausgewählt wurde.

Optimierung der Emaille G7283

Im Laufe der Versuche mit der Emaille G7283 kristallisierte es sich in den Gesprächen zwischen den Projektpartnern heraus, dass die Gehalte der Emaille an Chrom, Bor und Nickel einen großen Einfluss auf das Verhalten der Mischung beim Einschmelzen besitzen. Daher wurde die Grundemaille G7283 systematisch im Hinblick auf diese Elemente variiert. Außerdem wurde der Gehalt an weiteren Elementen, die möglicherweise für das geforderte Verhalten unwesentlich sind, reduziert, um eine für den Einschmelzvorgang optimale Emaillezusammensetzung einzustellen. Auf Basis dieser reduzierten Emaille erfolgte dann eine schrittweise Zugabe insbesondere von Chrom. Ziele waren dabei, die Schichthärte zu erhöhen, die Porosität zu verringern, die Oberflächengüte und das Auftragsverhalten weiter zu verbessern.

Durch den Versatz der Emaille mit Chrom erhöhte sich dabei besonders die Schichthärte nach dem Einschmelzen, was durch die verstärkte Bildung von Cr-haltigen harten Ausscheidungen verstanden werden kann.

Die so neu entstandenen Emailen, erhielten die Bezeichnung 0605-xxx. Neben dem Einfluss von Chrom, Nickel und Bor erwies sich auch der Antimongehalt als offensichtlich sehr wichtig. Bei fehlendem oder zu geringen Antimongehalt bildete sich regelmäßig ein Rissnetzwerk in der Schicht, wie es exemplarisch in der Abbildung 4, oben links, zu sehen ist. Diese Risse wurden dann durch die aufschwimmende Emaille gefüllt.

In der nachfolgenden Tabelle ist eine Übersicht der daraufhin neu erstellten ersten Emailen zu sehen.

| Emaille: | Zugaben | Reduzierungen |
|----------|---------|--|
| 0605-001 | keine | komplett vereinfachte Emaille; neue reduzierte Grundemaille |
| 0605-002 | Nickel | |
| 0605-003 | Chrom | |
| 0605-004 | Bor | |
| 0605-005 | Chrom | |
| 0605-006 | Chrom | |
| 0605-007 | Chrom | |
| 0605-008 | Chrom | Barium |
| 0605-009 | Chrom | |
| 0605-010 | Chrom | |
| 0605-011 | Chrom | |

Tabelle 4: Übersicht über die Entwicklung der Emailen 0605-xxx (1 –11)

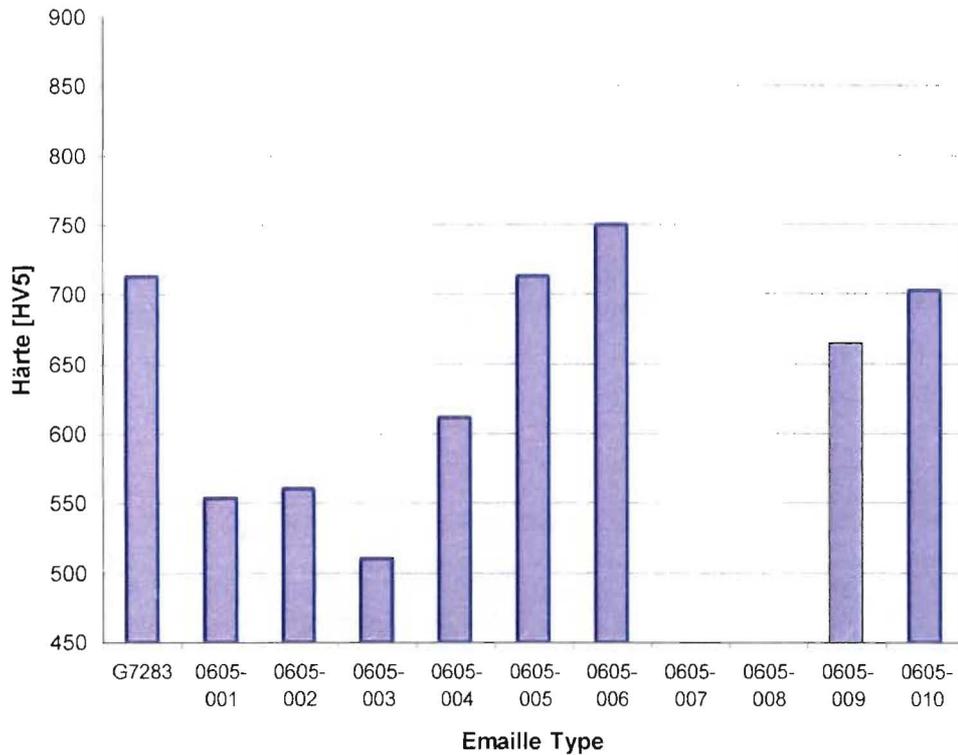


Abb. 11: Härte der Schicht bei Einsatz der neu entwickelten Emaillezusammensetzungen

Abbildung 11 gibt die gemessenen Härtewerte wieder. An einigen Proben konnten aufgrund der unzureichenden Schichtgüte keine Härtemessungen durchgeführt werden, jedoch ließen sich auch Mischungen identifizieren, an denen die Härte die vorgegebene Zielgröße von 700HV deutlich überstieg.

Alternative Mischungen:

Versuchswise wurden in diesem Rahmen auch Proben erstellt, bei denen das Metallpulver nur mit Ton/530N versetzt worden ist, ohne eine Beteiligung von Emaille. Hintergrund war die Vorstellung, dass die Tonzugabe evtl. schon zu einer ausreichenden Haftung im Anfangsbereich des Einschmelzvorganges führen könnte.

Es konnten auf diesem Wege auch Schichten erzeugt werden, jedoch muss nach Auswertung dieser Versuchsreihe gesagt werden, dass dieser Ansatz nicht zu einer ausreichend hohen Schichthärte und zu einer ausreichend guten Schichthomogenität führt.

Die Schichten aus einem reinen Ton-Metall-Gemisch sind nicht in sich geschlossen. Dies wird illustriert durch die Abbildungen 12 und 13, die eine Aufsicht und ein Schlibfbild wiedergeben.

Die Ergebnisse dieser ersten Versuchsserie führten zu einer Entwicklungslinie für die Emaille, welche auf den in Tabelle 4 und der Abb. 11 gezeigten Emailen beruhte und diese schrittweise in Bezug auf weiter gesteigerte Härte und Schichtgüte modifizierte.



Abb. 12: Oberfläche einer Schicht aus Ton

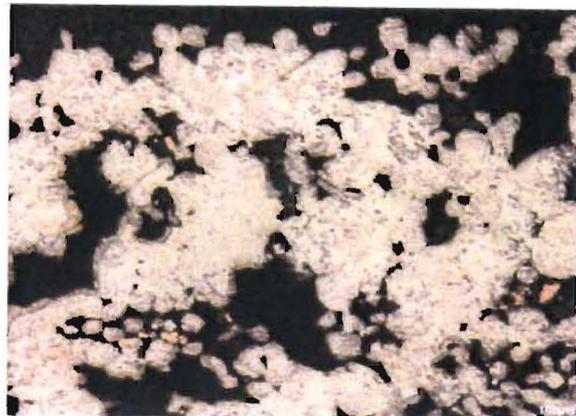


Abb. 13: Schliff durch eine Schicht aus Metallpulver Ton und Metallpulver

6.1.2 Weiterentwicklung der Emaille

Aufbauend auf den im vorigen Abschnitt dargestellten Ergebnissen wurden weitere Emailen bis zur Type 0605-34 zum Abschluss des Projektes entwickelt. In Abbildung 14 ist die Entwicklung der Schichthärte bei ansonsten gleichbleibenden Parametern dargestellt (1050°C Einschmelztemperatur, 25 Minuten Haltezeit, Metallpulver Metco 15E, Mischungsverhältnis 10 Anteile Metall, 1 Anteil Emaille).

Deutlich wird die Zunahme der Härte im Laufe der Entwicklung, bis Emailen vorlagen, mit denen eine Schichthärte über dem Zielgrenzwert von 700HV sicher erreicht werden konnte

Die Schichthärte allein ist jedoch kein ausreichendes Kriterium, um eine Einsatzfähigkeit dieser Beschichtungstechnologie nachzuweisen. Daneben ist auch eine ausreichende Oberflächengüte, Porenarmut der Schicht und Haftung der Schicht auf dem Grundwerkstoff wichtig. Die Abbildungen 15 und 16 geben die Entwicklung dieser beiden Größen exemplarisch wieder, jeweils für eine Einschmelztemperatur von 1050°C bei 25 min Haltedauer. Im Laufe der Entwicklung konnte die Menge und Anzahl der Emailleinschlüsse deutlich verringert werden, so dass ein zunehmend homogenes Gefüge eingestellt werden konnte.

