



Hartstoffbeschichtungen für den Aluminiumdruckguss – Schichtauswahl mit System

VON MARC ADAM UND ANDREAS GEBAUER-TEICHMANN, BAUNATAL, SOWIE MARTIN FEHLBIER, KASSEL

Das Vergießen von Aluminiumlegierungen im Druckgießverfahren bietet die Möglichkeit, geometrisch anspruchsvolle und maßlich präzise Gussteile bei gleichzeitig hoher Produktivität zu erzeugen [1-4]. Dabei ist ein Spektrum von dickwandigen Volumenbauteilen bis zu dünnwandigen Strukturteilen herstellbar [5].

Eines der hochgradig qualitätsbeeinflussenden Elemente des Druckgießprozesses ist die zweigeteilte Dauerform aus Warmarbeitsstahl. Auf Grund der Tatsache, dass die Formerstellung sehr kostenintensiv ist [6] und sich der Formzustand direkt in der Qualität des gegossenen Bauteils widerspiegelt, ist eine schadensfreie Beschaffenheit der Form

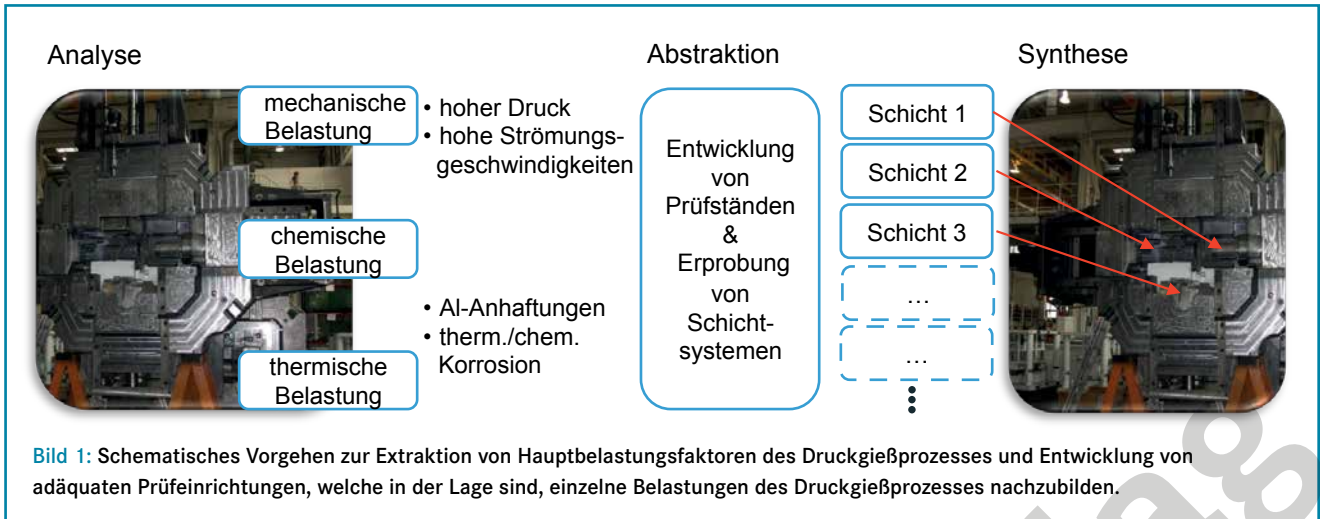
über einen maximalen Zeitraum anzustreben.

Die Hauptschäden, welche der Formqualität entgegenwirken, können in Anlehnung an [7] in Auswaschungen, Brandrisse, Spannungsrisse, Bruch sowie Anklebungen der Al-Legierung und Korrosion

eingeteilt werden. Dabei ist es nur bis zu einem gewissen Grad möglich, den Schädigungsverlauf und letztendlich die Standzeit der Druckgießform mit der Güte des Warmarbeitsstahls zu verbessern. Ein weiteres interessantes Potential bieten Prozesse zur Optimierung der Randschichten

KURZFASSUNG:

Ein möglichst schadensfreier Zustand der Druckgießform ist für die Herstellung von anspruchsvollen Druckgussteilen entscheidend. Dünne Hartstoffbeschichtungen können den Widerstand der Formoberfläche gegenüber prozestypischen Belastungen deutlich erhöhen. Die Schichtauswahl erfolgt in der Regel erfahrungsbasiert. Da aber nur Beschichtungen mit geeigneten Eigenschaften diese Widerstandserhöhung erzeugen, ist die Entwicklung einer Schichtauswahlssystematik notwendig, welche eine eigenschaftsorientierte und objektive Auswahl ermöglicht. Zur Bewertung wurde eine zusammenfassende und gewichtende Matrix entwickelt. Zusätzlich wurden die in dieser Arbeit für geeignet befundenen Beschichtungen CrVN, TiBN-TiB₂ und WC im Realprozess erprobt und nach Einsatzende analysiert.

