

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Standzeiterhöhung im Aluminiumdruckguss durch angepasste Werkzeugoberflächen
hergestellt mittels mechanischer Vorbehandlung und/oder PVD/PACVD-Beschichtung***

der Forschungsstelle(n)

Institut für Oberflächentechnik

Das IGF-Vorhaben 16471 N der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft
Dünne Schichten e.V wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Aachen, 14.12.2015

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Lehrstuhl für Oberflächentechnik
Prof. Dr.-Ing. K. Bobzin
Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen
D-52056 Aachen
Germany

Standzeiterhöhung im Aluminiumdruckguss durch angepasste Werkzeugoberflächen hergestellt mittels mechanischer Vorbehandlung und/oder PVD/PACVD-Beschichtung

Zusammenfassung

Im Aluminiumdruckguss stellen die Werkzeuge einen Hauptkostenfaktor dar. Durch eine erhöhte Werkzeuglebensdauer können die Kosten für Werkzeugherstellung und Produktionsausfall infolge von Instandhaltung oder Werkzeugwechsel reduziert werden. Die Schadensmechanismen im Aluminiumdruckguss sind sehr ausgeprägt und vielseitig. Während des Druckgießens treten an der Werkzeugoberfläche beim Kontakt mit der Aluminiumschmelze Maximaltemperaturen von ca. $T = 650\text{ °C}$ auf. Beim Besprühen mit dem Trennmittel/Wasser-Gemisch werden Temperaturen bis unter $T = 80\text{ °C}$ erreicht. Dies führt zu wechselnder Zug- und Druckbelastung in den Werkzeugen, was bei Überschreiten der Warmstreckgrenze der Materialien zur Bildung von Thermoschockrisen führt. Ein weiterer Schadensmechanismus ist Korrosion. Beim Kontakt von festem Eisen mit der Aluminiumschmelze kommt es durch Diffusionsvorgänge zur Bildung von intermetallischen Phasen. Diese haften zwischen Werkstück und Werkzeug, was zu Problemen beim Auswerfen führt. Bei der Erstarrung der Bauteile in der Form und beim Auswerfen der Gussteile kommt es zumeist an Oberflächenrauheitshügeln, verstärkt durch mechanische Verklammerung bzw. Aufschumpfen, zu Anhaftungen. Durch Strömungsverschleiß kommt es zudem zu plastischer Verformung, Rissbildung und Ausbrüchen. Das Ziel des Forschungsprojektes war es, im Rahmen der Oberflächentechnik Maßnahmen für die Standzeiterhöhung im Aluminiumdruckguss, im Speziellen für die Formkerne, abzuleiten und ihre Wirkungsweise wissenschaftlich zu begründen.

Im Rahmen des ersten Arbeitspaketes AP 1 wurden insgesamt zwölf unterschiedliche Vorbehandlungsvarianten des industriell genutzten Werkzeugformenstahls 1.2343 untersucht. Hierbei wurden zum Einen der Einfluss einer Plasmanitrierung zur Randschichthärtung analysiert, die von der Firma Oerlikon Metaplas (seit Herbst 2014 Oerlikon Balzers) durchgeführt wurde und zum Anderen sechs unterschiedliche Druckstrahlvarianten untersucht, bei denen in Druckstrahlversuchen der Firma OSK-Kiefer gezielt Druckeigenstressungen im oberflächennahen Bereich induziert wurden. Tiefenaufgelöste Eigenspannungsprofile, die von der Firma Stresstech durchgeführt wurden, zeigten, dass bei einer der getesteten Vorbehandlungsvarianten im Vergleich

zu den anderen die höchsten Druckeigenspannung in der Randzone induziert wurden. Da die Probenoberfläche nach dieser Vorbehandlung zudem die geringsten Rz-Werte im Vergleich aufwies, was für die Beschichtung mit dünnen Hartstoffschichten im Mikrometerbereich entscheidend ist, qualifizierte sich diese Vorbehandlungsvariante für alle weiteren Versuche in den folgenden Arbeitspaketen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte erfolgreich eine angepasste Vorbehandlungsvariante für Druckgusswerkzeuge entwickelt werden. Hierbei wurde nachgewiesen, dass die im Forschungsvorhaben entwickelte Vorbehandlungsvariante, zu einer beinahe vollständigen Vermeidung von Thermoschockrisen im Werkzeugstahl führte.