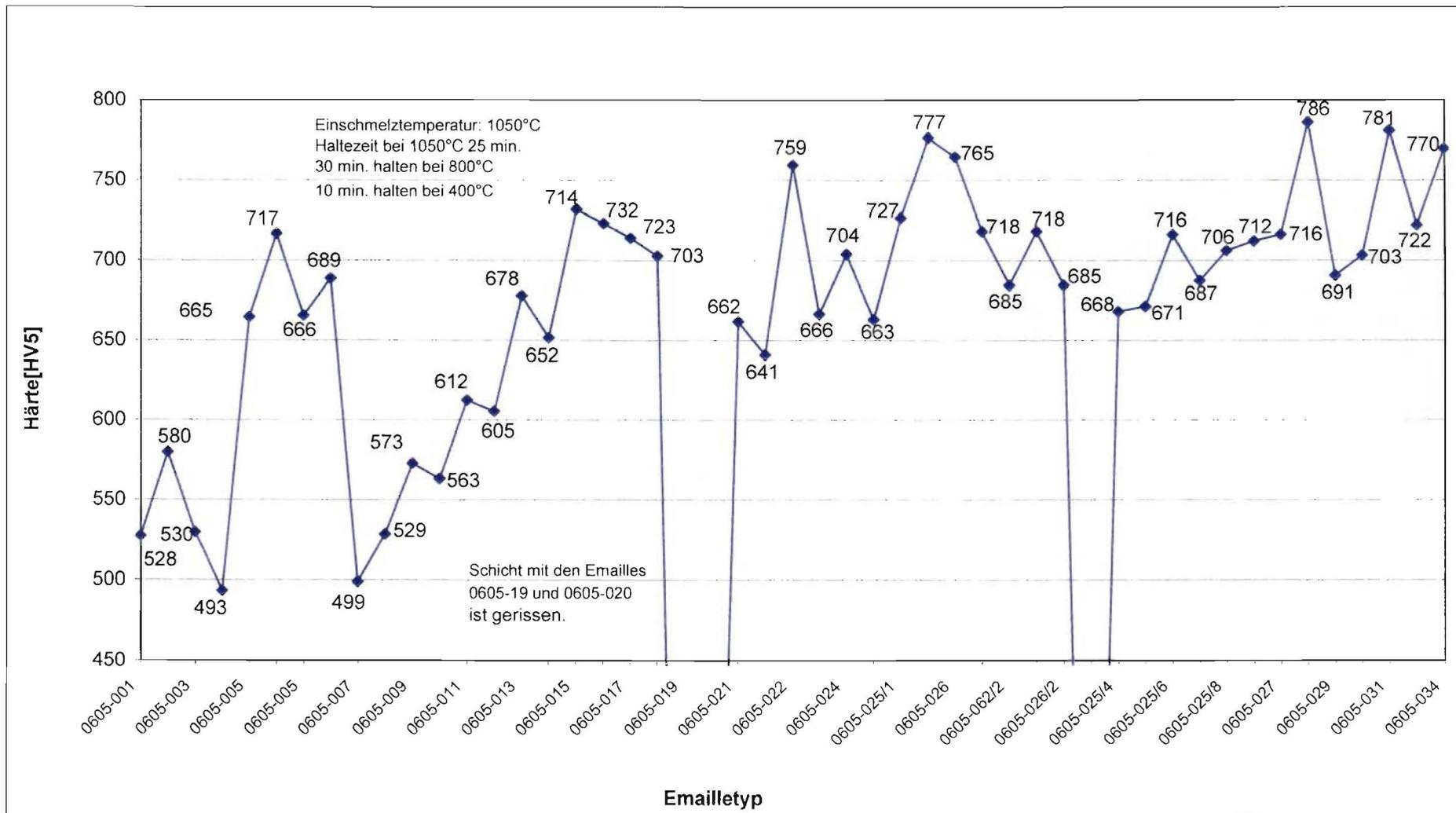


Abb. 14: Entwicklung der Schichthärte



0605-011; V105



0605-018; V167

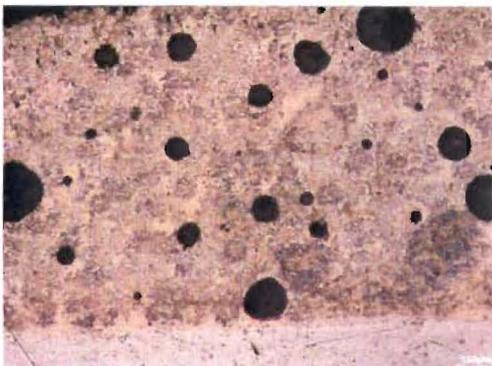


0605-026; V225

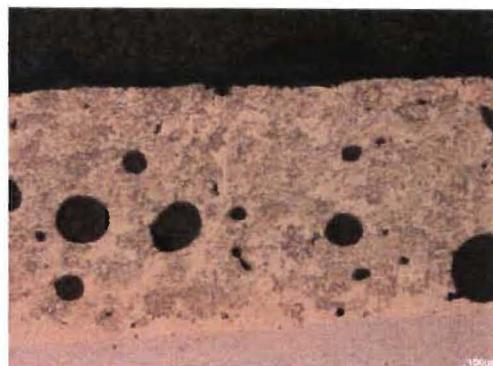


0605-034; V318

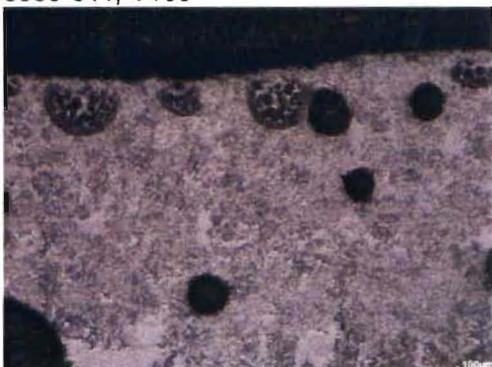
Abb. 15: Exemplarische Darstellung der Entwicklung der Schichtoberfläche



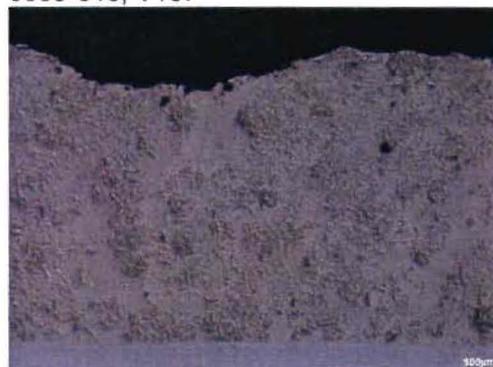
0605-011; V105



0605-018; V167



0605-026; V225



0605-034; V318

Abb. 16: Exemplarische Darstellung der Entwicklung des Schichtgefüges

6.2 Einfluss der Parameter Einschmelztemperatur und Emailleanteil

Die Entwicklung der Emaille führte zu Typen, die eine gute Schichthärte, Oberflächengüte und ein dichtes Gefüge ergaben. Die weiteren Parameter wie Temperatur der Einschmelzbehandlung, Dauer der Glühung und Anteil der Emaille waren dabei konstant gehalten worden. Um auch den Einfluss dieser Größen beurteilen zu können und damit eine Optimierung durchführen zu können, wurde unter Verwendung der Emaille 0605-034 eine Versuchsserie durchgeführt, bei der die Einschmelztemperatur zwischen 1050°C und 1100°C variiert wurde und der Anteil der Emaille von 10% (bezogen auf die Metallmasse) bis 30% verändert wurde. Gleichgehalten wurde die Einschmelzdauer von 25 Minuten, als Metallpulver wurde Metco 15E verwendet. Die Abbildungen 17 bis 19 geben die Entwicklung der Oberfläche für die verschiedenen Kombinationen wieder.

