

Einstellung des Formgebungsprozesses im teilflüssigen Materialzustand für die Kobaltbasislegierung CoCr28Mo6

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA, M. Sc. Christoph Seyboldt* und
Dipl.-Ing. Kim Rouven Riedmüller

Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 17, 70174
Stuttgart, Germany

*Kontakt des Hauptautors: christoph.seyboldt@ifu.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Seit über 5 Jahren werden am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Verarbeitung hochschmelzender und biokompatibler Metallwerkstoffe im teilflüssigen Zustand durchgeführt. Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen auf Legierungssysteme, welche auf den Metallen Titan oder Kobalt basieren. Derartige Legierungssysteme weisen meist eine hervorragende Kompatibilität mit dem menschlichen Körper auf und werden daher vor allem in der Medizin- bzw. Implantattechnik eingesetzt. Die konventionellen Verfahren die dabei zur Verarbeitung solcher biokompatiblen Werkstoffe eingesetzt werden, sind aufgrund von erhöhtem Material- und Energieeinsatz meist mit hohen Kosten verbunden. Abhilfe könnte hier die Formgebung solcher Werkstoffe im teilflüssigen Zustand schaffen, welche ein großes Potential hinsichtlich der Herstellung komplexer Bauteilgeometrien mit guten mechanischen Eigenschaften und Net-Shape- bzw. Near-Net-Shape-Qualität aufweist [1, 2].

Der vorliegende Ergebnisbericht befasst sich mit Untersuchungen zur Einstellung des Formgebungsprozesses im teilflüssigen Zustand für die Legierung CoCr28Mo6. Hier konnte gezeigt werden, dass durch die Wahl von geeigneten Prozessparametern die Near-Net-Shape-Herstellung einer komplexen medizintechnischen Komponente in Form eines Hüftimplantats realisiert werden kann.

Schlüsselwörter: Formgebung im teilflüssigen Zustand, Kobaltbasislegierung, Biokompatible Werkstoffe, Medizintechnik

1. Einleitung

Kobaltbasislegierungen werden vor allem für solche Bauteile eingesetzt, die höchste Anforderungen bezüglich mechanischer Festigkeit und thermischer Belastbarkeit erfüllen müssen. Aus diesem Grund werden bspw. Komponenten für Düsentriebwerke aus solchen Kobaltlegierungen, welche auch als Superlegierungen bezeichnet werden, hergestellt. Solche extrem hitzebeständigen Superlegierungen enthalten bis zu 50% Kobalt und sind im Gegensatz zu konventionellen Stahlwerkstoffen gegenüber Hochtemperaturkorrosion inert. Weitere Anwendungen solcher hochschmelzenden Legierungen sind Schneidwerkstoffe für die mechanische Bearbeitung oder auch Permanentmagneten [3].

Des Weiteren werden Kobaltbasislegierungen seit dem Jahr 1929 in der Medizintechnik eingesetzt. Während damals Zahnersatzimplantate zu den ersten Anwendungen zählten, sind CoCr-Legierungen heutzutage überwiegend in der Orthopädie und der kardiovaskuläre

Chirurgie zu finden [4]. Dabei kommt in den meisten Anwendungsfällen die kohlenstoffarme CoCr28Mo6-Legierung zum Einsatz. Die Verwendung dieser Legierung für medizintechnische Komponenten im Allgemeinen sowie der aufgrund der älter werdenden Bevölkerung steigende Bedarf an Implantaten führt zu einem gesteigerten wirtschaftlichen Interesse in der effizienten Verarbeitung dieses biokompatiblen Werkstoffes. Zudem reicht das Spektrum von Implantaten heutzutage weit über die klassischen Knie- oder Hüftimplantate hinaus, was es erlaubt, verschiedene Gelenke des menschlichen Körpers durch Implantate zu ersetzen.

Derzeit findet eine Verarbeitung des Werkstoffes CoCr28Mo6 überwiegend mit klassischen Gießverfahren statt, welche einen verfahrensbedingten erhöhten Materialeinsatz und anschließende Prozessschritte, z.B. zur Entfernung von Angüssen oder der beim Fertigungsprozess entstandenen Oxidschicht, erfordern [5]. Aufgrund der stetig steigenden Energie- und Werkstoffpreise mit einhergehender Verknappung der vorhandenen Ressourcen müssen in diesem Zusammenhang weitere Herstellungskonzepte entwickelt werden. Neben dem intelligenten Bauteildesign, also der Entwicklung einer an den Belastungsfall angepassten und zeitgleich materialeinsparenden Konstruktion, gilt auch der Entwicklung alternativer und effizienter Fertigungsprozesse zur Einsparung von Energie und Material ein großes Interesse. Beispiele für solche ressourceneffizienten Prozesse sind die Verfahren der Formgebung im teilflüssigen Materialzustand wie z.B. das Thixo-Schmieden, das Thixo-Gießen und das New-Rheocasting.

