








Info-Reihe Massivumformung, Extraausgabe

Kaltmassivumformung: Präzision in Serie



$37,3 \pm 0,05$ $1 \times 45^\circ$  0,1
 $R1$ 212,35
 0,05 $\varnothing 128 \pm 0,1$ $16,5^{+0,05}$
 $16,5^{+0,05}$ $38,2_{-0,1}$  0,01
 212,35 $\varnothing 78,7^{+0,2}$
 $\varnothing 25,2 \pm 0,05$
 0,1 $38,2_{-0,1}$ $\varnothing 25,2 \pm 0,05$
 $\varnothing 78,7^{+0,2}$ $1,5 \times 30^\circ$  0,1
 $1 \times 45^\circ$ $235,5 \pm 0,15$
 $1,5 \times 30^\circ$ $\varnothing 45,8_{-0,25}$
 0,05 $R1,5$  0,05
 $R60$
 $\varnothing 60$ $\varnothing 58,3 \pm 0,1$
 $58,3 \pm 0,1$ $528,7 \pm 0,2$
 $528,7 \pm 0,2$ $29,35^\circ_{-1^\circ}$
 $29,35^\circ_{-1^\circ}$

Info

EXTRA

Vorwort des Herausgebers

Die Massivumformung in Deutschland zeichnet sich aus durch das Bestreben, vorhandene Ressourcen optimal zu nutzen. Die kompetente Ausschöpfung aller Möglichkeiten von Produkt und Prozess erfüllt den Anspruch eines nachhaltigen Wirtschaftens.

Besonders bei großen Serien haben Materialverbrauch und Energieeinsatz entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz und Wettbewerbsfähigkeit des Bauteils, des daraus entstehenden Endprodukts und der angewendeten Prozesse. Eine besondere Rolle spielt in diesem Kontext die Kaltmassivumformung. Sie erlaubt eine maximale Werkstoffausnutzung und führt im Vergleich mit anderen Produktionsverfahren, insbesondere zur spanenden Fertigung, zum geringsten spezifischen Energiebedarf bezogen auf das Fertigteilgewicht.

Das vorliegende EXTRA-Info zeigt anhand zahlreicher Beispiele die vielfältigen Anwendungsbereiche der Kaltmassivumformung. Es beschreibt dem Konstrukteur und dem Anwender intelligente Lösungen zur Realisierung besonderer Merkmale, Toleranzen und Bauteileigenschaften.

Eine Beschreibung der gesamten Prozesskette von der Produktentwicklung unter Ausnutzung moderner CA- und Simulationstechniken über die Werkstoffauswahl bis zur Festlegung von Verfahren oder Verfahrenskombinationen wird auch in Lehre und Studium eine wertvolle Hilfe sein.

Wir freuen uns, allen an der Produkt- und Prozessentwicklung Beteiligten mit der Schriftenreihe EXTRA-Info insgesamt und auch mit dieser neuesten Ausgabe wieder wirkungsvolle Unterstützung bei allen Fragestellungen mit Blick auf zeitgemäße, zukunftsgerichtete Produkte und Prozesse geben zu können.

Die Autoren sind Experten aus Unternehmen und Instituten, die in der German Cold Forging Group (GCFG) durch vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung, Mitarbeit in technischen Arbeitsgruppen und gemeinsame Öffentlichkeitsarbeit die Entwicklung der Kaltmassivumformung fördern. Der größte Dank an die Autoren ist eine vielfache aktive Nutzung dieser Schrift.

Dipl.-Ing. Hans Ulrich Volz,
Vorsitzender des Ausschusses
Öffentlichkeitsarbeit/Technische
Information des Industrieverbands
Massivumformung e. V.

58093 Hagen, im Oktober 2012

Kaltmassivumformung: Präzision in Serie

In der Massivumformung wird der metallische Werkstoff ausgehend von einem Stab- oder Drahtabschnitt in meist zylindrischer Form durch zum Teil große Querschnitts- und Dickenänderungen räumlich verteilt. Im Gegensatz dazu wird bei der Blechumformung flächenhaftes Vormaterial umgeformt. Wenn die bei der Massivumformung eingesetzten Werkstoffabschnitte vorher nicht erwärmt, sondern bei Raumtemperatur in die Werkzeuge eingelegt werden, spricht man von Kaltmassivumformung. Die Kaltmassivumformung wird in den letzten Jahrzehnten zunehmend für die Herstellung von Gebrauchsgütern in großen Stückzahlen, wie zum Beispiel in der Fahrzeugindustrie oder zur Herstellung präziser Bauteile mit einem konstant hohen Qualitätsniveau eingesetzt.

Herausgeber:
Industrieverband Massivumformung e. V.
Telefon: +49 2331 958830
Telefax: +49 2331 958730
Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
Internet: www.metalform.de
E-Mail: orders@metalform.de

Impressum

Editorial: Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA,
Dipl.-Ing. Marcus Kannewurf

Vorlage dieses Dokuments: Dr.-Ing. Manfred Hirschvogel, Peter Kettner,
Gerhard Linder, Dipl.-Ing. Michael Dahme,
Dr.-Ing. Dirk Landgrebe, Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt

Bilder: Siehe Bilderverzeichnis Seite 26

Verantwortlich für die Gesamtherstellung: Industrieverband Massivumformung e. V.

