

# **SURFACE ENGINEERING VON ATMOSPHERISCH PLASMAGESPRITZTEN WC-12Co SCHICHTEN**

W. Tillmann, E. Vogli, B. Krebs

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund

## **Kurzfassung**

Zur Herstellung von endkonturnahen, maßgenauen und hochverschleißfesten Umformwerkzeugoberflächen wird ein Verfahren entwickelt, welches einen thermischen Spritzprozess mit einem in-situ Walzprozess kombiniert. Auszüge der dafür nötigen Grundlagenuntersuchungen werden in dieser Publikation vorgestellt. Thermische WC-12Co Spritzschichten wurden unter Verwendung von statistischen Versuchsplanungsmethoden optimiert und damit an das Anforderungsprofil von Umformwerkzeugen angepasst. Des Weiteren wurden verschiedene regelgeometrische Bauteile beschichtet, mit dem Ziel, Daten zur Beschichtung von Freiformflächen zu generieren. Anschließend wurden WC-12Co Spritzschichten hinsichtlich ihrer Bearbeitbarkeit durch einen Festwalzprozess untersucht.

Stichwörter: Surface Engineering, atmosphärisches Plasmaspritzen, Regelgeometrie, Walzen, WC-12Co

## **1 Einleitung**

Die industrielle Fertigung von Umformwerkzeugen basiert heutzutage hauptsächlich auf zeit- und kostenintensiven Zerspanungsprozessen. Zur Einstellung der geforderten Oberflächengüte der Umformwerkzeuge werden in der Regel viele unterschiedliche Prozessschritte durchgeführt. Stand der Technik ist hierbei bislang, dass ein Großteil der Fertigungsschritte händisch vorgenommen wird und folglich von dem Geschick und der Erfahrung des Werkzeugmachers abhängt. Darüberhinaus steigen die tribologischen Anforderungen an die Werkzeuge, da besonders in der Automobilindustrie vermehrt hochfeste Stähle umgeformt werden. Unbeschichtete Werkzeuge verschleißern bei der Umformung hochfester Stähle stark und müssen daher nach relativ geringen Einsatzzeiten nachbearbeitet oder sogar ausgetauscht werden.

# **ROBOTERGESTÜTZTE BESCHICHTUNG REGELGEOMETRISCHER OBERFLÄCHEN MITTELS FEINSTSTRUKTURIERTER WC-12Co VERSCHLEIßSCHUTZSCHICHTEN**

W. Tillmann, E. Vogli, I. Baumann

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund

## **Kurzfassung**

Der Verschleißschutz von Umformwerkzeugen mittels thermischer gespritzter Cermetschichten ist ein neuer und zugleich vielversprechender Ansatz im Bereich des Surface Engineerings. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die hohe Maß- und Formgenauigkeit der Werkzeugkonturen auch nach dem Schichtauftrag erhalten bleibt. Aus diesem Grunde spielen der Einsatz und die Untersuchung neuer Konzepte zur endkonturnahen Beschichtung eine wichtige Rolle. In dieser Studie wurden dazu die Potentiale des Beschichtens komplexer regelgeometrischer Bauteile unter Verwendung feiner WC-Co Pulver ( $- 8 + 1 \mu\text{m}$ ) beim Hochgeschwindigkeitsflammspritzen untersucht.

Stichwörter: Regelgeometrische Oberflächen, feine WC-Co Pulver ( $- 8 + 1 \mu\text{m}$ ), feinst strukturierte Verschleißschutzschichten, endkonturnahes Beschichten

## **1 Einleitung**

Die Umformtechnik zählt zu den wichtigsten und vielseitigsten Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Blechwerkstoffen und Massivmaterialien. In den letzten Jahren sind dabei die Anforderungen an die Umformwerkzeuge hinsichtlich ihrer Performance, Größe, geometrischer Komplexität sowie ihrer Genauigkeit deutlich gestiegen. Dies resultiert nicht zuletzt aus dem zunehmenden Einsatz höher fester Blechwerkstoffe [1], welche im Bereich des Leichtbaus für die Herstellung von Bauteilen mit neuartigen Struktur- und Funktionseigenschaften genutzt werden. Das sich hieraus ergebende komplexe Beanspruchungsprofil hat jedoch einen steigenden Verschleiß der Umformwerkzeuge und eine Herabsetzung der Lebensdauer zur Folge [2,3,4]. Um dies zu vermeiden, ist der Einsatz geeigneter Verfahren zum Schutz der Werkzeugoberflächen erforderlich.