Vorhergehende Forschungsarbeiten am Institut für Umformtechnik haben gezeigt, dass eine Verarbeitung biokompatibler und hochschmelzender Werkstoffe im teilflüssigen Zustand deutliche Vorteile gegenüber den konventionellen Fertigungsverfahren wie z.B. dem Schmieden oder dem Gießen in Bezug auf die Materialersparnis besitzt. Verfahrensbedingt weisen derartig hergestellte Bauteile eine erhöhte Festigkeit sowie eine verbesserte Zähigkeit im Vergleich zu gusstechnisch hergestellten Komponenten auf [6, 7, 8, 9]. Gerade in der Implantattechnologie stellt dies ein Vorteil dar, da diese Eigenschaften eher den Belastungen im menschlichen Körper entsprechen. Hierbei wird meist weniger Augenmerk auf die von Grund aus recht hohe Festigkeit der Bauteile, sondern vielmehr auf eine erhöhte Bruchdehnung und Dauerfestigkeit gelegt [10].

2. Die verwendete CoCr28Mo6-Legierung

Die Legierungszusammensetzung von CoCr28Mo6 ist nach DIN ISO 5832-12 [11] genormt. Die Zusammensetzung der Charge, welche in den hier beschriebenen Untersuchungen verwendet wurde, ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammensetzung der verwendeten CoCr28Mo6-Legierung in % [12]

	Co	Cr	Mo	Si	Fe	Mn	Ni	C	O
CoCr28Mo6	Rest	28,09	5,79	0,56	0,50	0,54	0,2	0,064	-

Die Gefügestruktur der CoCr28Mo6-Legierung wird, wie bei vielen metallischen Legierungssystemen, wesentlich durch ihren Verarbeitungsprozess beeinflusst und sie

bestimmt daher maßgeblich die mechanischen Eigenschaften der Legierung [13]. Die Herstellung von Implantaten aus der Legierung CoCr28Mo6 erfolgt üblicherweise mittels Gießverfahren.

Die Auswirkungen auf die Gefügestruktur und die mechanischen Eigenschaften der CoCr28Mo6-Legierung bei einer gusstechnischen Verarbeitung wurden intensiv von Dobbs [14] untersucht. Die hergestellten Bauteile wiesen dabei eine Zugfestigkeit R_m von 715 MPa und eine Bruchdehnung von 7,5 % auf. Das dabei ausgebildete Gefüge ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Mikrostruktur nach dem Gießen zeigt eine Kobaltmatrix mit dendritischen Karbiden in den Körnern und Ausscheidungen an den Korngrenzen.

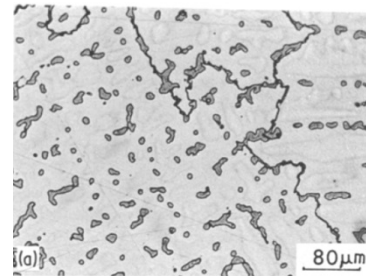


Abbildung 1: Gefügeausbildung der Legierung CoCr28Mo6 nach dem Gießen [14]

3. Anlagen und Werkzeugtechnik

Die Erwärmung des Vormaterials wurde am IFU mithilfe einer induktiven Erwärmungsanlage der Firma KUKA, welche in Abbildung 2 dargestellt ist, durchgeführt. Diese besitzt eine Anschlussleistung von etwa 60 kW und die Wechselfrequenz lässt sich im Bereich von 1000 bis 4000 Hz frei wählbar einstellen. Die in das Rohteil eingebrachte Leistung kann dabei über die Pulsweitenmodulation (PWM) angepasst werden. Während der Erwärmung wird die im Bolzen vorliegende Temperatur über Thermoelemente ermittelt [15].

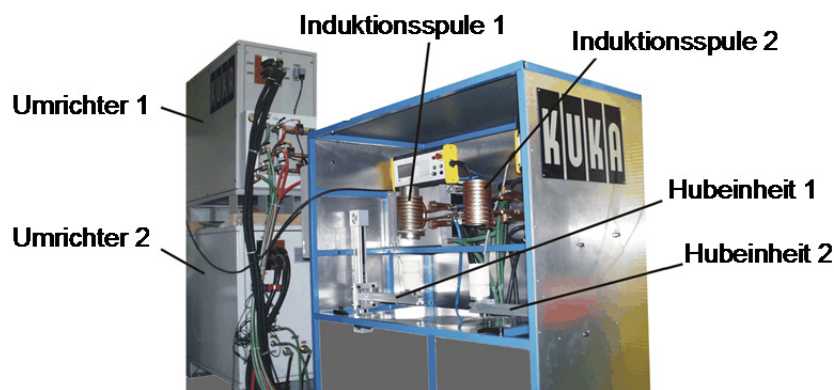


Abbildung 2: Induktive Erwärmungsanlage der Firma KUKA am IFU/Stuttgart

Die Wärme wird frequenzabhängig in den äußeren Bereichen des Rohteiles erzeugt (Skin-Effekt), daher muss für eine homogene Temperaturverteilung über den kompletten Rohteilquerschnitt ein Wärmefluss vom Randbereich in den Mittenbereich durch Wärmeleitung erfolgen [16]. Dies wird über eine Verstellung der PWM während des Erwärmungsvorgangs erreicht. Dabei wird zu Beginn der Erwärmung eine möglichst hohe PWM eingestellt, um eine maximale Leistungsinduzierung in das Rohteil zu erreichen und damit eine schnelle Erwärmung bis hin zur Soliduslinie einzustellen. Anschließend wird die PWM reduziert und dadurch eine homogene Temperaturverteilung über den Rohteilquerschnitt erreicht. Auf diese Weise lassen sich die zu verarbeitenden Werkstoffe gezielt bis zu einem Temperaturintervall von $\pm 2^\circ\text{C}$ erwärmen [17].