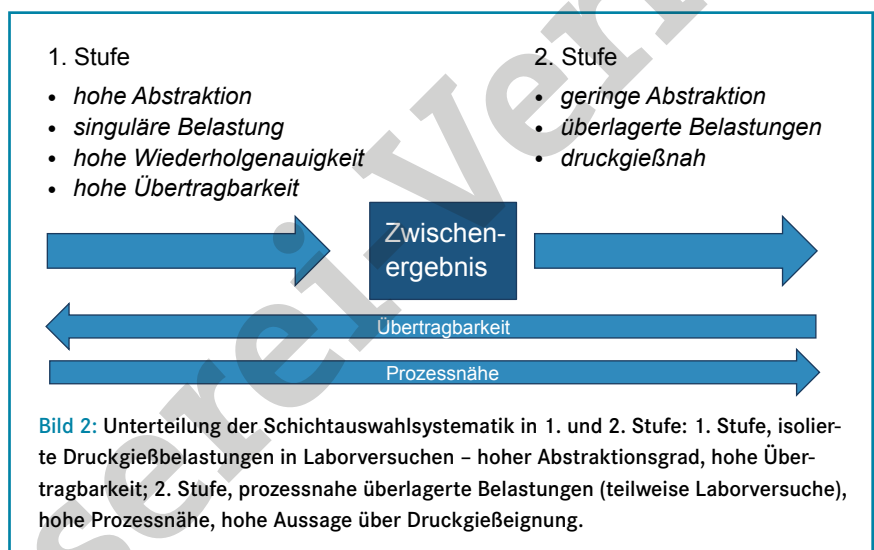


und/oder der Oberflächen von Werkzeugen. Die Vorteile dieser Vorgehensweise bestehen darin, dass das Substrat (die Druckgießform) weiterhin aus z. B. vergleichsweise kostengünstigem 1.2343 Warmarbeitsstahl gefertigt werden kann. Dies bietet große wirtschaftliche Vorteile, da der Anteil der Werkstoffkosten für die Herstellung einer Druckgießform mit bis zu 15 % in die Gesamtherstellkosten eingeht [6]. Lediglich die oberflächennahen Bereiche sowie die Oberfläche selbst werden durch einen zusätzlichen Prozess in ihrer Betriebsleistung optimiert.

Als Beispiel der Oberflächenoptimierung ist die Beschichtung mit dünnen Hartstoffschichten durch das PVD (physikalische Gasphasenabscheidung) bzw. das PACVD (plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung) zu nennen. Auf Grund der in diesen Prozessen vorherrschenden Temperaturen ist die Beschichtungstechnik, wenn keine nachgestellte Wärmebehandlung des Substrats erfolgen soll, auf diese aus der Gasphase abscheidenden Prozessvarianten beschränkt.

Dünne Hartstoffschichten für das Al-Druckgießen

In der Vergangenheit wurde gezeigt, dass der Einsatz von korrekt ausgewählten Hartstoffbeschichtungen, hergestellt durch das PVD- und das PACVD-Verfahren, prinzipiell zur Standzeiterhöhung der erprobten Formeinsätze geführt hat [8-11]. Dazu sollte das der Beschichtung vorgeschaltete, verbindungs-schichtfreie Nitrieren des Substrats als zwingend erforderlich angesehen werden. Hierdurch wird nicht nur die Stützwirkung des Substrats gegenüber der Hartstoffbeschichtung verbessert, sondern es kann die Schichthaftung am Substrat deutlich gesteigert werden [10, 12-14].



Die Schichterprobung erfolgt durch den Einsatz im realen Druckgießprozess. In der Regel ist dies ein zeitintensiver Prozess, bei dem eine gesicherte Nachverfolgung der Ergebnisse nicht trivial ist. Nicht optimal ist ebenfalls die Qualität der erhaltenen Ergebnisse. Letztendlich ist lediglich die Standzeit anhand der Schusszahlen erfassbar. Die Ermittlung des Schädigungsverlaufes und des Schädigungsmaßes während des Einsatzzyklus ist nicht ohne den Ausbau aus der Form möglich. Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich die Hartstoffschicht im Versuchszeitraum verhält und welcher Schädigungsmechanismus zum Versagen geführt hat. Existierende Schichten/Schichtsysteme können nur auf Grund von Erfahrungswerten, welche in bauteilabhängigen Prozessproben gewonnen wurden, erneut für den neuen Anwendungsfall erprobt werden. Gleiches gilt ebenfalls für Schichtneuentwicklungen.

Es besteht daher die Notwendigkeit der Entwicklung eines Schichtvorbewer-

tungsprozesses, der eine objektive Entscheidungsbasis für die Auswahl einer Hartstoffbeschichtung im Aluminiumdruckgießverfahren bietet.