Das thermische Spritzen bietet ein hohes Potential zur Erzeugung neuartiger verschleißbeständiger Oberflächen für Werkzeuge der Umformtechnik, welche hohen mechanischen Beanspruchungen und intensiver Reibung ausgesetzt sind [5,6]. Um den steigenden Anforderungen an die Performance der Werkzeuge im Umformprozess, der Komplexität der Werkzeugkonturen sowie deren Maß- und

# **OPTIMIERUNG DER FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN THERMISCH GESPRITZTER SCHICHTOBERFLÄCHEN DURCH INKREMENTELLES WALZEN**

V. Franzen, A. Brosius, A.E. Tekkaya,

Institut für Umformtechnik und Leichtbau, TU Dortmund

## **Kurzfassung**

Dieser Beitrag stellt die Untersuchung der umformtechnischen Nachbearbeitung thermisch gespritzter Werkzeugbeschichtungen durch inkrementelle Walzprozesse vor. Die Werkzeugbeschichtungen sollen in Tiefziehwerkzeugen eingesetzt werden, wobei sie hohen tribologischen Belastungen, die bei der Umformung hochfester Blechwerkstoffe entstehen, standhalten müssen. Hartstoffhaltige thermisch gespritzte Beschichtungen bieten eine hohe Verschleißfestigkeit, sind jedoch prozessbedingt zunächst rau und porös und erfordern daher eine Nachbearbeitung zur Glättung und gegebenenfalls Verdichtung der Schicht. Ein inkrementeller Walzprozess ermöglicht sowohl die Glättung und Kompaktierung, als auch eine Texturierung der beschichteten Oberfläche. Die inkrementelle Prozessführung erlaubt hierbei eine äußerst flexible Bearbeitung der Oberfläche. Somit können definierte Oberflächeneigenschaften eingestellt werden, um durch angepasste Reibverhältnisse den Materialfluss im Formgebungsprozess gezielt zu beeinflussen. Durch die plastische Umformung in der Beschichtung werden zudem Druckeigenstressungen in die Randzone eingebracht, wodurch eine Rissgefahr (z.B. durch Poren, die als Kerben wirken können oder durch Zugeigenstressungen, die nach dem Beschichtungsprozess auftreten), deutlich reduziert werden kann.

Stichwörter: Blechumformung, Werkzeugbeschichtung, Glattwalzen

## **1 Einleitung**

Bei der Umformung hochfester Blechwerkstoffe sind die formgebenden Werkzeuge lokal sehr hohen Belastungen ausgesetzt. Um ein besseres Verschleißverhalten der Werkzeuge zu erzielen, werden vermehrt keramische Werkstoffe im Werkzeugbau eingesetzt. Dabei werden sowohl komplette Werkzeuge aus Keramiken gefertigt, als auch stählerne Grundkörper an der Oberfläche beschichtet [1, 2]. Ein wirtschaftliches und flexibles Beschichtungsverfahren ist das thermische Spritzen, da es hohe Materialauftragsraten ermöglicht und hinsichtlich der Auswahl an Beschichtungswerkstoffen eine hohe Vielfalt bietet. Hierbei werden hartstoffhaltige Spritzdrähte oder Pulver aufgeschmolzen und mithilfe eines Trägergases auf das zu beschichtende Werkstück aufgebracht, wo sie zu einer

# **UNTERSUCHUNGEN ZUR PROZESSFÜHRUNG BEIM ROBOTERGESTÜTZTEN THERMISCHEN SPRITZEN KOMPLEXER GEOMETRIEN**

B. Kuhlenkötter, C. Scheele

Lehrstuhl für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung, TU Dortmund

## **Kurzfassung**

Der Einsatz von thermisch gespritzten Hartstoffschichten zum Verschleißschutz von Oberflächen ist ein bewährtes Verfahren zur Erhöhung der Standzeiten von Werkzeugen und anderen Bauteilen. Die Anwendung dieses Verfahrens auf Umformwerkzeuge ist jedoch ein neuartiger Ansatz des Surface Engineerings, bei dem die Anforderungen an die Maßhaltigkeit und Formtreue der resultierenden Werkzeugkontur sehr hoch sind. Aufgrund der komplexen Geometrien der Umformwerkzeuge sind die bisherigen Verfahren für das Aufbringen von Schichten nicht unmittelbar geeignet. In den hier betrachteten Versuchen wird das robotergestützte Aufbringen von Verschleißschutzschichten auf komplexe regelgeometrische Bauteile unter Verwendung verschiedener Spritzbrenner untersucht.

Stichwörter: Roboter, oberflächenbasierte Werkzeugführung, thermisches Spritzen, endkonturnahes Beschichten

## **1 Einleitung**

Die zunehmende Verwendung und Herstellung von hoch- und höherfesten Blechwerkstoffen [1] und daraus gefertigten Werkstücken wirkt unmittelbar auf die zugrundeliegende Prozesskette zurück. Insbesondere bei umformtechnischen Verfahren sind die Anforderungen an die verwendeten Werkzeuge mit Hinblick auf die Feingliedrigkeit der Geometrie und die maximal erlaubten Toleranzen der gefertigten Bauteile sehr hoch. Die höhere Festigkeit der eingesetzten Werkstoffe und die steigende Komplexität der zu fertigen Teile führen zu gegenläufigen Effekten bei den verwendeten Werkzeugen: Trotz des durch den umzuformenden Werkstoff bedingtem höheren Verschleißes bei den Fertigungswerkzeugen steigen die Anforderungen an die Herstellungsgenauigkeiten. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen führt dies zwangsweise zu geringeren Standzeiten der eingesetzten Werkzeuge. Ein Lösungsansatz für diese Problemstellung bietet die Anwendung von Verfahren zum Verschleißschutz der Werkzeugoberfläche.