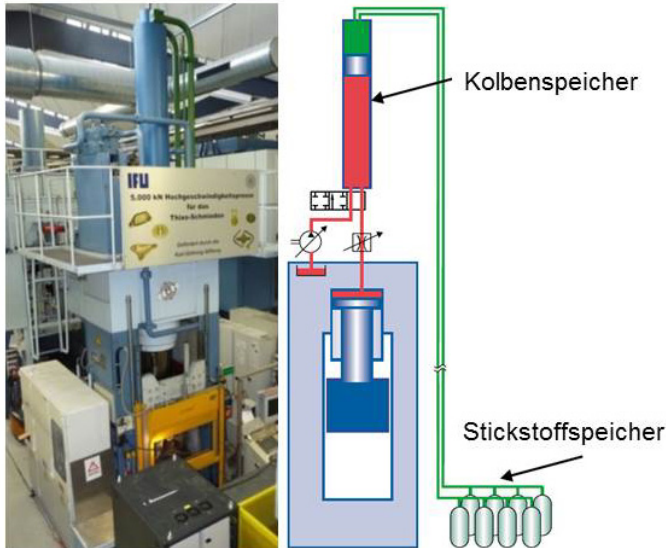


Abbildung 3: 5000 kN Hochgeschwindigkeitspresse am IFU/Stuttgart [12]

Zur anschließenden Formgebung des in den teilflüssigen Materialzustand erwärmten Vormaterials wird am IFU/Stuttgart eine einfachwirkende, hydraulische Hochgeschwindigkeitspresse der Firma Becker van Hüllen verwendet. Es ist möglich, ein frei wählbares Weg-Geschwindigkeits-Profil mit einer maximalen Stößelgeschwindigkeit von 800 mm/s abzufahren, wobei die maximale Presskraft 5000 kN beträgt [15]. In Abbildung 3 ist die am IFU vorhandene Presse dargestellt.

Das Formgebungswerkzeug zur Herstellung der Hüftimplantate wurde nach dem Prinzip des Thixo-Schmiedens im geschlossenen Gesenk aufgebaut. Dieser prinzipielle Aufbau mit Einpressstempel, Schließplatte, Kavität und Auswerfersystem ist in Abbildung 4 zu sehen. Grundsätzlich handelt es sich dabei um ein modular aufgebautes Formgebungswerkzeug, welches sich an dem Aufbau von Spritzgusswerkzeugen nach DIN 16760-1 orientiert [7, 18].

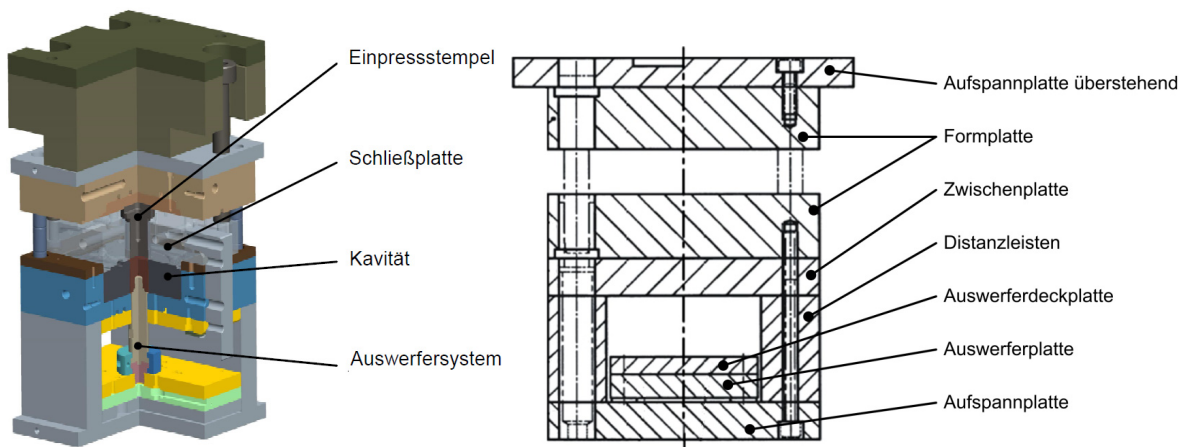
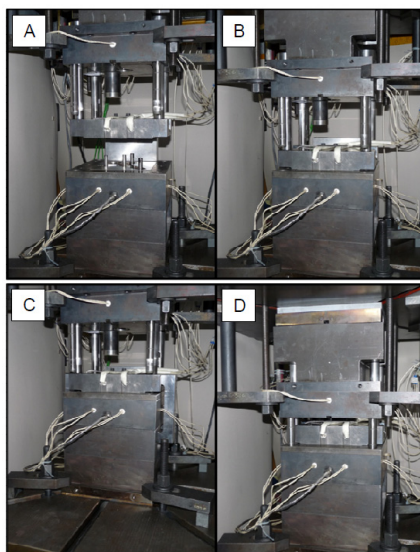