Schichtauswahlsystematik von Hartstoffschichten für das Al-Druckgießen

Inhalt der Schichtauswahlsystematik ist ein Bewertungssystem, welches es durch das Einfließen von diversen Untersuchungen von mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften verschiedener Hartstoffbeschichtungen ermöglicht, für jeden Bereich in der Druckgießform mit den jeweiligen Hauptbelastungsparametern die ideale Schicht auszuwählen. Um die Schichtauswahlsystematik an den Druckgießprozess anzupassen, wurde nach der Methode der Analyse, Abstraktion und Synthese vorgegangen (Bild 1).

Im Bereich der Analyse werden die primären Schädigungsmechanismen des Druckgießprozesses ermittelt und vonein-

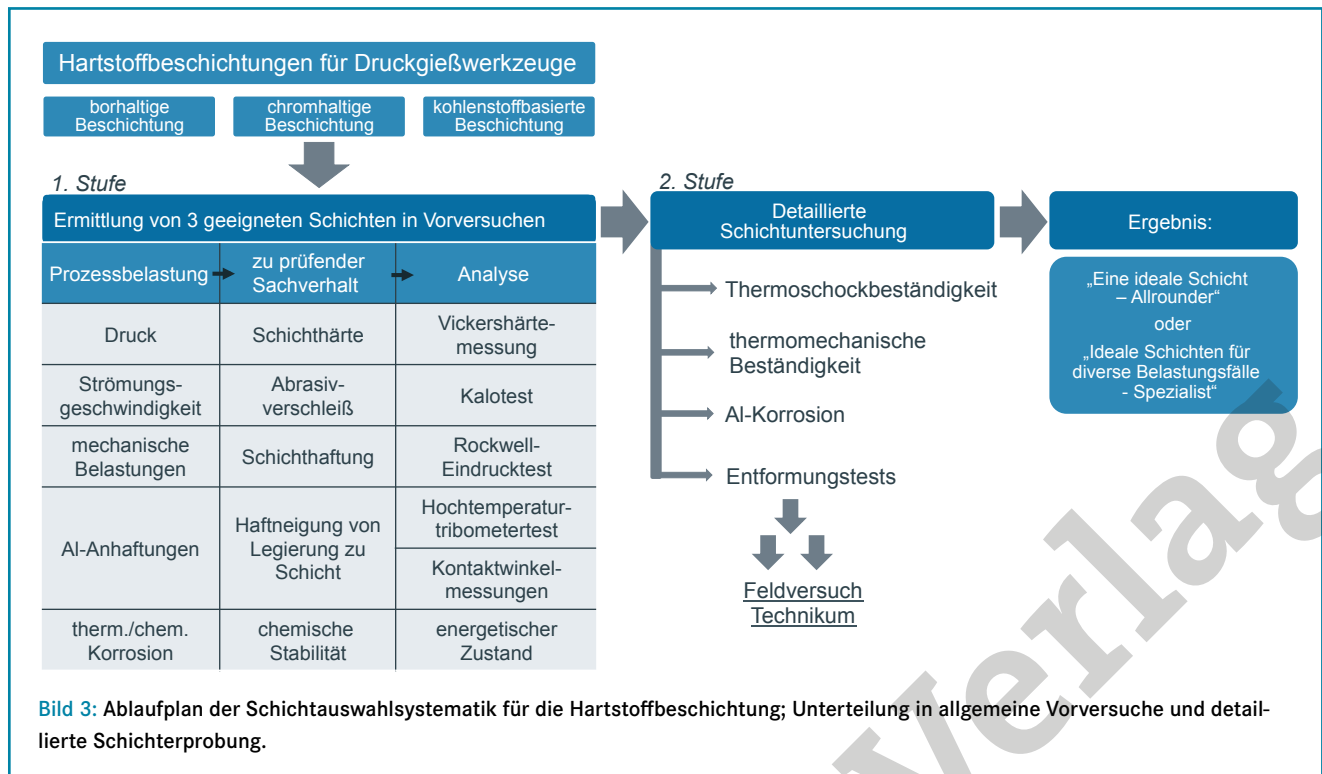


Bild 3: Ablaufplan der Schichtauswahlsystematik für die Hartstoffbeschichtung; Unterteilung in allgemeine Vorversuche und detaillierte Schichterprobung.

	Randschicht	Schicht-härte	Abrasi-verschleiß	Schicht-haftung	Haft-neigung	Thermo-dynamische Stabilität	Oberflächen-energie	Summe	Auswahl
Bewertungs-faktor	/	0,6	0,8	1	0,5	0,4	0,5	max. 63,3	
1.2343	WBH							14,9	x
borhaltig	TiB ₂ -TiB ₂ Multilayer							58,1	✓
chromhaltig	CrN							42,9	x
	CrVN							49,5	✓
	(CrTiAlSi)N							45,2	x
	CrW							38,9	x
kohlen-stoffbasiert	Cr-DLC							30,9	x
	WC							45,6	✓

Kennzahlen der Analyseverfahren

Bild 4: Bewertungsmatrix der Analyseverfahren der Schichtauswahlsystematik mit der Gewichtung der Bewertungsfaktoren für den Al-Druckgießprozess.