Das thermische Spritzen auf Oberflächen, um diese mit einer Hartstoffbeschichtung zu versehen, bietet für Werkzeuge der Umformtechnik einen Ausweg aus der oben dargestellten Problemsituation, welche im Rahmen des Sonderforschungsbereichs

# **EINSATZ VON SCHLEIFSTIFTEN AUF BEARBEITUNGSZENTREN ZUR HERSTELLUNG VON BESCHICHTETEN TIEFZIEHWERKZEUGEN -SIMULATION UND PRAXIS-**

D. Biermann<sup>1)</sup>, H. Blum<sup>2)</sup>, H. Kleemann<sup>2)</sup>, T. Mohn<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund

<sup>2)</sup>Lehrstuhl für Wissenschaftliches Rechnen, TU Dortmund

## **Kurzfassung**

Der Beitrag gibt eine Übersicht über die Fortschritte in der Entwicklung einer geeigneten Prozessführung sowie der Simulation eines Schleifprozesses zur Bearbeitung thermisch gespritzter Schichten auf Bearbeitungszentren. Experimentelle Untersuchungen dienen dem Aufbau einer Datenbasis über auftretende Prozesskräfte und Oberflächenkenngrößen in Abhängigkeit von der Prozessführung, die neben der Prozessoptimierung die Grundlage zur Kalibrierung des hybriden Simulationssystems bildet.

Die Finite-Elemente-Simulation wurde zu einem dynamischen reibungsbehafteten gekoppelten Modell erweitert, so dass die wesentlichen Prozesskräfte abgebildet werden können. Dazu wurde die automatische Generierung von Finite Elemente Netzen aus Nagelbrettern komplettiert. Spezielle Randapproximationen wurden auf ihren Einfluss in der Simulation untersucht.

Stichwörter: Schleifen, statistische Versuchsplanung, Oberflächenmesstechnik, Simulation, FEM

## **1 Experimentelle Untersuchungen**

Die in [1] und [2] dargestellten Arbeiten innerhalb des Teilprojektes A5 haben zu einer Festlegung auf keramisch gebundene CBN-Schleifwerkzeuge für die weiteren Untersuchungen im SFB 708 geführt, da Abrichtversuche mit kunstharzgebundenen CBN-Schleifstiften unter Einsatz einer Sinterdiamantformrolle zur Zerstörung des Abrichtwerkzeuges führten.

Aufbauend auf der Erprobung verschiedener Werkzeuge und der Ermittlung qualitativer Prozesszusammenhänge in früheren Arbeiten wurde die Datenbasis zum Schleifen thermisch gespritzter Hartstoffschichten um quantitative Zusammenhänge erweitert.

Im Fokus standen hierbei die erreichbare Oberflächenqualität und die auftretenden Prozesskräfte in Abhängigkeit von der Schleifprozessführung für das Schleifen mit zylindrischen Werkzeugen. Hierbei wurden der auftretende Werkzeugverschleiß sowie eine Erhöhung des Überdeckungsgrades durch Ausfeuern der Oberflächen

# REALDATENBASIERTE SIMULATIONSMODELLIERUNG BEIM THERMISCHEN SPRITZEN

T. Wiederkehr, H. Müller

Lehrstuhl für Graphische Systeme, TU Dortmund

## Kurzfassung

Realdatenbasierte Simulationen zeichnen sich dadurch aus, den zu simulierenden Prozess auf Basis von Daten zu modellieren, welche aus realen Experimenten gewonnenen wurden. In diesem Beitrag wird zunächst ganz allgemein der Entwicklungsprozess einer realdatenbasierten Simulation beschrieben und anschließend auf die Simulation des thermischen Spritzens übertragen. Grundlage bildet dabei eine Datenbasis aus Spritzfootprints, welche als analytisches oder Lookup Table basiertes Auftragsmodell genutzt werden kann. Ein Vergleich zwischen real gespritzten, eingescannten Höhenprofilen und dem mit der Simulation erzielten Ergebnis zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung.

Stichwörter: Simulation, Auftragsmodell, Footprint, Validierung

## 1 Realdatenbasierte Simulation

Computersimulationen technischer Prozesse werden in der Regel mit dem Ziel entwickelt, bei der Konzeption neuer Produkte den Fertigungsablauf im Vorhinein planen und somit Kosten für reale Testreihen minimieren zu können. Des Weiteren können Simulationen einen wertvollen Beitrag zur Vertiefung des Prozessverständnisses liefern, da der Prozess detailliert analysiert werden muss, um das zur Entwicklung eines Simulationsmodells benötigte Wissen zu erlangen. Kern bei einer realdatenbasierten Simulationsmodellierung ist die Durchführung von realen Experimenten, zum einen zur Gewinnung einer grundlegenden Datenbasis für die Simulation und zum anderen für den Vergleich mit den in äquivalenten Simulationsläufen erzielten Ergebnissen (Abb. 1).

