

Entwicklung hybrider Aluminium-Serienwerkzeuge mittels Transfer von Erkenntnissen im additiven Lichtbogen- und Rührreibschweißen und Abscheiden von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten

IGF-Nr.: 251 EBR

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Hochschule Schmalkalden, Schmalkalden (DE, HSM)

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Ilmenau, Ilmenau (DE, TUI)

Forschungseinrichtung 3: FH Oberösterreich, Wels (AT, FHW)



Ansprechpartner bei HSM: Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul
+49 (0) 3683-688.1003, t.seul@hs-sm.de

Ansprechpartner bei TUI: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann
+49 (0) 3677-69.2981, jeanpierre.bergmann@tu-ilmenau.de

Ansprechpartner bei FHW: FH-Prof. Dipl. Ing. Dr. Daniel Heim
+43 (0) 50804-43215, daniel.heim@fh-wels.at

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 251 EBR der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

NextMould ist ein interdisziplinäres Projekt im Bereich des additiven Lichtbogen- und Rührreibschweißens, der Abscheidung dicker diamantähnlicher Kohlenstoffschichten und der Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien in den Marktsektoren Werkzeug-/Formenbau, Spritzguss und Metallbearbeitung mit Innovationspotenzial auf nationaler und internationaler Ebene. Der Bedarf der KMU für dieses Projekt entsteht im Bereich der Kunststoffproduktion, wo kostengünstige, hochwertige und ressourcenschonende Werkzeuge benötigt werden. Innovationsziel des Projekts ist die additive Fertigung eines Spritzgusswerkzeugs aus Aluminiumlegierungen durch Lichtbogenschweißen und das Aufbringen von dicken DLC-Schichten unter Anwendung von Richtlinien zur energieeffizienten additiven Gestaltung.

Forschungsziel

Das übergeordnete Gesamtziel des Forschungsvorhabens war die Konzeptionierung bzw. Auslegung eines additiv mittels Lichtbogenschweißen gefertigten und DLC-beschichteten Spritzgießwerkzeuges für Serienprozesse. Ziel war aber auch, die darin enthaltenen Einzelaspekte separat nutzen und weiterentwickeln zu können. Somit sollten die Ergebnisse auf eine breitere Anwenderbasis gestellt werden. Im Detail wurden folgende Forschungsziele adressiert:

- Additive Fertigung von Spritzgusswerkzeugen (500 x 500 x 500 [mm]) aus Aluminiumlegierungen mittels Lichtbogenschweißen; Schaffung von Strukturen zur Steigerung der Energieeffizienz durch integrierte Leichtbau- und Isolationsstrukturen; Untersuchung des Einsatzes von Rührreibschweißen zur Erzeugung einer verschleißfesten Stahlschicht auf der Aluminiumstruktur
- Entwicklung von dicken DLC-Beschichtungen und Konstruktionsrichtlinien für Werkstücke aus Aluminiumlegierungen, die mit additivem Lichtbogenschweißen hergestellt werden, als Verschleiß- und Korrosionsschutz
- Konstruktionsrichtlinien für energieeffizientes, additives Design (auch anwendbar für konventionell hergestellte Werkzeuge aus Aluminiumlegierungen und additiv gefertigte Stahlformen)

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurden numerische und experimentelle Demonstratoren im Labormaßstab entwickelt und unabhängig voneinander untersucht. Die einzelnen Ergebnisse wurden im Laufe des Projekts zu einem Demonstrator zusammengeführt. Die Projektteilnehmer wurden aufgrund ihrer Expertise und ihres Industrienetzwerks ausgewählt. Das deutsch-österreichische Konsortium besteht aus zwei Vereinen (FGW- Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., KC - Kunststoff-Cluster Austria) und 3 RTOs (Hochschule Schmalkalden, TU Ilmenau, FH Wels). 8 Industriepartner in Deutschland und 11 in Österreich haben sich ebenfalls dem User Committee angeschlossen.

Die Arbeiten begannen mit der Definition der anwendungs- und fertigungsspezifischen Anforderungen sowie intensiven Recherchetätigkeiten. Dies erfolgte in enger Abstimmung mit dem Unternehmenspartnern. Hierbei sind zugleich die Schnittstellen und Übergabepunkte im Projekt definiert worden.

Die weiteren Schritte sind nun dreiteilig gehalten. Je nach Forschungseinrichtung und Aufgabengebiet. Erst im weiterem Projektverlauf sind die Ergebnisse in Proof-of-Concept-Aufbauten zusammengefloßen.