Innerhalb der Arbeitspakete AP 2 und AP 3 wurden am Institut für Oberflächentechnik die drei Schichtsysteme CrN/AlN, CrN/AlN/Al₂O₃ und ZrN/ZrO₂ für den Einsatz im Aluminiumdruckguss mittels des neuartigen gepulsten Arc-Verfahrens entwickelt. Des Weiteren wurden insgesamt sechs industrielle Beschichtungen, IB-1 bis IB-6, von den Firmen Oerlikon Balzers und Oerlikon Metaplas auf den Versuchsproben hergestellt. Diese insgesamt neun Schichtsysteme wurden grundlegend hinsichtlich ihrer Schichteigenschaften analysiert. Des Weiteren wurde die Verbundhaftung der Schichtsysteme auf dem vorbehandelten Stahlsubstrat 1.2343 mittels Rockwell-eindringprüfung und Scratchtest untersucht. Hierbei wurde nachgewiesen, dass alle getesteten Beschichtungen Verbundhaftungen im zulässigen Bereich gemäß der VDI-Richtlinie 3198 aufwiesen. Anschließend wurden anwendungsnahe Systemtests durchgeführt. Hierbei wurden temperaturabhängige Untersuchungen hinsichtlich der Phasenstabilität mittels differential scanning calorimetry (DSC) durchgeführt. Des Weiteren wurde das Benetzungsverhalten des von der Firma Geiger + Co. Schmierstoff Chemie bereitgestellten Trennmittels W900 Honsel auf den Probenoberflächen mittels Kontaktwinkelmessungen analysiert. Zusätzlich wurde der Widerstand der unterschiedlichen Schichtsysteme gegen metallphysikalische Korrosion zwischen der industriell eingesetzten Aluminiumsiliziumdruckgusslegierung 226D und dem beschichteten Formenstahl 1.2343 untersucht. Hierfür wurde ein Tauchversuchsprüfstand entwickelt, der die Rotation beschichteter Proben in der schmelzflüssigen AlSi-Legierung über mehrere Stunden erlaubt. Es zeigte sich, dass insbesondere die Beschichtungen CrN/AlN/Al₂O₃ und IB-6 in den durchgeführten Tauchversuchen einen guten Schutz vor metallphysikalischer Korrosion bieten. Das am IOT entwickelte

Schichtsystem CrN/AlN/Al₂O₃ zeichnete sich in diesen Versuchen darüber hinaus durch eine geringe Adhäsionsneigung gegenüber der AlSi-Legierung aus.

