

Pulvermetallurgische Herstellung gradierter Werkzeugwerkstoffe

Für produzierende Unternehmen mit Schmiedeprozessen hat die Verbesserung der Effizienz der eingesetzten Gesenke eine immense Bedeutung. Hierbei sind neben den Herstellkosten vor allem die Rüst- und Reparaturkosten entscheidend. Der innovative Einsatz gradierter Werkstoffsystemen als Ausgangsmaterial in der Herstellung von Schmiedegesenken ermöglicht eine lokale Einstellung der Werkstoffzusammensetzungen innerhalb des Werkzeugs. Somit können belastungsangepasste Gesenke durch lokale Kombinationen von Werkstoffeigenschaften angepasst werden, wodurch z.B. die Erhöhung der Gesenk-Lebensdauer ermöglicht wird. Der Einsatz gradierter Werkstoffsysteme ist ein völlig neuartiger Ansatz mit großem Potential zur Senkung der Reparaturkosten in Umformprozessen.

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens¹, M.Sc. Najmeh Vahed¹, Dipl.-Ing Helmut Brand²
¹Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM), Leibniz Universität Hannover
²Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW)

Einleitung

Das Fertigungsverfahren Massivumformung - als Untergruppe der Umformtechnik - stellt neben weiteren gießtechnischen oder spanenden Fertigungsverfahren eine effiziente Methode für die Serienproduktion dar. Diese Technik ermöglicht die Herstellung von Bauteilen aus einem breiten Massenspektrum; von einigen Gramm bis zu weit über eine Tonne. Die ununterbrochene Gefügeausrichtung in massiv umgeformten Bauteilen resultiert in höherer Betriebsfestigkeit, wodurch eine geringere Dimensionierung ohne Herabsetzung der Belastbarkeit erzielt werden kann. Aus diesem Grund stellt die Umformtechnik eine nicht zu ersetzende Methode in der Leichtbauentwicklung besonders in Fahrzeug- und Maschinenbau dar.

Die großen und mittelständischen Unternehmen der Massivumformung, besonders des Gesenkschmiedens, besitzen eine lange Tradition und nehmen in der deutschen Wirtschaft hinsichtlich des Produktionswerts einen wichtigen Platz ein. Laut aktuellen Statistikdaten vom Industrieverband Massivumformung (IMU) beträgt die Anzahl der deutschen Unternehmen, die der Massivumformung angehören circa 250. Es wurden in Deutschland im Jahr 2011 knapp 2,9 Mio. Tonnen bzw. rund 2 Mrd. Teile massiv umgeformt. Mit einem Produktionswert von 8,5 Mrd. Euro ist die Massivumformung in Deutschland klarer Marktführer in Europa und der zweite im weltweiten Vergleich [1]. Die Verfahrensvielfalt in der Massivumformung umfasst neben den inkrementellen Verfahren, Freiformschmieden, auch die abbildenden Verfahren des Gesenkschmiedens sowie Kaltmassivumformverfahren.

Der Wirtschaftszweig der Massivumformung unterliegt immer mehr dem Kostendruck der konkurrierenden Niedriglohnländer sowie den erhöhten Anforderungen der Kunden an Lieferzeit und Termintreue. Die hohen Belastungen an Schmiedewerkzeugen insbesondere durch neue und schwer umformbare Werkstoffe führen zu schwankenden Durchlaufzeiten, was einer geforderten Termintreue widerspricht. Ausgehend von den Kundenwünschen nach immer komplexer werdenden Konturen der Schmiedeteile, hat der Verschleißschutz und die daraus resultierende Standmengenerhöhung der zum Einsatz kommenden Gesenke immer mehr an Bedeutung gewonnen [2]. Die durchschnittlichen Standmengen der Gesenke liegen häufig bei nur wenigen tausend Teilen [3]. Mit der Berücksichtigung der stark wachsenden asiatischen Märkte ist die innovative Weiterentwicklung der Massivumformprozesse ein Anliegen mit höchster Priorität, um auch zukünftig in Deutschland wettbewerbsfähig zu bleiben.

Im Rahmen des von der AiF geförderten Forschungsprojektes „Pulvermetallurgische Herstellung von gradierten Werkzeugwerkstoffen für die Warmmassivumformung“ wird die Erhöhung der Verschleißfestigkeit und somit der Standmenge von Werkzeugen der Warmmassivumformung angestrebt. Die untersuchte Lösung besteht im Einsatz von belastungsangepassten Werkzeugstählen auf Basis pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoffe. Über die gezielte Kombination und pulvermetallurgische Verbindung von metallischen Werkstoffen und Hartstoffen in einem Werkstoffsystem sollen gradierte Halbzeuge zur Fertigung von Schmiedegesenken entwickelt und hergestellt werden. Durch die Erzeugung angepasster Eigenschaften können diese Werkstoffsysteme speziell im Bereich der Warmmassivumformung angewendet werden.

Die endgültige Werkzeugkontur der Schmiedegesenke wird abschließend spanend aus dem gradierten Halbzeug endgefertigt. Bei der Auslegung der Gradientenstruktur soll der Materialabtrag durch spanende Bearbeitung berücksichtigt werden, sodass nach der Endbearbeitung die erforderliche Härte an der Gesenkoberfläche vorhanden ist. Eine weitere Möglichkeit bietet die endkonturnahe Formgebung der Pulver, wodurch die Herstellung von zur Gesenkkontur parallelen Gradierungen ermöglicht wird (Abbildung 1).

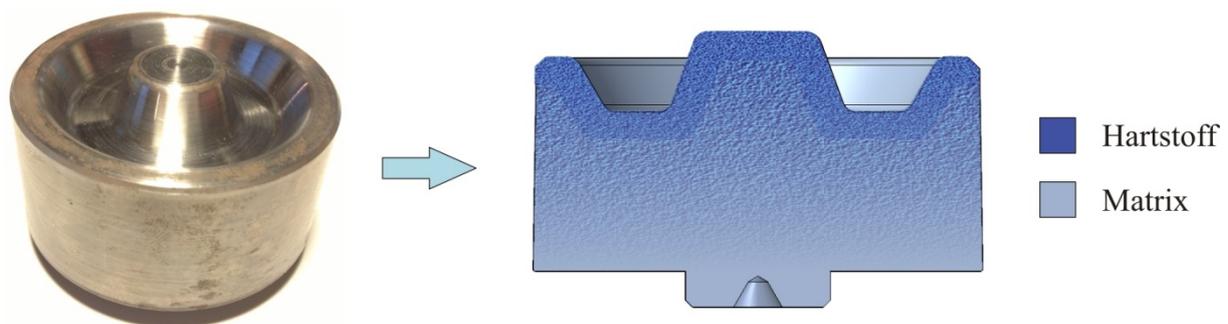


Abbildung 1: Ein verschleißfestes Schmiedegesenk aus gradiertem Pulverwerkstoff

Verschleißfeste Werkzeugwerkstoffe

Die industriell eingesetzten Schmiedegesenke aus Warmarbeitsstahl unterliegen einem komplexen Belastungskollektiv aus mechanischen, thermischen, chemischen und tribologischen Beanspruchungen. Dies führt zu hohem Verschleiß, der den frühzeitigen Ausfall der Werkzeuge bedingen und so die Standmenge entscheidend verringern kann. Die Standmenge eines Werkzeugs wird definiert als die Anzahl der Teile, die bis zum Ausfall des Werkzeugs hergestellt werden kann, und stellt einen

wichtigen Faktor für die wirtschaftliche Herstellung von Schmiedeteilen dar. Neben den unmittelbaren Herstellkosten der Werkzeuge entstehen weitere Kosten durch Rüst- und Einrichtungszeiten beim Werkzeugwechsel. Der Anteil der Materialkosten an den Herstellkosten eines Gesenkschmiedestücks liegt im Durchschnitt bei 10 %, während der Kostenanteil der Rüst- und Einrichtungszeiten an den Stillstandzeiten 20 % beträgt. Durch eine Steigerung der Gesenkstandmenge lassen sich demnach die Kosten des Bauteils deutlich reduzieren, zusätzlich ergibt sich eine höhere Fertigungssicherheit [4].

Eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren zur Herstellung der Werkzeuge mit immer komplexeren Anforderungsprofilen und verbesserten Funktionseigenschaften bei gleichzeitig erhöhter Wirtschaftlichkeit sichert den Kompetenzvorsprung. Zurzeit werden zur Herstellung von Werkzeugen der Warmmassivumformung überwiegend Warmarbeitsstähle eingesetzt. Eine Qualitätserhöhung dieser vergütbaren, meist hochlegierten und teuren Werkstoffe ist durch erzeugungs- und legierungstechnische Maßnahmen möglich. Eine Alternative liegt in der oberflächennahen Erhöhung der Verschleißbeständigkeit, welche eine wirtschaftlichere Lösung darstellt und in aktuellen Forschungsarbeiten stark vorangetrieben wird [5].

Die Pulvermetallurgie und Sintertechnologie wiederum sind weitere urformende Fertigungsverfahren, die zur Herstellung von Hartverbundwerkstoffen als verschleißfeste Werkzeugwerkstoffe eingesetzt werden können. Durch die Pulvermetallurgie können Werkstoffkombinationen hergestellt werden, die gießtechnisch schwierig oder teilweise nicht herstellbar sind. Hierdurch kann das Spektrum erreichbarer Bauteileigenschaften und -funktionen deutlich gesteigert werden. Aufgrund technologischer und qualitativer Vorteile der Pulvermetallurgie hat sich dieses Herstellungsverfahren in den letzten Jahren immer stärker gegenüber anderen Verfahren durchgesetzt. Im Vergleich zu den konventionellen Fertigungsverfahren können eine höhere Wirtschaftlichkeit durch gute Rohstoffausnutzung, eine größere Formgebungsfreiheit, eine gesteigerte Produktivität sowie eine verbesserte Bauteilqualität erzielt werden [6]. In Abbildung 2 sind Beispiele für pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile (PM-Bauteile) dargestellt.



Abbildung 2: Beispiele für pulvermetallurgisch hergestellte Bauteile, Quelle: Hüttenmuseum Thale

Bei pulvermetallurgisch hergestellten Werkzeugstählen (PM-Werkzeugstahl) handelt es sich in der Regel um eine Metallmatrix mit gebundenen Hartstoffpartikeln, die zur Steigerung der mechanischen Festigkeit des Matrixwerkstoffs führen. Hartstoffe werden nach ihrem Bindungscharakter in kovalent, ionisch und metallisch gebundene Typen unterteilt. Die daraus resultierenden charakteristischen Eigenschaften sind hohe Schmelzpunkte, Härte und Elastizitätsmodule, gute chemische Beständigkeit sowie geringe thermische Ausdehnungskoeffizienten. Im Bereich des Verschleißschutzes besitzen

hauptsächlich metallische Hartstoffe wie Titan-, Wolfram-, Niob-, Vanadium- und verschiedene Chromkarbide eine hohe technische Relevanz. Weiterhin kommen Borkarbide und ionisch gebundene Hartstoffe wie Aluminium- und Zirkonoxide zum Einsatz. Neben den typischen physikalischen Eigenschaften werden an die Hartstoffe hohe Anforderungen bezüglich der Anbindungsfähigkeit an die metallische Grundmatrix gestellt. Metallische Hartstoffe neigen zur Legierungsbildung mit Eisen in der Matrix, wodurch eine besonders gute Anbindung erreicht wird [7]. Als Basiswerkstoff fungieren in der Praxis erprobte Werkzeugwerkstoffe für die Kaltarbeit. PM-Werkzeugwerkstoffe sind Verbundwerkstoffe mit besonders hoher Härte und Verschleißbeständigkeit bei gleichzeitig hoher Zähigkeit. Die aktuellen Haupteinsatzgebiete für pulvermetallurgisch hergestellte Werkzeugwerkstoffe liegen in der Zerspantechnik und der Kaltumformung.

Zur Steigerung der Verschleißfestigkeit von PM-Stählen können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Eine übliche Methode ist das Einsatzhärten. Ein problematischer Aspekt dieses Verfahrens ist die ungleichmäßige Diffusion des Kohlenstoffs im Pulverwerkstoff. Dies ist besonders bei Mischpulvern mit unterschiedlichen lokalen Eigenschaften der Fall, da die Werkstoffgefüge während des Sinterns nicht vollständig homogenisiert werden. Dieser Effekt kann außerdem durch das Vorhandensein von groben Körnern verstärkt werden [8].

Ein weiteres Verfahren ist die Herstellung von PM-Werkstoffen aus fertiglegierten Pulvern, wie zum Beispiel Chrom, Wolfram, Molybdän, Vanadium sowie Cobalt, mit unterschiedlichen Karbidgehalten. Der Vorteil von solchen PM-Werkstoffen gegenüber den konventionellen Festkörpermaterialien ist die homogene Karbidverteilung ohne Netz- und Zellenstruktur, welche vergleichsweise isotrope Werkstoffeigenschaften, eine bessere Zähigkeit und Bearbeitbarkeit herbeiführt [8]. Der Herstellung solcher Werkstoffe ist die Erzeugung von karbidhaltigen Pulvern vorausgesetzt, was zusätzlichen Produktionsaufwand und -kosten bedeutet. Zudem ist der Anteil an Karbidgehalt bei solchen Werkstoffen begrenzt, da es zu einer schlechten Pressbarkeit, geringen Zähigkeit und niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs führt. Dies ist besonders für Anwendungen mit hohen Temperaturen von Nachteil.

Die Flexibilität bei pulvermetallurgischen Herstellungsverfahren ermöglicht die Realisierung komplexerer Werkstoffkonzepte. Hier sind beispielsweise Gradientenwerkstoffe (FGM – functionally graded materials) zu nennen. Gradiente Werkstoffsysteme vereinen die Vorteile von PM-Werkzeugstählen und Oberflächenbeschichtungen. Nach B. Ilschner besteht die Aufgabe eines Gradienten in einem Gradientenwerkstoff darin, einen weiteren Gestaltungsparameter zu liefern, der eine Optimierung des Werkstoffs als Ganzes oder die Einstellung eines gewünschten Eigenschaftsprofils zulässt [9]. Ein solches Werkstoffsystem kann für die Herstellung von Werkzeugen mit hoher Randhärte und damit tribologisch guten Eigenschaften sowie einem zähen Kern zur Aufnahme von Überlastungen eingesetzt werden. Die Entwicklung von gradierten Werkstoffen basiert auf zwei Gestaltungsprinzipien; der grundlegenden Auswahl geeigneter Werkstoffe und Werkstoffpaarungen sowie dem strukturellen Aufbau der Werkstoffkombination [10]. Einen großen Forschungsbedarf stellt die Reproduzierbarkeit der Gradierung dar.