In der Entwicklungsphase einer Simulation sind diese Vergleichsexperimente besonders wichtig, um freie Parameter der Simulation so zu kalibrieren, dass die Simulation den Prozess möglichst exakt abbildet. Ganz allgemein wird dabei das der Simulation zu Grunde liegende Prozessmodell validiert, d.h. es wird geprüft, ob die entwickelte Simulation auf Basis des angewandten Modells in der Lage ist, den Prozess innerhalb vorgegebener Toleranzen abzubilden. Sollte dies nicht der Fall sein, muss das bestehende Modell angepasst beziehungsweise ein neues



# **DETAILLIERTE ANALYSE DER FRÄSBEARBEITUNG VON FREIFORM- BAUTEILEN MIT HILFE EINES MULTISKALIGEN SIMULATIONSSYSTEMS**

A. Zabel, S. Odendahl, A. Peuker,

Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund

## **Kurzfassung**

Der Wunsch nach Effizienz und Prozessstabilität in der Kleinserienfertigung von Formwerkzeugen in komplexen Prozessketten, wie der des SFB 708, führt zu hohen Anforderungen an die Prozessplanung. Aus diesem Grund wurde ein multiskaliges Frässimulationssystem entwickelt, welches die Vorteile verschiedener Modellierungsansätze in sich vereint. Mit diesem Simulationssystem ist es möglich, komplette Bearbeitungsschritte effizient mithilfe eines Multi-Dexel-Board-Modells zu simulieren und falls es erforderlich ist zu einem detaillierteren Simulationsmodell umzuschalten, um genauere Informationen über die Schnittkräfte und das dynamische Verhalten der Maschine zu erhalten. Diese detaillierte Analyse verwendet ein auf der Constructive-Solid-Geometry-Technik basierendes Modell, mit dem außerdem die erzeugten Oberflächenstrukturen vorhergesagt werden können.

Stichwörter: Simulation, Fräsen, Geometrische Modellierung

## **1 Einleitung**

Die komplexe Prozesskette des SFB 708, beginnend mit der Fräsbearbeitung von Freiformbauteilen, erfordert eine effiziente Produktion und Prozessstabilität, um die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses zu gewährleisten. Dies stellt jedoch hohe Anforderungen an die vorgelagerte Prozessplanungsphase. Mithilfe einer umfassenden Frässimulation können Probleme schon im Vorfeld erkannt werden und außerdem zusätzliche Funktionalitäten wie z. B. Vorschubanpassung und Oberflächenoptimierung zur Verfügung gestellt werden. Die Simulation aller Aspekte des Prozesses ist jedoch eine sehr umfangreiche Aufgabe [1]. Daher wurden verschiedene Modellierungstechniken miteinander kombiniert, um einzelne Aspekte getrennt voneinander untersuchen zu können und damit die Dauer und den Aufwand der Prozessplanungsphase zu reduzieren. In diesem Artikel werden zunächst die zugrundeliegenden Modellierungstechniken für Werkzeug und Werkstück dargestellt. Nach der Beschreibung des multiskaligen Gesamtsystems stehen dann die Ergebnisse der experimentellen Validierung und der Abstimmung der verschiedenen Modelle aufeinander im Mittelpunkt, insbesondere hinsichtlich der Schnittkraftberechnungen als eine der wesentlichen zu bestimmenden Prozessgrößen.

## **ABSCHMELZVERHALTEN VON FÜLLDRÄHTEN IM LICHTBOGENSPRITZPROZESS**

W. Tillmann, E. Vogli, M. Abdulgader

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund

### **Kurzfassung**

Beim Lichtbogenspritzprozess (LiBo) spielen die Spritzparameter eine entscheidende Rolle beim Abschmelzverhalten des Spritzzusatzes und den daraus entstehenden Spritzpartikeln. Die einstellbaren Spritzparameter bestimmen das kinetische und thermische Verhalten der erzeugten Spritzpartikeln. Die Partikelentstehung wird ebenfalls durch den eingesetzten Drahttyp stark beeinflusst. Bei den Fülldrähten hat die Pulverfüllung einen maßgeblichen Einfluss auf das Abschmelz- und Zerstäubungsverhalten. Um präzisere Modelle hinsichtlich der LiBo-Prozessoptimierung aufzustellen und gezielt darauf Einfluss zu nehmen, wurden in dieser Studie die Wirkungen von einstellbaren Spritzparametern auf das Abschmelzverhalten und die Partikelentstehung bei verschiedenen Drahttypen untersucht und miteinander verglichen. In dieser Arbeit wird beim Einsatz von Fülldrähten zusätzlich der Einfluss von unterschiedlicher Korngrößenverteilung in der Pulverfüllung auf das Abschmelzverhalten untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse sind sowohl für die Modellierung und Simulation von Lichtbogenspritzprozessen mit Fülldrähten als auch für die Modifikation der Zerstäubungsdüsen sehr wichtig.