Abbildung 4: Aufbau des verwendeten Formgebungswerkzeugs [7] (links); Normaufbau von Spritzgusswerkzeugen [18] (rechts)

Aufgrund der Verwendung eines geschlossenen Gesenks kommt der Kinematik des Formgebungswerkzeugs eine besondere Bedeutung zu. Die aufeinander folgenden Bewegungsschritte sind in Abbildung 5 dargestellt. In Position A befindet sich der Pressenstößel im oberen Totpunkt 1, bei welchem Trennmittel auf die Werkzeugeinsätze aufgebracht werden können. Danach wird der Stößel auf Position B abgesenkt und die Schließplatte auf die untere Werkzeughälfte aufgelegt, wodurch der Formkasten gebildet wird. Der Abstand zwischen dem Stempel und der Schließplatte wird durch die Länge der Führungssäulen bestimmt, welche die Schließplatte mit der oberen Werkzeughälfte verbinden. Die exakte Positionierung der Schließplatte zur Kavität erfolgt dabei durch in die Kavität eingebrachte Einlaufflächen, welche auch im erwärmten Zustand ein sicheres

Ineinandergleiten der beiden Formeinsätze bewirken. Im oberen Totpunkt 2, der in Abbildung 5, Position C dargestellt ist, beginnt der eigentliche Formgebungsprozess. Dabei werden zunächst die beiden seitlichen Klemmbügel angebracht, welche die Schließplatte mit der unteren Werkzeughälfte verspannen. Anschließend wird das erwärmte Rohteil in die entsprechende Bohrung in der Schließplatte unterhalb des Stempels eingebracht und der verbleibende, kurze Weg des Pressenstößels mit einem vorab programmierten Weg-Geschwindigkeits-Profil zurückgelegt. Im unteren Totpunkt und somit am Ende des Formgebungsprozesses liegt die Formplatte der oberen Werkzeughälfte auf den Prellschlagkörpern auf und verharrt in dieser Position für ca. 10 Sekunden [7]. Anschließend wird der Pressenstößel zurück in OT 2 angehoben, die Klemmbügel entfernt und nachdem der Stößel in OT1 zurückgefahren ist, kann das Bauteil ausgeworfen werden.



Position A: Werkzeug in OT 1
(Aufbringen von Trennmitteln)

Position B: Werkzeug in OT 2
(Beginn der Formgebung)

Position C: Manuelle Anbringung
der Klemmbügel

Position D: Werkzeug in UT
(Ende des Pressvorgangs)

Abbildung 5: Werkzeugkinematik des Formgebungswerkzeugs [7]

4. Einstellung des semi-solid Formgebungsprozesses für die CoCr28Mo6-Legierung

Erste Untersuchungen zur Verarbeitung der CoCr28Mo6-Legierung im teilflüssigen Zustand wurden am IFU/Stuttgart erstmals unter der Verwendung einer einfachen Plattengeometrie durchgeführt [19]. In diesem Ergebnisbericht soll nun erstmals der Prozess für die Herstellung einer komplexen Hüftimplantatgeometrie beschrieben werden. Hierfür wurden für die verwendete Legierung diejenigen Prozessparameter (Rohteil erwärmt, Pressenkinematik, Werkzeugbeheizung, usw.) ermittelt, welche den Formgebungsprozess maßgeblich beeinflussen.

4.1. Induktive Rohteil erwärmt

Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen der CoCrMo-Legierung von über 1400°C wurden der Induktor mithilfe eines Keramikrohres und die Hubeinheit mittels eines Schamottsteins thermisch isoliert. Zusätzlich zur Isolierung wurde eine Schutzgasleitung an den Induktor angebracht, um die bei der Rohteil erwärmt auftretende Oxidbildung zu vermindern.

Die Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen Erwärmungsparameter haben gezeigt, dass eine homogene Erwärmung, bei welcher sich ein Festphasenskelett mit

eingeschlossener Flüssigphase ausbildet, bei dieser Legierung nicht erreicht werden kann. Gründe dafür sind, dass der Werkstoff nicht explizit für die Formgebung im teilflüssigen Materialzustand hergestellt wird, weshalb das Material als sogenanntes „Slurry“ verarbeitet wird. Dabei wird das Material nahezu aufgeschmolzen, beinhaltet jedoch in der Flüssigphase noch feste Bestandteile (Festphase f_s ca. 5 bis 50 %). Diese Verarbeitung bringt den Nachteil mit sich, dass das Rohteilhandling aufwändiger wird und eine Manipulation des Rohmaterials ohne Tiegel nicht mehr möglich ist.