Gradiente Werkstoffsysteme

Gradiente Werkstoffsysteme sind gekennzeichnet durch einen Übergang in ihrer Materialzusammensetzung, ihres Gefüges und/oder Struktur innerhalb des Werkstoffvolumens. Die daraus

abgeleiteten Werkstoffeigenschaften, wie die Härte oder die Zähigkeit weisen somit ebenfalls Gradienten auf. So bewirkt die Gesamtheit der lokalen Eigenschaften die Eigenschaft des Verbundes. Die Materialeigenschaften können als Funktion einer oder mehrerer Raumrichtungen beschrieben werden. Des Weiteren bietet ein gradiertes Werkstoffsystem die gezielte Einstellbarkeit und Anpassung der Werkstoffeigenschaften an die Einsatzanforderungen. Dies bietet die Möglichkeit, optimal auf den Einsatzzweck zugeschnittene Werkzeuge herzustellen. Elastizitätsmodul, thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie Wärmekapazität sind einige Materialeigenschaften, die vorwiegend von der chemischen Zusammensetzung des Materials abhängen. Darüber hinaus bewirkt eine Variation der Gefüge- bzw. Mikrostruktur des Materials Änderungen der Kenngrößen Ermüdungsfestigkeit, Zugfestigkeit, Bruchzähigkeit, Korrosionsfestigkeit und magnetische Eigenschaften [11].

Gradientenwerkstoffe lassen sich zwischen den Werkstoffverbunden und den Verbundwerkstoffen ansiedeln. Der große Vorteil dieser Werkstoffe besteht darin, dass im Vergleich zu den Werkstoffverbunden bei komplexeren Bauteilen und Bauteilgruppen keine Fügetechnik benötigt wird und somit potenzielle Schwachstellen im Fertigungsprozess entfallen. Eine erste Anwendung von Gradientenwerkstoffen fand sich in den fünfziger Jahren. So wurden gradierte Turbinenschaufeln mit ausgezeichneten thermomechanischen Eigenschaften hergestellt. In den siebziger Jahren fanden die Gradientenwerkstoffe Anwendung in Polyurethan-Integralschäumen, die eine hohe Stoßfestigkeit bei geringem Gewicht ermöglichen. Außerdem sorgte die Entwicklung von Lichtleitfasern mit gradiertem Brechungsindex für große Aufmerksamkeit. Sie ermöglichten bis dahin unerreichten Übertragungsbandbreiten. Im Jahr 1972 wurden Gradientenwerkstoffe erstmals als eigenständiges Werkstoffkonzept bekannt gegeben, blieben jedoch zunächst relativ unbeachtet [12]. Mitte der achtziger Jahre trugen Luft- und Raumfahrtstudien in Japan zur Entwicklung und Erprobung von Gradientenwerkstoffen bei. Sie wurden zur Herstellung der Hitzeschilde für die Rumpfnase und Flügelkanten weltraumfähiger Flugkörper, die beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre extremen Temperaturbeanspruchungen von über 1700°C ausgesetzt sind, angewendet [13]. Zeitgleich nahm in den USA die Forschung auf diesem Gebiet immer stärker zu und es wurden Einzelforschungsprojekte an vielen Universitäten durchgeführt. Van Nguyen untersuchte die Eigenschaften härterer PM-Hartlegierungen mit gradiertem Struktur [14]. Als Matrixwerkstoff diente der Warmarbeitsstahl 1.2714 (56NiCrMoV7) mit CrB₂ und TiB₂ als zugesetzte Hartstoffe. Hierbei wurden die Proben durch das Verfahren „Heiß-Isostatisches Pressen (HIP)“ gefertigt. Die Untersuchungen haben belegt, dass die kritische Risslänge in gradierten Strukturen größer war als in nicht gradierten Legierungen mit Hartstoffanteil. Dadurch wurde eine höhere Stabilität des Werkstoffs mit einer gradierten Struktur bei Rissentstehungen gezeigt. Somit lassen sich Legierungen mit einem sehr hohen Hartphasenanteil herstellen, welche trotz überlegener Verschleißfestigkeit gegenüber dem reinen, pulvermetallurgisch verarbeiteten Basiswerkstoff eine gute Zähigkeit aufweisen. Aus Literatur der 90er Jahre sind auch die Arbeiten von Schober und Richter zu erwähnen [10]. Sie haben die Herstellung von Hartmetall aus Wolframkarbidpulver mit einer linearen Änderung von Korngrößen und/oder Bindegehalt zur Realisierung eines Härtegradienten untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass infolge der C- und CO-Diffusion beim Sintern die Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung der Schichten und damit das Härtegefälle ausgeglichen werden. Der Diffusionsaustausch zwischen den Schichten kann jedoch mithilfe von Kurzzeit-Sinterverfahren wie zum Beispiel Spark Plasma Sintern (SPS), auch feldaktives Sintern (FAST) genannt, begrenzt werden.

In dem von der DFG geförderten Schwerpunktprogramm „Gradientenwerkstoffe“ (SPP 733, 1995-2003) wurden die Grundlagen und Verfahren zur Herstellung gradiertter Werkstoffsysteme erarbeitet. Dadurch wurde ein Beitrag zu dem bestehenden Stand der Technik geleistet und die Grundlage für eine Industrialisierung dieser Fertigungsmethode erweitert. Dabei wurden sowohl verfahrenstechnische Fragen als auch werkstofftechnische Themen sowie Charakterisierungsmethoden dieser Werkstoffklasse behandelt. Neben den experimentellen Untersuchungen stand die Modellierung und numerische Simulation der gradierten Werkstoffsysteme im Mittelpunkt der Untersuchungen. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden hauptsächlich polymerbasierte Werkstoffe untersucht, welche als thermische Barrierschichten, Biowerkstoffe oder Sensoren Anwendung finden [15].

Weiterhin wurde die Technik der gradierten Werkstoffe für den Einsatz in weiteren Anwendungsbereichen untersucht. Im Bereich der Fertigungstechnik wurden Gradientenwerkstoffe z.B. als Einsätze für Schneidwerkzeuge verwendet [16]. Die Herausforderung bestand hierbei in der Entwicklung eines serientauglichen Herstellungsprozesses zur Fertigung von gradierten Hartmetallwerkzeugen mit hochtemperaturfester Oberfläche. Für den Werkzeug- und Formenbau wurden in [17] Gradientenwerkstoffe vorgestellt, die Gradiierungen zwischen einer Verschleißschicht und einem gut wärmeleitenden Kern, einer Verschleißschicht und einem zähen Kern bzw. zwischen einer korrosionsfesten Schicht und einem zähen Werkzeuggrundkörper enthalten. Dabei wurden die gradierten Schichten bzw. Bauteile mittels Laser-Auftragschweißen hergestellt (Abbildung 3).