Titelbild: Bauteilabbildung: Schondelmaier GmbH Presswerk,
www.fotolia.com, Stahlplatte 2, Jörg Vollmer,
Grafik Design Peter Kanthak, Wickede (Ruhr)

Layout und Satz: Grafik Design Peter Kanthak, Wickede (Ruhr)

Druckschriften-Nr.: EI-KM-1012-20 DOM

Ausgabe: Oktober 2012, überarbeitete Ausgabe

ISBN: 978-3-928726-29-0

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung und Vervielfältigung, vorbehalten. Auszugsweise Wiedergabe des Inhalts nur nach Rückfrage beim Industrieverband Massivumformung e. V. mit Quellenangabe gestattet.

Den Veröffentlichungen des Industrieverbands Massivumformung e. V. liegen die Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung der im Industrieverband Massivumformung e. V. zusammengeschlossenen Mitgliedsunternehmen zugrunde.

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	5
Impressum	6
1. Produkte und Märkte	8
2. Grundlagen, Verfahren und Grenzen	12
3. Maschinen und Werkzeuge	13
4. Werkstückwerkstoffe und Wärmebehandlung	15
5. Kaltumformung mit erhöhter Rohteiltemperatur	16
6. Verfahrenskombinationen	18
7. Entwicklungstendenzen und Perspektiven	20
Begriffsdefinitionen	22
Literaturverzeichnis	24
Bilderverzeichnis	26

1. Produkte und Märkte

Bedeutung der Kaltmassivumformung

Die Kaltmassivumformung gewann seit den 50/60er Jahren des 20. Jahrhunderts an Bedeutung, nachdem die Erforschung der Herstellung von Halbzeugen bereits einen hohen wissenschaftlichen Stand erreicht hatte. In dem Wort „Kaltmassivumformung“ sind schon die wesentlichen Merkmale dieses Fertigungsverfahrens beschrieben: Die Umformung, das heißt eine dauerhafte plastische Formänderung eines metallischen, meist zylindrischen Vormaterialabschnitts, erfolgt ohne Vorwärmung. Im Gegensatz zur Blechumformung ergibt sich bei massiven Werkstücken ein dreiachsiger Formänderungszustand während des Umformens. Die Kaltumformung wird vor allem für die Fertigung von Bauteilen eingesetzt, die in der Folge nur noch wenig oder keine Nacharbeit erfordern. Die Kaltmassivumformung erreicht höchste Werkstoffausnutzung und weist im Vergleich zur Warmmas-

sivumformung und besonders zur spanenden Fertigung den geringsten auf das Fertigteilgewicht bezogenen spezifischen Energiebedarf auf [Her89] [Doe07]. Die wirtschaftliche Bedeutung der Kaltmassivumformung im Vergleich zu anderen Massivumformverfahren zeigt Abbildung 1.

Im Jahr 2011 lag das Volumen aller in Deutschland durch Massivumformung hergestellten Produkte bei rund 2,38 Millionen Tonnen. Daran hatten Kaltfließpressteile einen Anteil von 215.385 Tonnen. Allerdings darf der Unterteilung von Warm- und Kaltumformung dabei nicht zu große Bedeutung zugemessen werden, denn die Grenzen verwischen zunehmend: Es werden Kombinationen der verschiedenen Verfahren angewandt, die nahezu keine exakte Aufgliederung mehr erlauben [Doe07].

Teilespektrum der Kaltmassivumformung

Durch Kaltmassivumformung lassen sich überwiegend rotations- und achsensymmetrische Bauteile herstellen. Seltener werden Nebenformelemente durch Querfließpressen hergestellt. Durch die hohen Fließspannungen bei Raumtemperatur und die dadurch entstehenden hohen Werkzeugbelastungen ist die Formenvielfalt gegenüber dem Warmmassivumformen eingeschränkt.

Kaltfließpressteile mit kurzer Längsachse

Klassische Kaltfließpressteile sind rotationssymmetrische Bauteile und haben eine gedrungene Form. Dabei kann es sich zum Beispiel um Kugel- oder Axialgehäuse handeln, die im Fahrwerks- und Lenkungsbereich von Fahrzeugen benötigt werden. Neuere