Die besten Ergebnisse beim definierten Aufschmelzen der Legierung wurden mit den in Tabelle 2 dargestellten Werten erreicht.

Tabelle 2: Erwärmungsparameter für die CoCr28Mo6-Legierung

Frequenz	PWM ₁	PWM ₂	t ₁
1000 Hz	254	220	100 s

Bei der Verwendung dieser Erwärmungsparameter wird eine sehr gute Reproduzierbarkeit des Erwärmungsprozesses sichergestellt. Eine Variation des flüssigen Anteils kann dabei durch die Wahl der gewünschten Zieltemperatur bzw. Endzeit der Erwärmung erfolgen. Dies bedeutet, dass bei einer länger gewählten Gesamterwärmungsdauer die Zieltemperatur und damit der vorhandene Flüssigphasenanteil f_L erhöht werden.

Aufgrund der Verarbeitung als „Slurry“ erfolgt bereits beim Einleeren des Rohmaterials eine Teilfüllung der Kavität, welche den Formgebungsvorgang signifikant beeinflusst. Daher mussten zur Ermittlung der optimalen Verarbeitungstemperatur mehrere „Gussproben“ im Werkzeug angefertigt werden. Dabei wird das erwärmte Rohmaterial aus dem Tiegel in die Kavität gegeben und nach der Abkühlung ohne Pressvorgang wieder entnommen. Abbildung 6 zeigt die für drei unterschiedliche Erwärmungszeiten bzw. Temperaturniveaus erstellten „Gussproben“.

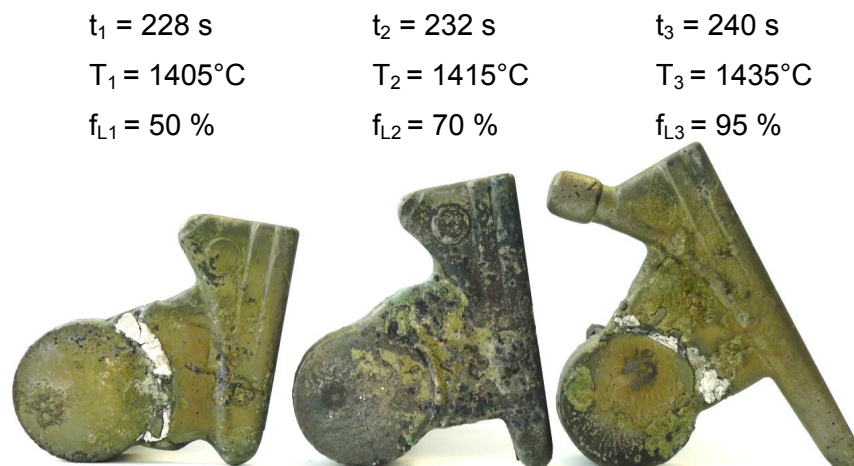


Abbildung 6: „Gussproben“ bei unterschiedlichen Erwärmungszeiten der Legierung CoCr28Mo6

Auf diese Weise konnte festgestellt werden, dass bei zu hoch gewählter Formgebungstemperatur das Material zu weit in den Formkasten einfließt und dort bereits erstarrt. Der anschließende Pressvorgang bewirkt somit ein Umfließen des bereits erstarrten Materials, einen sogenannten Kaltfluss, welcher in Abbildung 7 links deutlich zu erkennen ist.

Bei einer zu niedrig gewählten Formgebungstemperatur liegt im Rohmaterial ein zu geringer Flüssigphasenanteil vor, wodurch der Werkstofffluss in den Formkasten während der Formgebung gebremst wird und sich eine nur unvollständige Formfüllung des Bauteils ergibt.



Abbildung 7: Bauteil mit Kaltfluss (links); Unvollständig ausgefülltes Bauteil (rechts)

4.2. Weg-Geschwindigkeits-Profil des Pressenstößels

Eine weitere Einflussgröße des Formgebungsprozesses stellt das Weg-Geschwindigkeits-Profil, welches während des Pressvorgangs vom Pressenstößel abgefahren wird, dar. Hierbei muss darauf geachtet werden, das Werkzeug mit hoher Geschwindigkeit zu schließen, um ein vorzeitiges Erkalten des Werkstoffs zu vermeiden. Das Auftreffen auf das Rohmaterial erfolgt dabei mit geringer Geschwindigkeit, um evtl. auftretende Spritzverluste zu vermeiden und zudem einen laminaren Stofffluss zu erzeugen.

