

# ta-C beschichtete Werkzeuge für die Trockenumformung von Aluminiumblechen

*ta-C coated tools for dry forming of aluminum sheets*

Volker Weihnacht, Andreas Brückner, Sven Bräunling

## Zusammenfassung

Anhand von Streifenziehversuchen wurde die Eignung ta-C beschichteter Werkzeugoberflächen zur Umformung von Aluminiumlegierungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass ta-C, die verschleißfesteste Schichtvariante der diamantartigen Kohlenstoffschichten, auch bezüglich des antiadhäsiven Verhaltens sehr vorteilhaft ist. In Versuchen mit AlMg5Mn- sowie Al99Mg1-Blechen konnten unter Verzicht von Ziehhilfsmitteln mehrere hundert Bleche gezogen werden, ohne dass es zu wesentlichen Aluminium-Anhaftungen am ta-C beschichteten Werkzeug kam. Weder die Reibungskoeffizienten noch die Oberflächenqualitäten der gezogenen Bleche verschlechterten sich in dem beobachteten Zeitraum. Im Vergleich zu Versuchen mit unbeschichtetem Werkzeug und Ziehhilfsmitteln schneidet die Variante ta-C-trocken nahezu ebenbürtig mit einem guten Ziehhilfsmittel ab.

In einem Praxistest, dem Clinchen von Aluminiumblechen, bestätigten sich die positiven Ergebnisse aus den Streifenziehversuchen. Offenbar ist es möglich, mit ta-C beschichteten Clinchstempeln unter völligem Verzicht auf Schmiermittel eine größere Anzahl von Clinchvorgängen durchzuführen, ohne dass es zu merklichen Aluminium-Anhaftungen am Werkzeug und damit zu einer Erhöhung der Abstreifkräfte kommt.

## Abstract

The suitability of ta-C coated tool surfaces for sheet forming of aluminum alloys was examined by strip-draw testing. It was shown that ta-C coatings, which are known as DLC coatings with superior wear resistance are also favourable concerning the anti-adhesive behaviour. In attempts with AlMg5Mn- as well as Al99Mg1-sheet materials several hundred sheets could be formed without noticeable aluminum adhering at the ta-C coated tool surface. Neither the coefficients of friction nor the surface qualities of the aluminum sheets worsened during the observed period. Compared with tests of uncoated tools in combination with lubricants, the dry ta-C coated tool behaves comparable with a good lubricant. In a real clinch test with aluminum sheets the positive results from strip-draw experiments were confirmed. Using ta-C coated clinching stamps and no lubricants a large number of clinching processes could be performed without noticeable adhering and increase of stripping forces.

## 1 Einleitung

Die Verarbeitung von Blechen, insbesondere deren Umformung zu sofort verwertbaren Teilen mit hoher Oberflächenqualität stellt hohe Ansprüche an die Oberfläche der eingesetzten Werkzeuge. So werden zunehmend die oft sehr teuren und komplex geformten Werkzeugoberflächen durch Beschichtungen veredelt, um deren Verschleiß zu reduzieren, Anhaftungen zu verhindern sowie die Reibung zwischen

Werkzeugoberfläche und dem umzuförmenden Blech herabzusetzen. Zusätzlich müssen Schmiermittel eingesetzt werden, um die Reibung zu minimieren, Materialübertrag zu vermeiden und eine ausreichende Standzeit der Werkzeuge zu gewährleisten. Im Anschluss an den Umformprozess sind z. T. kostenaufwändige Reinigungsschritte zur Entfernung der Schmiermittelreste erforderlich.

Kommt es zur Unterbrechung des Schmiermittelfilms (Notlauf) während des Umformprozesses, gleitet die Blechoberfläche über die metallische Werkzeugoberfläche, was aufgrund der Adhäsionsneigung schnell zu Kaltverschweißungen zwischen beiden führen kann. Die Folge ist eine schlechte Oberflächenqualität des umgeformten Bleches, ein hoher Reinigungsaufwand und im ungünstigsten Fall die Zerstörung des Werkzeuges. Deshalb stehen bei der erforderlichen Verbesserung der Umformprozesse nicht nur die Entwicklung von immer besseren Schmierstoffen, sondern auch die Suche nach solchen verschleißbeständigen, reibungsarmen Beschichtungen im Mittelpunkt, die ausreichende Notlaufeigenschaften gewährleisten können. Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, dass eine Beschichtung aus tetraedrischem amorphem Kohlenstoff (ta-C) sogar eine derart geringe Reibung und Adhäsionsneigung aufweist, dass eine reine Trockenumformung in einigen Fällen möglich ist.