ander getrennt. Dabei ist entscheidend, welcher Schadensart diese zugehörig sind (mechanisch, chemisch, thermisch) und wie sie sich im Prozess äußern (Druck, Strömungsgeschwindigkeit, Al-Anhaftungen, thermische/chemische Korrosion). Im Bereich der Abstraktion werden diese ermittelten Schädigungen auf ihre grundlegenden Mechanismen reduziert und deren Auswirkungen in Laborversuchen imitiert. Es steht die Intension im Vordergrund, durch normierte Versuche unter immer gleichen Bedingungen vergleichbare Ergebnisse auf Grund identischer Be-

lastungen zu schaffen. Durch die Komplexität des Druckgießprozesses ist dies in einem Realitätstest nicht möglich, da neben dem vorherrschenden Hauptbelastungsmechanismus Überschneidungen mit anderen Belastungsmechanismen existieren. Damit der Grad der Abstraktion der Schichtauswahlsystematik nicht zu groß ist und die Aussagefähigkeit mindert, wird die Systematik in zwei Stufen unterteilt (Bild 2).

In der 1. Stufe werden isolierte Druckgießbelastungen in einzelnen Laborversuchen auf die beschichteten Probekör-

per aufgebracht. Es herrscht ein hoher Grad an Abstraktion, jedoch eine hohe Übertragbarkeit auf andere Prozesse, in denen ähnliche Belastungsmechanismen existieren. Es werden die Reaktionen der Schichten auf diese ermittelt. Ziel ist hierbei die Bestimmung der drei geeignetsten Schichten und damit die weitere Untersuchung in prozessspezifischen detaillierten Schichterprobungen. In der 2. Stufe werden die Ergebnisse aus der 1. Stufe verwendet, um diese in prozessnahen Belastungen auf ihre Druckgießeignung hin zu untersuchen. Unter diesen Bedingungen setzt sich die Schichtauswahlsystematik wie in Bild 3 gezeigt zusammen.

Die Schichtauswahlsystematik erlaubt die Untersuchung und den Vergleich beliebig vieler Schichten bzw. Schichtsysteme. Im dargestellten Beispiel wurden die untersuchten Schichten in Gruppen in Abhängigkeit von ihrer stofflichen Zusammensetzung eingeteilt. Hintergrund ist, dass die Ergebnisse gegebenenfalls Rückschlüsse auf ganze Gruppen von stofflich ähnlichen Hartstoffbeschichtungen zulassen. Ergebnis der Systematik ist entweder ein Schichttyp, welcher in allen Bereichen ideale Leistungen erbringt, oder die Ermittlung einer Beschichtung für den jeweiligen Hauptbelastungsmechanismus innerhalb eines Formbereiches. Die im Folgenden aufgeführten Untersuchungen werden zur Nachbildung der prozesstypischen Belastungen durchgeführt.

Druck – Schichthärte

Die Reaktion auf Druckbelastung wird durch eine Härtemessung mittels Nanoindentierung gemessen.

In der dritten Phase des Gießprozesses wird die Form mit maximalem Druck auf der Oberfläche, die zu diesem Zeitpunkt die maximale Temperatur besitzt, belastet. Gehen wir von einer ausreichenden Stützwirkung der verbundungsschichtfrei nitrierten Randschicht aus, so besteht die Gefahr, dass harte Partikel (Oxide, Siliziumausscheidungen) die Hartstoffbeschichtung durchdringen [15]. Dies führt zur Schädigung der Schicht und letztendlich zum Versagen der Beschichtung. Schichten mit hoher Härte sind hier zu bevorzugen, da der Faktor Zähigkeit bei Schichtdicken von ca. 3 bis 10 µm in den Hintergrund tritt.

Strömungsgeschwindigkeit – Abrasivverschleiß

Im Al-Druckgießprozess treten Strömungsgeschwindigkeiten der flüssigen Legierung, insbesondere bei dünnwandigen Strukturbauteilen, von bis zu 60 m/s auf [16]. Diese Belastungszustände herrschen vor allem in angussnahen Bereichen. Es entstehen massive Auswaschungen des Formstahls durch Abrasion bzw. Erosion.

Da Härte und Abrasivverschleiß in direktem Zusammenhang stehen, ist die Ermittlung dieses Parameters von äußerster Wichtigkeit, um die Druckgießeignung einer Hartstoffschicht beurteilen zu können. Es wird hierzu ein Kalottenschliff angefertigt, bei dem über das aus der Schicht herausgelöste Volumen der Verschleißwiderstand gegen Abrasion errechnet wird.

Mechanische Belastung – Schichthaftung

Die Schichthaftung zwischen Substrat und Hartstoffbeschichtung ist das wesentliche Attribut einer funktionsfähigen Hartstoffbeschichtung. Die positiven Aspekte einer Oberflächenbeschichtung können nur dann zum Tragen kommen, wenn die Schicht über die Betriebszeit die Substratoberfläche lückenlos abdeckt.