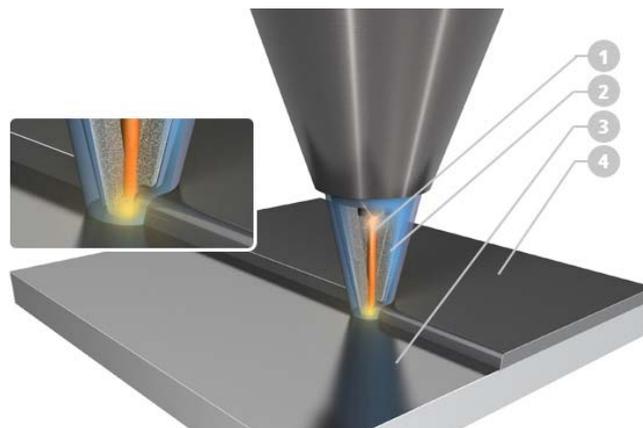


Abbildung 3: Verfahrensprinzip beim Laser-Auftragschweißen, 1: Laserstrahl, 2: Pulverzufuhr, 3: Werkstück, 4: Auftrag, Quelle: O.R. Lasertechnologie GmbH

Sowohl bei der Herstellung wie auch beim Einsatz von Gradientenwerkstoffen entstehen aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten der Verbundpartner phasenspezifische Eigenspannungen, die Rissbildung zur Folge haben können. Zusätzlich können diesen Mikroeigenspannungen, makroskopische Eigenspannungsfelder überlagert sein, die beispielweise als Folge inhomogener Abkühlungsprozesse entstehen. Da diese Eigenspannungen unter Betriebsbedingungen oft durch Lastspannungen überlagert sind, können sie einen maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile haben [17]. Deshalb muss das Ablaufprofil des Sinterprozesses, d.h. die Einstellung der Temperatur über die Zeit, den thermophysikalischen Eigenschaften der Werkstoffkombination angepasst werden. Demnach stellt das Sintern der Werkstoffe mit unterschiedlichen lokalen Zusammensetzungen und Eigenschaften eine große Herausforderung dar.

Herstellung eines gradierten Schmiedegesenks

In diesem Kapitel werden die ersten Untersuchungen, die im Rahmen des von der AiF geförderten Forschungsprojekts „pulvermetallurgische Herstellung von gradierten Werkzeugwerkstoffen für die Warmmassivumformung“ durchgeführt sind, vorgestellt. Bei der Durchführung der Untersuchungen steht die pulvermetallurgische Herstellung von verschleißfesten Werkzeugwerkstoffen durch Zumischung von Hartstoffen zum Stahlpulver im Mittelpunkt. Darüber hinaus wird durch Variation des Hartstoffanteils innerhalb der Pulverschüttung eine annähernd stufenlose Gradierung hergestellt. Dadurch kann eine lokale Einstellung des Härtegrads und somit eine gezielte Anpassung der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs realisiert werden. Dieses Verfahren stellt eine kostengünstige und flexible Methode zur Herstellung von verschiedenen Pulverlegierungen dar. Die Durchführung und Anwendung dieser Methode wird anhand der pulvermetallurgischen Herstellung von zwei konturierten Schmiedegesenken mit einer Gradierung in der Werkstoffzusammensetzung demonstriert (Abbildung 4). Durch die Gradierung soll eine kontinuierliche Verminderung des Hartstoffanteils von der Funktionsfläche in Richtung Kern realisiert werden.



Abbildung 4: konturierte Gesenke zur Verschleißuntersuchung

Die in Abbildung 4 dargestellten Schmiedegesenke werden bereits am IFUM im Bereich der Tribologie und Verschleißuntersuchungen eingesetzt. Die scharfen Radien des linken Gesenks unterstützen die Erzeugung hoher Verschleißbelastungen während der Umformung und ermöglichen damit die Untersuchung von Verschleißigenschaften des Werkzeugwerkstoffs. Die besondere Form des rechten Werkzeugs erzeugt hohe Umformgrade durch das Schmieden von flachen Bauteilen aus zylindrischen Halbzeugen. Demzufolge entstehen hohe Gleitwege, welche die Untersuchung des Reibungsverhaltens zwischen Werkstoff und Werkzeug begünstigen. Um die mechanischen Kräfte zu minimieren ist das Werkzeug offen und ohne ausgeprägte Gratbahn ausgelegt.

Bei der Durchführung der geplanten Versuche sind sowohl technologische als auch werkstofftechnische Aspekte zu bearbeiten. Die Auslegung gradiertter Werkzeuge erfolgt auf Basis der numerischen Simulationen und Modellierung der Belastungen im Gesenk. Die belastungskritischen Bereiche werden durch hohe Konzentration von Hartstoffpartikeln verstärkt, während restliche Bereiche des Gesenks mit geringem bzw. keinem Anteil an Hartstoffpartikeln eine hohe Duktilität und Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Zwischen harten und duktilen Bereichen besteht ein stufenloser Übergang mit gradiertter Struktur. Durch die gezielte Zusammenstellung der Metall-Hartstoff-Pulvermischungen können die lokalen Werkstoffeigenschaften durch die Variation der Mischungsverhältnisse und Mischungsgradienten an die Prozessbelastungen angepasst werden. Der Einsatz gradiertter Werkstoffe zur Herstellung von Schmiedewerkzeugen soll zu einer Erhöhung der Werkzeugstandmenge und somit zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von gradierten Werkstoffen ist die Auswahl geeigneter Matrix- und Hartstoffphasen. Dabei bestehen große Anforderungen an die Pulverkorngöße und -form

sowie Kombinationen von Pulverwerkstoffen. Die Paarungen der Werkstoffe sollen keine Diffusionsvorgänge während des Sinterprozesses hervorrufen, da in diesem Fall eine unerwünschte Änderung der Werkstoffeigenschaften und der Gradientenstruktur möglich ist. Des Weiteren sollen die Korngrößen der zu kombinierenden Pulverwerkstoffe aufeinander abgestimmt sein, so dass eine möglichst homogene Verteilung der Hartpartikeln im Matrixwerkstoff erzielt wird. Es ist zu beachten, dass durch ein geeignetes Mischungsverhältnis die einzelnen Hartpartikel von Matrixwerkstoff eingebettet werden sollen. Der Grund liegt in der Differenz der Sintertemperaturen von Matrix- und Hartwerkstoffen. Das Mischpulver wird bei der Sintertemperatur des Matrixwerkstoffs gesintert, so dass die Hartstoffpartikel inert bleiben und lediglich formschlüssig in die Matrix eingeschlossen werden.

Für eine grundlegende Untersuchung und Bewertung der Realisierbarkeit von gradierten Bauteilen wurden zuerst kleine zylindrische Proben hergestellt (Abbildung 5). Die Vorgehensweise und Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.