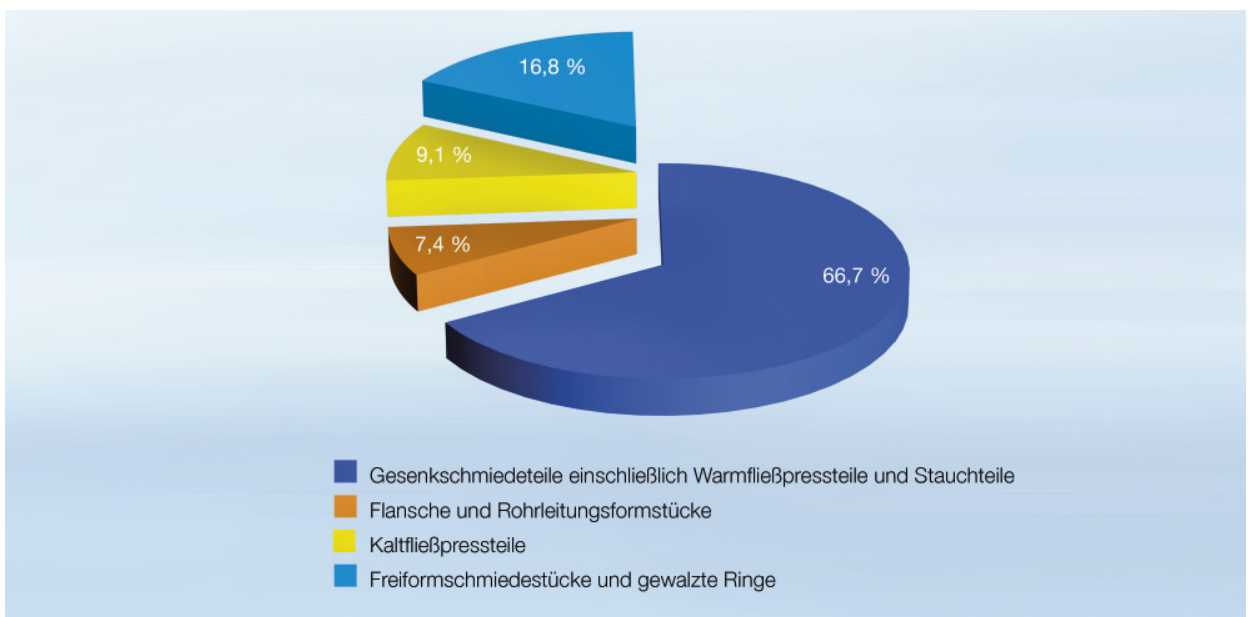


Abbildung 1: Produktionsanteile umformtechnisch hergestellter Komponenten in Deutschland 2011

Entwicklungen bei dieser Bauteilfamilie führen zu nicht rotationssymmetrischen Geometrien in Teilbereichen wie zum Beispiel Schlüsselflächen oder Luftleitnuten (Abbildung 2). Auch Nebenformelemente wie Nocken- und Zahnprofile erhöhen die Komplexität dieser Teilefamilie. Kurze Hohlteile werden mit oder ohne Boden ausgeführt, teilweise können dabei extreme Wanddickenunterschiede realisiert werden. Eine besonders anspruchsvolle Teilegruppe stellen spiegel- und/oder asymmetrische Formen dar, bei denen die Asymmetrie teilweise durch gezielte Volumenverteilung oder durch Stanzoperationen erzeugt wird (Abbildung 3). Bei diesen Bauteilen ist die Form der späteren Funktion des Bauteils weitgehend angepasst. Materialanhäufungen treten nur dort auf, wo Versteifungen oder Rippen erforderlich sind, Ausparungen und Verjüngungen sparen Gewicht oder erleichtern die Montage. Ähnliche Randbedingungen gelten auch für Kaltfließpressteile aus Aluminiumwerkstoffen, wobei der relative Einfluß der Reibung zwischen Halbzeug und Werkzeugoberfläche deutlich stärker wird.

Getriebewellen

Ausgehend von einem gescherten beziehungsweise gesägten Rohteil werden Antriebskegelräder sowie Getriebewellen im Allgemeinen in drei bis vier Stufen umgeformt. Das Spektrum umfasst Wellen mit unterschiedlichen Kopfformen sowie verschieden abgestufte Schäfte und/oder Wellen mit Hinterschnitten (Abbildung 4). Der zweite Pressbund bei den hinterschnittigen Wellen wird in einem speziellen, radial schließenden Werkzeug in der letzten Umformstufe gepresst. Die Prozessführung ermöglicht dabei eine gratlose Fertigung mit engsten Rundlauf toleranzen und belastungsgerechter Kornorientierung.

Hohlteile

Auch Hohlteile lassen sich vorteilhaft durch Kaltmassivumformung herstellen. Die heute in der Praxis vorzufindenden Verfahren lassen sich hauptsächlich durch drei Varianten kennzeichnen. In Abbildung 5 sind 3 unterschiedliche wellenförmige Hohlteile gezeigt, anhand welcher die Ver-

fahren näher erläutert werden können: Die oben abgebildete Welle wird ausgehend von einem gescherten Rohteil fließgepresst und genapft. Anschließend wird durch mehrfaches Abstreckgleitziehen die tiefe Hohlform erzeugt. Durch die sehr hohe Umformung ist nach jedem Abstreckvorgang ein Rekristallisationsglühen notwendig, was das Verfahren allerdings aufwendig macht. Die in der Bildmitte dargestellte Welle wird in zwei Hälften durch Napf-Rückwärts-Fließpressen und Reduzieren hergestellt. Anschließend werden die beiden Hälften durch Reibschweißen miteinander gefügt. Die unten gezeigte Welle wird ausgehend von einem Rohrstück durch mehrfaches Hohl-Vorwärts-Fließpressen und Kopfstauchen umgeformt.

Hohle Fließpressteile mit rotations-symmetrischen Bunden oder Flanschen lassen sich sowohl durch Quer-Fließpressen als auch durch Stauchen mit Hilfe eines Dorns im Werkzeug herstellen. Die Verfahrensgrenzen sind durch Faltenbildung, Formabweichungen am Flansch sowie lokales Werkstoffversagen und Einschnürungen gekennzeichnet [Lie12].