## 2 tetraedrischer amorpher Kohlenstoff (ta-C)

Am Fraunhofer IWS Dresden wurden mehrere Verfahren zur Erzeugung von ta-C-Schichten mit dem Produktnamen Diamor<sup>®</sup> entwickelt. Alle basieren auf der Verwendung von gepulsten Vakuumbogenentladungen, die im Gegensatz zu konventionellen Gleichstrombogenverfahren eine zuverlässigere und effizientere Verdampfung von Graphit erlauben [1]. Die neueste Laser-Arco<sup>®</sup>-Technologie erlaubt die langzeitstabile Abscheidung von ta-C-Schichten mit einer zu alternativen PVD- und PECVD-Beschichtungen vergleichbaren Beschichtungsrate [2]. Die Abscheidung der ta-C-Schichten erfolgt im Hochvakuum durch Vakuumbogenverdampfen von festem Graphit. Fast 100% der in ein Plasma überführten Kohlenstoffteilchen sind ionisiert und weisen hohe kinetische Energien (einige 10 eV) auf, was die Grundvoraussetzung für das Entstehen von Diamantbindung in der wachsenden Schichtstruktur darstellt. Eine zweite Voraussetzung für den hohen Diamantbindungsanteil ist eine hinreichend niedrige Beschichtungstemperatur (<150 °C). Damit ist die Beschichtungstemperatur von vornherein auf diese Maximaltemperatur begrenzt.

Ein Charakteristikum von konventionellen ta-C-Schichten ist eine relativ große Schichtrauheit, verursacht durch unvermeidliche, herstellungsbedingte Schichtdefekte. Diese Rauheit kann durch eine mechanische Nachbearbeitung (Glättung) der Schichten beseitigt werden. Die in diesem Beitrag verwendeten ta-C-beschichteten Werkzeugoberflächen wurden entsprechend geglättet.

Die Abscheidung defektfreier Schichten kann durch eine angepasste Beschichtungstechnik, d. h. durch Verwendung von Plasmafiltern erreicht werden. Entsprechend kann auch die Laser-Arco<sup>®</sup>-Technologie mit einem entsprechenden Filtermodul kombiniert werden, welches zukünftig die Abscheidung sehr glatter ta-C-Schichten erlauben wird.

## 3 Streifenziehversuche an Aluminiumblechen

Der Streifenziehversuch stellt einen einfachen Modellversuch zur Nachbildung einer realen Blechumformung dar und kann in unterschiedlichen Formen ausgeführt werden. Er dient zur Ermittlung der Rei-

bungs- (und Verschleiß-) Kennwerte. Dabei ist die Abbildung des Tiefziehprozesses in verschiedenen Bereichen eines realen Tiefziehteiles möglich. Der Streifenzieh-Prüfstand an der TU Dresden stellt einen Umlenkversuch dar und bildet damit die Verhältnisse an einer einfach gekrümmten Ziehkante nach. Es können hohe Flächenpressungen eingestellt werden, wie sie auch im realen Tiefzug an der Ziehkante auftreten. Die wesentlichste Vereinfachung gegenüber dem realen Tiefziehprozess besteht darin, dass die tangentialen Druckspannungen (und der resultierende Werkstofffluss), wie sie z. B. im Eckenbereich eines realen Tiefziehteils auftreten würden, nicht abgebildet werden können.

Bei dem Versuch wird ein Blechstreifen mit Hilfe einer hydraulischen Einrichtung über ein der Ziehkante nachempfundenes Werkzeugsegment gezogen. Das Blech wird mittels hydraulischer Spannzangen fixiert. Der Umformprozess läuft wie folgt ab, siehe Abb. 1: Spannzange 1 wird durch Kolben 1 mit konstanter Geschwindigkeit nach unten bewegt. Spannzange 2 wird so nachgeführt, dass ein vorgegebener Kraft-Zeit-Verlauf an Kolben 2 realisiert wird. Das bedeutet, an Spannzange 2 wird stets über bestimmte Zeitintervalle mit konstanter vordefinierter Kraft gegengehalten. Die erforderliche Zugkraft ergibt sich aus der Gegenkraft und dem Widerstand, den die Reibung an der Ziehkante der Bewegung des Bleches entgegengesetzt.