Abbildung 5: Gradierte Proben aus St- u. WC-Pulver (von links nach rechts: Proben mit 3, 4 und 5 Gradierungsschichten)

Grundlagen

Ein wichtiger Gestaltungsparameter für die Herstellung eines binären Werkstoffgradienten ist die Werkstoffzusammensetzung der obersten und der untersten Gradientengrenze. Idealerweise weist der Gradient eine stufenlose Änderung der Werkstoffzusammensetzung auf. Verfahrensbedingt, so wie es in der vorliegenden Arbeit der Fall ist, wird der Gradient durch Auftragen von Werkstoffschichten hergestellt. Durch Verkleinerung der Schichthöhen sowie Verringerung der Differenz der Mischungsverhältnisse von benachbarten Stufen, nähert sich der gesamte Gradient einem stufenlosen Aufbau an. Die Eliminierung vom sprunghaften Wechsel der Werkstoffzusammensetzung innerhalb des Werkstoffs verbessert die mechanischen Eigenschaften und Leistung des gesamten Werkstoffs und unterstützt die Homogenisierung der Eigenspannungen im Werkstoff. Bei der schichtartigen Herstellungsweise sind neben der Beschreibung der Mischungsgrenzwerte, zwei weitere Parameter zu definieren: die Schichthöhe und die Schrittweite der Mischungsva-riation. Bei einer konstanten Schnittfläche entlang der Bauteilhöhe, können die Schichten nach Gewicht portioniert werden. Die Mischungsverhältnisse werden üblicherweise in Gewichtsprozent (Gew.-%) angegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Werkstoffgradienten durch Mischung von einem eisenbasierten Pulver als Grundwerkstoff mit einem karbidischen Pulver als Hartphase hergestellt. Die ersten Proben wurden aus Stahlpulver als Grundwerkstoff und Wolframkarbid als Hartstoffanteil hergestellt. Die Gradienten entstanden durch Variation des Wolframkarbidanteils entlang der Bauteilhöhe. Die detaillierten Werkstoffdaten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Auswahl der Werkstoffe

	Bezeichnung	Hersteller Firma	Partikelgröße [µm]	Zusammensetzung					
Matrixwerkstoff	ATOMET 1001HP (St)	QMP	P < 250	C	O	S	Mn	P	Cu
				0,004	0,06	0,004	0,015	0,01	0,02
Hartstoff	Wolframkarbid (WC)	QMP	P < 10	min. 99,5 % WC					

Es ist zu berücksichtigen, dass die Zumischung von Hartstoffen zur Verringerung der Pressbarkeit der Pulvermischung führt. Bei einem zu hohen Anteil des Hartstoffs ist das Verdichten der Pulvermischung zu einer Masse mit ausreichendem Zusammenhalt nicht mehr möglich. Aus diesem Grund ist die Ermittlung des maximalen Anteils des Hartstoffs im Grundpulver, bei dem die Pressbarkeit der Pulvermischung noch gegeben ist, notwendig. Dazu wurden Proben aus homogenen Pulvermischungen aus Stahl- und Wolframkarbidpulver mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen gepresst und hinsichtlich des Zusammenhalts der Probe nach dem Pressen untersucht. Die unterschiedlichen Pulvermischungen wurden durch Erhöhung des Wolframkarbidanteils, ausgehend von 5 Gew.-% und mit einer Schrittweite von 5 Gew.-%, produziert.

Die Pulvermischungen wurden mit einer automatischen Pulvermischanlage (Turbula F2T) der Firma WAB hergestellt (Abbildung 6). Der Mischer verfügt über eine Zeitschaltuhr sowie ein Potentiometer für eine stufenlose Einstellung der Drehzahl von 22 bis 96 min⁻¹. Der Mischbehälter kann bis zu einem Bruttogewicht von 10 kg beladen werden. Die für die Versuche benötigten Pulvermischungen wurden bei einer Drehzahl von 40 min⁻¹ für 15 Minuten gemischt.

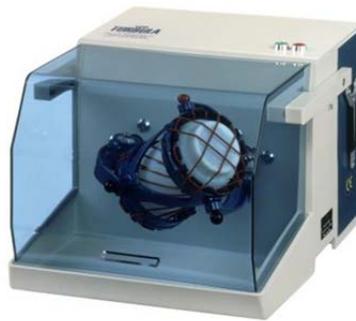


Abbildung 6: Automatische Pulvermischanlage (Turbula F2T, Fa. WAB)

Die einzelnen Pulvermischungen wurden zu kleinen zylindrischen Proben (Ø20 x 20 mm) mit einem Pressdruck von 600 MPa gepresst und nach Zusammenhalt des Grünlings (gepresstes Bauteil) bewertet. Zur Formgebung der Proben wurde ein einfaches Matrizenwerkzeug zum einseitigen Axialpressen eingesetzt. Das Werkzeug besteht aus einer Formgebungsmatrize, einem Stempel und der Unterplatte und wird in eine Handpresse eingebaut (Abbildung 7). Anhand der Ergebnisse wurde einen Grenzwert von 20 Gew.-% Wolframkarbid in Mischung mit Stahlpulver, bei dem die Pulvermischung gut pressbar ist, festgestellt.

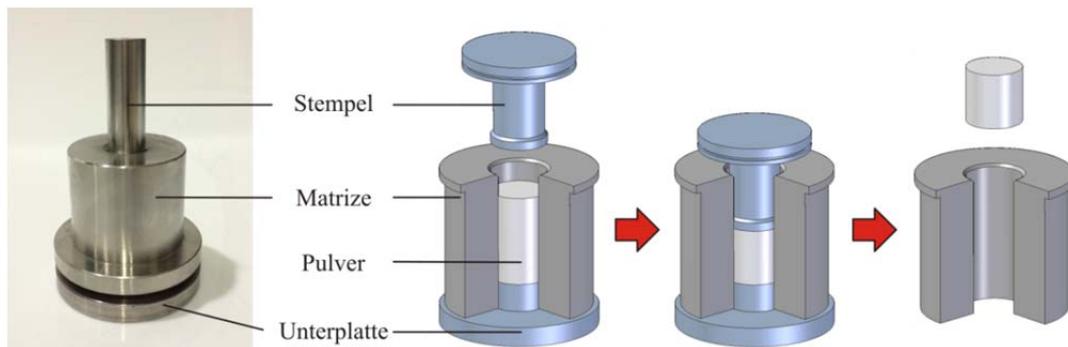


Abbildung 7: Die Komponenten eines einseitigen Pulverpresswerkzeugs

In weiteren Untersuchungen wurden die gepressten Bauteile aus homogenen Mischungen gesintert und hinsichtlich der Verteilung der Hartstoffe im Matrixwerkstoff untersucht. Zur Durchführung des Sinterprozesses wurde ein rechnergesteuerter Retortenofen der Firma Xerion eingesetzt. Der Sinterofen ermöglicht die Programmierung und Ausführung eines zeit- und temperaturgesteuerten Sinterzyklus. Die Retorte des Ofens besteht aus drei Erwärmungszonen, welche durch parallele Erwärmung eine gleichmäßige Temperatur innerhalb der Retorte erzeugen. Beim Sintern der Proben wurden die Sinterparameter nach Anforderungen des Stahlpulvers als Grundwerkstoff eingestellt. Der Temperaturablauf beim Sinterprozess ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Proben wurden mit einer gleichmäßigen Heizrate von 10 °C/min auf 950 °C vorerwärmt und über 20 Minuten bei dieser Temperatur gehalten. Danach wurde die Erwärmung bis zur Sintertemperatur, d.h. 1150 °C, fortgesetzt. Nach 20 Minuten bei konstanter Sintertemperatur wurden die Proben mit einer Abkühlrate von 5 °C/min auf Raumtemperatur gekühlt. Die Sinterung erfolgte unter Vakuum.