Abbildung 2: Kaltfließpressteile mit kurzer Längsachse

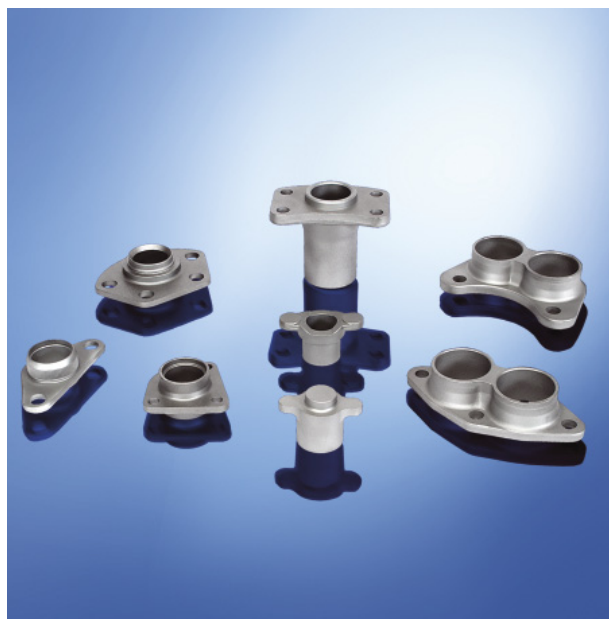


Abbildung 3: Asymmetrische Hohlteile



Abbildung 4: Kaltfließgepresste hinterschnittige Getriebewellen-geometrien



Abbildung 5: Durch Kaltmassivumformung hergestellte Hohlteile mit relativ langer Längsachse

Verzahnte Bauteile

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen Bauteile mit einbaufertig gepressten Verzahnungen, die heute sowohl als Steck- als auch Laufverzahnungen umformtechnisch mit hinreichender Genauigkeit herstellbar sind. Dabei kommen das Vorwärts-, Rückwärts- oder Quer-Fließpressverfahren zur Anwendung. Allerdings sind die Ansprüche an Laufverzahnungen bei Getrieberädern heute derartig hoch, dass meist eine Hartbearbeitung nach dem Umformen und Härten notwendig wird. Die Wahl des Pressverfahrens und auch die Lage der Verzahnung im/am Bauteil

(innen/außen) bestimmen wesentlich die erreichbaren Toleranzen, da sich sowohl der Stofffluss als auch die Verformung von Werkzeug und Werkstück während und nach dem Umformprozess grundlegend unterschiedlich verhalten. Eine genaue Stoffflusssimulation mit einer möglichst realen Modellierung der Randbedingungen ist heute bei der Werkzeugauslegung für solche Bauteile sehr zu empfehlen.

Funktionsintegration

Durch die stetig steigenden Anforderungen an kaltgepresste Komponenten hinsichtlich Steifigkeit, Gewicht

und Kosten verstärkt sich der Trend hin zur Einsparung von Montageoperationen und zur Reduktion der Anzahl von Komponenten in den letzten Jahren merklich. Abbildung 8 zeigt Beispiele für drehmomentübertragende Bauteile, welche komplett durch Umformung aus einem Rohteil entstehen. Dadurch wird die frühere Herstellung von mehreren Systemkomponenten mit anschließenden Montage- oder Fügeprozessen ersetzt. Zudem erweitert die Eliminierung von sicherheitsrelevanten Verbindungen die Einsatzgrenzen solcher funktionsintegrierten Komponenten. Teilweise können mit solchen Entwicklungen auch Durch-



Abbildung 6: Durch Kaltmassivumformung hergestellte Getriebeteile mit Verzahnungen



Abbildung 7: Kaltumgeformtes Kegelrad mit Innen- und Außenverzahnungen



Abbildung 8: Durch Umformung hergestellte, drehmomentübertragende Bauteile mit Verzahnung und hoher Funktionsintegration



Abbildung 9: Beispiel für Schraube mit geprägtem Gewinde

messerreduktionen, Gewichtseinsparungen und/oder eine verbesserte Torsionssteifigkeit erzielt werden. Nach Abbildung 8 können unter Umständen gleichzeitig Funktionen wie eine variable Längenverstellung mittels entsprechender Verzahnung in den Bauteilen integriert werden.

Gewindeprägen

Das Gewindeprägen stellt eine fertigungstechnologische Alternative zum Gewindewalzen für kleine Stückzahlen dar. Der Prozess wird mit geteilten Werkzeugen (Backen) durchgeführt,

welche während des Umformprozesses zum Beispiel mittels Treiberkeilen des Werkzeugoberteils geschlossen werden. Anders als beim Gewindewalzen entsteht bei diesem Prozess keine Schließfalte im Gewindekopf, was insbesondere beim Beschichten große Vorteile bringt und das Gewinde wesentlich widerstandsfähiger gegen Beschädigungen macht. Im Vergleich zum gerollten Gewinde können zusätzliche Elemente wie Reinigungsritzen, Verzahnungen und andere Funktionen im beziehungsweise am Schaft der Schraube integriert werden. Neben massiven Werkstücken sind auch hohle Gewindebau-

teile komplett umformbar. Ein Beispiel für Bauteile mit gepresstem Gewinde zeigt Abbildung 9.