Für die Untersuchungen wurden Blechstreifen mit einer Breite von 20 mm über die Ziehkante gezogen und erfahren dabei durch das 90°-Umlenken eine Hin- und Zurückbiegung. Pro Versuch wird ein Blechstreifen in 5 aufeinanderfolgenden Kraftstufen fortlaufend (ohne Hubunterbrechung) über die fest eingeschraubte Ziehbacke gezogen. Bei einer nutzbaren Streifenlänge von 400 mm wird bei kontinuierlicher Zugbewegung nach einem Ziehweg von jeweils ca. 80 mm (ausgehend von einem Anfangswert) die Gegenkraft in 4 Stufen sprunghaft erhöht. Damit un-

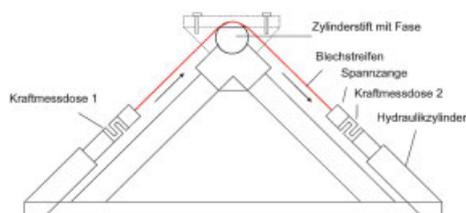


Abb. 1: Schematische Darstellung der Streifenziehvorrichtung.

terliegt der jeweilige Bereich des Blechstreifens einer sich einstellenden Flächenpressung. Dabei wird der Streifen über der Ziehkante elastisch-plastisch deformiert. Der größte Kraftwert wird so eingestellt, dass der betreffende Abschnitt des Blechstreifens über der Ziehkante eine Einschnürdehnung erfährt, jedoch kein Bruch des Streifens eintritt.

Für die Auswertung werden die gemessenen Kräfte  $F_G$  (Gegenkraft) und  $F_Z$  (Zugkraft) in Abhängigkeit der im Belastungsregime vorgegebenen Zeit bzw. des Weges benötigt. Für Eliminierung der Biegeanteile bei der Berechnung von Reibwerten werden zusätzlich Versuche über eine (annähernd reibungsfrei gelagerte) drehbare Rolle durchgeführt.

Mittlere Flächenpressung:

$$p_M = (F_Z + F_G) / (r \cdot b)$$

Ziehkante:

$$F_R = F_Z - F_G \quad f_R = (2/\pi) \cdot \ln(F_Z/F_G)$$

Drehbare Rolle:

$$F_B = F_{ZB} - F_{GB} \quad f_B = (2/\pi) \cdot \ln(F_{ZB}/F_{GB})$$

Superposition:  $\mu = f_R - f_B$

### 3.1 Streifenziehversuche mit AlMg5Mn

Die Versuche erfolgten mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau. Es wurden Versuche mit unbeschichteten Werkzeugen aus 100Cr6 sowie Versuche mit ta-C-beschichteten Werkzeugen (Grundwerkstoff 100Cr6) durchgeführt. Die Versuche mit unbeschichtetem Werkzeug erfolgten mit drei verschiedenen Ziehhilfsmitteln, die Versuche mit der ta-C-Schicht trocken ohne Schmierung. Die Versuche fanden bei Raumtemperatur statt. Die Versuchsbedingungen sind in Tab. 1 zusammengefasst. Es wurden quer zur Walzrichtung geschnittene Blechstreifen aus AlMg5Mn verwendet.

In Abb. 2 sind die Kraftverläufe der Ziehversuche mit ta-C-Schicht (trocken)

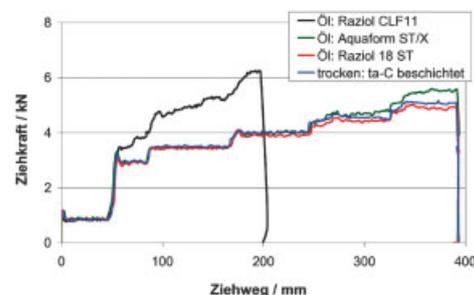


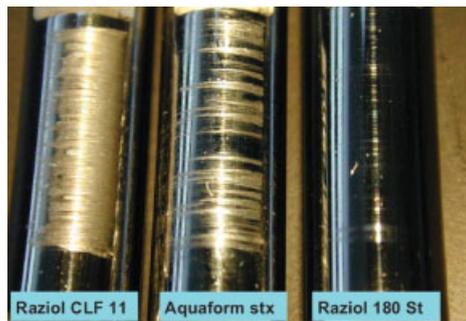
Abb. 2: Resultierende Zugkräfte beim Streifenziehen mit ta-C-beschichtetem Werkzeug (trocken) sowie unbeschichteten Werkzeugen mit verschiedenen Ziehhilfsmitteln.

