

Generative Manufacturing Processes – Innovations in Producing Complex Tool Geometries for Die Forging in the Short-Term Provision of Forged Prototypes

The laboratory phase is long since behind them. Generative manufacturing techniques, such as laser beam smelting technology, are fast developing to become veritable production processes and are also causing a stir in die manufacturing. Forging tools with complex geometries, no longer produced by cutting but by construction techniques, are ready to function in modular tool systems after relatively short time intervals and focus functionality, in particular, on demanding shaping tools. With these technologies, prototype, forged workpieces are available in record time.

Generative Fertigungsverfahren – Innovationen bei der Herstellung komplizierter Werkzeuggeometrien für das Gesenkschmieden zur kurzfristigen Bereitstellung von geschmiedeten Prototypen

Dipl.-Ing. Markus Bergmann,
Dr.-Ing. Bernhard Müller und
Dipl.-Ing. André Wagner,
Chemnitz

Die Laborphase haben sie längst hinter sich. Generative Fertigungsverfahren wie die Laserstrahlschmelztechnologie mausern sich zum veritablen Fertigungsverfahren und machen auch bald in der Gesenkfertigung von sich reden. Die nicht mehr spannend, sondern vielmehr aufbauend gefertigten Schmiedewerkzeuge komplexer Geometrien sind in modularen Werkzeugsystemen in relativ kurzen Zeiträumen funktionsbereit und bringen die Funktionalität besonders anspruchsvoller Umformwerkzeuge auf den Punkt. Mit dieser Technologie sind Prototypen-Schmiedestücke in Rekordzeit verfügbar.

Seit zirka 15 Jahren entwickeln sich neue, sogenannte „Generative“ Fertigungsverfahren, die rechnergestützt und in den meisten Anwendungen auf Grundlagen der Lasertechnik basieren. Eines der Hauptanwendungsgebiete ist, durch das lokale Auftragen von Werkstoffschichten im automatisierten Prozess auf Grundlage vorhandener 3D-CAD-Modelle Bauteile zu generieren. Erste Werkzeugbauanwendungen entstanden schon bald nach dem Aufkommen dieser neuartigen schichtbasierten Fertigungsverfahren, wie die Stereolithographie oder das Laminated Object Manufacturing (LOM), welche unter dem Oberbegriff „Rapid Tooling“ als konsequente Weiterentwicklung des „Rapid Prototyping“ zusammengefasst werden. Zu diesem Zeitpunkt war es noch nicht möglich, metallische Materialien direkt in einem generativen Verfahren zu verarbeiten. Das

führte dazu, dass Prototypen aus nichtmetallischen Materialien gefertigt wurden, um daraus Formen und Modelle für sich anschließende Fertigungsverfahren im Werkzeugbau zu generieren. Diese zum Teil noch konventionelle Technologie stellte einen indirekten Weg dar, um zu Werkstücken oder Werkzeugen aus Originalmaterial, zum Beispiel Metall, zu gelangen.

Erste Forschungen wurden damals zur Thematik der kurzfristigen wirtschaftlichen Fertigung von Prototypen in Verbindung mit umformtechnischen Anwendungen für generativ gefertigte Werkzeuge durchgeführt, deren Ansätze zur Fertigung von Prototypen und die dazu notwendigen Werkzeuge auf direktem Wege durch Rapid Tooling mittels speziellen Fertigungsverfahren führten. Mit der Entwick-

lung des Selective-Laser-Sintering-Verfahrens (SLS) hin zum direkten Metall-Laser-Sintern (DMLS) wurde eine Möglichkeit geschaffen, auf direktem Weg die generative Herstellung metallischer Körper mit komplexen Geometrien zu ermöglichen. Industrielle Anwendungen im Bereich der Kunststofftechnik und im Spritzguss zeigten, dass diese Werkzeuge für die Fertigung von Vor- und Kleinserien wirtschaftlich einsetzbar sind. Mit der Entstehung der Laserstrahlschmelztechnologie eröffneten sich grundlegend neue Möglichkeiten. Werkstoffe für Werkzeug der Warmumformung, wie 1.2709, 1.2343 oder 1.2344 sind jetzt generativ verarbeitbar. Dabei wird das pulverförmige Ausgangsmaterial vollständig zu einem nahezu 100 Prozent dichten Gefüge aufgeschmolzen. Mittels der Laserstrahlschmelztechnologie ist es möglich, vollwertige Werkzeuge für die Serienpro-

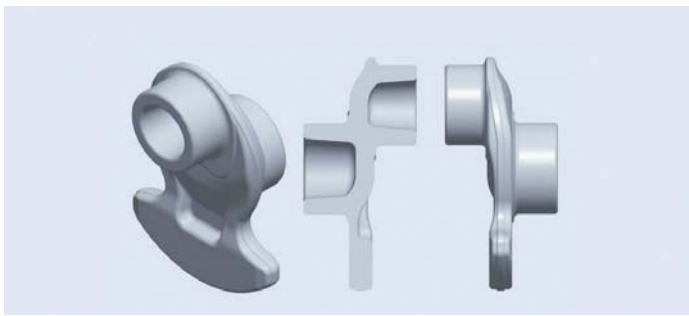


Bild 1: CAD-Modell des Referenzteils.