Die Haftfestigkeit der Beschichtungen auf dem Substrat wird mit der qualitativen Methode des Rockwell-Eindrucktests ermittelt. Entscheidende Kriterien sind hierbei die Ausprägung des entstandenen Rissnetzwerkes sowie die Fläche der Delamination [17].

Anhand der Schädigungsintensität werden die Ergebnisse in Haftklassen (HF1 bis HF6) eingeteilt.

Al-Anhaftung – Haftneigung von Al-Legierung zur Hartstoffschicht

Durch Legierungsanhaftungen entstehen häufig starke Formschädigungen, welche die Form- und die Bauteilqualität deutlich negativ beeinflussen und zur Erhöhung der Produktionskosten führen [18]. Daher ist es von hoher Wichtigkeit, eine Beschichtung für die Druckgießanwendung zu ermitteln, welche eine geringe Haftneigung gegenüber einer Al-Legierung aufweist. Dies erfolgt zunächst durch eine abgewandelte Variante des Hochtemperaturtribometertests. Anstelle eines Gegenkörpers mit hoher Härte wird ein Al-Legierungsspin verwendet. Über den im Anschluss quantifizierten Pinverschleiß und die Haftmenge auf der Beschichtung lässt sich eine Haftneigung der Hartstoffschicht gegenüber der Legierung ermitteln.

Die Anhaftungsvorgänge sind diffusionsgesteuert [15]. Daher ist es sinnvoll, Beschichtungen zu wählen, die durch ihren energetischen Oberflächenzustand eine geringe Kontaktfläche/Diffusionsfläche mit dem Liquid erlauben. Dies ist der Fall bei Zuständen geringer Oberflächenenergien. Daher wird dieser Zustand indirekt über die Bestimmung des Kontaktwinkels ermittelt.

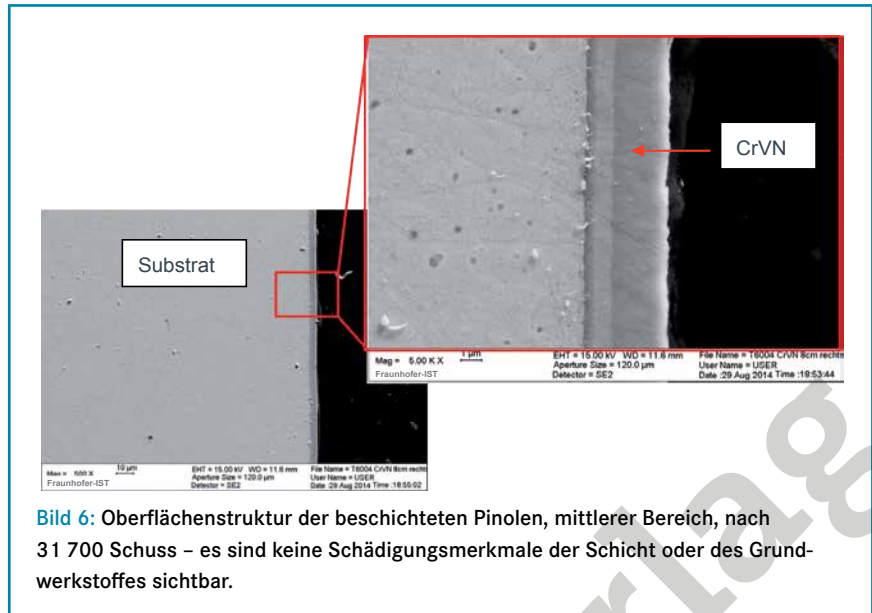
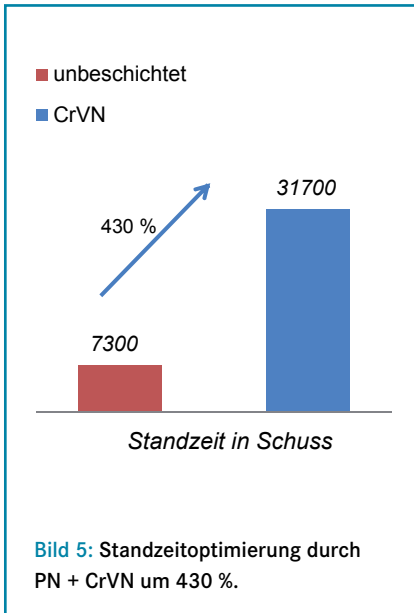
Thermisch/chemische Korrosion – chemische Stabilität

Um die thermodynamische Stabilität der Beschichtungen beurteilen zu können, wird die Enthalpieänderung der in der Schicht enthaltenen Phasen rechnerisch bestimmt.

In Abhängigkeit vom Vorzeichen und vom Betrag der Enthalpieänderung kann eine Aussage über die Stabilität des Schichtzustands getroffen werden.