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Untersuchungen der Schicht-, Verbund- und Systemeigenschaften wurden für das vierte Arbeitspaket AP 4 insgesamt drei Schichtsysteme ausgewählt, die in industriellen Druckgussversuchen bei der Firma Martinrea Honsel auf Druckgusskernen für die Herstellung von Motorblöcken eingesetzt wurden. Hierbei handelte es sich um CrN/AlN/Al₂O₃, die kohlenstoffbasierte Hartstoffbeschichtung IB-1 sowie um IB-6. Nach 5.884 Schuss wurden die industriellen Druckgussversuche beendet. Die anschließende Schadensanalyse wurde am IOT durchgeführt. Mittels dieser Schadensanalyse konnten die Hauptschädigungsmechanismen metallphysikalische Korrosion und Thermoschockrisse im Aluminiumdruckguss nachgewiesen werden. Die industriell eingesetzte Beschichtung IB-6 zeigte eine gute Beständigkeit gegen diese Schäden über die gesamte Länge der untersuchten Druckgusskerne. Die Beschichtung CrN/AlN/Al₂O₃ zeigte mit Ausnahme der thermisch besonders hochbeanspruchten Kernspitze ebenfalls eine gute Beständigkeit gegenüber metallphysikalischer Korrosion und Thermoschockrisse.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Stand der Technik	8
2.1	Aluminiumdruckguss	8
2.1.1	Gussverfahren	8
2.1.2	Prozessparameter beim Aluminiumdruckguss	8
2.1.3	Schadensmechanismen beim Aluminiumdruckguss	9
2.2	Substratvorbehandlung	11
2.2.1	Mechanische Vorbehandlung	11
2.2.2	Nitrieren	12
2.3	Das Schichtsystem CrN/AlN	13
2.3.1	Das Schichtsystem Al ₂ O ₃	14
2.3.2	Das Schichtsystem ZrO ₂	17
3	Zielsetzung	18
4	Lösungsansatz	19
5	Untersuchungsmethoden und Vorgehensweise	25
5.1	Verwendete Substratmaterialien	25
5.2	Beschichtungsprozess	26
5.2.1	Prozessparameter für das Schichtsystem CrN/AlN	27
5.2.2	Prozessparameter für das Schichtsystem CrN/AlN/Al ₂ O ₃	28
5.2.3	Prozessparameter für das Schichtsystem ZrN/ZrO ₂	31
5.3	Industrielle Beschichtungen	33
5.4	Untersuchungsmethoden	33
5.4.1	Schichteigenschaften	33
5.4.2	Verbundeigenschaften	40
5.4.3	Systemeigenschaften	42
5.4.4	Industrielle Druckgussversuche	45
6	Ergebnisse	46
6.1	Oberflächentopografien nach der Strahlbehandlung	46
6.2	Benetzungsuntersuchungen an gestrahlten Substraten	49
6.3	Tiefenaufgelöste Eigenspannungen	50
6.4	Schichteigenschaften	52
6.5	Verbundeigenschaften	56
6.6	Systemeigenschaften	62

6.7	Druckgussversuche im industriellen Prozess	90
6.7.1	Schadensanalyse der Druckgusskerne	91
7	Zusammenfassung	111
8	Nutzen der erzielten Ergebnisse für KMU	113
9	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	113
10	Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal, Geräten und Leistungen Dritter	113
10.1	Wissenschaftliches Personal	113
10.2	Geräte	114
10.3	Leistungen Dritter	114
11	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden	115
12	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	116
13	Förderhinweis	117
14	Literaturverzeichnis	119

1 Einleitung

Im Aluminiumdruckguss stellen die Werkzeuge einen Hauptkostenfaktor dar. Durch eine erhöhte Werkzeuglebensdauer können nicht nur die Kosten für die weitere Werkzeugherstellung, sondern auch für die Instandhaltung und den Werkzeugwechsel sowie den damit verbundenen Produktionsausfall reduziert werden. Die Schadensmechanismen und -ursachen im Aluminiumdruckguss sind sehr ausgeprägt und vielseitig. Nach wie vor besteht in der Industrie das Bestreben, die Werkzeugstandzeit im Aluminiumdruckguss zu erhöhen, um den Druckguss am Standort Deutschland wirtschaftlich und produktiv zu gestalten. An den Formen konnte die Standzeit durch Beschichtungen schon deutlich erhöht werden. Jedoch vor allem an den Formkernen sind die Standzeiten noch nicht ausreichend und führen zu häufigen Werkzeugwechseln. Gründe sind die durch die örtlichen Querschnittsverengungen hervorgerufenen hohen Geschwindigkeiten der Schmelze von bis zu $v = 120 \text{ m/s}$ und die gleichzeitig auftretenden starken Turbulenzen. Zusätzlich treten an den Kernen maximale Oberflächentemperaturen von bis zu $T = 650 \text{ °C}$ und hohe Temperaturgradienten beim Aufsprühen des kühleren Trennmittels auf die Werkzeuge auf [Gue98].