Zunächst wurde sich seitens Hochschule Schmalkalden mit der Auslegung von Aluminiumwerkzeugen beschäftigt, wobei sich die Arbeiten neben der allgemeinen Auslegung für konventionell gefertigte Spritzgießwerkzeuge auch auf die Auslegung von Leichtbau- und Isolierstrukturen fokussierten. Die auf Basis von numerischen Simulationen gewonnenen Erkenntnisse wurden dann im Folgenden übertragen.

Die Arbeitsschritte im Bereich Prozessauslegung des Lichtbogenschweißens der TU Ilmenau konzentrierten sich auf die Prozessfensterermittlung verschiedener Aluminiumlegierungen. Hierbei wurde auch eine Korrelation zwischen den Schweißparametern und der Nahtgeometrie gezogen. Anschließend wurden Wandstrukturen und Volumenkörper mit unterschiedlichen Schweißprozessen hergestellt und untersucht.

Hierbei erfolgte auch die Herstellung von Probekörpern für die Beschichtungsauslegung- und -untersuchung an der FH Wels. Ziel war die Auswahl eines geeigneten Beschichtungsprozesses bzw. die Anpassung der jeweiligen Parameter. Untersucht wurden neben DLC- auch Eloxalschichten bzw. Hartchromschichten, welche mittels metallografischem Querschliff, taktiller Rauheitsmessung, REM, etc. untersucht wurden.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind letztendlich in Proof-Konzept-Aufbauten eingeflossen. Die Demonstratoren deckten einerseits unterschiedliche Bauteilgrößen (62 mm bis 390 mm Kantenlänge ab) und verschiedene Fertigungsverfahren (Spritzgießen, Schäumen) und andererseits unterschiedliche Qualitätsanforderungen an die Kunststoffbauteile (technische Bauteile, optische Hochglanzbauteile für Konsumgüter, Bauteile für den Automobil und Industriebereich) ab. Somit konnte ein breites Anwendungsspektrum abgedeckt werden.

Die Konzept-Aufbauten und die damit gefertigten Bauteile wurden anschließend in Formgebungsprozessen charakterisiert. Die im Projekt erzielten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Konstruktive Auslegung Allgemein:

- die Mindestplattendicken sollten berechnet werden anhand des Werkzeuginnendrucks, generell dicker als vergleichbare Stahlplatte
- die Fläche der Tuschierung muss berechnet werden, damit die zulässige Flächenpressung nicht überschritten wird
- der Abstand der Temperierkanäle von der Kavität ist größer als bei vergleichbarem Stahleinsatz → Abschätzung siehe Excel Tabelle
- der Temperierkanaldurchmesser muss ausgelegt werden, damit eine turbulente Strömung gewährleistet ist
- bei zueinander laufenden Werkzeugbauteilen z.B. Formeinsatz und Auswerferstift muss die Bohrungs- bzw. Auswertoleranz berechnet werden, damit sowohl im Montage-, als auch im Betriebszustand eine Beweglichkeit garantiert und passendes Spaltmaß gewährleistet ist → ggf. können keine Normauswerfer verwendet werden, auch kann der Spalt zwischen Auswerfer und Bohrung zu groß für die Kunststoffschmelze sein
- Temperatureinsatzgrenzen von Aluminium beachten → ca. 120 °C Langzeit, 180 °C Kurzzeit bei EN AW 5083
- Gewinde generell tiefer schneiden wegen Ausreißkraft → Berechnung notwendig
- aktuelle Erfahrungen zeigen, dass bei einer Eloxalschicht nach ca. 30.000 Schuss leichte Kontaktkorrosion zum Stahl hin auftreten können

Konstruktive Auslegung Beschichtung:

- PACVD-DLC: höchste Härte mit knapp 1.000 HV0.1, aber starke Aufrauung der Oberfläche ($R_a = 0,74 \mu\text{m}$; $R_z = 4,36 \mu\text{m}$), schlechte Polierbarkeit und Abplatzungen an scharfen Kanten; generell sollte die Kontakttemperatur bei DLC-Beschichtung unterhalb einer Abscheidungstemperatur von 400-550 °C sein, → nicht geeignet für die vorliegenden Use Cases
- Chemisch Nickel: Härte von 630-770 HV0.1 (je nach Rezept, höhere Härte senkt maximale Schichtdicke) leichte Aufrauung der Oberfläche durch Beschichtung ($R_a = 0,38 \mu\text{m}$; $R_z = 2,95 \mu\text{m}$), aber sehr gut polierbar, konstante Schichtdicken von bis zu 50 μm (auch in Bohrungen von 7 mm), Schichtdicke bei 3 mm Bohrungen etwas geringer
- Eloxalschicht: Schichthärte ca. 390 HV0.1, erreichbare Hinterschneidungen/Bohrungen max. 3 mm, Schichtdicken bis 100 μm , Untermaß für Beschichtung ist etwa 2/5 der Zielschichtdicke, Polierbarkeit (besser als AW-5083 unbehandelt), Anwendungstemperatur sollte unterhalb 200 °C sein → sonst entstehen Risse, Eloxalschicht kann mit PTFE-Versiegelung modifiziert werden, um eine hydrophobe Oberfläche zu erhalten