Märkte für die Kaltmassivumformung

Das vielfältige Teilespektrum der Kaltmassivumformung bedient vor allem im Automobilbau ein breites Feld an Einsatzbereichen. Tabelle 1 stellt einen Auszug der wichtigsten Märkte kaltfließgepresster Bauteile dar und führt weitere Einsatzfelder auf.

Schrauben/Stifte nach Norm (große Stückzahlen)	Komplexe gedrungene Formen	Längliche Bauteile/Hohlteile
<ul style="list-style-type: none"> • Verbindungstechnik • Befestigungen • Bauindustrie • Maschinen- und Apparatebau • Automobilbau • Motorrad- und Fahrradindustrie • Luftfahrtindustrie • Haushaltgeräte 	<ul style="list-style-type: none"> • Getriebetechnik PKW/LKW/Landmaschinen • Sicherheitstechnik PKW/LKW • Antriebstechnik • Verbindungstechnik • Elektrotechnik • Haushaltgeräte 	<ul style="list-style-type: none"> • Getriebetechnik • Maschinen- und Apparatebau • Normprodukte wie Pumpen- und Motorengehäuse • Antriebs- und Achstechnik • Umwelttechnik • Lenksysteme • Wehr- und Pyrotechnik

Tabelle 1: Die wichtigsten Märkte für kaltfließgepresste Bauteile

2. Grundlagen, Verfahren und Grenzen

Die Kaltmassivumformung wird im Allgemeinen als Umformung zylindrischer Rohteile aus Metall bei Raumtemperatur definiert, wobei die Werkstücke nicht separat erwärmt werden. Die Metallphysik präzisiert: Es liegt dann eine Kaltumformung vor, wenn während der Umformung keine Rekristallisation stattfinden kann. Dies trifft zu, sofern die Werkstofftemperatur unterhalb von ca. 0,4 Ts (Schmelztemperatur in Kelvin) verbleibt [Got98]. Während des Umformprozesses können jedoch aufgrund der umgesetzten Umform- und Reibleistung im Werkstückvolumen lokal Spitzentemperaturen von bis zu 400 °C entstehen (Beispiel: Napfrückwärtsfließpressen eines Einsatzstahls [Rae02]). Unter den Verfahren der Kaltmassivumformung hat das Fließpressen die größte wirtschaftliche Bedeutung. Es dient dem Ziel, die Werkstücke mit möglichst geringer beziehungsweise ohne spanende Weiterbearbeitung bei belastungsangepasster Kornorientierung und hoher Grundfestigkeit herzustellen.

Die gegenwärtige Werkzeugtechnik ermöglicht es, teilweise einbaufertige (net-shape) Bauteile zu fertigen. Das Verfahren eignet sich vor allem für große Stückzahlen. Die Vorteile des Kaltfließpressens gegenüber anderen Fertigungsverfahren sind zum einen die belastungsorientierte, ununterbrochene Kornorientierung, wodurch die Dauerfestigkeit des Bauteils erhöht wird. Zum anderen können die Werkstoffeigenschaften durch Ausnutzen der Kaltverfestigung verbessert und somit kostengünstige Werkstoffe verwendet werden. Gegenüber den Umformverfahren mit erhöhten Werkstücktemperaturen tritt bei der Kaltmassivumformung keine Verzunderung an den Oberflächen auf und der

Wärmeverzug ist gering. Im Vergleich zum Warmschmieden sind dadurch höhere Form- und Maßgenauigkeiten erreichbar sowie eine oftmals ausreichende Oberflächengüte für den Einsatz des Bauteils. Nachteile ergeben sich durch die Grenze des Formänderungsvermögens des Werkstückwerkstoffs und die spezifisch hohen Belastungen zwischen Werkstück und Werkzeug. Die in der Kaltmassivumformung am häufigsten eingesetzten Werkstoffe sind unlegierte und niedriglegierte Stähle, Nichteisenmetalle wie Aluminium und Kupfer sowie deren Legierungen [VDI98]. Ein zwischen den einzelnen Umformstufen eingeschobenes Rekristallisationsglühen baut die erhöhte Versetzungsdichte wieder ab, wodurch die Umformbarkeit weiter gewährleistet bleibt. Bei Umformgraden von 8 - 12% (Bereich des sogenannten „kritischen Umformgrads“) bewirkt das Rekristallisationsglühen eine Grobkornbildung. Ein Grobkorn kann durch Normalglühen beseitigt werden, wodurch wieder ein

feinkörniges Gefüge entsteht. Dies sorgt für verbesserte Werkstoffeigenschaften im Falle einer nachfolgenden spanenden Bearbeitung [Lan08].