Das Ziel des abgeschlossenen Forschungsprojekts „Standzeiterhöhung im Aluminiumdruckguss durch angepasste Werkzeugoberflächen hergestellt mittels mechanischer Vorbehandlung und/oder PVD/PACVD-Beschichtung“ war es, im Rahmen der Oberflächentechnik Maßnahmen für die Standzeiterhöhung beim Aluminiumdruckguss, im Speziellen für die Formkerne, abzuleiten und ihre Wirkungsweise wissenschaftlich zu begründen. Hierbei wurden unterschiedliche Routen beschritten. Zunächst wurden Proben aus dem Warmarbeitsstahl 1.2343 (X37CrMoV5-1) von der KIND & CO., EDELSTAHLWERK GmbH & Co. KG, Wiehl, gehärtet und von der FLP Microfinishing GmbH, Zörbig, poliert. Die erste Forschungsrouten hatte zum Ziel, mittels Druckstrahlen der Substrate gezielt Druckspannungen an den Randzonen zu induzieren, um der Warmrissbildung im Druckguss vorzubeugen. Im Rahmen der zweiten Forschungsrouten wurden die Proben nach dem Politurschritt zusätzlich von der Oerlikon Metaplas GmbH, Bergisch Gladbach, plasmanitriert. Anschließend wurden zur Induzierung der Druckeigenstressungen die Proben aus beiden Forschungsrouten von der OSK Kiefer GmbH, Oberhausen, mit unterschiedlichen Strahlparametern behandelt. Von der Stresstech GmbH, Höhn, wurden tiefeaufgelöste Eigenstressmessungen durchgeführt, um die Strahlparameter mit den

eingebrachten Druckspannungen in der Randzone zu korrelieren. Die am besten geeignete Vorbehandlungsvariante wurde für die Arbeiten in den weiteren Arbeitspaketen verwendet. Am Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen University wurden drei nitridische und oxidische Hartstoffbeschichtungen mittels physikalischer Abscheidung aus der Gasphase (PVD) entwickelt. Diese wurden mittels eines neuartigen gepulsten Arc-Verfahrens hergestellt. Die Projektpartner Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH, Schopfheim, und Oerlikon Metaplas stellten jeweils drei industrielle Beschichtungen zur Verfügung. Anschließend wurde eine Analyse der Schicht-, Verbund- und Systemeigenschaften am IOT durchgeführt. Hierbei wurden Untersuchungen hinsichtlich der Phasenstabilität mittels differential scanning calorimetry (DSC) durchgeführt. Des Weiteren wurde das Benetzungsverhalten des von der Geiger + Co. Schmierstoff Chemie GmbH, Heilbronn, bereitgestellten Trennmittels W900 Honsel auf den Probenoberflächen mittels Kontaktwinkelmessungen analysiert. Zusätzlich wurde der Widerstand der unterschiedlichen Schichtsysteme gegen metallphysikalische Korrosion zwischen der industriell eingesetzten Aluminiumsiliziumdruckgusslegierung 226D und dem beschichteten Formstahl 1.2343 untersucht. Zu diesem Zweck wurde am IOT ein Tauchversuchsprüfstand entwickelt, der die Rotation beschichteter Proben in der schmelzflüssigen AlSi-Legierung 226D über mehrere Stunden erlaubt.

Nach Abschluss der Analyse aller beschichteten Proben wurden drei unterschiedliche Schichtsysteme für den Einsatz in industriellen Druckgussversuchen bei der Martinrea Honsel Germany GmbH, Meschede, qualifiziert. Hierbei wurden Druckgusskerne entsprechend den zuvor getesteten Stahlproben vorbehandelt und mit den drei ausgewählten Beschichtungen beschichtet und in industriellen Druckgussversuchen für die Erzeugung von druckgegossenen Motorblöcken eingesetzt. Die abschließende Schadensanalyse erfolgte am IOT.