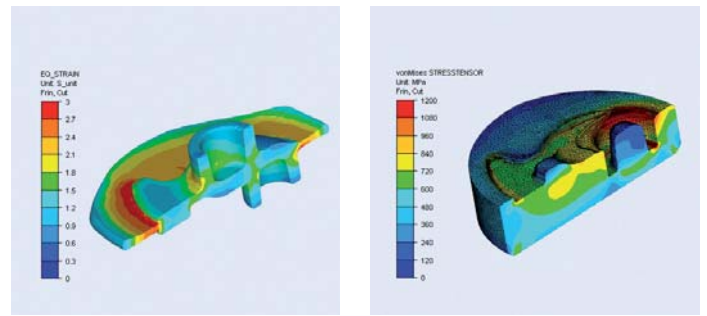


Bild 2: Vergleichsumformgrad am Fertigteil; Gesenk, von Mises Vergleichsspannung.

duktion herzustellen, ohne dass nennenswerte Einschränkungen in der Werkzeugstandzeit gegenüber konventionell gefertigten Werkzeugen erkennbar sind. Tendenziell ist eine wachsende Akzeptanz laserstrahlgeschmolzener Formen und Einsätze bei Spritzgießwerkzeugen zu verzeichnen. Besonders vorteilhaft sind die Möglichkeiten, konturnahe und konturkonforme Platzierungen von Kühlkanälen nahezu beliebiger Komplexität zu erzeugen.

Innovativer Ansatz für Schmiedewerkzeuge

Umformwerkzeuge der Massivumformung wurden bisher nur in geringem Maß auf die Einsatzmöglichkeit generativ gefertigter Werkzeuge untersucht. Die erfolgreiche Anwendung im Spritzgießen und Leichtmetall-Druckgießen legt eine tiefere Betrachtung anderer Anwendungsbereiche generativ gefertigter Werkzeuge mit komplexen 3D-Geometrien nahe. Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchung war es, die Anwendbarkeit laserstrahlgeschmolzener Gesenke im praktischen Einsatz zur Herstellung geschmiedeter Prototypen nachzuweisen. Das gewählte Bauteil basiert auf einem realen Referenzteil mit anspruchsvollen Geometrieelementen. Die Versuchsschmiedung wurde auf einer Kupplungsspindelpresse SPKA 2000 durchgeführt. Zur Bewertung dieses innovativen Verfahrensansatzes wurden die Kriterien Zeit, Qualität und Kosten im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren betrachtet. Die Forderungen nach industriell geschmiedeten Prototypen bei kürzestmöglicher Lieferzeit stellt für die Schmiedeindustrie in zunehmendem Maße eine echte Herausforderung dar. Das Ziel, „echte Schmiedestücke innerhalb einer Woche“ in die Realität umzusetzen, soll mit dem Einsatz moderner Laserstrahlenschmelztechnologien realisierbar werden. Bauteilkonstrukteure sollen zukünftig die Möglichkeit erhalten, bereits in frühen Entscheidungsphasen der Produktentwicklung entsprechende Prototypen, die durch umformtechnische Prozessketten gefertigt werden, zum Beispiel für Bauteiltests oder die Prozesskettenentwicklung, zur Verfügung zu haben.

Der Schmiedeprozess stellt bezüglich Temperatur- und Verschleißverhalten ähnliche Anforderungen an die Werkzeuge wie Druckguss. Für Warmformwerkzeuge hatte bisher die Einbringung von Kühlkanälen aufgrund fertigungstechnischer Grenzen eine geringe Bedeutung. Mit der freien Gestaltbarkeit von Hohlräumen durch die neuen

generativen Verfahren ergeben sich völlig neue Möglichkeiten der Integration von Funktionalitäten in die Werkzeuge. Insbesondere bei extrem tiefen Gravuren mit hohen thermischen Belastungen könnten durch Kühlkanäle erhebliche Steigerungen der Standmengen erreichbar werden. Die erzielbaren Gravurtoleranzen und Oberflächengüten bieten die Chance, auf eine mechanische Bearbeitung der Gesenkoberfläche zu verzichten, wodurch sich eine erhebliche Zeiteinsparung in der Werkzeugfertigung ergibt.