**Tabelle 1: Versuchsbedingungen beim Streifenziehversuch.**

Blech	AlMg5Mn, Anlieferungszustand trocken, gereinigt Dicke 1,2 mm, Breite 20 mm, Länge 800 mm
Werkzeug	100Cr6-60 ± 2 HRC, geschliffen und poliert, R <sub>z</sub> < 0,5 µm
Ziehhilfsmittel	Beölung ca. 1 g/m <sup>2</sup> – Raziol CLF11 (niedrigviskose mineralölbasiertes Öl) – Raziol 180st (hochviskose hochlegiertes Öl) – Aquaform st/x (wasserbasierten Wachs)
ta-C-Schicht	3 µm ta-C auf 100Cr6, Schicht nachpoliert

denen mit unbeschichteten Werkzeugen und Ziehhilfsmitteln (Parameter siehe Tab. 1) gegenübergestellt. Bei dem mit Raziol CLF11 gezogenen Streifen kommt es zu einem raschen Zugkraftanstieg, auch innerhalb eines vorgegebenen Gegenkräfte-Plateaus. Dies hängt vermutlich mit einer fortschreitenden adhäsiven Wechselwirkung des Bleches mit der Werkzeugoberfläche zusammen. Nach einem vergleichsweise kurzen Ziehweg überstieg die Ziehkraft 6 kN und es kam zum Blechabriss.

Die beiden anderen geschmierten Varianten sowie der Trockenversuch mit ta-C-Schicht verhalten sich im Ziehkraftverlauf sehr ähnlich. Der Kraftverlauf innerhalb der Belastungsplateaus ist relativ konstant, was



**Abb. 3: Oberflächen der unbeschichteten Ziehkanten nach mehreren Streifenziehversuchen AlMg5Mn mit den im Bild angegebenen Ziehhilfsmitteln.**



**Abb. 4: Oberfläche der ta-C-beschichteten Ziehkante nach mehreren Streifenziehversuchen von AlMg5Mn (trocken).**

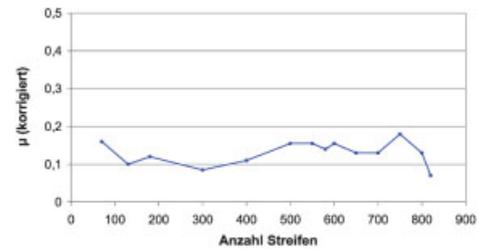
für ein gutes Gleitverhalten spricht. Bei der höchsten Belastungsstufe differenzieren sich die Varianten etwas deutlicher. Am günstigsten schneidet die geschmierte Variante Raziol 180st ab, dicht gefolgt von der Trockenvariante mit ta-C-Schicht. Das Ziehhilfsmittel Aquaform st/x zeigt im Gegensatz dazu ein leicht erhöhtes Kraftniveau.

Im Anschluss an die Versuche erfolgte die optische Begutachtung der Ziehkanten. Die in Abb. 3 und Abb. 4 gezeigten Aufnahmen widerspiegeln die Ergebnisse der Ziehkraftkurven relativ gut. So zeigt die Schmiermittelvariante Raziol CLF11 mit den höchsten Kräften und dem vorzeitigen Blechabriss auch die markantesten Anhaftungen von Aluminium. Der mit Aquaform st/x durchgeführte Versuch erzeugt deutlich weniger Aluminium-Anhaftungen an der Ziehkante, das hochwertige Ziehhilfsmittel Raziol 180st nur noch sehr geringe Spuren von Anhaftungen. Die trocken gezogene Variante zeigt auf der ta-C-Oberfläche keine größerskaligen Anhaftungen, lediglich sehr feinteilige Überträge, die sich in den winzigen Mikrodefekten der ta-C-Schicht befinden. Diese punktuellen Überträge scheinen keinen nachteiligen Effekt auf das Ziehverhalten auszuüben, denn es tritt im Verlauf etlicher Wiederholungen keine signifikante Veränderung der Oberflächenmorphologie auf.

**3.2 Streifenziehversuche mit Al99,9Mg1**

Die Versuche erfolgten mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau (siehe auch Tab. 1). Die Auswahl der außerordentlich weichen und zu Anhaftungen tendierenden Aluminiumsorte Al99,9Mg1 erfolgte, um die Eignung von ta-C-Schichten für die Trockenumformung unter sehr kritischen Bedingungen näher zu beleuchten.