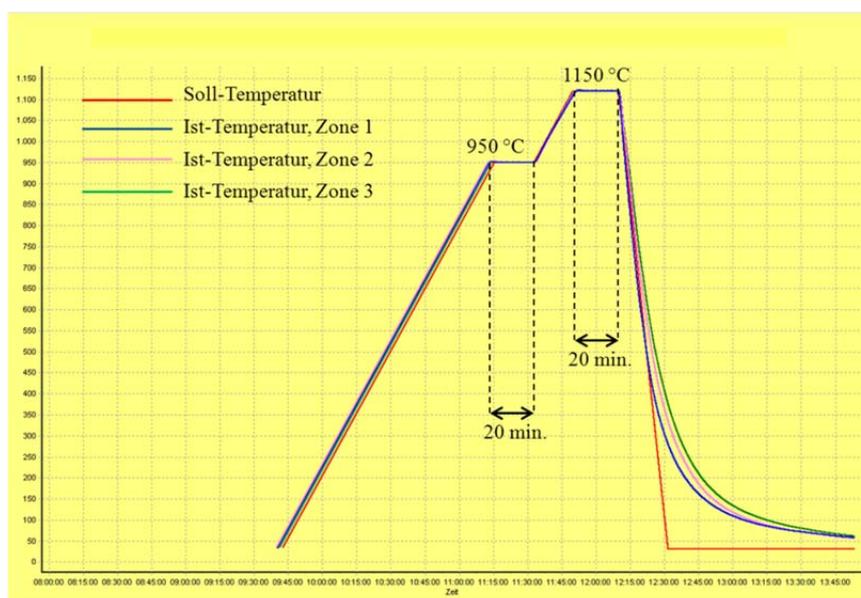
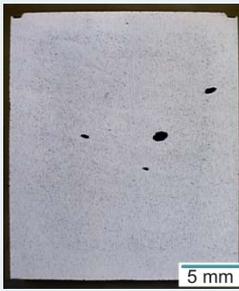
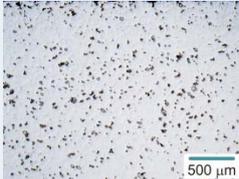
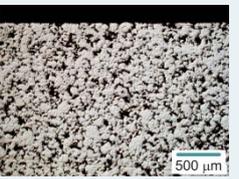
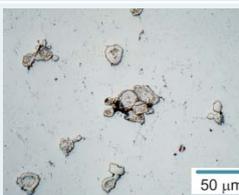
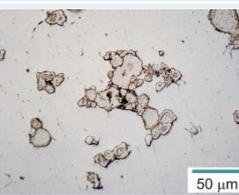
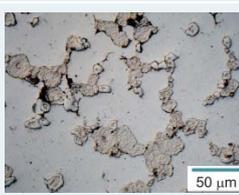
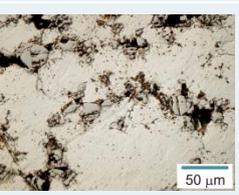


Abbildung 8: Temperaturverlauf beim Sintern der Proben in drei Erwärmungszonen des Sinterofens

Für die metallographischen Untersuchungen wurden die Proben entlang des Durchmessers getrennt und an der Schnittfläche präpariert. Um die allgemeine Verteilung von Hartstoffen in der Stahlmatrix zu bewerten, wurden makroskopische Aufnahmen erzeugt. Außerdem wurden mikroskopische Auf-

nahmen verwendet, um die Einbindung von einzelnen Hartstoffpartikeln in Stahlpulver zu untersuchen. Tabelle 2 beinhaltet die metallographischen Aufnahmen von ausgewählten Proben.

Tabelle 2: Metallographische Aufnahmen von gepressten Proben aus homogenen Pulvermischungen

Zusammensetzung	95 Gew.-% St 5 Gew.-% WC	90 Gew.-% St 10 Gew.-% WC	85 Gew.-% St 15 Gew.-% WC	80 Gew.-% St 20 Gew.-% WC
Vergrößerung				
Übersicht				
50-fach				
500-fach				

Auf den Aufnahmen, die die gesamte Längsschnittfläche zeigen, ist zu erkennen, dass es innerhalb der Probe zu einer unregelmäßigen Lunkerbildung bzw. Entstehung von größeren Poren gekommen ist. Die Ursache ist zum einen die unzureichende plastische Formänderung durch Formgebung in kaltem Zustand und zum anderen die einseitige Pressrichtung. Die Verbindung oder Agglomeration von Harten Partikeln blockieren den Kraftfluss und verhindern die Verdichtung von unter stehendem Pulver. Durch Anwendung von zwei- oder mehrseitigem Pressen kann dieser negativer Effekt behoben werden. Des Weiteren ist die manuelle Befüllung eine Ursache für die Entstehung der Lunker, wodurch eine ungleichmäßige Verteilung des Pulvers in der Matrize entsteht. Durch die Erzeugung von Vibration in der Matrize vor dem Pressvorgang kann jedoch eine komplette und gleichmäßige Formfüllung der Matrize gewährleistet und die Lunkerbildung weitestgehend verhindert werden. Anhand der Mikroaufnahmen wird es ersichtlich, dass die Erhöhung des Hartstoffanteils im Werkstoff die Agglomeration der Hartpartikel herbeiführt. Dies verursacht eine lokale Verminderung der Pulververdichtung und Entstehung von größeren Poren bzw. Lunkern. Dieser Effekt ist in Abbildung 9 detailliert dargestellt. Hinsichtlich dieser Problematik steht die Beseitigung von Lunkern und Poren und damit Verbesserung der Werkstoffeigenschaften im Mittelpunkt der zukünftigen Untersuchungen.

In einer weiteren Untersuchung wurde der Einfluss von Mischzeitvariation auf die Homogenität der Pulvermischung untersucht. Dazu wurde die Pulvermischung aus 15 Gew.-% Wolframkarbid und

85 Gew.-% Stahlpulver über unterschiedliche Mischzeiten (10, 15 und 20 min.) gemischt. Die Proben wurden nach dem Pressen und Sintern metallographisch untersucht und miteinander optisch verglichen. Anhand der Ergebnisse wurde kein deutlicher Effekt erkannt.