Konstruktive Auslegung WAAM-Bauteil:

- bei Strukturen ohne Supportstruktur, d.h. wenn diese freitragend im Raum sind → maximaler Winkel zwischen Struktur und horizontaler Ebene 30 °, besser 40° → am einfachsten lässt es sich mit 50° herstellen, dann muss der Brenner nicht geschwenkt werden
- Tropfendurchmesser beim CMT-Print minimal 4 mm maximal 12 mm
- wenn innenliegende Hohlstrukturen einzuarbeiten sind, dann ist darauf zu achten, dass der Deckel, um diese zu verschließen, möglichst auf einer Ebene liegt, damit diese in einem Zug geschlossen werden können
- bei Temperierkanälen und auch bei Außenwandungen ist darauf zu achten, dass diese groß genug sind, damit diese nicht aufbrechen → dies liegt daran, dass der WAAM-Prozess Schweißraupen ablegt und diese kugelförmig sind, zwischen den Raupen ist die Wanddicke geringer
- 3D-geführte Temperierkanäle sind möglich, Freiformkanäle wurden noch nicht probiert
- bei der Konstruktion bereits an die spätere Schweißlage denken, d.h. welche Bereiche werden zuerst geschweißt → daraufhin sind z.B. auch Temperierkanäle und Leichtbaustrukturen zu denken

- Aufmaß zum Feinbearbeiten mit einrechnen ca. 5 mm
- Es wäre ideal, wenn die Breite, die Länge und die Höhe des Temperierkanals, aber auch die Abstände zwischen den Kanälen und die Außenseiten des Werkzeugs wie gefolgt ausgewählt werden können. So kann garantiert werden, dass kein ungleichmäßiger Kanalquerschnitt durch ungleichmäßige Bahnplanung stattfindet
- Länge und Breite des Temperierkanals = $NB \cdot (n \cdot ((100 - \ddot{U}) / 100) - 1)$
- Abstand zwischen Kanal und Außenkontur = $NB \cdot (1 + n \cdot ((100 - \ddot{U}) / 100))$, wobei NB die Schweißnahtbreite ist (zw. 6 und 10 mm bei Aluminium), \ddot{U} ist die Überlappung (zw. 30% und 50 %) und n ist eine natürliche Zahl (1,2, 3 ...)
- Höhe des Temperierkanals = $n \cdot H$, wobei H die Lagenhöhe ist
- Das heißt eine Kommunikation zwischen dem Konstrukteur und dem Schweißer muss vorher erfolgen, um Zeit bei der Bahnplanung zu sparen aber auch gleichmäßige Kanalquerschnitte herstellen zu können
- Die oben erwähnten Formeln können auch bei der Planung von Holzstrukturen eingesetzt werden

Zusammenfassung

Die Ergebnisse können so zusammengefasst werden, dass durch den Einsatz von Aluminium in Verbindung mit Leichtbau- und Isolationsstrukturen eine homogenere Werkzeugoberflächentemperatur erreicht werden konnte, welches sich in geringeren Eigenspannungen bei den Kunststoffbauteilen widerspiegelt. Hierdurch konnten bei den Kunststoffbauteilen auch ein geringerer Verzug und eine verminderte Größe der Einfallstellen festgestellt werden.

Im Spritzgießprozess selbst äußerten sich die Ergebnisse so, dass teilweise eine Zykluszeiteinsparung von 30 % erreicht werden konnte.

Die ermittelten Ergebnisse fanden Eingang in Designrichtlinien für die Werkzeug-, die WAAM-Prozess- und Schichtauslegung in Form einer Excel-Tabelle. Dies ist daher hier im Weiteren nicht näher ausgeführt. Die Tabelle kann zusammen mit einem detaillierteren Schlussbericht bei der Forschungsgemeinschaft bzw. der Hochschule angefragt werden.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Seul unter kunststofftechnik@hs-schmalkalden.de