Bei den Formgebungsversuchen für die CoCr28Mo6-Legierung wurden die in Abbildung 8 dargestellten Weg-Geschwindigkeits-Profile untersucht. Die ersten Versuche wurden dabei mit „Kurve 1“ (blau) durchgeführt. Die Schließgeschwindigkeit erwies sich bei dieser Kurve als zu gering, weshalb das Rohmaterial bis zum Auftreffen zu stark abgekühlt und die Erstarrung zu früh einsetzte. Daher konnten die Bauteile nicht voll ausgeformt werden. Das deutlich „schnellere“ Weg-Geschwindigkeits-Profil „Kurve 3“ (grün) führte ebenfalls zu nicht vollständig ausgeformten Bauteilen, da die hohe Geschwindigkeit beim Auftreffen des Stempels auf das Rohmaterial (ca. 300 mm/s) zu einem Versagen der metallischen Dichtfläche und somit zur Ausbildung eines Grates in der Trennebene des Werkzeugs führte. Aufgrund des dadurch fehlenden Materialvolumens konnten ebenfalls nicht alle Bauteilbereiche ausgefüllt werden (siehe Abbildung 9).

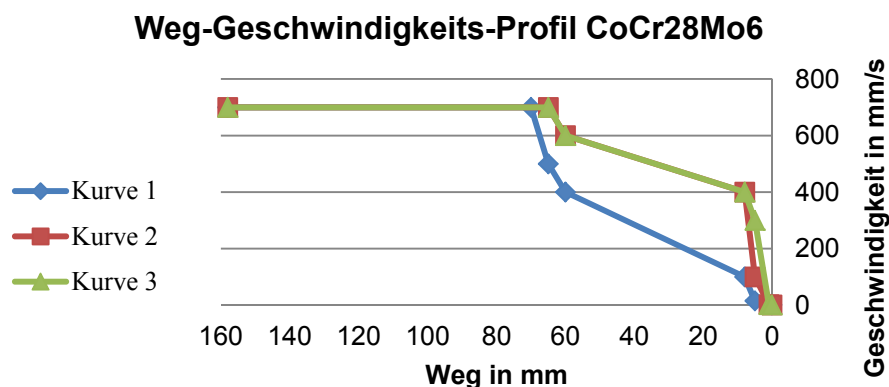


Abbildung 8: Weg-Geschwindigkeits-Profile des Pressenstößels für CoCr28Mo6

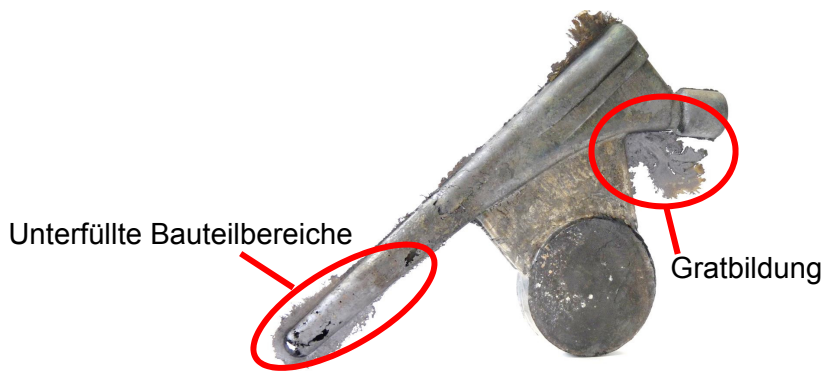


Abbildung 9: Unterfülltes Bauteil mit Gratbildung „Kurve 3“

Aus diesem Grund wurde die Auftreffgeschwindigkeit von ca. 300 mm/s auf ca. 100 mm/s reduziert („Kurve 2“ rot), wodurch die am besten ausgeformten Bauteile erzielt werden konnten.

4.3. Temperierung des Formgebungswerkzeugs

Neben den Einflussfaktoren Rohteilerwärmung und Weg-Geschwindigkeits-Profil des Pressenstößels wurde auch die Einstellung der Werkzeugtemperatur während des Formgebungsprozesses untersucht. Mit einer geeigneten Temperierung ist es möglich, ein vorzeitiges Erstarren des Rohmaterials im Werkzeug zu verhindern und somit die Formfüllung zu verbessern. Bei dem vorhandenen Werkzeugaufbau wurde darauf geachtet, dass die Erstarrung des Materials von außen nach innen erfolgt. Das bedeutet, dass am Ende des Formgebungsvorganges der Anguss der zuletzt erstarrende Bauteilbereich ist. Nur dann kann das Material während der Erstarrungsphase nachverdichtet und ein lunkerfreies Bauteil gewährleistet werden.

Die Auswahl der für die Werkzeugtemperierung benötigten Heizelemente sowie deren Positionierung am Formgebungswerkzeug erfolgten mithilfe einer thermodynamischen Auslegung, welche bereits während des Konstruktionsprozesses durchgeführt wurde. Hierzu kam die FEM-Software Ansys Workbench zum Einsatz. Tabelle 3 zeigt die für die Simulation gewählten Parameter. Die numerisch berechnete Temperaturverteilung im Formgebungswerkzeug ist in Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 3: Parameter für die thermodynamische Simulation