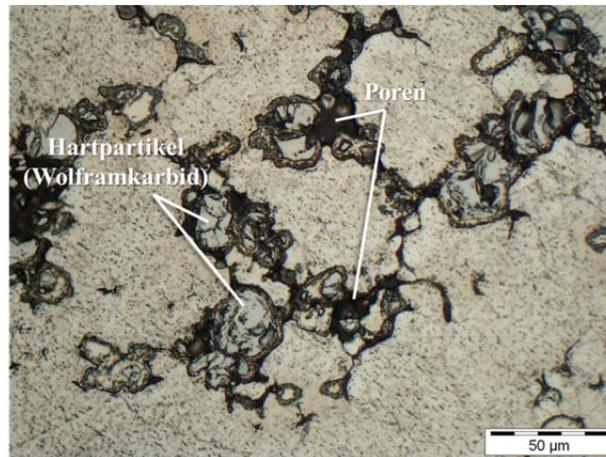


Abbildung 9: Metallographischer Schliff einer gesinterten Probe aus 85 Gew.-% Stahl (Atomet1001) und 15 Gew.-% Wolframkarbid, poliert und geätzt

Herstellung gradierter Proben

Für die Herstellung der gradierten Proben wurde zuerst das Grundpulver mit Hartstoff in kleinstufig absteigenden Mischungsverhältnissen gemischt und vorbereitet. Die verschiedenen Pulvermischungen wurden anschließend schichtweise mit möglichst gleichmäßigen Höhen sukzessive nach absteigendem Hartstoffanteil in eine Pressmatrize manuell eingefüllt. Um die Höhe der Stufen gezielt einzustellen, wurden die Pulvermischungen für jede Schicht nach Gewicht portioniert. Aufgrund des variablen Anteils des Hartstoffs mit höherer Dichte im Stahlpulver ist die Variation der Schichtenhöhe bei gleichen Gewichten nicht vermeidbar. Dies bedeutet, dass die Schichthöhe bei gleich bleibendem Gewicht und steigendem Hartstoffanteil abnimmt. Nach dem Einfüllen jeder Schicht wurde die Pulveroberfläche glatt gestrichen und für die nachfolgende Schicht vorbereitet. Anschließend wurde die gradierte Pulverschüttung einseitig und axial mit einem Pressdruck von 600 MPa zu einem gradierten Grünling verdichtet. Die verwendeten Pulvermischungen sowie ihre Zuordnung in der gradierten Pulverschüttung sind in Abbildung 10 dargestellt. Da die Verteilung der Hartstoffe im Werkzeug nach dem Pressvorgang nicht mehr veränderlich ist, stellt die Herstellung einer genau strukturierten Pulverschüttung einen äußerst wichtigen Prozess dar. Nach dem Pressvorgang wurden die gradierten Grünlinge gesintert. Der Sinterprozess wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen von Grundwerkstoff, d.h. Stahlpulver, durchgeführt. Die Parameter und Ablauf waren mit denen des bereits vorgestellten Sinterzyklus von homogenen Mischungen in Kapitel „Grundlagen“ identisch.

Stufe	Stahl	Wolframkarbid
1	100 %	0 %
2	95 %	5 %
3	90 %	10 %
4	85 %	15 %
5	80 %	20 %

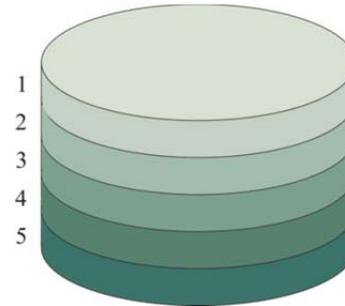


Abbildung 10: Mischungsverhältnisse der Gradientenstufen

Ergebnisse

Im Rahmen der Versuche wurden gradierte Proben mit unterschiedlicher Schichtdicken hergestellt. Diese wurden bezüglich der Formstabilität der Schichten nach dem Pressen und Sintern näher untersucht. In Abbildung 11 sind die gradierten Strukturen verschiedener Proben anhand metallographischer Aufnahmen dargestellt. Anhand der Bilder wird deutlich, dass infolge der Reduzierung der Stufenhöhen die Formstabilität des Gradienten abnimmt und die Schichten zur Bildung gewölbter Formen neigen. Diese Formabweichung kann mit den unterschiedlichen mechanischen Verhalten der Schichten infolge der unterschiedlichen Mischungsverhältnisse begründet werden. Einerseits führt die Variation des Hartstoffanteils zur Absenkung der Pressbarkeit der Pulvermischung, andererseits variieren dabei die Eigenspannungen, welche durch das Sintern im Werkstoff entstehen. Ein weiterer Faktor für die Formabweichung der Schichten ist die Wandreibung, welche beim Pressen zwischen der Matrizenwand und dem Pulver entsteht. Die Wandreibung wirkt der Presskraft entgegen und verursacht eine ungleichmäßige Verdichtung im Pulver, wodurch die Bereiche nahe der Matrizenwand weniger und innere Bereiche mehr verdichtet werden. Mit Erhöhung des Hartstoffanteils steigt die Reibungskraft, sodass der Einfluss der Wandreibung innerhalb der Gradierungsschichten mit der Variation der Werkstoffzusammensetzung korreliert.

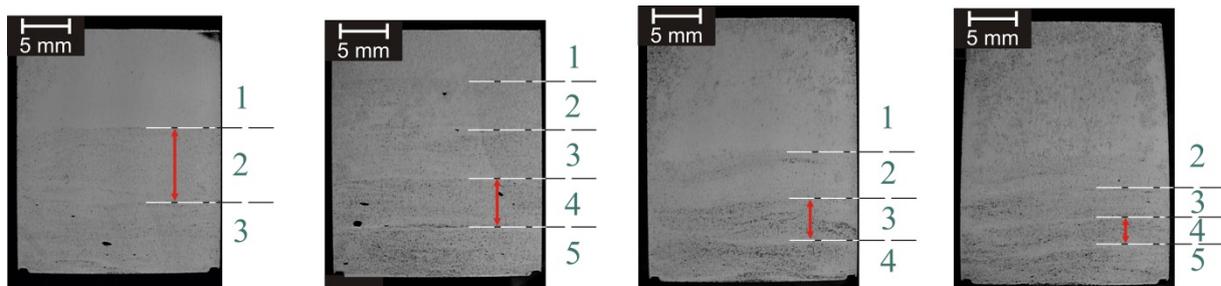


Abbildung 31: Schnittfläche der gradierten Proben mit variierenden Höhen der Gradientenstufen

Unter dem Einfluss von Presskraft und dem Zusammenwachsen der Pulverpartikel durch den Sinterprozess verwischen die Stufengrenzen zunehmend, was bei dünneren Schichten einen stufenlosen Werkstoffübergang zur Folge hat und somit eine kontinuierliche Veränderung der Werkstoffeigenschaften erwarten lässt. Ein frühzeitiges Werkstoffversagen durch sprunghafte Werkstoffcharakteristika kann somit vorgebeugt werden. Durch Veränderung der Schichthöhen und Mischungsverhältnisse, ist es möglich, die Eigenschaften des Werkstoffs lokal anzupassen. Ein entscheidender Faktor bei der

Herstellung von gradierten Werkstoffen ist das Erzielen von einer hohen und insbesondere gleichmäßigen Verdichtung des Pulverwerkstoffs, um den Bruch oder Entstehung von Rissen zwischen den Gradientenstufen unter den Betriebsbelastungen zu vermeiden.

Angesichts der Problematik bezüglich der Werkstoffdichte sowie Formabweichung der gradierten Werkstoffstruktur, die sich im Rahmen der bisherigen Versuche herausgestellt hat, wurde das Axial-Pressverfahren mit anschließendem Sintern als eine ungeeignete Methode eingestuft. Aus diesem Grund steht zukünftig die Optimierung des Formgebungsverfahrens bzw. die Anwendung einer alternativen Methode im Mittelpunkt der Untersuchungen. Im nächsten Kapitel wird auf eine mögliche Lösung zur Erhöhung der Produktqualität eingegangen.