Werkzeugentwicklung – Simulation

Für die Machbarkeitsuntersuchungen wurde ein praxisrelevantes Schmiederohteil nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Komplexität der Teilegeometrie (zum Beispiel Gravurtiefe mit erhabenem, nicht rotations-symmetrischem Dorn).
- Nichtsymmetrische Anordnung von Formelementen.
- Gekröpfte Formteilungsebene.
- Anspruchsvolle Querschnittsübergänge (Grund- und Gravurkantenradien, Bodendicken, Ausformschräge).

Mit diesen Auswahlkriterien sollte erreicht werden, dass mit entsprechend positiven Ergebnissen eine Verallgemeinerung für künftige Praxisanwendung gewährleistet ist. Ausgewählt wurde ein Kurbelwellensegment mit Gegengewicht, Komponente einer Demonstrator-kurbelwelle in Leichtbauweise (Bild 1), Masse ca. 1,8 kg, Werkstoff 42CrMo4.

Besonders anspruchsvoll für den Materialfluss und die damit verbundene Beanspruchung der Gesenke zur optimalen Formfüllung sind zwei asymmetrisch versetzte, nicht rotations-symmetrische Dorne zur Formung der hohlen Lagerstellen am Kurbelsegment. Die geometrische Lage der Dorne führt während des Schmiedens zu extrem hohen Querkräften im Dorngrundradius.

Typische Anforderungen an die Eigenschaften von Schmiedegesenken liegen bei 1.500 ±100 MPa Zugfestigkeit. Für Schmiedegesenke werden in der Regel Warmarbeitsstähle wie 1.2343, 1.2344 oder 1.2709 eingesetzt. Diese Werkstoffe können auch im Laserstrahlenschmelzprozess verarbeitet werden. Laserstrahlgeschmolzene Bauteile können eine Zugfestigkeit bis zu 1.950 MPa nach der Wärmebehandlung erreichen.

Maximale Abmessungen für laserstrahlgeschmolzene Teile liegen für die meisten Laserstrahlenschmelzanlagen bei 250 × 250 × 250 mm. Die für die Untersuchungen gefertigten Gesenkeinsätze hatten die Abmessungen Ø 170 × 54 beziehungsweise Ø 47 mm (Gesenk oben/unten). Die Werkzeugkonstruktion der Gesenke wurde unter Verwendung vorhandener Muttergesenke mit Topfführung ausgeführt (Fixierung mittels Presspassung in Muttergesenken). Die Werkzeugbelastung und der Materialfluss während des Schmiedeprozesses wurde mit der Software „Forge - 2009“ simuliert. Die installierte Rechenleistung ermöglicht neben der Stoffflusssimulation eine elastische Werkzeugberechnung mit Berücksichtigung der Armierung durch einen virtuellen Festsitz. Spannungsspitzen können damit sicher identifiziert und Anpassungen der Geometrie vorgenommen werden. Die Vergleichsspannungen am Werkzeug sind in Bild 2, rechts, dargestellt. Die Optimierung von Umformteil- und Werkzeuggeometrie zur Reduzierung der Gesenkbeanspruchung kann in mehreren Iterationen mit relativ kurzer Rechenzeit erfolgen. Die Simulationsergebnisse liefern gleichzeitig Konstruktionswerte zur Dimensionierung der Werkzeuge beziehungsweise Gesenke, um möglichst geringe Bauvolumen für das Laserstrahlenschmelzen realisieren zu müssen (Kostenfaktor). Die Simulationsergebnisse zeigen das Umformergebnis einschließlich der Gratausbildung (Bild 2, links, Darstellung des Vergleichsumformgrads).

Einsatz generativ gefertigter Gesenke

Beide Gesenkeinsätze wurden am Fraunhofer IWU generativ mittels Laserstrahlenschmelzen des Gesenkwerkstoffs 1.2709 hergestellt. (Bild 3). Die Einsätze wurden mit einem 3D-Scanner vermessen, um ihre Maßhaltigkeit direkt gegen das 3D-CAD-Modell zu prüfen. Die Vermessung fand vor den Polierarbeiten statt und zeigte sehr gute Maßhaltigkeit mit Abweichungen < 0,1 mm. Die Gesenkkontur wurde von Hand poliert und nicht mechanisch nachbearbeitet. Der Außendurchmesser und die Rückseite wurden mechanisch auf das Passungsmaß zum Muttergesenk bearbeitet, in das Muttergesenk eingeschrumpft und das Schmiedegesenk produktionsfertig montiert.