Dass beim Kaltfließpressen vor allem rotations- und achssymmetrische Bauteilformen erzeugt werden, hängt damit zusammen, dass unsymmetrische Volumenelemente des Werkstücks Spannungsüberhöhungen in der Werkzeugkavität hervorrufen: kürzere Werkzeugstandzeiten sind die Folge. Zum Teil werden auch komplizierte, funktionsintegrierte Formelemente angeformt, bei denen die Funktionsflächen einbaufertig hergestellt werden. Heute wird von erfahrenen Unternehmen daher häufig eine Kombination der Fließpressverfahren eingesetzt und das Werkstück in mehreren Stufen in die vorgegebene Form gepresst, wodurch lokale Belastungsspitzen im Werkzeug vermieden werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 10 die Fertigungsfolge einer kaltfließgepressten Getriebewelle, die

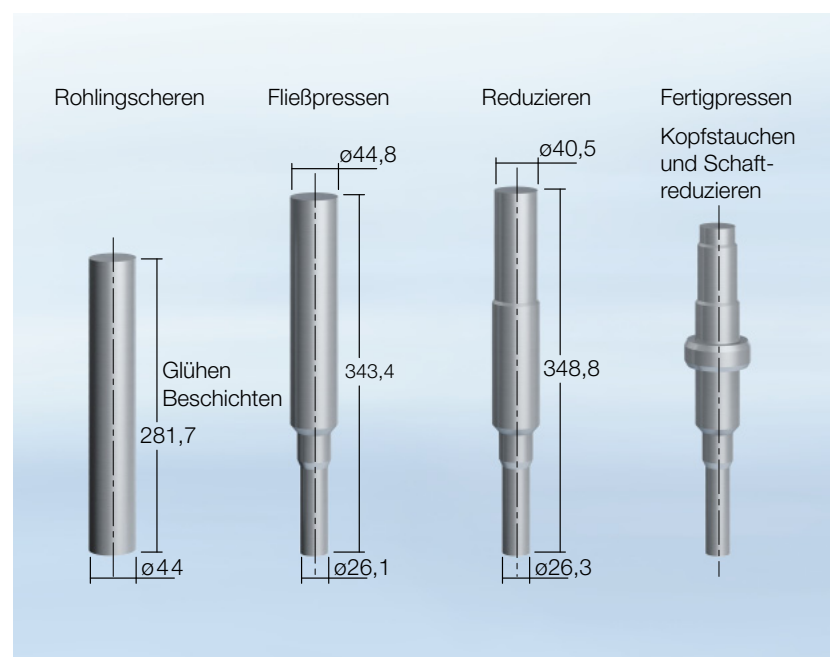


Abbildung 10: Fertigungsfolge einer kaltfließgepressten Getriebewelle

durch mehrfaches Reduzieren und Stauchen hergestellt wird. Die Verfahrensgrenzen sind abhängig vom Werkstückwerkstoff, von der zulässigen Werkzeugbelastung, vom jeweiligen Fließpressverfahren, von der Arbeitsfolge sowie vom sich einstellenden, dreiachsigen Spannungszustand [VDI98]. Die erreichbaren Toleranzklassen beim Kaltumformen liegen im

Allgemeinen zwischen IT 7 und IT 11 in Abhängigkeit von zahlreichen Faktoren. In der Praxis kann zwischen Ober- und Unterwerkzeug zudem ein Werkzeugversatz (Führungsspiel) zu Rundlaufabweichungen oberhalb der genannten Toleranzklassen führen, so wie zum Beispiel ein Massenausgleich in der Länge eines Bauteils auch seine Toleranzklasse erweitert.

Da beim Kaltmassivumformen keine Verzunderung der Werkstücke eintritt, können Oberflächengüten von mindestens $Rz = 12$ bis $20 \mu\text{m}$ erreicht werden. Je nach den herrschenden Kontaktspannungen und dem Zustand der Werkzeugoberflächen sind meist noch bessere Oberflächenqualitäten am Werkstück erreichbar.

3. Maschinen und Werkzeuge

Die hohen Fließspannungen der Werkstückwerkstoffe und die mit dem Umformgrad zunehmende Verfestigung bedingen sehr hohe Presskräfte und stellen höchste Anforderungen an die eingesetzten Umformwerkzeuge und die verwendeten Umformanlagen. In der Kaltfließpresstechnik bestimmen das Antriebskonzept der Umformmaschine, der zur Verfügung stehende Nennkraftbereich und die Ausführung des Bauteiltransports im Wesentlichen den Skalenbereich der Werkstücke. Im Falle schlanker, langer Bauteile (lange Schäfte, Wellen, schlanke Hohlteile) wird zumeist mit hydraulischen Pressen gearbeitet, die den Vorteil bieten, dass über den gesamten Hub eine gleichförmige Nennpresskraft und auch Geschwindigkeit zur Verfügung steht. Durch Aufschlagleisten im Werkzeughaltersystem kann der Pressenhub dabei präzise eingestellt werden.

Zum anderen steht bei mechanischen Pressen die Nennpresskraft der Maschine erst kurz vor dem unteren Totpunkt zur Verfügung und der Bewegungsablauf ist durch die Antriebskinematik weitgehend festgelegt. Nachteile wie die Trägheit des Hydraulikmediums bestehen nicht, wodurch mechanische Pressen im Allgemeinen mit höheren Hubzahlen betrieben wer-

den können [Lan08]. Die Ausbringung kann heute bei mechanischen Pressen mittels eines servo-elektrischen Hauptantriebs weiter gesteigert werden, da die Zeit-Weg-Kurve im Gegensatz zu konventionellen mechanischen Pressen variabel ist und höhere Stößelgeschwindigkeiten (bis Auftreffen auf das Werkstück sowie beim Rückhub) erreicht werden können. Zudem können solche Pressen unter Einhaltung bestimmter Grenzen auch im Pendelhub betrieben werden. Daraus ergibt sich für kleine, flache oder niedrige Bauteile eine höhere Leistungsfähigkeit, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit

des Gesamtprozesses [Ros11]. Abbildung 11 zeigt exemplarisch das modifizierte Geschwindigkeitsprofil einer servo-elektrisch betriebenen gegenüber einer konventionellen mechanischen Presse.