Bewertungsmatrix und Bewertungsfaktoren

Neben der Ermittlung der Kennwerte ist die Entwicklung einer Beurteilungssystematik von hoher Wichtigkeit, um die Vielzahl an ermittelten Schichtkennzahlen dem Druckgießprozess entsprechend passend beurteilen zu können (Bild 4). Neben der Auflistung aller untersuchten Beschichtungen sowie der durchgeführten Beurteilungsverfahren werden die Kennzahlen durch einen Bewertungsfaktor gewichtet. Dies ermöglicht die Anpassung der Matrix an Bereiche in der Form mit verschiedenen Belastungszuständen (z. B. chemisch oder mechanisch) und es entsteht die Möglichkeit, die Schichtauswahlssystematik für Prozesse mit ähnlichen Belastungsprofilen zu verwenden. Die Bewertungsfaktoren ergeben sich aus den Prozessbelastungen und dem Einfluss



der Beschichtungen auf die Reaktion der Belastung.

Eine Grundlage der Schichtwirksamkeit ist, wie erwähnt, die Schichthaftung. Diese wird ausschließlich durch das Beschichtungssystem und seine Struktur beeinflusst und erhält daher die Wertung „1“. Der Abrasivverschleiß wird neben der Oberfläche durch die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit bedingt. Es ergibt sich eine Wertung von „0,8“ (= 1 - 0,2). Mit dem Faktor „0,6“ gehen die Schichthärte und die Haftneigung ein. Es folgen die Oberflächenenergie und die thermodynamische Stabilität. Es wird deutlich, dass sich der Bewertungsfaktor indirekt proportional zur Existenz von weiteren Einflussfaktoren für den Schädigungszustand verhält. Das heißt, je größer die Anzahl der vorhandenen Einflussgrößen neben der Oberflächenbeschichtung ist, welche den Schädigungsverlauf beeinflussen, desto geringer wird die Gewichtung.

Die Kennzahlen der Analyseverfahren werden ermittelt und dann innerhalb eines Verfahrens in ein prozentuales Verhältnis gesetzt. Ein wesentlicher Vorteil, welcher sich hieraus ergibt, ist die problemlose Eingliederung neuer Analyseergebnisse der zukünftig untersuchten Schichten.

Die jeweiligen Ergebnisse werden durch die zugehörigen Bewertungsfaktoren gewichtet und deren Summe gebildet. Dies ermöglicht die Erstellung eines Rankings und die Auswahl von in diesem Fall drei Beschichtungen zur weiteren Untersuchung in der 2. Stufe zur detaillierten, druckgießnahen Erprobung.

Die nach den beschriebenen Kriterien gewichteten Ergebnisse der Schichtauswahlssystematik beschreiben:

- > TiBN-TiB2 Multilayer,
- > CrVN und
- > WC

als die in Frage kommenden Schichten. Unter Zuhilfenahme der Erkenntnisse aus der 1. Stufe und durch die Durchführung der komplexeren und druckgussnäheren Versuche der 2. Stufe ist es möglich, entweder jedem Belastungsbereich der Form eine ideale Schicht zuzuweisen oder eine „Allrounder-Schicht“ für die gesamte Formbeschichtung zu ermitteln.

Verifikation der 1. Stufe

Zum aktuellen Zeitpunkt der Untersuchungen wurde die 1. Stufe der Schichtauswahlssystematik vollständig abgeschlossen und die Übergabe der Ergebnisse in die 2. Stufe kann stattfinden. Da diese Art der Bewertung für Hartstoffbeschichtungen zum ersten Mal angewendet wird, findet zunächst eine Verifikation der Ergebnisse in realen Druckgießversuchen statt, die bei positivem Abschluss bei der weiteren Verwendung unterlassen werden können. Bei diesen Versuchen wurde ein Formeinsatz eines Zylinderkurbelgehäuses verwendet. Dieser besitzt eine konturgebende Länge von 330 mm. Aktuell sind die Versuche mit CrVN abgeschlossen. Hierbei wurde eine Standzeitverlängerung von 430 % ermittelt (s. Bild 5). Während der gesamten Einsatzzeit der Pinole waren keinerlei Instandhaltungsmaßnahmen wie z. B. das Entfernen der Al-Legierung in diesem relevanten Bereich notwendig.

Im weiteren Verlauf der Verifikation werden in Kürze die ausstehenden Beschichtungen TiBN-TiB2 Multilayer und WC erprobt.

Zustandsanalyse der Pinole

Nach dem Ausbau der Pinole wurde das Schädigungsausmaß analysiert. Dazu wurden unter anderem REM-Aufnahmen der Oberflächenstrukturen gemacht. Nach 31 700 Zyklen sind drei Zustände aufzuzeigen:

1. Vollständig unversehrte Bereiche mit geschlossener Schichtstruktur (Bild 6). Wie zu erkennen ist, liegen in diesem Zustand eine ideale Schichtanbindung sowie eine intakte Schichtstruktur vor. Weder die Hartstoffbeschichtung noch die Grundstruktur des Werkstoffs sind verändert.