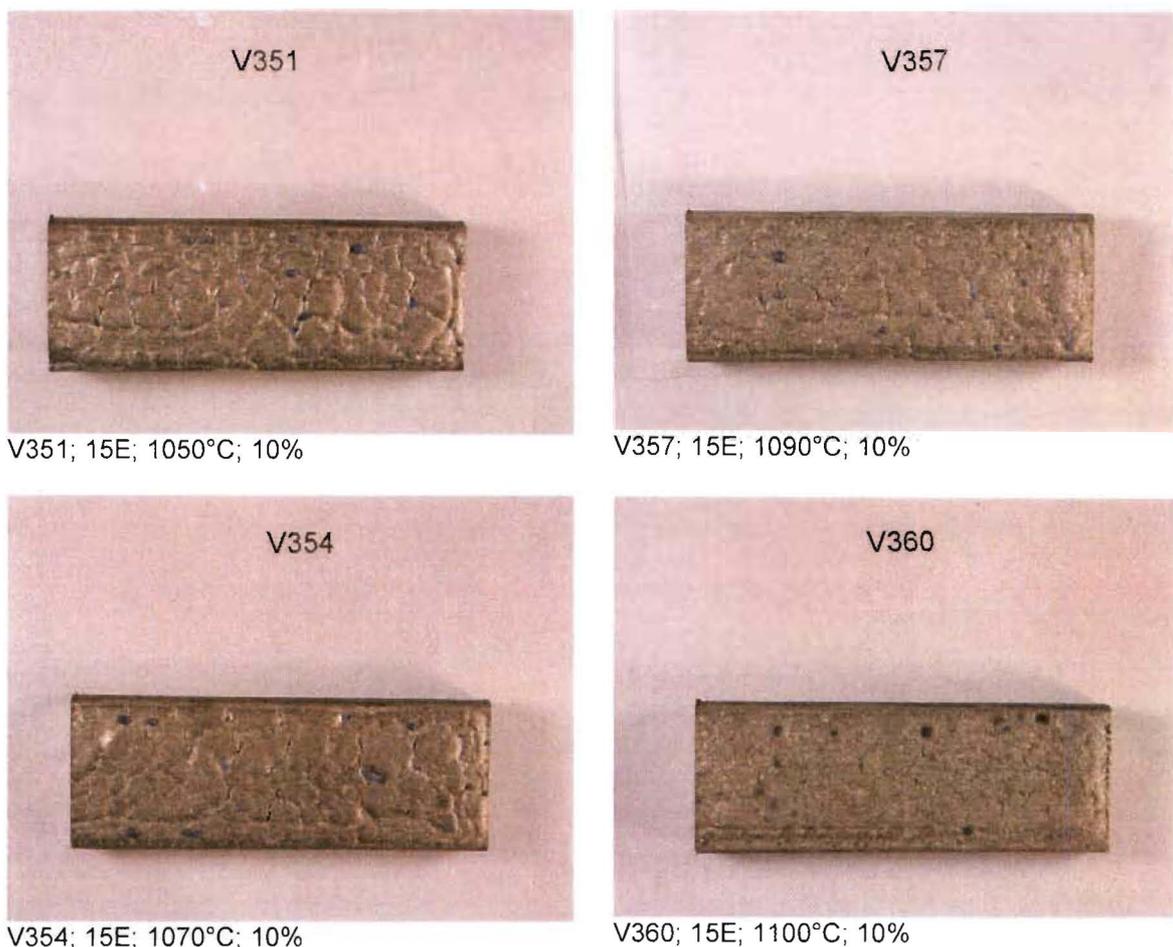


Abb. 17: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 10% Emaille-Anteil

Bei niedriger Einschmelztemperatur wirkt die Oberefläche rissig, offensichtlich ist das Fließverhalten nicht ausreichend. In den Rissen ist teilweise aufgeschwemmte Emaille zu sehen. Mit steigender Temperatur wird die Oberfläche zunehmend glatter.

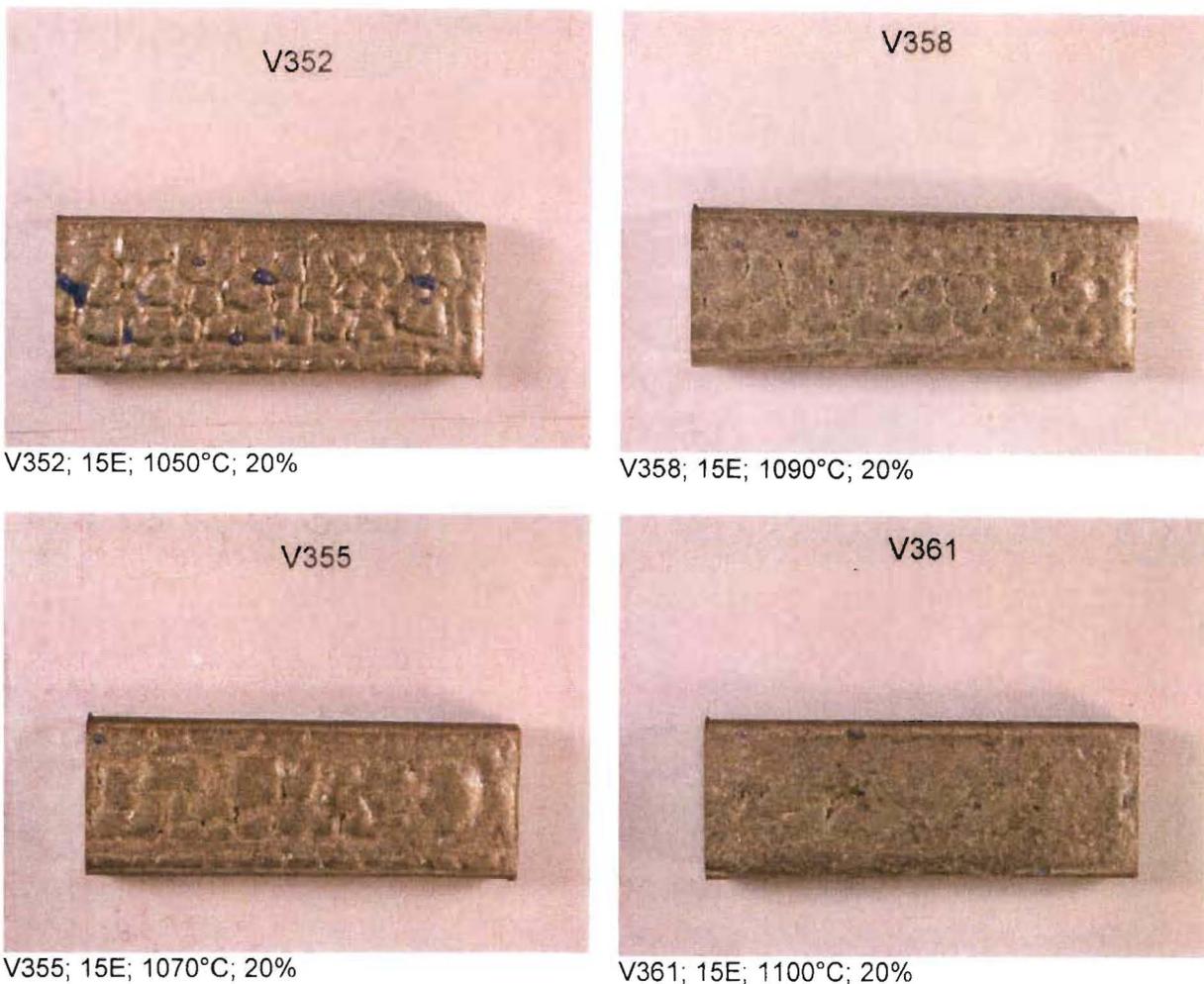


Abb. 18: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 20% Emaille –Anteil

Das Verhalten bei 20% Emaille-Anteil ist ähnlich wie bei 10%. Eine Erhöhung auf 30% führt jedoch zu einer deutlichen weiteren Verbesserung. Während bei 10% und 20% auch bei 1070°C und 1090°C das Rissnetzwerk noch deutlich ausgeprägt erkennbar ist, wenn auch in schwächerer Form als bei 1050°C, ergibt der hohe Emaille-Anteil schon bei 1070°C einer signifikant glattere Oberfläche, in der praktisch keine Spuren des Rissnetzwerkes mehr nachzuweisen sind. Aufgeschwemmte Emaille macht sich nur in Form flacher Tropfen bemerkbar, welche jedoch keine feste Haftung zum Untergrund besitzen und i.a. ohne Bearbeitung abplatzen. Spuren der Tropfen sind kreisförmige, jedoch recht flache Markierungen in der Oberfläche.

Somit ergibt sich aufgrund der Oberflächenausprägung ein Bereich der Einschmelztemperatur oberhalb oder gleich 1070°C, eine höhere Temperatur ist somit vorteilhaft.