Das Teilespektrum reicht in der Kaltmassivumformung von wenigen Gramm bis ca. 30 kg, wobei die Roh-teile dem Werkzeug beziehungsweise der Umformanlage, meist ausgehend vom Stangen oder Drahtabschnitt, automatisch durch Hubbalken und Greifertransportsysteme oder Robotern zugeführt werden. Aus Gründen

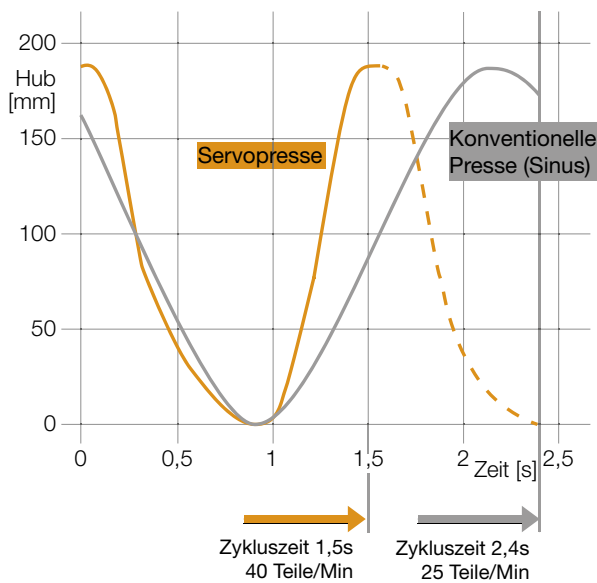


Abbildung 11: Modifikation des Geschwindigkeitsprofils im Vergleich mit dem Profil einer konventionellen mechanischen Presse

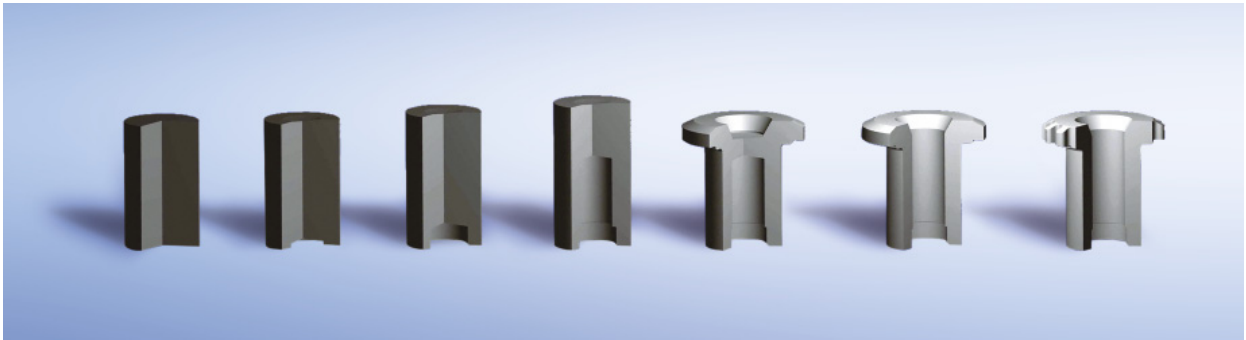


Abbildung 12: Stadienfolge zur Herstellung eines hohlen Kaltfließpressteils mit Verzahnung

des Stoffflusses und zur Verteilung der extremen Werkzeugbelastungen ist in vielen Fällen ein mehrstufiges Umformen erforderlich, woraus sich eine Stadienfolge der einzelnen Stufen vom Rohteil bis zum Fertigteil ergibt. Eine solche Stadienfolge ist beispielhaft in Abbildung 12 anhand eines Kaltfließpressteils mit Verzahnung dargestellt.

Beim Quer-Fließpressen fließt der Werkstoff während des Umformens durch axiales Stauchen in radiale Werkzeugöffnungen. Dadurch bilden sich in der geschlossenen Werkzeugform Hinterschneidungen am Werkstück, wodurch ein horizontal geteiltes Werkzeug notwendig ist. Durch die hohen Umformbelastungen werden beim Quer-Fließpressen spezielle Schließvorrichtungen benötigt, welche die Flächenpressung und Abdichtwirkung zwischen den Werkzeughälften gewährleisten [Lie11]. Die Schließkraft wird dabei von Federsystemen mit festen, flüssigen oder gasförmigen Federmedien erzeugt. In Einzelfällen werden auch mechanische Verriegelungen verwendet.