Der Schmiedeprozess unter Verwendung generativ gefertigter Gesenkeinsätze wurde vom konventionellen Schmiedeverfahren zur Kleinserien-



Bild 3: Laserstrahlgeschmolzener Gesenkeinsatz.



Bild 4: Leichtbau-Kurbelwellensegmente. Bilder: Autoren

fertigung des gleichen Referenzteils abgeleitet. Die technologischen Parameter Einsatz- und Roh-teilmasse, 2,4 kg beziehungsweise 1,8 kg, Erwärmungstemperatur 1.200 °C, Werkzeugtemperatur zirka 140 °C, Gesenkschmierstoff „Lubrodal“ sowie die Oberflächennachbehandlung der Schmiedeteile durch Stahlkiesstrahlen wurden unverändert beibehalten.

Die prinzipielle Anwendbarkeit zur Werkzeug-fertigung von Gesenken durch die Laserstrahl-schmelz-Technologie wurde im Rahmen dieses Grundlagenprojekts unter Beweis gestellt. Zirka 50 Prototypen wurden geschmiedet (Bild 4). Während des Schmiedeprozesses konnten keine Unterschiede zum Schmieden in Kompaktgesenken festgestellt werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

In dem Projekt konnte nachgewiesen werden, dass die Laserstrahlschmelztechnologie in der Lage ist, Schmiedewerkzeuge zu fertigen. Damit ist die Möglichkeit gegeben, unmittelbar aus CAD-Daten in relativ kleinen Zeitfenstern komplexe Werkzeuggeometrien zu fertigen.

Die geschmiedeten Prototypen entsprechen in ihren Eigenschaften den in konventionellen Gesenken gefertigten Werkstücken. Nach der Beurteilung der Gesenke kann davon ausgegangen werden, dass weitere qualitätsgerechte Schmiedestücke gefertigt werden könnten, da keine Verschleißmarken festgestellt wurden. Eine Aussage über mögliche Standmengen lässt sich zurzeit noch nicht treffen.

Beim Vergleich generativ gefertigter Prototypen-Schmiedegesenke mit herkömmlichen Schmiedegesenken kann festgestellt werden, dass die neue Fertigungstechnologie mit folgenden Herausforderungen konfrontiert ist:

- Die heute verfügbare Größe von Laserstrahlschmelzanlagen begrenzt grundsätzlich die maximal mögliche Gesenkabmessung.
- Die aktuell erreichbare Baurate beim Laserstrahlschmelzen von Warmarbeitsstählen

liegt bei zirka 10 bis 12,5 cm³/h bei gleicher Gefügequalität (99,8 Prozent dicht) und hat direkten Einfluss auf die Herstellungskosten.

- Die Oberflächenqualität der Gravur muss durch Polieren im Vergleich zur HSC-Bearbeitung verbessert werden.
- Die aktuellen Preise für Pulvermaterial (Warmarbeitsstahl), zuzüglich durchschnittlicher Maschinenstundensätze, führen zurzeit noch zu höheren Kosten gegenüber konventioneller Gesenkfertigung.

Neben der Verbesserung der Laserstrahltechnologie (insbesondere deutliche Erhöhungen der Bauraten) spielt für zukünftige Anwendungen die Preisentwicklung für Pulvermaterial eine wichtige Rolle. Um die Anwendungspotenziale des Laserstrahlschmelzens zu erhöhen, sollten sich weitere Forschungsarbeiten auf die folgenden Punkte konzentrieren:

- Verringerung des Bauvolumens im Laserstrahlschmelzen durch „Downsizing“ der zu bauenden Werkzeuge einschließlich intelligenter Strukturierung.
- Entwicklung hybrider Werkzeugkonzepte zur Reduzierung der Aufwendungen für das Laserstrahlschmelzen.
- Entwicklung innovativer Fügetechniken, um laserstrahlgeschmolzene Werkzeugaktivteile schnell und einfach mit universellen Mutterwerkzeugen zu verbinden.

Es ist wichtig, diese Technologie weiter zu entwickeln, um bekannte Schwächen zu eliminieren, dann sollte es zukünftig bei entsprechender Anlagenverfügbarkeit möglich sein, „Prototypen-Schmiedeteile innerhalb einer Woche“ mit Gesenken beizustellen, welche mit der Technologie des Laserstrahlschmelzen effizient gefertigt wurden. ■



Dipl.-Ing. Markus Bergmann



Dr.-Ing. Bernhard Müller



Dipl.-Ing. André Wagner