Da bei einer höheren Einschmelztemperatur auch die Möglichkeit von Reaktionen zwischen Emaille und Metall zunimmt, war auch ein Einfluss auf die Schichthärte zu erwarten. Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse der Härtemessungen für die gezeigten Proben. Es zeigt sich, dass das Härtemaximum

jeweils bei einer Einschmelztemperatur von 1070°C angenommen wird und somit diese Temperatur sowohl für die Härte als auch die Oberfläche ein Optimum darstellt.



V353; 15E; 1050°C; 30%



V359; 15E; 1090°C; 30%



V356; 15E; 1070°C; 30%



V362; 15E; 1100°C; 30%

Abb. 19: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 30% Emaille-Anteil

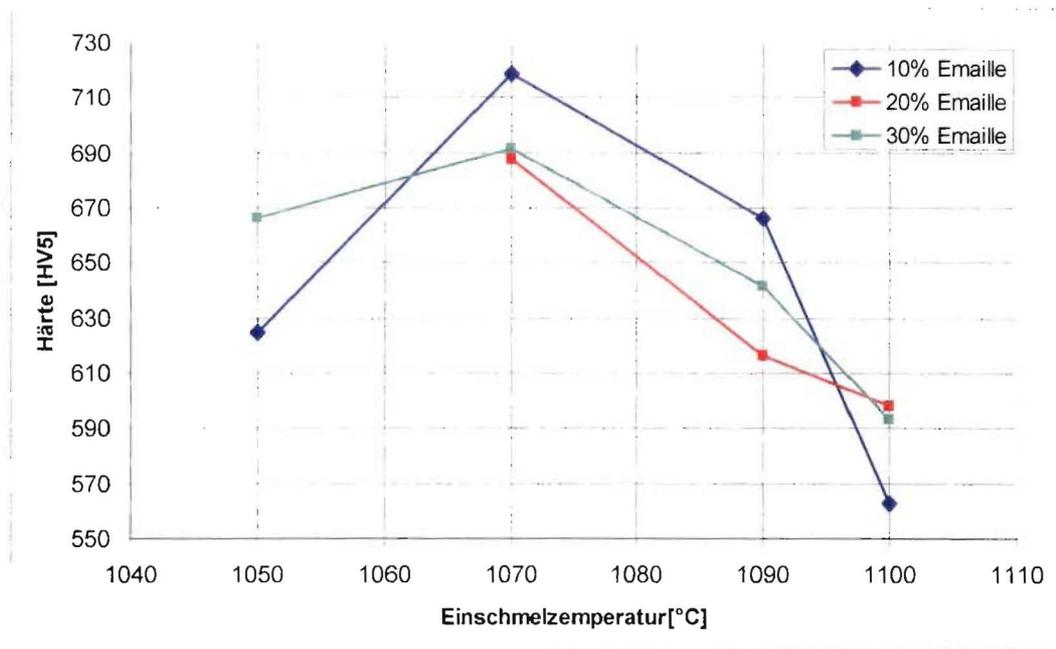


Abb. 20: Härteverlauf für unterschiedliche Einschmelztemperaturen und Emaille-Anteile

In Abbildung 21 sind ergänzend Gefüge im Querschliff dargestellt. Für alle drei Temperaturen ergeben sich dichte Gefüge.



Abb. 21: Ausbildung der Gefüge für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 30% Emaille-Anteil

6.3 Einfluss der Einschmelzlegierung

Die in den oben beschriebenen Versuchen verwendete Metalllegierung Metco 15E ist eine Standardeinschmelzlegierung. Daneben existieren am Markt verschiedene ähnliche Legierungen, die sich z.T. in der Partikelgröße oder auch im Fließverhalten, das durch unterschiedliche Legierungsgehalte eingestellt wird, unterscheiden. So sind mit den Metco-Legierungen Amdry 770 und Amdry 780 zwei Legierungen verfügbar, die niedrigere Einschmelztemperaturen besitzen, was Vorteile in Bezug auf die thermische Belastung des Grundwerkstoffes, dem Energieaufwand zur Schichtherstellung, der Verzugsgefahr sowie der Dauer des Einschmelzens besitzen kann. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Oberflächen sowie einige Gefüge für diese beiden metallischen Partner im Vergleich. Da die Solidus- und Liquidustemperaturen niedriger sind als bei Metco 15E sind entsprechend auch die gewählten Einschmelztemperaturen niedriger, sie liegen im Bereich 980°C bis 1020°C.



V333; Amdry 770; Temperatur 980°C



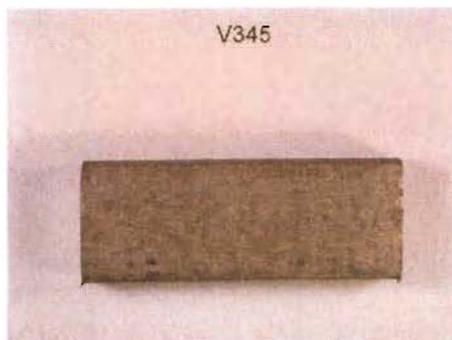
V334; Amdry 780; Temperatur 980°C



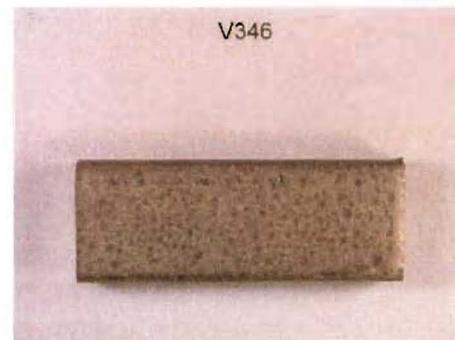
V339; Amdry 770; Temperatur 1000°C



V340; Amdry 780; Temperatur 1000°C



V345; Amdry 770; Temperatur 1020°C



V346; Amdry 780; Temperatur 1020°C

Abb. 22: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 10% Emaille-Anteil für Amdry 770 und Amdry 780 (Emaille 0605-034; 25 min)

Es zeigt sich ein vergleichbarer Gang wie im Fall des Metco 15E, in diesem Fall ergibt eine Temperatur von 1020°C eine glatte Oberfläche. Im Gegensatz zu Metco 15E ist bei diesen beiden Legierungen jedoch ein höherer Emaille-Anteil nicht positiv in Bezug auf die Oberflächenausbildung, wie Abbildung 23 zeigt.