Es wurden über 820 Streifenziehversuche mit demselben ta-C-beschichteten



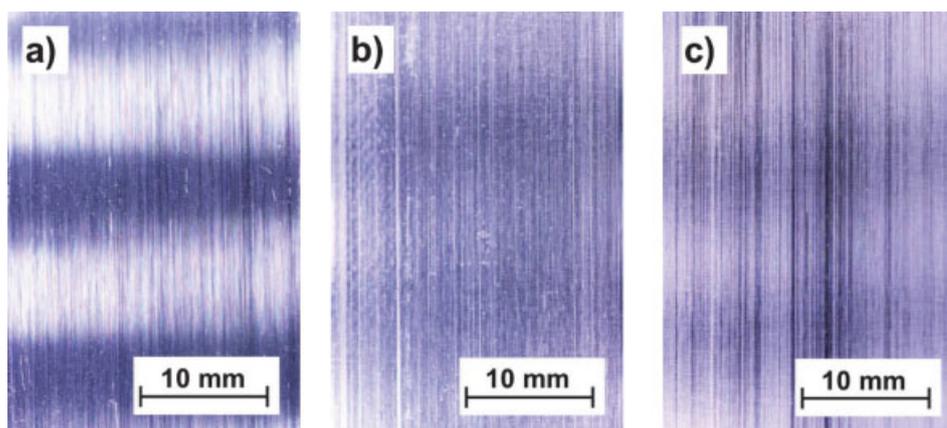
**Abb. 5: Korrigierte Reibwerte bei 25 MPa Pressung über den Verlauf von 820 Streifenziehversuchen mit Al99,9Mg1-Blechen (trocken).**



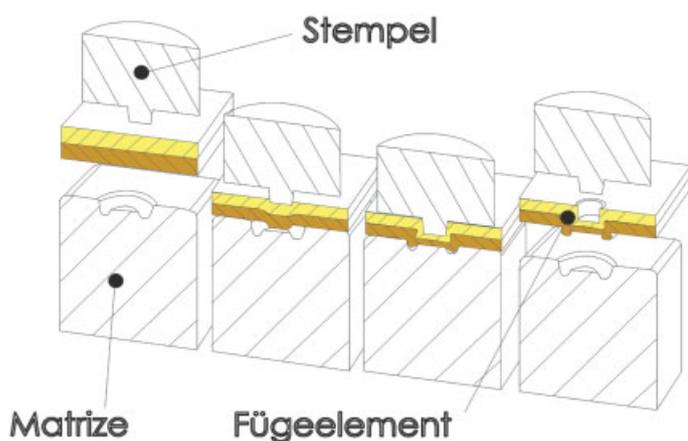
**Abb. 6: Oberfläche des ta-C-beschichteten Werkzeuges nach 820 Streifenziehversuchen von Al99,9Mg1-Blechen (trocken).**

Werkzeug durchgeführt, um das Langzeitverhalten zu analysieren. Abb. 5 zeigt in Auswertung der gemessenen Ziehkraftverläufe die berechneten Reibwerte bei einer Pressung von 25 MPa. Es zeigt sich, dass es innerhalb von 820 Versuchen keinen Anstieg des Reibungskoeffizienten gibt. Die Werte schwanken um einen mittleren Reibwert von 0,15 (die Schwankungen rühren vermutlich von der Messunsicherheit der eigentlich für härtere und dickere Bleche konzipierten Streifenziehanlage her). Auch das optische Erscheinungsbild der ta-C beschichteten Ziehkante nach 820 Versuchen (siehe Abb. 6) spricht für ein stabiles Gleitverhalten ohne nennenswerte Materialüberträge, Aufschweißungen oder Anhaftungen von Aluminium auf die ta-C Schichtoberfläche.