2. Geschlossene Schichtstruktur mit Legierungsanhaftungen und leichten Schichtdefekten. Lokal existieren Schichtbereiche, an denen leichte Legierungsanhaftungen zu erkennen sind. Im oberen Bereich des Bildes 7 sind Schichtabplatzungen erkennbar, wobei die Bruchfläche innerhalb der Schicht selbst verläuft und somit keine direkte Kontaktfläche zwischen Legierung und Substrat existiert. An allen anderen Schichtbereichen sind keinerlei Schädigungen sichtbar.

3. Zerstörung der Schichtstruktur und des Substrats. In Bild 8 sind massive lokale Schädigungen der Schicht und des Substrats erkennbar. Der Bereich des Substrats, der nicht mehr durch die Hartstoffbeschichtung geschützt wird, wird durch abrasiven Verschleiß und chemische Lösungserscheinungen geschädigt. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die weitere Schichtschädigung durch Unterwanderung der Beschichtung stattfindet. Auf Grund der Tatsache, dass der Grundwerkstoff geringere Widerstandskennwerte als die Hartstoffbeschichtung besitzt, wird das freigelegte Substrat deutlich schnell-

ler abgetragen. Es resultiert der Entfall der Stützwirkung des Grundwerkstoffes und die Beschichtung bricht.

Zusammenfassung

Die Schichtauswahlssystematik für Hartstoffbeschichtungen ist eine Methode zur quantifizierten Beurteilung der Einsatzfähigkeit bestimmter Beschichtungen für den Al-Druckgießprozess. Diese bietet die Möglichkeit, eine Auswahl auf Grund quantifizierter Kennwerte zu treffen und eine zeit- und kostenintensive Prozesserschöpfung entfallen zu lassen. Dieser Zwischenbericht liefert folgende Ergebnisse:

- > eine Auswahl an Untersuchungsmethoden, welche isolierte Belastungen des Druckgießprozesses in Laborumgebung wiederholbar nachbilden,
- > eine Beurteilungsgrundlage durch quantifizierte Ergebnisse,
- > Aussagen über Verlauf und Ausmaß des Verhaltens bei Belastung,
- > eine Bewertungsmatrix, welche durch Bewertungsfaktoren neben dem Druckgießen auch für Prozesse mit ähnlichen Belastungsfaktoren verwendet werden kann (z. B.: Warm- und Massivumformung) und
- > deutliche Zeit- und Kostenersparnis der Schichtauswahl durch den Vorbeurteilungsprozess.

Aus ersten Ergebnissen wird deutlich, dass eine Beschichtung, welche in der Systematik eine gute Betriebsleistung aufweisen soll, auch im realen Prozesseinsatz eine Steigerung der Betriebsleistung (430 %) aufweist. Insbesondere bei der Schadensanalyse wird ersichtlich, dass Großteile der Beschichtung nach Ende der Standzeit nahezu schadungsfrei sind. Wird die Hartstoffbeschichtung jedoch geschädigt und der Grundwerkstoff den Prozessbelastungen direkt ausgesetzt, folgt der druckgießtypische Schädigungsverlauf des Formeinsatzes. Da dies jedoch erst nach deutlich höherer Anzahl an Gießzyklen (verglichen mit unbehandelten Formeinsatzes) eintritt und die Schädigung nur in einzelnen Bereichen stattfindet, ist eine massive Standzeiterhöhung durch die korrekte Auswahl von Hartstoffbeschichtungen möglich.

Dipl.-Ing. Marc Adam und Dr.-Ing. Andreas Gebauer-Teichmann, Volkswagen AG, Bauratal, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier, Universität Kassel

Literatur:

[1] Nogowizin, B.: *Theorie und Praxis des Druckgusses*. Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2011.