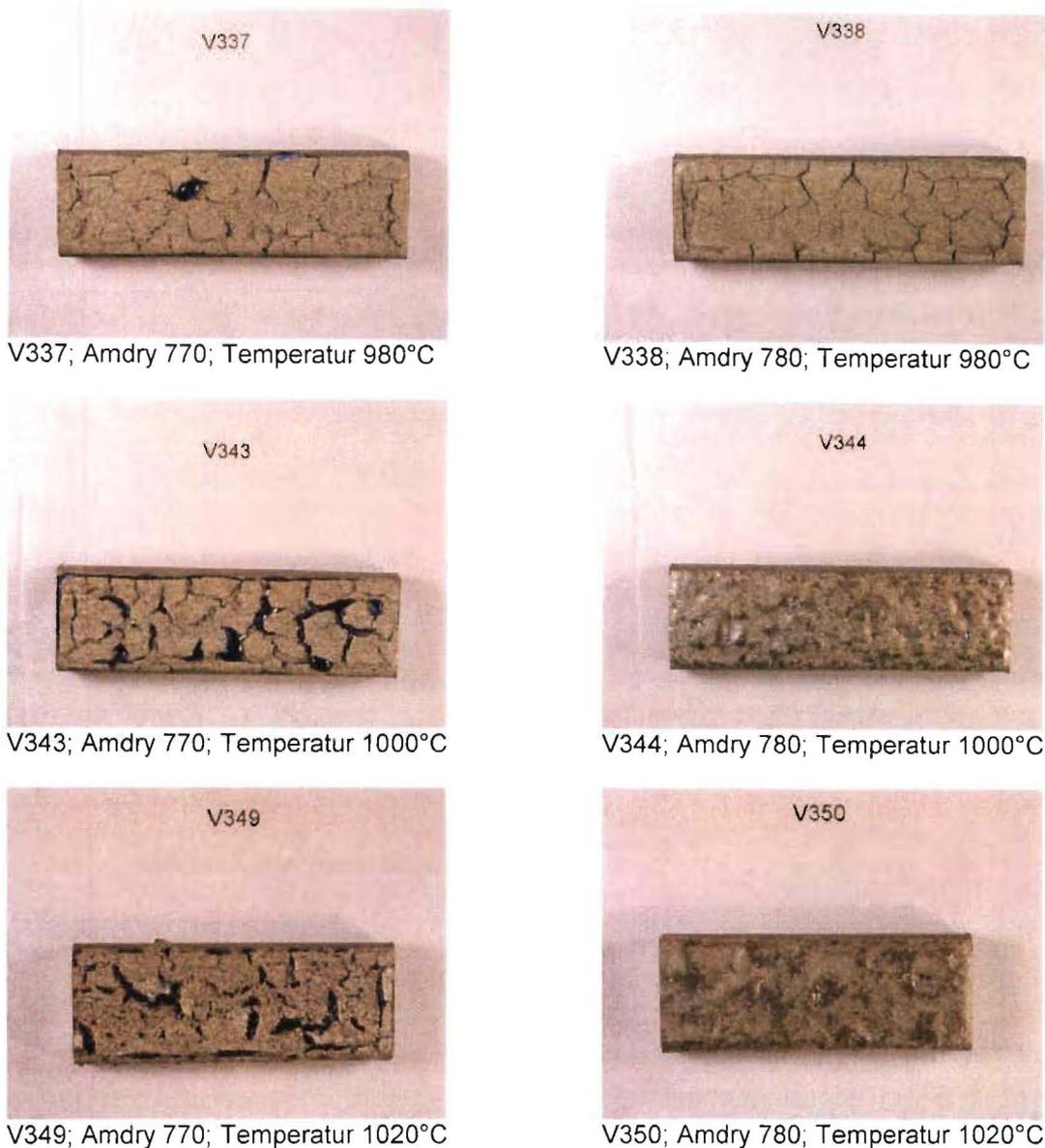


Abb. 23: Ausbildung der Oberflächen für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 30% Emaille-Anteil für Amdry 770 und Amdry 780 (Emaille 0605-034; 25 min)

Dass eine niedrige Einschmelztemperatur nicht ausreichend ist, wird auch durch die Analyse der Gefüge deutlich. Exemplarisch ist das für den Fall 10% Emaille-Anteil in Abbildung 24 dargestellt. Bei 980°C ergibt sich kein eingeschmolzenes Gefüge, die einzelnen Partikel sind nahezu unverändert erhalten. Ab 1000°C ergibt sich ein dichtes Gefüge, wobei kugelförmige Emaille-Einschlüsse vorliegen, die bei höherer Temperatur offensichtlich abgebaut werden und daher in deutlich geringerer Zahl und Größe vorliegen.

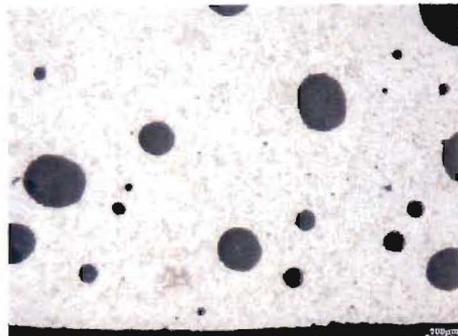
Durch die verschiedenen Temperaturen, Emaille-Anteile, Gefügebildungen und Metalllegierungen ergeben sich Härteverläufe, wie sie in Abb. 25 dargestellt sind.



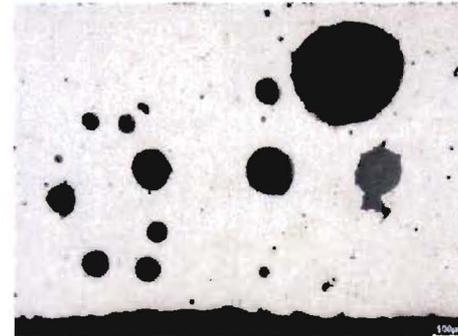
V333; Amdry 770; Temperatur 980°C



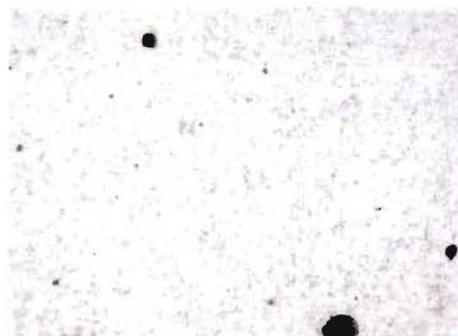
V334; Amdry 780; Temperatur 980°C



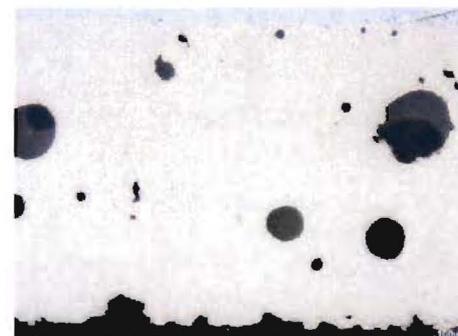
V339; Amdry 770; Temperatur 1000°C



V340; Amdry 780; Temperatur 1000°C



V345; Amdry 770; Temperatur 1020°C



V346; Amdry 780; Temperatur 1020°C

Abb. 24: Ausbildung der Gefüge für unterschiedliche Einschmelztemperaturen bei 10% Emaile-Anteil für Amdry 770 und Amdry 780 (Emaile 0605-034; 25 min)

Im Vergleich zu Metco 15E wird deutlich, dass die Schichthärte unter Verwendung dieser Legierungen deutlich niedriger liegt. Ähnlich wie bei Metco 15E nimmt die Härte mit steigendem Emaile-Anteil tendenziös ab.

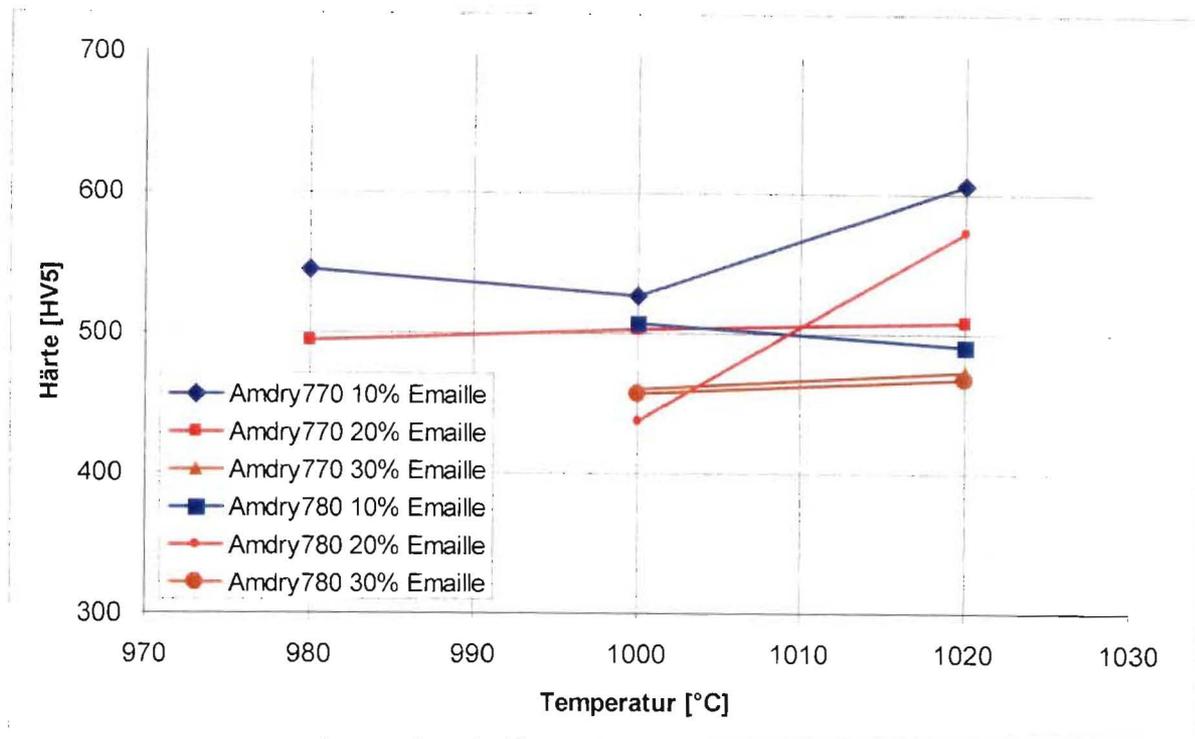


Abb. 25: Härteverlauf für unterschiedliche Einschmelztemperaturen und Emaille-Anteile für Amdry 770 und Amdry 780

6.4 Untersuchung verschiedener Grundwerkstoffe

Standardmäßig wurden die Probeteile aus dem Stahl S235 (St 37) beschichtet. Die Beschichtung dieses Grundwerkstoffes hat sich während der gesamten Schicht- und Technologieentwicklung als problemlos erwiesen. Aus Gesprächen mit interessierten Anwendern ergab sich jedoch auch, dass andere Grundwerkstoffe von Interesse sein könnten, dies umfasste z.B. Eisengusswerkstoffe und Werkzeugstähle. Aufgrund dieser Information wurden orientierend Beschichtungsversuche auf diesen Grundwerkstoffen durchgeführt. Der Focus lag dabei jedoch nur auf der Frage der grundsätzlichen Machbarkeit, eine ausführlich spezielle Untersuchung war im Rahmen des Vorhabens nicht möglich. Es ergaben sich dadurch jedoch interessante weitere Entwicklungs- und Anwendungsperspektiven.