Lösungsansatz	Instationäre Lösung
Knotenanzahl des Rechenetzes	ca. 224000
Elementanzahl des Rechenetzes	ca. 102500
Heizelemente (Heizpatronen)	Vorgabe der Heizleistung
Wärmeleitung im Werkzeug	Vorgabe der werkstoff- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität
Wärmeübergang an die Umgebung	Konvektion und Strahlung
Wärmeleitung in den Pressentisch/-stößel	Perfekte Isolierung (keine Wärmeleitung)
Aufheizphase	Werkzeug geschlossen
Zieltemperatur der Aktivteile	400°C
Aufheizdauer	60 min

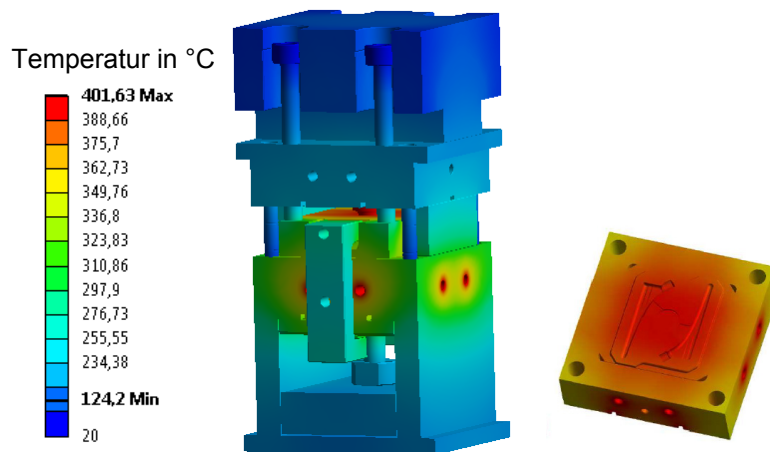


Abbildung 10: Thermische Auslegung des Formgebungswerkzeugs mit dem FEM-Code Ansys Workbench

Zum Erreichen der oben dargestellten Temperaturverteilung wurde das Werkzeug mit elektrischen Hochleistungsheizpatronen beheizt. Insgesamt wurde in das Formgebungswerkzeug eine Heizleistung von 7 kW eingebracht, welche sich auf 11 Heizpatronen verteilte. So wurden in der Schließplatte zwei Heizpatronen mit je 1000 W, im Stempel eine Heizpatrone mit 250 W und in der unteren Werkzeughälfte 8 Heizpatronen mit je 600 W eingebracht.

Die in der Simulation eingestellte Temperatur von ca. 400 °C an den Aktivteilen wurde während der Formgebungsversuche variiert, um den Einfluss der Werkzeugtemperierung auf den Formgebungsprozess zu ermitteln. Es wurden Temperaturen zwischen ca. 350°C und ca. 450 °C untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine Werkzeugtemperatur von etwa 400°C die besten Ergebnisse liefert. Bei zu niedrig gewählter Werkzeugtemperatur wurde eine Unterfüllung des Schaftes der Hüftprothese (siehe Abbildung 11 links) und bei zu hoch gewählter Werkzeugtemperatur die Ausbildung von Poren an der Bauteiloberfläche im Schaftbereich festgestellt (siehe Abbildung 11 rechts).



Abbildung 11: Unterfüllte Bauteile; Links: Unterfüllter Schaft (350°C); Rechts: Poren an der Bauteiloberfläche (450°C)

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe der hier beschriebenen Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass die Herstellung von Hüftimplantaten aus der Legierung CoCr28Mo6 mittels der Formgebung im

teilflüssigen Zustand möglich ist. Hierzu wurden unterschiedliche Prozessparameter untersucht und deren optimale Einstellungswerte ermittelt. In Abbildung 12 ist ein vollständig ausgeformtes Versuchsbauteil, welches mittels des Formgebungsprozesses im teilflüssigen Zustand hergestellt wurde, dargestellt.



Abbildung 12: Vollständig ausgeformtes Versuchsbauteil aus der Legierung CoCr28Mo6

Während der Prozessauslegung traten Probleme auf, welche im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten zur Formgebung dieser Legierung genauer untersucht werden müssen. So sollte die auftretende Oxidation während der induktiven Erwärmung der Rohteile vermieden werden. Hier gilt es in Zukunft, ein geeignetes Konzept zu entwickeln, welches das Fluten der Induktionsspule mit Schutzgas ermöglicht und es somit erlaubt, die Oxidation des Rohmaterials während der Erwärmung zu verhindern. Zusätzlich muss eine anschließende Oxidation beim Transport in das Formgebungswerkzeug und beim Schmiedevorgang verhindert werden. Als Lösung bietet sich die Integration des Induktors in den Pressenraum mit einer einhergehenden vollständigen Kapselung der Presse an.

Ebenso bedarf es weiterer Forschungsaktivitäten hinsichtlich des zu verarbeitenden Werkstoffs. Für die hergestellten Hüftimplantate sollten zunächst die mechanischen Eigenschaften durch Zugversuche sowie die Gefügeausbildung durch metallografische Schriffe untersucht werden. Zusätzlich könnten weitere Versuchsbauteile unterschiedlichen Wärmebehandlungen unterzogen werden, wodurch eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bzw. eine gezielte Anpassung an den späteren Belastungsfall erzielt werden soll.