Stichwörter: Abschmelzverhalten, Partikelentstehung, Fülldrähte, Korngrößen

### **1 Einleitung**

Bei den thermischen Spritzprozessen kommt es durch die Überlagerung vieler einzelner Spritzpartikel zur Ausbildung einer Spritzschicht mit Eigenschaften, die primär von den Partikelcharakteristika (Partikelgröße, -temperatur und -geschwindigkeit) der auftreffenden Einzelpartikel abhängen[1-7]. Die Spritzpartikel sind ein Produkt der Zerstäubung von abgeschmolzenen Spritzzusätzen. Die Partikelentstehung im thermischen Spritzen ist verfahrensspezifisch und hängt maßgeblich von dem verwendeten Spritzzusatzwerkstoff ab. In Spritzverfahren, bei denen Pulver als Spritzzusatz verwendet wird, werden die Partikelcharakteristika von der Korngrößenverteilung der zu verspritzenden Pulver vorbestimmt [5, 6,11]. Durch die eingebrachte thermische Energie werden die meisten injizierten Pulverpartikel abgeschmolzen. Gleichzeitig bewirkt die kinetische Energie die Zerstäubung der abgeschmolzenen Pulverpartikel. Bei Spritzverfahren, bei denen Drähten oder Stäbe als Spritzzusatz verwendet werden, werden die Partikel vom Schmelzbad an der Draht- bzw. Stabspitze vom Zerstäubungsgas zerrissen und



# **ROBOTERBAHNPLANUNG UNTER BERÜCKSICHTIGUNG SPEZIFISCHER RANDBEDINGUNGEN DES THERMISCHEN SPRITZENS**

A. Kout, H. Müller

Informatik VII (Graphische Systeme), TU Dortmund

## **Kurzfassung**

In dem Aufsatz wird zunächst die Notwendigkeit spezieller Bahnstrategien für das thermische Beschichten dargelegt. Ein grundsätzlicher Ansatz zur Erfüllung dieser Anforderungen sind trochoidale Bahnen. Es werden Ansätze zur Planung trochoidaler Bahnen für das thermische Beschichten präsentiert, die durch Simulation und Experiment evaluiert werden.

Stichwörter: Bahnplanung, Trochoidal, Thermisches Spritzen

## **1 Einleitung**

Die Aufgabe des roboterbasierten thermischen Beschichtens besteht darin, eine das Werkstück überdeckende Bahn für die Spritzpistole zu erstellen, welches eine vorgegebene Beschichtung auf dem Werkstück erzeugt. Dazu muss jeder Punkt auf dem Werkstück von dem Werkzeug auf der Bahn beeinflusst werden, was meistens durch die Vorgabe eines Maximalabstands zur Bahn erreicht wird.

Für die allgemeine Bahnplanung einer Werkstücküberdeckung existieren bereits zahlreiche Ansätze [1,2], die jedoch für das roboterbasierte thermische Beschichten weitestgehend ungeeignet sind, da die Geschwindigkeitsanforderungen meistens nicht erfüllt werden können.

Eine Bahnstrategie, die sich im Bereich der Hochgeschwindigkeitszerspanung entwickelt wurde und hier weiter verfolgt wird, sind trochoidale bzw. verwandte Bahnen [3]. Dabei bewegt sich das Werkzeug auf kreisförmigen Bahnen, die eine glattere Bewegung ermöglichen und für den Zerspanungsprozess auch Vorteile bieten. Diese Strategie konzentriert sich unseres Wissens bisher nur auf spanende Verfahren, so dass die speziellen Randbedingungen des Beschichtens unberücksichtigt bleiben.

In Kapitel 2 wird die Notwendigkeit für eine spezielle Bahnstrategien für das Beschichten dargelegt. Die Konstruktion der trochoidalen Bahnen sowie deren Anpassung an das Beschichten wird dort ebenfalls geschildert. In Kapitel 3 wird die trochoidale Bahnstrategie durch Simulation und Experiment evaluiert.

## **MODELLIERUNG UND SIMULATION DES HETEROGENEN MATERIALVERHALTENS IN THERMISCH GESPRITZTEN SCHICHTEN**

B. Klusemann, C. Hortig, B. Svendsen,  
Institut für Mechanik, TU Dortmund

### **Kurzfassung**

Im Fokus dieser Forschungsarbeit steht die Untersuchung des umformtechnischen Verhaltens und die gezielte Beeinflussung von thermisch gespritzten Schichten durch inkrementelle Walzprozesse zur Anpassung der Eigenschaften an die Anforderungen des Tiefziehprozesses. Als Beitrag wird das mikrostrukturelle Verhalten der Beschichtung analysiert. Hierzu wird ein Verfahren der Bildverarbeitung vorgestellt, mittels dessen Informationen von mikrostrukturellen Schliffbildern in ein Finite-Element-Modell transferiert werden können. Die daraus resultierenden Modelle werden zur Analyse der effektiven elastischen Eigenschaften der Beschichtung genutzt, welche mit Ergebnissen aus der Homogenisierungstheorie verglichen werden. Desweiteren wird die Eigenspannungsentwicklung während des Abkühlvorgangs an diesen Mikrostrukturen und die daraus resultierenden Folgen für den Walzprozess untersucht.