Werkzeugstahl

Für ein interessiertes Unternehmen wurde eine Scheibe des hochlegierten ledeburitischen Kaltarbeitsstahles mit der Werkstoffnummer 1.2379 beschichtet. Es ergibt sich eine ähnlich gute Oberfläche wie im Fall des einfachen Baustahles. Offensichtlich wirken sich die unterschiedlichen Festigkeitswerte und thermischen Ausdehnungskoeffizienten nicht negativ aus (Abb. 26).



Abb. 26: Beschichtete Scheibe aus dem Grundwerkstoff 1.2379

Eisengusswerkstoff GGG40

Bild 27 zeigt den Querschliff aus einem beschichteten Blech des Gusswerkstoffes GGG40 im Übergangsbereich zwischen Grundwerkstoff (unten) und Schicht (oben). Der Übergang ist recht sauber, Risse treten nicht auf.

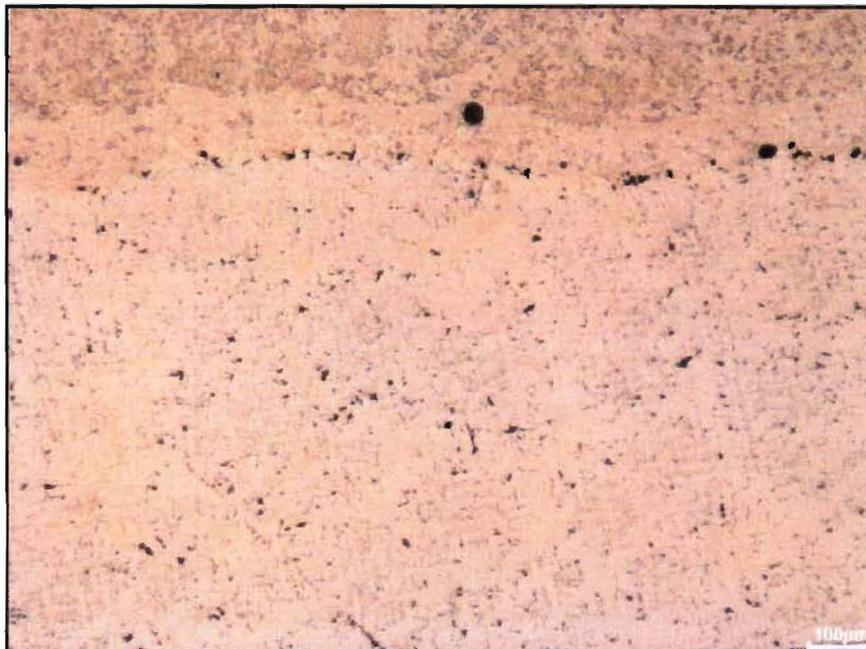


Abb. 27: Querschliff im Übergang einer beschichteten Gussplatte aus GGG40

Die Beschichtung wärmebehandelbarer Werkstoffe wie Werkzeugstählen hat zum Hintergrund, eine verschleißbeständige Oberfläche mit einer einstellbaren Festigkeit und Duktilität des Grundwerkstoffes zu verbinden. Dies kann nur so erfolgen, dass die Wärmebehandlung des Grundwerkstoffes nach der Beschichtung erfolgt, da sie i.a. bei niedrigerer Temperatur erfolgt. Das setzt für eine erfolgreiche Durchführung jedoch voraus, dass die Schicht durch die Wärmebehandlung und die damit verbundenen thermischen Spannungen nicht beschädigt wird.

Um dies an einem Beispiel zu überprüfen, wurde ein Stab aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4 beschichtet und dann einer üblichen Härtebehandlung (Härtetemperatur 840°C mit anschließendem Abschrecken in Wasser) unterzogen. Die Schicht zeigte daraufhin makroskopisch keine Schädigung, so dass dieses Vorgehen eine weitere interessante Anwendungslinie aufzeigte.

6.5 Ergänzende Prüfungen

Die grundsätzlichen Kenngrößen, welche im Rahmen der Technologieentwicklung überprüft wurden, waren die Schichthärte, die Oberflächenausprägung sowie die Gefügestruktur. Daneben sind für eine erfolgreiche Anwendung natürlicherweise weitere Größen von Interesse, dies umfassen z.B. die Haftung der Schicht am Substrat sowie das Verschleißverhalten der Schicht.

Haftung

Als einfacher Test auf das Haftungsverhalten waren Biegebleche beschichtet worden, die in der oben beschriebenen 3-Punkt-Biegeapparatur geprüft wurden.



Abb. 28: Auf Zug beanspruchte Schicht im Biegeversuch; 30° Biegewinkel

Wie deutlich zu erkennen ist, bilden sich bei einem Biegewinkel von 30° Querrisse in der Schicht, so dass eine Zugbelastung bei Raumtemperatur als kritisch anzusehen ist, die jedoch bei üblichen Anwendungen kaum auftreten dürfte.

Ein Abplatzen der Schicht wurde jedoch nicht beobachtet, was auf eine ausreichend hohe Haftfestigkeit hinweist.

Verschleißverhalten

Ursprünglich war geplant, das Verschleißverhalten in der beschriebenen Apparatur unter Strahlverschleißbedingungen zu prüfen. Es stellte sich jedoch bald heraus, dass zur Gewinnung aussagekräftiger Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die Fragestellung nach Unterschieden zwischen den einzelnen Schichttypen, ein beträchtlicher experimenteller Aufwand notwendig gewesen wäre, der in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht mehr erbracht werden konnte.

Es war jedoch möglich, die grundsätzliche Frage nach der Verschleißbeständigkeit im Vergleich zu anderen, üblicherweise als Verschleißwerkstoff eingesetzten Materialien, zu beantworten.

Hierzu wurden bei einem Industrieunternehmen, das auf dem Gebiet der Auskleidung von Industrieanlagen mit verschleißbeständigen Schichten tätig ist, Vergleichsversuch zu keramischen Auskleidungswerkstoffen durchgeführt.

Im Strahlverschleißtest nach ASTM C 704 ergab sich folgendes Ergebnis:

| Werkstoff | Verschleißabtrag |
|------------------------------|-------------------------|
| Aluminiumoxid | 0,29 cm ³ |
| Neu entwickelte Beschichtung | 0,11 cm ³ |

Tabelle 5: Ergebnisse von Strahlverschleißtests

Somit ergab sich das hervorragende Ergebnis, dass die Verschleißbeständigkeit deutlich besser ist als die der getesteten Keramik, bei deutlich verringertem Herstelleraufwand und großer Variationsbreite in den Schichteigenschaften und der Möglichkeit des Schichtauftrags.

Beschichtung durch Tauchen

Ein wesentliches Ziel des Vorhabens war es, die Herstellung beschichteter Bauteile deutlich zu vereinfachen und dadurch Ressourcen einzusparen. Hierzu zählt auch die Möglichkeit, die Beschichtung nicht nur durch Bestreichen, sondern auch durch Tauchen in den Schlicker durchzuführen. Da die geschilderten Beschichtungsversuche grundsätzlich durch Bestreichen erfolgten, sollte an einem etwas komplexer geformten Bauteil auch die Tauchbeschichtung überprüft werden. Dazu wurde ein Modellzahnrad aus dem Stahl S235 hergestellt und ähnlich wie in Abbildung 2 dargestellt getaucht sowie anschließend im Vakuumofen eingeschmolzen. In Abbildung 29 ist das fertige Bauteil zu sehen. Der Schlicker hat sich gleichmäßig um die Oberfläche verteilt und eine im Mittel 0,1 mm dicke Schicht erzeugt.