Nach den Versuchen erfolgte auch eine Untersuchung der Blechoberflächen hinsichtlich ihrer topografischen Veränderungen. Die in den Abbildungen 7a bis 7c gegenübergestellten Fotos zeigen (unter seitlichem Lichteinfall) eine deutlich erkennbare Riefenstruktur bereits auf der Ausgangsoberfläche. Nach der Umformung mit stufenweise erhöhter Last bis ca. 20 MPa Flächenpressung sind keine signifikanten Veränderungen zu erkennen. Der mit der höchsten Flächenpressung von bis zu ca. 35 MPa gezogene Bereich weist hingegen eine Verstärkung der Riefen-



**Abb. 7:** a: Blechoberfläche Anlieferungszustand  
b: Blechoberfläche gezogen über ta-C trocken mit  $p_M = 20 \text{ N/mm}^2$   
c: Blechoberfläche gezogen über ta-C trocken mit  $p_M = 35 \text{ N/mm}^2$



**Abb. 8:** Schematische Darstellung des einstufigen Clinchens mit starrer Matrize

struktur auf. Für Anwendungen mit hohen Ansprüchen an die Oberfläche ist diese Qualität u. U. nicht ausreichend.

#### 4 Clinchversuche mit Aluminiumblechen

Clinchen ist der Oberbegriff für die umformtechnischen Fügeverfahren, bei denen unlösbare Verbindungen ohne Zusatzwerkstoff und Wärmeeinwirkung aus dem Material der zu verbindenden Teile erzeugt werden. Das Clinchen beruht auf örtlicher plastischer Umformung von Blech-, Rohr-, Profil- und Gussteilen durch die Einwirkung eines in der Regel aus Stempel und Matrize bestehenden Werkzeugsatzes (siehe Abb. 8). Das Verbinden von Aluminiumblechwerkstoffen mittels Clinchen ist eine sehr günstige Fertigungsverfahren. Allerdings bereitet das prozesssichere Clinchen dickerer Aluminiumbleche ( $s < 1,5 \text{ mm}$ ) immer noch Schwierigkeiten, insbesondere dann, wenn die Bleche ölfrei bzw. gebeizt sind. Dabei sind starke Kaltaufschweißungen von Fügeelementwerkstoff an den Mantelflä-

chen der Fügeelemente zu beobachten (Abb. 10a). Diese Materialanlagerung führt zu einem drastischen Anstieg der Abstreifkräfte sowie zur extremen Streuung der Werte im Vergleich zu Stahlwerkstoffen. Durch die partielle Schädigung des Fügepunktes ergeben sich eine Reihe negativer Effekte, wie das Entstehen von Kerben und Rissen im Fügeelement (Abb. 11a). Bei dynamischer Belastung eines derart geschädigten geclinchten Bauteils können die vorhandenen Kerben zu einem beschleunigten Anriss und somit zur Verkürzung der Lebensdauer des Bauteils führen.

Für diese Fügeaufgaben existieren bislang nur Einzel- bzw. Sonderlösungen, die

mit erhöhtem konstruktivem Aufwand verbunden sind, wie z. B. der Verwendung zusätzlicher Niederhaltereinrichtungen und/oder einer zusätzlichen Minimalmen-Schmiereinrichtung. Diese Maßnahmen erhöhen jedoch die Kosten des ansonsten kostengünstigen und robusten Verfahrens erheblich.

Eine adhäsionshemmende Beschichtung des Fügeelementes zur Verhinderung von Kaltaufschweißungen stellt daher eine anstrengenswerte Lösung dar. Sie würde die Kosten für das Fügeverfahren nur minimal erhöhen und keine konstruktiven Anordnungsprobleme verursachen. Aus diesem Grund beschäftigten sich schon viele Untersuchungen mit der Suche nach einer geeigneten Werkzeugwerkstoff - Beschichtungskombination. Bisher führten jedoch alle bekannten Untersuchungen noch zu keiner durchgängigen Lösung der Probleme beim Clinchen von Aluminium.

Mit der oben beschriebenen ta-C-Schicht wurden deshalb Vorversuche zur Eignung der Schicht als Adhäsionshemmer für das Clinchen von Aluminiumwerkstoffen durchgeführt. Dabei wurde ein konventionell gefertigter Clinchstempel mit einem identisch gefertigten, jedoch mit ta-C beschichteten Stempel, verglichen. Die relevanten Parameter sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Nach einer ersten Versuchsreihe mit sehr dünnen Blechen (0,7 mm) wurde die Blechpaarung Al99,5 - 1,5 mm / DC04 - 1,5 mm geclincht. Dabei war an dem unbeschichteten Fügeelement innerhalb weniger Versuche der Übertrag von Aluminium auf den Stempel so erheblich, dass die Abstreifkräfte schnell das Niveau des Standardabstreifers der Fügeeinrichtung (Stufe 4 - vgl. Abb. 9) überschritten. Beim ta-C beschichteten Stempel wird die Kraftstufe 3 erst nach ca. 150 Teilen erreicht, es ist daher bei einer deutlich höheren Versuchszahl von einer Stabilisierung zwischen der Stufe 3 und 4 auszugehen.