Stichwörter: FEM, Mikrostruktur, Bildverarbeitung, Eigenspannungen, Walzprozess, Homogenisierung

### **1 Einleitung**

Thermisch gespritzte Beschichtungen werden oftmals genutzt um die Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Bauteilen zu erhöhen. Bei dem hier benutzten thermischen Spritzprozess handelt es sich um das Lichtbogenspritzen mit Fülldraht, welcher der Spritzprozess mit der höchsten Auftragsrate ist. Bei dem benutzten Fülldraht handelt es sich um AS-850, einen Metall-Matrix-Verbundwerkstoff auf Eisenbasis mit Wolframschmelzkarbid (WSC) als Hartstoff.

Verfahrensbedingt wird beim Lichtbogenspritzen die Schicht nicht porenfrei abgeschieden. Der Porengehalt in der AS-850-Schicht beträgt typischer Weise 1-5 % [1]. Weiterhin ist die Spritzschicht mit einzelnen Phasen aus Fe, WSC und deren Pseudolegierungen mikroskopisch inhomogen und weist im Vergleich zu anderen Spritzverfahren eine hohe Oberflächenrauigkeit auf. Die hohen Temperaturen beim thermischen Spritzen führen außerdem zu beträchtlichen Eigenspannungen innerhalb der Beschichtung.

## **Effiziente FEM Techniken bei Beschichtungsvorgängen mittels Thermischer Spritztechnik**

M. Gurriss, R. Münster, Z. Cui, S. Turek, M. Möller, D. Kuzmin, O. Mierka

Institut für Angewandte Mathematik, TU Dortmund

### **Kurzfassung**

Im Teilprojekt B7 werden mathematische Modelle und numerische Algorithmen zur Simulation des Thermischen Spritzens entwickelt, validiert und verglichen. Die partikelbeladenen Gasströmungen werden mit Hilfe eines 2-Fluid-Modells beschrieben, welches auf den kompressiblen Euler Gleichungen basiert. Zur numerischen Behandlung dieses Systems von Erhaltungsgleichungen werden hochauflösende Finite Elemente Verfahren vom Typ TVD eingesetzt. Zur Modellierung der Partikel-Substrat-Interaktion kommen die (mehrphasigen) inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen zum Einsatz, wobei die dynamische Phasengrenzfläche der Tröpfchen mit Hilfe der Level-Set Methode erfasst wird.

Stichwörter: 2-Fluid-Modell, Level-Set Methoden, hochauflösende FEM Verfahren, Mehrgitterlöser

### **Einleitung**

Der erste Teil dieser Arbeit behandelt die Modellierung und Simulation von partikelbeladenen Gasströmungen, die u.a. beim Lichtbogenspritzen auftreten. Hierzu kommt ein makroskopisches 2-Fluid-Modell [1, 2] zum Einsatz, welches auf den volumengewichteten Euler Gleichungen [3] basiert. Dabei wird die Zwei-Wege-Kopplung durch die Phasenwechselwirkungskräfte induziert, welche in Form von Quelltermen auftreten. Dieses Modell liefert eine wesentlich detailliertere Beschreibung der Flugphase als das zuvor in [4] vorgestellte Gemischmodell.

Bei der räumlichen Diskretisierung der nichtviskosen Flüsse wird von der schwachen Formulierung (des konvektiven Terms und des Druckanteils) ausgegangen, wodurch eine effiziente, stabile und implizite Randwertbehandlung ermöglicht wird. Aufgrund der Dominanz und Steifheit der Quellterme wird für die Zeitdiskretisierung üblicherweise ein Operatorsplittingansatz verwendet. Ein solches Verfahren mit impliziter Zeitintegration für das 2-Fluid-Modell ist in [12] beschrieben. Jüngste Entwicklungen zeigen, dass sich eine wesentlich höhere Robustheit des Algorithmus und unbedingte Stabilität mit Hilfe eines stark gekoppelten semi-impliziten Verfahrens erreichen lässt.

# HERSTELLUNG UND EINSATZVERHALTEN VON THERMISCH BESCHICHTETEN RAPID TOOLING TIEFZIEHWERKZEUGEN AUS FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN

J. Witulski, M. Trompeter, A.E. Tekkaya,

Institut für Umformtechnik und Leichtbau, TU Dortmund

## Kurzfassung

Zur schnellen und kostengünstigen Herstellung von Tiefziehwerkzeugen für die Klein- bis Mittelserie werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes hybride Tiefziehwerkzeugen entwickelt und zur Umformung von Blechformteilen eingesetzt. Hierzu wird eine Hartstoffbeschichtung thermisch auf eine Negativform gespritzt und/oder mit Aramid- und Kohlefasern verstärkt und mit einem Polymer hintergossen. Anschließend wird dieser Verbund entformt. Die Hartstoffschichten bzw. die Faserverstärkungen dienen hierbei als verschleißfeste Wirkfläche des Werkzeugs. Das Reibverhalten dieser Wirkflächen ist vergleichbar mit dem konventioneller Werkstoffe. Hierbei ist die Verschleißfestigkeit ausreichend hoch, um neben weichen Tiefziehstählen auch höherfeste Stähle umzuformen.