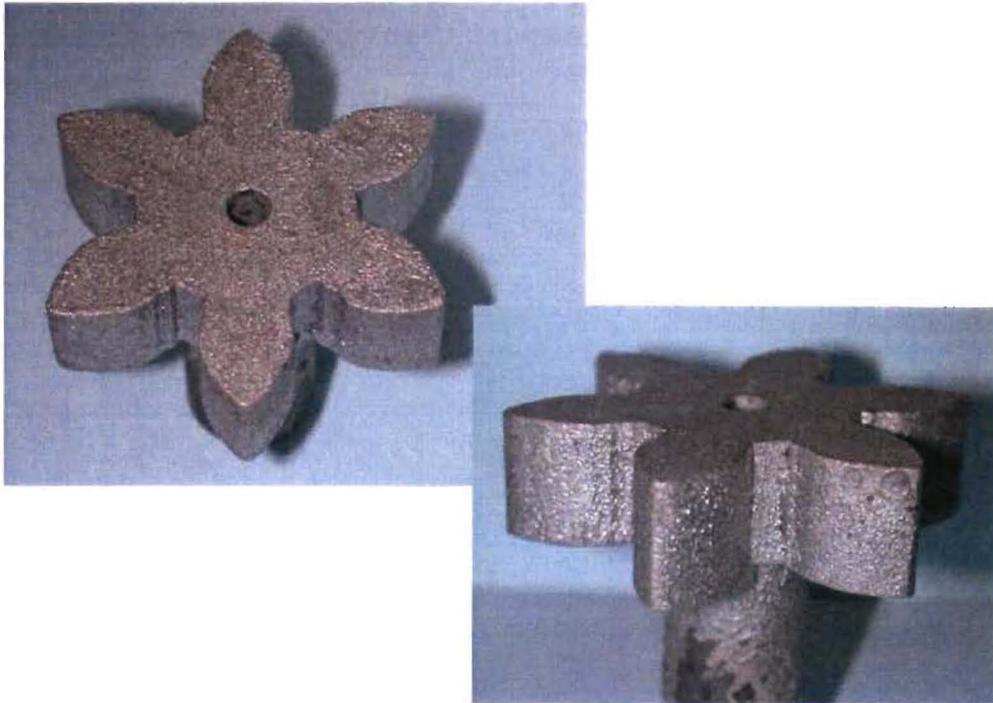


Abb. 29: Durch Tauchen beschichtetes Zahnrad

Bearbeitbarkeit

Die Bearbeitbarkeit der Schicht oder beschichteter Bauteile wurde zwanglos bei der Herstellung von Proben, bei der Präparation und in Einzelfällen gezielt überprüft. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass eine spanende Bearbeitung in gleichem Maße möglich ist wie bei konventionellen Werkstoffen, was insbesondere bedeutet, dass aufgrund der hohen Härte entsprechende qualitativ hochwertige Werkzeuge zu verwenden sind. Einfache unlegierte Werkzeugstähle sind aufgrund der eingeschränkten Härte bzw. der zu geringen thermischen Beständigkeit der Schneide kaum geeignet. Ein besonderer Vorteil der Schicht ist die Möglichkeit, sie bei entsprechendem Vorgehen auch durch Schweißen oder Löten zu fügen

7 Beschichtung erster Bauteile für Anwendungstests

In der zweiten Phase des Projektes wurden Kontakte zu möglichen Interessenten aus der Industrie geknüpft, um erste Musterbauteile zu beschichten und praxisnahen Einsatztests zu unterziehen.

Rohrförmige Mischerelemente

Ein Kontakt ergab sich zu einem Unternehmen, welches Mischeinrichtungen relativ kleiner Baugröße für den mobilen Einsatz auf Baustellen liefert. In diesen Anlagen, die aus Rohrabschnitten aufgebaut sind, werden mineralische Baustoffe verwendungsfertig vermischt. Durch die Strömung der Mineralstoffpartikel werden die inneren Oberflächen dieser Elemente starkem abrasivem Verschleiß ausgesetzt, was die Standmenge der Mischer stark begrenzt. Unter diesem Aspekt kann eine Beschichtung, welcher zu einer größeren Standzeit führt, sowohl die Kosten als auch den Instandhaltungs- und Erneuerungsaufwand deutlich senken. In diesem Rahmen wurde eine erste Testbeschichtung durchgeführt und das Element im normalen Baustellenbetrieb eingesetzt.

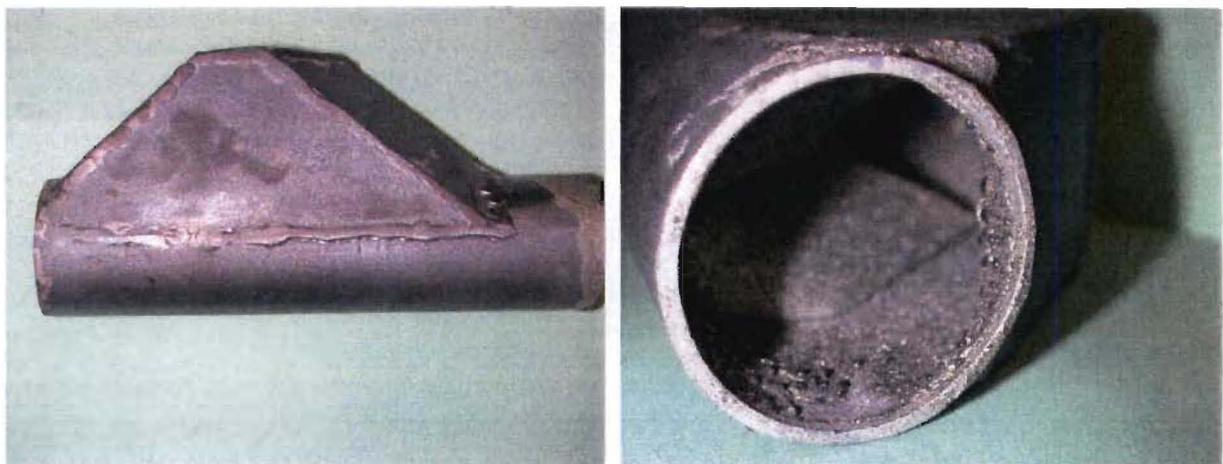


Abb. 30: Mischerelement mit Innenbeschichtung

Die Ergebnisse im Praxiseinsatz waren sehr vielversprechend, so dass sich daraus eine Anfrage des Betreibers bezüglich einer serienmäßigen Herstellung ergab, was zu einer ersten kommerziellen Anwendung führen könnte.

Da die Beschichtung dieses Bauteiles aufgrund der ungleichmäßigen Innenkontur und schwierigen Zugänglichkeit etwas problematisch war, da die Schichtdicke sich nicht umfassend ohne eine Zerstörung kontrollieren ließ, wurden in einer Modifikation die Einzelteile der Konstruktion getrennt beschichtet und später zusammengefügt. Dies erlaubt eine deutlich bessere Schichtkontrolle. Bild 31 zeigt drei der vier beschichteten Teile, aus denen das Gesamtsystem aufgebaut ist.