Des Weiteren sollten an der Legierung CoCr28Mo6 rheologische Untersuchungen durchgeführt werden. Durch derartige Untersuchungen könnten Kennwerte ermittelt werden, welche eine verbesserte numerische Abbildung des Materialflusses mithilfe von CFD-Simulationen erlauben [20]. Zusätzlich können durch diese Untersuchungen eventuell vorhandene thixotrope Eigenschaften der Legierungen nachgewiesen und genauer beschrieben werden. Hierfür benötigte Hochtemperaturrheometer, welche Untersuchungen im Bereich von bis zu 1700°C erlauben, befinden derzeit noch in der Entwicklungsphase und wurden bislang lediglich anhand von Stahllegierungen erprobt [21, 22].

6. Literatur

- [1] Hirt, G.; Baadjou, R.: Thixoforming von Stahl und Aluminium; in Schmiede-Journal Ausgabe März 2008
- [2] Hirt, G.; Kopp, R.: Thixoforming – Semi-solid Metal Processing; Wiley-VCH Verlag, 2009, ISBN 978-3-527-32204-6
- [3] Briehl, H.: Chemie der Werkstoffe; 2. überarbeitete Auflage; B.G. Teubner Verlag Wiesbaden; 2008; ISBN 978-3-8351-0223-1
- [4] Wintermantel, E.; Ha, S.-W.: Biokompatible Werkstoffe und Bauweisen, Implantate für Medizin und Umwelt; Springer Verlag Berlin Heidelberg New York; 1996; ISBN 3-540-59405-1
- [5] Guillén, T.; Ohrndorf, A.; Christ, H.-J.; Hagemann, K.; Bührig-Polaczek, A.; Krupp, U.: Removal of the α -Case Layer from Precision-Cast Cellular TiAl6Nb7 to be Used for Biomedical Applications, in Advanced Engineering Materials, Volume 11, August 2009
- [6] Kertesz, L.; Liewald, M.; Unseld, P.: Center of Competence for Casting and Thixoforging - an Example of Networked Research. International Conference, (2009)
- [7] Kertesz, L.; Liewald, M.: Production of Titanium Alloy Components by semi-solid Forming; 12th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites S2P2012; 08.-11. Oktober 2012
- [8] Kertesz, L.: Untersuchung zur Einstellung des Formgebungsprozesses einer α - β -Titanlegierung im teilflüssigen Zustand; Dissertation; Universität Stuttgart; 2013; ISBN 978-3-88355-397-9
- [9] Liewald, M.; Kertesz, L.: Werkzeug- und Prozesstechnik für die teilflüssige Formgebung biokompatibler Werkstoffe; FTK 2008 Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart; Gesellschaft für Fertigungstechnik in Stuttgart; 2008
- [10] Wintermantel, E.: Medizintechnik Life Science Engineering; 4.Auflage 2008; Springer Verlag Berlin Heidelberg; ISBN 978-3-540-74924-0
- [11] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 5832-12 Chirurgische Implantate-Metallische Werkstoffe- Teil 12: Kobalt-Chrom-Molybdän-Schmiedelegerung; 2007
- [12] Aubert & Duval: Abnahmeprüfzeugnis EN 10204/3.1 für die Legierung CoCr28Mo6; 28.10.2011
- [13] Davis, J.R.: ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys; ASM International; 2000; ISBN 978-0-871-70685-0

- [14] Dobbs, H. S.; Robertson, J.L.M.: Heat treatment of cast Co-Cr-Mo for orthopedic implant use; in Journal of Material Science 18, Seite 391-401; 1983
- [15] Baur, J.: Anlagen für das Thixo-Schmieden, in: „wt Werkstatt 10-2000, S. 441-445, Springer-VDI-Verlag
- [16] Doege, E., Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen, 2. Bearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010, ISBN 978-0-8717-0686-7
- [17] Meßmer, G.: Gestaltung von Werkzeugen für das Thixo-Schmieden von Aluminium- und Messinglegierungen in automatisierten Schmiedezellen, MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt 2006, ISBN 3-88355-355-7
- [18] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 16760-1 Press-, Spritzgieß- und Druckgießwerkzeuge, 2002
- [19] Kertesz, L.; Liewald, M.: Forming of Biocompatible Materials in the Semi-Solid State, 10th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites S2P2008, RWTH Aachen, 16.-18. September 2008
- [20] Unseld, P.: Ein Beitrag zur Herstellung metallischer Verbundwerkstoffe durch teilflüssige/thixotrope Formgebung; Dissertation; Universität Stuttgart; 2009
- [21] Pape, L.: Fließ- und Deformationsverhalten von Aluminium- und Stahllegierungen im zweiphasigen Zustand; Dissertation; RWTH Aachen; 2012; ISBN 978-3-8440-0822-7
- [22] Modigell, M.; Volkmann, T.; Zang, C.: A High-Precision Rotational Rheometer for Temperatures up to 1700°C; 12th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites S2P2012; 08.-11. Oktober 2012