Stichwörter: Blechumformung, Rapid Tooling, Beschichtung, Werkzeugentwicklung, Polymere, Faserverstärkung

## 1 Einleitung

Konventionelle Tiefziehwerkzeuge aus Stahl- und Gusswerkstoffen sind aufgrund der Werkstoff- und Herstellungskosten für Großserienproduktionen ausgelegt und amortisieren sich in Klein- und Mittelserien nur bedingt [1]. Ein Ansatz zur kosteneffizienten und flexiblen Fertigung von Blechformteilen in dieser Seriengröße ist daher die Substitution der Stahl- und Gusswerkstoffe durch Polymere [2]. Erste Untersuchungen in [3] zeigen, dass Tiefziehen weicher Tiefziehstähle mit Werkzeugen aus Polymeren im Kleinserienbereich möglich ist. Die mechanische [1] oder tribologische [4] Charakteristik der Werkzeuge kann dabei durch eingebettete mineralogische Füllstoffe modifiziert werden. Ein Nachteil von polymeren Tiefziehwerkzeugen ist allerdings der geringe Verschleißwiderstand insbesondere bei der Umformung höherfester Werkstoffe [5, 6]. Ein Ansatz zur Erhöhung der Werkzeuglebensdauer ist die Verwendung von Beschichtungen. Untersuchungen in [7] mit DLC (Diamond-like-carbon) Beschichtungen im PVD-Verfahren zeigen jedoch, dass die Anbindung der Beschichtung an den Grundkörper nicht zufriedenstellend ist. Vergleichbare Ergebnisse wurden in [8] bei Verwendung von

# **EINFLUSS DER SPRITZPARAMETER AUF DIE MECHANISCHEN UND TRIBOLOGISCHEN EIGENSCHAFTEN VON LICHTBOGENGESPRITZTEN WSC-FECSiMn SCHICHTEN**

W. Tillmann, E. Vogli, J. Nebel,

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund

## **Kurzfassung**

Was bedeuten optimierte Beschichtungsparameter? Wie groß ist der Einfluss der Spritzparameter und der Schichtmorphologie auf die Verschleißeigenschaften?

Diese Fragestellungen zu betrachten ist das Ziel dieser Forschungsarbeit. In einer ersten Stichprobenuntersuchung am lichtbogengespritzten Schichtsystem WSC-FeCSiMn wird der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Spritzbedingungen auf die tribologischen Eigenschaften bestimmt.

Mit Hilfe metallographischer Analysen und Pin-on-Disk-Tests konnte nachgewiesen werden, dass eine porösere, gröbere und inhomogenere Schicht zu systematisch höheren Reibwerten und höheren Verschleißraten bei  $Al_2O_3$ , WC-Co und 100Cr6 als Reib-Gegenkörper führt.

Stichwörter: Unterschiedliche Spritzbedingungen, Lichtmikroskopie, REM, Morphologie, Porosität, Härte, Verschleiß, Pin-on-Disk,

## **1 Einleitung**

Das Lichtbogenspritzen (LiBo) ist eines der wirtschaftlichsten Spritzverfahren. Hierzu trägt besonders die hohe Auftragsrate von bis zu 30 kg/h Spritzwerkstoff bei. Zudem sind die Materialkosten und die Spritznebenkosten im Allgemeinen geringer als z.B. beim Plasma- oder Hochgeschwindigkeitsflammspritzen [1,2]. Nachteilig für das LiBo-Spritzen ist jedoch der hohe Wärmeeintrag in den Spritzwerkstoff, der zum Aufschmelzen des Drahtwerkstoffes erforderlich ist. Je nach Spritzbedingungen kann es zur chemischen Umwandlung temperatursensitiver Materialien ( $WC \rightarrow W_2C$ ) oder zur Oxidation der metallischen Bestandteile (z.B.  $Fe_2O_3$ ) kommen. Zusätzlich sind lichtbogengespritzte Schichten von einem groben Gefüge aus einzelnen Partikeln und Lamellen geprägt, die zu einer mikroskopisch stark inhomogenen Morphologie führen. Auch die Morphologie ist wiederum stark von den Spritzparametern abhängig. So können die Partikel- und Lamellengrößen,

## **SIMULATION UND KOMPENSATION RÜCKFEDERUNGSBEDINGTER FORMABWEICHUNGEN**

M. Gösling<sup>1</sup>, H. Kracker<sup>2</sup>, A. Brosius<sup>1</sup>, S. Kuhnt<sup>2</sup>, A.E. Tekkaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Umformtechnik und Leichtbau, TU Dortmund