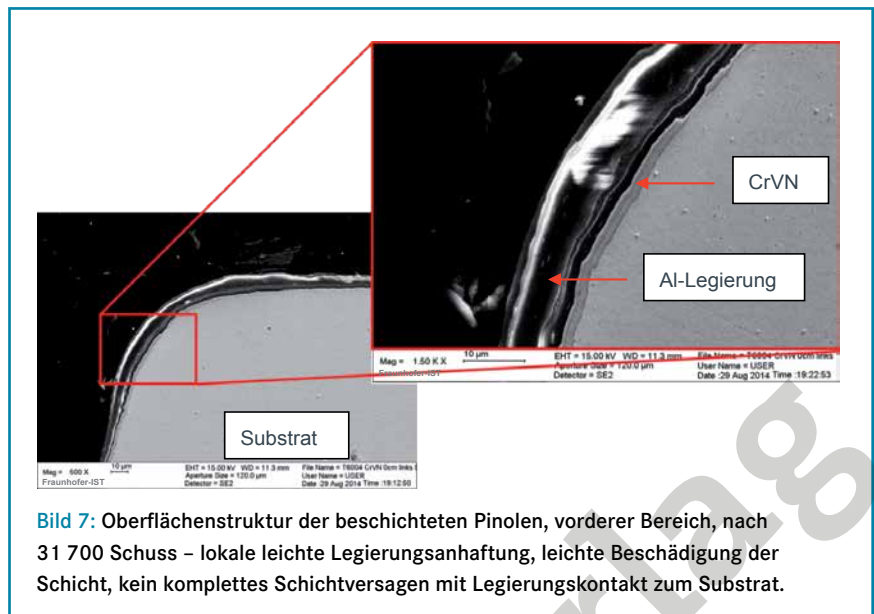


Bild 7: Oberflächenstruktur der beschichteten Pinolen, vorderer Bereich, nach 31 700 Schuss – lokale leichte Legierungsanhftung, leichte Beschädigung der Schicht, kein komplettes Schichtversagen mit Legierungskontakt zum Substrat.

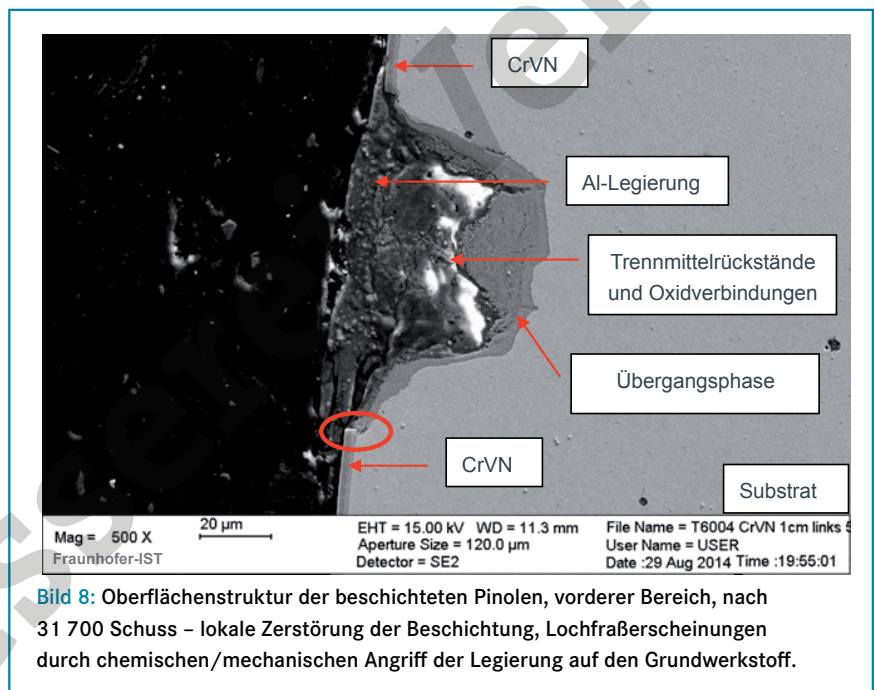


Bild 8: Oberflächenstruktur der beschichteten Pinolen, vorderer Bereich, nach 31 700 Schuss – lokale Zerstörung der Beschichtung, Lochfraßerscheinungen durch chemischen/mechanischen Angriff der Legierung auf den Grundwerkstoff.

lin, 2011.

[2] Hasse, S.: *Guss- und Gefügefehler*. Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2003.

[3] van Basshuysen, R.; Schäfer, F.: *Handbuch Verbrennungsmotor*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010.

[4] Brecher, C.: *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Springer-Verlag, Berlin, 2011.

[5] Fehlbier, M.: *Herstellung, Charakterisierung und Verarbeitung teilflüssiger metallischer Werkstoffe am Beispiel verschiedener Aluminium- und Magnesiumlegierungen*. Shaker Verlag, Aachen, 2003.

[6] *Giesserei* 91 (2004), [Nr. 5], S. 55-58.

[7] *Giesserei* 84 (1997), [Nr. 23], S. 9-14.

[8] *Galvanotechnik* (1998), S. 3380-3392.

[9] *Die Casting Engineer* 44 (2000), [Nr. 2], S. 50-58.

[10] *Surface and Coatings Technology* 125

(2000), [Nr. 1-3], S. 233-239.

[11] *Giesserei-Praxis* (1993), S. 166-169.

[12] *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* (2006), [Nr. 2], S. 202-208.

[13] *Surface and Coatings Technology* 72 (1995), [Nr. 3], S. 157-162.

[14] *Surface and Coatings Technology* 116-119 (1999), S. 530-536.

[15] *Die Casting Engineer* 44 (2000), [Nr. 3], S. 70-81.

[16] Hasse, S.: *Giesserei Lexikon*. Schiele & Schön, Berlin, 2000.

[17] Macherauch, E.; Zoch, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. Vieweg Verlag, Seelze, 2011.

[18] Kunrath, A.; Tentardini, E.; Castro, M., u. a.: *Prüftechnologie zur Untersuchung des Klebeverhaltens von Formmaterialien und Formüberzügen*. *Druckgusspraxis* (2006), S. 13-18.