Um die Belastung des Stempels noch weiter zu erhöhen wurde in einer dritten

**Tabelle 2: Versuchsbedingungen beim Clinch-Test.**

Blech	- Aluminiumbleche im Anlieferungszustand trocken, mit Azeton entfettet + Stahlblech, Tiefziehgüte (1) Al99,9Mg1, Dicke 0,7 mm + DC04, Dicke 1,5 mm (2) Al99,5 W7, Dicke 1,5 mm + DC04, Dicke 1,5 mm (3) AlMgSi1, Dicke 2,0 mm + DC04, Dicke 1,15 mm
Werkzeug	Clinchstempel, PM-Stahl - 64 HRC, hartgedreht
ta-C-Schicht	2 $\mu\text{m}$ ta-C auf PM Stahl, Schicht nachpoliert

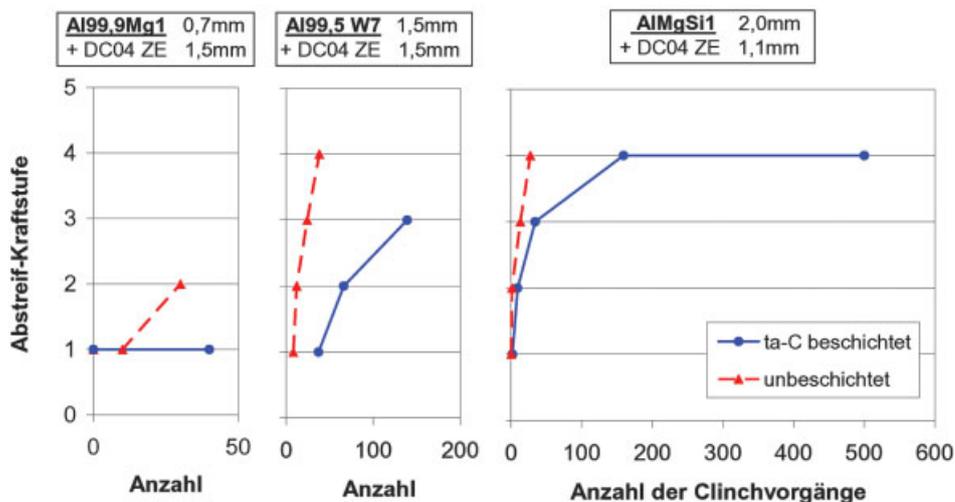


Abb. 9: Vergleich der gemessenen Abstreifkräfte bei trocken-Clinchversuchen mit unbeschichteten und ta-C-beschichteten Clinchstempeln.

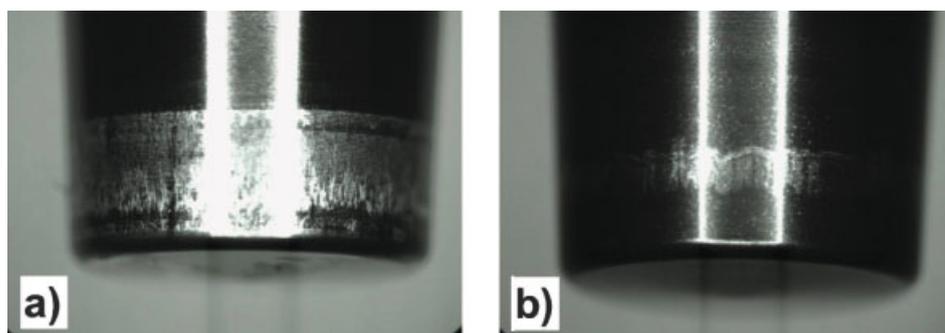


Abb. 10: a: Unbeschichtete Clinchstempel nach 4 Teilen. b: Mit ta-C-beschichteter Clinchstempel nach 100 Teilen.