<sup>2</sup> Institut für mathematische Statistik und industrielle Anwendungen, TU Dortmund

### **Kurzfassung**

In diesem Artikel werden die Möglichkeiten zur Kompensation rückfederungsbedingter Formabweichungen mithilfe von Finite-Element Simulationen und statistischer Modellierungstechniken diskutiert. Es wird zunächst untersucht, inwieweit die Finite-Element Methode geeignet ist, Rückfederungen vorherzusagen. Dazu werden numerisch prognostizierte mit experimentell ermittelten Rückfederungen verglichen. Im nächsten Schritt werden unterschiedliche Möglichkeiten bzw. Strategien zur Rückfederungskompensation wie die Veränderung des Spannungszustandes, der Bauteilsteifigkeit und der Werkzeuggeometrie (Bombierung) vorgestellt. Anhand eines Streckbiegeteils werden die unterschiedlichen simulationsbasierten Kompensationsstrategien illustriert und anhand eines ausgewählten Beispiels experimentell überprüft. Schließlich werden Rückfederungssimulationen hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber dem Einfluss von Störgrößen wie Reibung und Materialeigenschaften untersucht. Dabei wird eine auf statistischen Vorhersagemodellen basierende Methode vorgestellt, die im Vergleich zur klassischen Monte-Carlo Methode einen sehr viel geringeren numerischen Aufwand benötigt.

Stichwörter: Blechumformung, Statistik, Rückfederung, Simulation, Kompensation

### **1 Einleitung**

Rückfederungsbedingte Formabweichungen stellen eines der wichtigsten Fragestellungen bei der Herstellung von tiefgezogenen Blechformteilen dar. Durch die Rückfederung entstehen Formabweichungen, die durch aufwendiges Nacharbeiten und Ändern der Umformwerkzeuge kompensiert werden müssen. Besonders vor dem Hintergrund beschichteter Werkzeuge ist die Frage nach Rückfederungseffekten von großer Bedeutung, da manuelle Nacharbeiten an Werkzeugen mit aufgebrachtten hartstoffhaltigen Schichtsystemen nur noch eingeschränkt möglich sind.

Deshalb ist es erstrebenswert kostenintensive und manuelle Nacharbeiten an Tiefziehwerkzeugen bereits im Vorfeld der Fertigung zu reduzieren. Einen



## KOMPENSATION VON FORMFEHLERN DURCH RAUMVERZERRUNG

D. Biermann, T. Surmann, A. Sacharow,  
Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund

### Kurzfassung

Dieser Artikel präsentiert Methoden zur Kompensation von Formfehlern, die bei der Herstellung und dem Einsatz von Tiefziehwerkzeugen entstehen können. Durch die verbesserten Registrierungsmethoden ist möglich, auch starke Deformation, die durch die Rückfederung verursacht werden, präzise zu analysieren und ein diskretes Deformationsfeld zu generieren. Mit Hilfe der kontinuierlichen Raumverzerrung kann dieses Feld approximiert und extrapoliert werden. Dies ermöglicht die Kompensation der Formfehler durch die direkte Manipulation der Werkzeuggeometrie.

Stichwörter: Formfehlerkompensation, Registrierung, Frei-Form-Deformation

### 1 Einleitung

Ein großes Problem bei der Herstellung von freigeformter Tiefziehwerkzeugen besteht in prozessbedingten Bauteildeformationen. Insbesondere durch die Rückfederung können starke Deformationen wie Aufbiegungen oder Torsionen auftreten. Der Prozess der Formfehlerkompensation besteht aus zwei Phasen. In der ersten Phase werden die Deformationen des Werkstücks analysiert und geeignete Formfehlerbeschreibungen generiert [1]. Dabei können sowohl die simulierte Daten als auch die Digitalisierdaten des gefertigten Bauteils verwendet werden. In der zweiten Phase werden die eigentlichen Maßnahmen zur Fehlerkompensation ergriffen. Zuerst wird der Tiefziehprozess durch das Anpassen der Parameter wie Niederhalterkraft oder Kantenradien optimiert [2, 3]. In der Regel reicht das nicht immer aus, um die Formabweichungen zu kompensieren, so dass Änderungen in der Geometrie der Werkzeuge vorzunehmen sind [4].

Dieser Artikel beschreibt die wesentlichen Komponenten der Formfehlerkompensation. Im Kapitel 2 wird eine Methode vorgestellt, die eine genaue Analyse der Formfehler ermöglicht. Es wird ein diskretes Deformationsfeld generiert, das die Deformation im Werkstück beschreibt und als Grundlage für die weitere Kompensation dient. Mit Hilfe einer auf der NURBS-Technik basierenden Frei-Form-Deformation ist es möglich eine stetige und kontinuierliche Raumverzerrung zu erzeugen, die das diskrete Deformationsfeld approximiert und extrapoliert. Im Kapitel 4 wird dieses Verfahren dazu verwendet die kompensierende Geometrie der Werkzeuge zu