Ausblick

Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und Erhöhung der Belastbarkeit von pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffen oder Bauteilen können alternative Verfahren zum axialen Kaltpressen angewendet werden. Eine Möglichkeit ist das axiale Heißpressen, welches als eine wichtige Fertigungsmethode bei der Herstellung von nicht oxidischen Keramikwerkstoffen sowie Metallmatrix-Verbundwerkstoffen besonders in Kleinserien eingesetzt wird. Dabei wird das Pulver unter gleichzeitiger Druck und Erwärmung verdichtet. Die Prozesswärme unterstützt die Diffusionsprozesse innerhalb des Werkstoffs und fördert das Zusammenwachsen der Pulverpartikel. Somit kann eine höhere Verdichtung im Vergleich zum Kaltpressen erreicht werden [18].

Ein weiteres Fertigungsverfahren ist das heißisostatische Pressen (HIP), welche in der Produktion von vollverdichteten Werkstoffen z.B. Werkzeugstählen, wo eine pulvermetallurgische Prozesskette aufgrund der besonderen Anforderungen an die Produkteigenschaften unentbehrlich ist, eingesetzt wird. Die durch dieses Verfahren hergestellten Werkstoffe weisen eine feine, homogene und isotrope Mikrostruktur auf. Des Weiteren wird das HIP-Verfahren in der endkonturnahen Fertigung verwendet, wenn hierdurch trotz hoher Fertigungskosten wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können [19]. Die HIP-Technik wird bei der Herstellung von Großteilen aus Hartmetallen sowie von Spezialsinterwerkstoffen wie Schnellarbeitsstahl, Super- oder Titanlegierungen industriell eingeführt [6].

In zukünftigen Arbeiten wird die Herstellung von gradierten Schmiedegesenken (Abbildung 4) dargestellt, anhand vom HIP-Verfahren angestrebt. Um die Nachbearbeitung der Gesenkkonturen insbesondere auf der Funktionsfläche mit hohem Anteil an Hartstoff weitgehend zu verringern, werden formgebende Elemente aus Vollmaterial verwendet. Dadurch wird eine endkonturnahe Formgebung des Pulvers realisiert. Das Prinzip dieser Idee ist in Abbildung 12 veranschaulicht. Ein Vorteil dieser Methode ist die zur Gesenkkontur parallele Positionierung der Gradientenstufen. Dadurch wird eine Entfernung von verschleißfesten Bereichen während der spanenden Endbearbeitung und somit die Beeinträchtigung der gradierten Struktur des Werkstoffs verhindert.

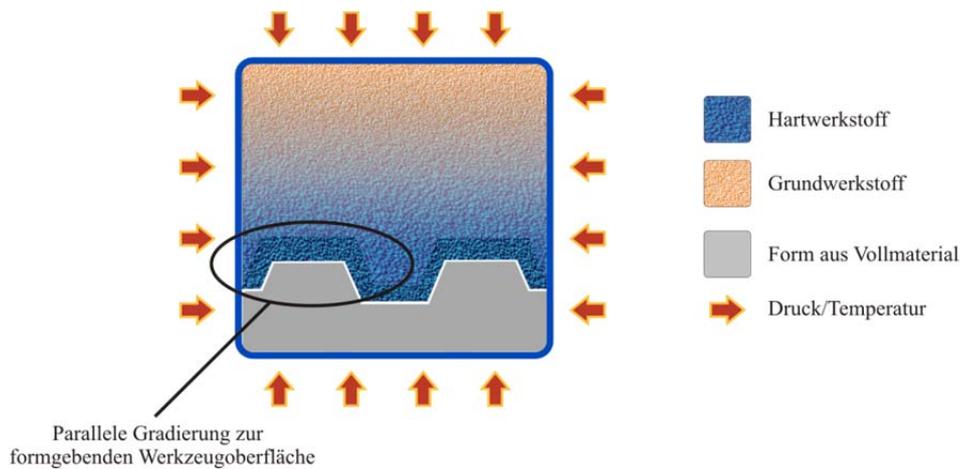


Abbildung 42: Prinzip der endkonturnahen Herstellung eines gradierten Schmiedegesenks mithilfe von heißisostatischem Pressen (HIP)

Danksagung

Das IGF-Vorhaben „Pulvermetallurgische Herstellung von gradierten Werkzeugwerkstoffen für die Warmmassivumformung“, AIF 17271N der Forschungsvereinigung Werkzeuge und Werkstoffe wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Industrieverband Massivumformung (IMU), <http://www.metalform.de/branche.html>, Stand Januar 2014
- [2] Michler, D.; Brandt, J.: Verschleißschutzschichten für Umformwerkzeuge, Umformtechnik 32, Nr.4, 1998
- [3] Lange, K.: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 2: Massivumformung, Springer Verlag, 1988
- [4] Barnert, L.: Verschleißminderung bei Werkzeugen der Warmmassivumformung durch Verwendung von keramischen Gesenkeinsätzen, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2005

- [5] Pant, M.: Erhöhung der Standzeit von durch Thermoschock und Verschleiß hoch beanspruchten Warmarbeitswerkzeugen aus Stahl 1.2365, Dissertation, RWTH Aachen, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-2873-6, 2004
- [6] Schatt, W.; Wieters, K.-P. ; Kieback, B.: Pulvermetallurgie - Technologien und Werkstoffe, 2. Ed., Springer Verlag, Germany, 2007
- [7] Berns, H.: Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe, Springer Verlag, ISBN 3-540-62925-4, 1998
- [8] Friedrich Josef Esper: Pulvermetallurgie, expert-Verlag, 1996, ISBN 3-8169-1321-0
- [9] Ilschner, B.: Structural and Compositional gradients: basic idea, preparation, applications“, Journal de Physique IV, C7, 3, (Proceeding of Euromat `93), S. 763-772, 1993
- [10] Suresh, S.; Mortensen, A.: Fundamentals of Functionally Graded Materials, ISBN 1-86125-063-0, Maney Materials Science Verlag, 1998
- [11] Gasik, M.; Cherradi, N.; Kawasaki, A.: FGM components: PM meets the challenge. Metal Powder Report 51, Issue 12, 1996
- [12] Güntner, A.: Gießtechnisch gradierte Werkstoffverbunde, Dissertation, RWTH Aachen, Shaker Verlag, ISBN 3-8265-7516-4, 2000
- [13] Niino, M.; Maeda, S.: Recent Development Status of Functionally Gradient Materials, ISIJ International, Vol. 30, No. 9, pp. 699-703, 1990
- [14] Van Nguyen, C.: Härtbare PM-Hartlegierungen mit gradierter Struktur, VDI-Berichte, Reihe 5, Nr. 192, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990
- [15] Kieback, B.; Neubrand, A. ; Riedel, H.: Processing techniques for functionally graded materials, Material Science and Engineering A362, pp. 81-105, 2003
- [16] Lengauer, W.; Dreyer, K.: Functionally graded hardmetals. Journal of Alloys and Compounds (2002)
- [17] Weisheit, A.: Multifunktionale Gradientenwerkstoffe für den Werkzeugbau, Abschlussbericht, Report-Nr. FKZ 03N5045, 2006
- [18] German, R.: Powder Metallurgy Science, 2. Edition, ISBN 1-87895-442-3, Princeton, 1994
- [19] Thümmler, F.; Oberacker, R.: Introduction to powder metallurgy, ISBN 0-901716-26-X, The Institute of Materials, University press, Cambridge, 1993