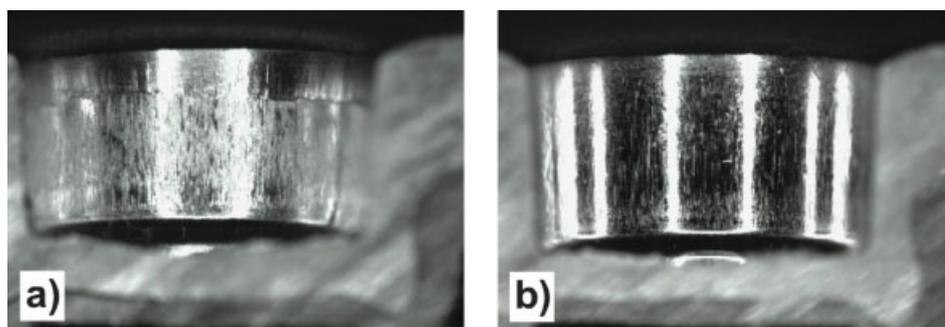


Abb. 11: a: Clinchnapf mit unbeschichteten Stempel nach 4 Teilen. b: Clinchnapf mit ta-C-beschichteten Stempel nach 100 Teilen.

Versuchsreihe ein Fügepaarung mit AlMgSi1 und einer relativ großen Blechdicke von 2,0 mm untersucht. Für den unbeschichteten Stempel sind dabei schon wie in Versuchsreihe 2 bereits nach wenigen Fügungen starke Adhäsion (vgl. Abb. 10a) und das Überschreiten des standardmäßigen Abstreifkraftniveaus zu verzeichnen. Für den ta-C-beschichteten Stempel sind zwar ebenfalls minimale Anlagerungen von Fügepartikelwerkstoff zu verzeichnen, die sich

jedoch nicht in so großem Maße auf das Niveau der Abstreifkraft (vgl. Abb. 9) auswirken. Vielmehr kam es bisher zu einem stochastischen Selbstreinigen des Stempels. Die ta-C-Schicht hat zudem eine positive Wirkung auf die Oberfläche des Clinchnapfes. Diese ist im Vergleich zu der ohne Beschichtung gefügten wesentlich glatter und weniger zerklüftet (vgl. Abb. 11a und 11b).

Sollten sich diese Ergebnisse auch über eine wesentlich größere Versuchszahl ( $10^4$  bis  $10^5$ ) sowie für andere Werkstoffpaarungen bestätigen, wäre für das Clinchen von trockenem Aluminium ein Kosten reduzierender und Prozesssicherheit steigender Lösungsvorschlag gefunden.

**Literatur**

[1] B. Schultrich, H.-J. Scheibe: Neuere Entwicklungen bei harten Kohlenstoffschichten. Jahrbuch Oberflächentechnik, Bd. 56, Giesel-Verlag, Isernhagen (2000), S 97-116  
 [2] Scheibe, H.-J., Leonhardt, M., Leson, A., Meyer, C.-E., Laser-Arc-Modul (LAM), Metalloberfläche 61 (2007) 4, 45

**Autoren**

Dr.-Ing. Volker Weihnacht, Jahrgang 1971, Studium der Werkstoffwissenschaft in der Vertiefungsrichtung Metallkunde an der TU Bergakademie Freiberg. Doktorand am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW), Promotion 2001. Anschließend Wechsel zum Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden (IWS). Seit 2007 Leiter der Arbeitsgruppe Kohlenstoffschichten in der Abteilung PVD- und Nanotechnologie. Derzeitiger Arbeitsschwerpunkt: Entwicklung von ta-C-basierten Schichtsystemen für verschiedene tribologische Anwendungen.

Dipl.-Ing. Andreas Brückner, Jahrgang 1981, Studium der Werkstoffwissenschaft in der Vertiefungsrichtung Funktionswerkstoffe an der TU Dresden. Diplomarbeit zur Entwicklung von PVD-Schichten auf Werkzeugen für die schmierstofffreie Aluminium- und Magnesium-Blechumformung, bearbeitet am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden (IWS), 2006. Seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung PVD- und Nanotechnologie. Derzeitiger Arbeitsschwerpunkt: Entwicklung von ta-C-basierten Schichtsystemen für verschiedene tribologische Anwendungen.

Dipl.-Ing. Sven Bräunling, Jahrgang 1970, Studium der Fertigungstechnik an der TU Dresden, seit 1995 Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik. Seit 2003 Leiter der Arbeitsgruppe umformtechnisches Fügen.

**Kontakt:**

Dr.-Ing. Volker Weihnacht  
 Abt. PVD- und Nanotechnologie  
 Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik  
 Winterbergstr. 28  
 01277 Dresden  
 Volker.Weihnacht@iws.fraunhofer.de