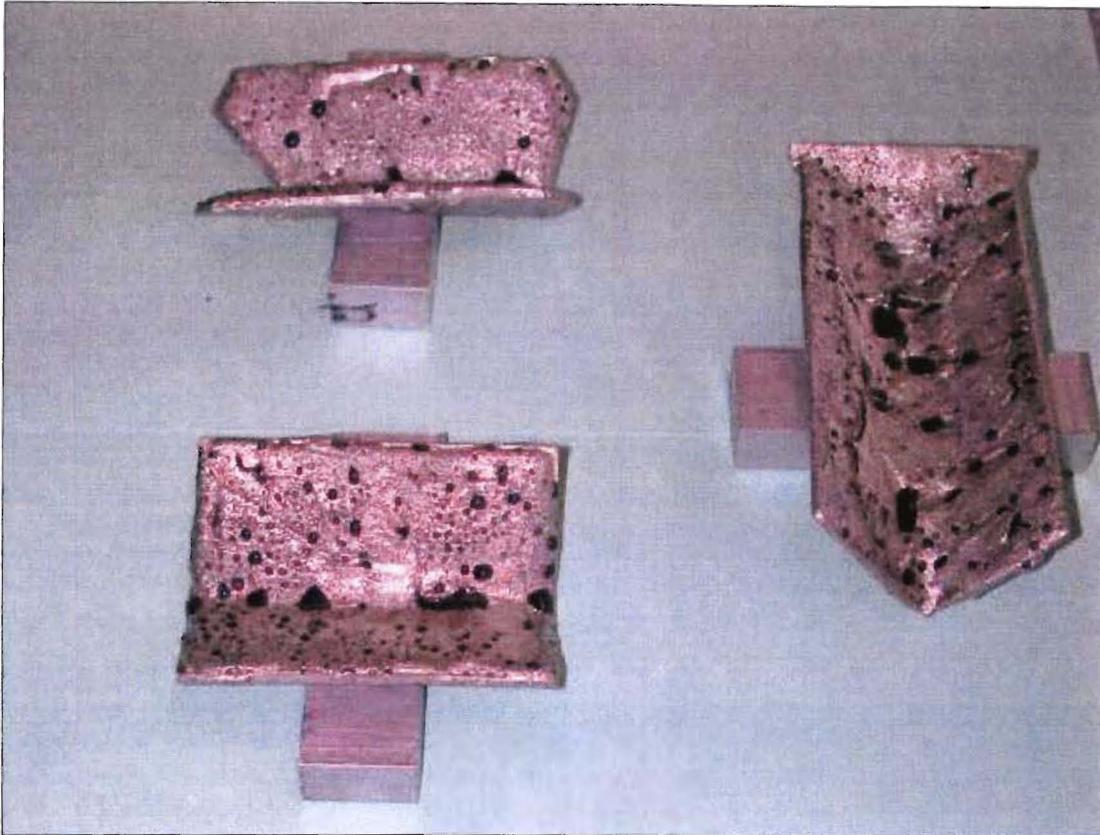


Abb. 31: Beschichtete Einzelemente des Mischers

90°-Rohrbogen

Eine zweite Testbeschichtung eines Bauteiles konnte im Bereich der Stahlindustrie realisiert werden. Partner bei dieser Anwendung ist das Warmwalzwerk 1 der ThyssenKrupp Steel AG in Duisburg-Bruckhausen.

Im Bereich der Warmwalzwerke stellen die Ableitungen des Sinterwassers stark verschleißbefallene Komponenten dar. Sinterwasserrohre und die zugehörigen Komponenten wie Pumpen, Klappen und Krümmer leiten das in der Zunderwäsche des Vor- und Fertigerüstes anfallende Wasser zur Weiternutzung in Sammelbehälter ab. Dieses Wasser trägt den abgewaschenen Zunder, der aus sehr harten plättchenförmigen Partikeln unterschiedlicher Größe besteht, sowie möglicherweise weitere Feststoffanteile mit sich. Da der Zunder von seiner Natur her ein Oxid ist, also ein keramischer Stoff, wirkt er äußerst abrasiv. Die durchströmte Rohrleitung, die i.a. aus unlegiertem Baustahl besteht, wird dadurch stark durch Verschleiß geschädigt. Um den Verschleißabtrag zu verringern, sind die Rohre üblicherweise durch eine Auftragsschweißschicht geschützt. Trotzdem fällt in Anbetracht der großen Rohrlänge ein äußerst großer Instandhaltungsaufwand an. Der Verschleißabtrag wird dabei zusätzlich

durch die sehr hohe Welligkeit/Rauhigkeit der Auftragsschweißung verstärkt, die sich unter den Bedingungen des Hydroabrasivverschleißes sehr nachteilig auswirkt.

Für diese Anwendung konnte ein 90°-Rohrbogen (Durchmesser 200mm) beschichtet werden. Der Rohrbogen wird bei der nächstfolgenden Instandhaltungspause eingesetzt, so dass realitätsnahe Ergebnisse über die Standzeit im Vergleich mit herkömmlichen Lösungen gewonnen werden können (Abbildung 32). In der rechten Hälfte der Abbildung ist ein größerer Emailletropfen zu sehen, der sich während des Einschmelzvorganges am Tiefpunkt des Teiles angesammelt hat.



Abb. 32: Rohrbogen mit Innenbeschichtung

8 Fazit

Generelles Ziel des durchgeführten Vorhabens war, ein Verfahren zu entwickeln, das es erlaubt, auf Verschleiß beanspruchte Maschinenbauteile auf eine wenig umweltbelastende, einfache und kostengünstige Art mit einer verschleißhemmenden, gut haftenden überwiegend metallischen Beschichtung zu versehen, ohne dass dafür eine aufwändige Beschichtungsanlage mit den damit verbundenen Umweltbelastungen benötigt wird, welche auch die Beschichtung von geometrisch komplexen Bauteilen, z.B. mit Hinterschneidungen, erlaubt.

Dieses Ziel wurde erreicht.

Es wurde ein Schichtsystem auf der Basis speziell hierfür ausgelegter Emailen zusammen mit Einschmelzhartlegierungen entwickelt. Dieser Werkstoff kann in Form eines wässrigen Schlickers durch einfaches Aufstreichen oder durch Tauchen auf das Bauteil aufgetragen werden. Durch Glühen in einem herkömmlichen Vakuumofen bildet der Schlicker eine feste beständige, gut haftende Schicht hoher Härte. Die Härte kann dabei diejenige klassischer Thermischer Spritzschichten erreichen und auch übersteigen.

Bereits während der Projektlaufzeit ergab sich die Möglichkeit eines Transfers der Entwicklungsergebnisse in die industrielle Praxis. Es konnte in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen in zwei Anwendungsfällen eine Beschichtung von Bauteilen durchgeführt werden, welche in einem Fall bereits mit sehr gutem Erfolg im betrieblichen Einsatz getestet wurden, in zweiten Fall beginnt zum Projektende die betriebliche Testphase.

Während der Projektlaufzeit wurden zwei Patentanmeldungen zu der entwickelten Technologie beim Deutschen Patentamt eingereicht.

9 Literaturverzeichnis

(Allgemein verwendete Literatur)

- [1] Sandt, A., Krey, J.: "NiCrBSi-Schichten mit Hartstoff-Beimischungen, Teil 1", Metall 38, 1984, Heft 12, Seite 1171-1176
- [2] Sandt, A., Krey, J.: "NiCrBSi-Schichten mit Hartstoff-Beimischungen, Teil 2", Metall 39, 1985, Heft 13, Seite 233-237
- [3] Gebert, A., Wesling, V., Heinze, H., Reiter, R.: "Entwicklung vanadinkarbidhaltiger Schweißzusatzwerkstoffe auf Nickelbasis zum Schutz gegen Verschleiß und Korrosion", AiF-Bericht Nr. 12.754B / DVS-Nr.: 01.033
- [4] Theiler, C., Seefeld, T., Sepold, G.: „Prozessgrundlagen für die Herstellung von Metall-Hartstoff-Verbundwerkstoffen mittels Laserstrahl-Pulverbeschichten“, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 2001, Wiley-VCH, Weinheim, New York, S. 548-557
- [5] Azarava, T.: „Entwicklung von Verbundpulvern auf Basis von Titankarbid für das thermische Spritzen hochverschleißfester Schichten“, Dissertation, TU Chemnitz, 2001
- [6] Sandt, A., Krey, J.: „NiCrBSi-Schichten-Verhalten bei Reibung und Verschleiß“, Maschinenmarkt, 91, 1985, Heft 6, Seite 80-83
- [7] Lugscheider, E., Sicking, R.: „Auflösungsverhalten von Wolframkarbid in NiCrBSi-Legierungen“, DVS-Bericht, Band 192 (1998), Seite 252-257
- [8] Knotek, O., Lugscheider, E., Reimann, H., Lohage, P.: "Reaktionen beim Ofeneinschmelzen heterogener Hartlegierungen auf Nickelbasis", Metall 35, 1981, Sonderdruck aus Heft 3
- [9] Müller, K-P., „Praktische Oberflächentechnik“, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1995
- [10] Lugscheider, E.: "Handbuch der thermischen Spritztechnik", Band 139, DVS-Verlag, 2002
- [11] Schedler, W.: "Hartmetalle für den Praktiker", VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1988
- [12] Schatt, W.: "Pulvermetallurgie Sinter- und Verbundwerkstoffe", VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1. Auflage, 1988
- [13] Pawlowski, L.: "The science and engineering of thermal spray coatings", John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1995
- [14] Kieffer, R., Schwarzkopf, P.: "Hartstoffe und Hartmetalle", Springer-Verlag, Wien 1953
- [15] Elliott, P.: "Constitution of Binary Alloys, First Supplement", New York ; London : McGraw-Hill, 1965
- [16] Shunk, Francis A.: "Constitution of Binary Alloys, Second Supplement", New York : McGraw-Hill, 1969