Die hohen Kontaktspannungen zwischen Werkzeug und Werkstück können zu einem frühzeitigen Verschleiß, aber auch zu einem Bruch der Werkzeuge führen. Um den Verschleiß zu minimieren, werden Werkstoffe mit hoher Festigkeit bis hin zu Hartmetallen oder pulvermetallurgisch hergestellten Stählen als Matrizen verwendet. Die

se Werkzeugwerkstoffe sind aufgrund ihrer hohen Verschleißbeständigkeit oft spröde, müssen jedoch bisweilen hohen und nicht vermeidbaren Zugbelastungen ausgesetzt werden. Um die Bruchempfindlichkeit der Werkzeuge in solchen Fällen herabzusetzen, werden die Matrizen längs oder quer geteilt beziehungsweise miteinander verspannt. Die radiale Vorspannung der Matrize wird als Armierung bezeichnet. Diese wird erzielt, indem ein harter Matrizenkern mit Übermaß durch thermisches Einschrumpfen oder Einpressen in einen Armierungsring eingebracht wird. Dadurch werden Druckspannungen im Innenring (von außen) aufgezwungen und Zugspannungen (aufgrund der wirkenden Prozesslast) minimiert. In Abbildung 13 ist der Armierungsverband eines Umformwerkzeuges zum Formen des Bundes einer Getriebewelle, bestehend aus einem äußeren und inneren Armierungsring sowie einem Matrizenkern, dargestellt.

Eine Teilung der Matrizenkerne gewährleistet, besonders an bruchgefährdeten Stellen in der Matrize, wie Übergängen, Kanten und Radien, die Herabsetzung der Spannungskonzentration und des Rissbildungsrisikos.

Neben einer speziellen Werkzeugtechnologie erfordern die hohen Kontaktspannungen auch besondere Maßnahmen, durch die eine Kaltverschweißung zwischen Werkzeug und Werkstück verhindert wird. Dies er-

folgt durch das Aufbringen einer Träger- und Trockenschmierstoffschicht auf die Werkstücke, die aufgrund ihrer hohen Druckbeständigkeit den hohen Normalspannungen standhält und die trotz Oberflächenvergrößerung (und der nicht vermeidbaren Schmierstoffverteilung) während der Kaltumformung wirksam den metallischen Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug verhindert. Um das Haften der Gleitmittel zu verbessern, werden die Bauteile vor dem Umformen meist mit einer Zinkphosphatschicht überzogen. Als druckbeständige feste Gleitmittel werden Graphit, Molybdändisulfid, spezielle Seifen oder Wachse eingesetzt. Der Verschleiß im Umformwerkzeug wird heute üblicherweise durch Auflage- und Reaktionsschichten minimiert. Als Auflageschichten werden die Werkzeuge mit Hartstoffschichten wie Titanitrid TiN und Titantanbid TiC beschichtet. Für Reaktionsschichten wird das Einsatzhärten, das Nitrieren oder Ionenimplantieren mit entsprechenden Polierprozessen angewendet [Lan08].

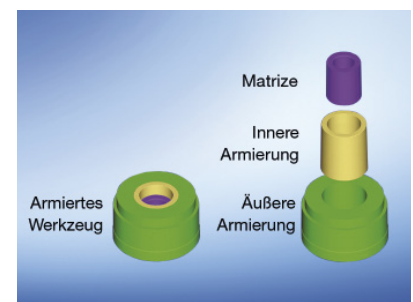


Abbildung 13: Armierungsverband eines Kaltumformwerkzeugs

4. Werkstückwerkstoffe und Wärmebehandlung

Grundlagen

Bei der Kaltmassivumformung ist die richtige Werkstoffauswahl bedeutend für einen wirtschaftlichen Umformprozess sowie die erfolgreiche Herstellung einer vorgegebenen Bauteilgeometrie. Den Werkstoff kennzeichnet sein eigenes Umformvermögen, der Verlauf der Fließkurve sowie die Zusammensetzung des Gefüges. Die Fließspannung eines Werkstoffs bestimmt zudem, welche Vergleichsspannungen im Werkstoffvolumen erzeugt werden müssen, damit die plastische Umformung einsetzt und mit weiterer Belastung auch aufrecht erhalten werden kann. Je höher die Fließspannung eines Werkstoffs ist, desto größeren Belastungen werden die Werkzeuge ausgesetzt. Gleichzeitig sinkt aus praktischer Sicht die mögliche geometrische Komplexität des Werkstücks, da ausgeprägte Formelemente zu einer Spannungsüberhöhung führen, die die zulässige Werkzeugwerkstoffbelastung übersteigt. Der Umformgrad ist ein dimensionsloses Maß. Es dient der Beschreibung der plastischen Formänderung während des Umformprozesses, wobei auch das erreichbare Umformvermögen eines Werkstoffs quantifiziert werden kann. Werkstoffe mit höherer Fließspannung weisen im Allgemeinen einen geringeren Grenzumformgrad auf. Durch Erhöhung der Werkstücktemperatur wird die Fließspannung herabgesetzt und der erreichbare Umformgrad erhöht [Lan08]. Ausnahmen bilden der Bereich der Blausprödigkeit bei Stahlwerkstoffen und der Beginn der Ausscheidungsbildung bei Aluminiumlegierungen.

Stahlwerkstoffe

Für die Kaltmassivumformung eignen sich vorzugsweise unlegierte Einsatz- sowie Vergütungsstähle mit einem Kohlenstoffgehalt von bis zu 0,5% und einem Legierungsbestandteil von max. 5%. Weitere Begleitelemente wie Schwefel oder Phosphor dürfen nur in geringen Mengen im Werkstoff enthalten sein (max. 0,035%), weil das Formänderungsvermögen durch diese Bestandteile verschlechtert wird. Da die Fließspannung des Werkstoffs stark vom Kohlenstoffgehalt des Werkstoffs abhängt, sind insbesondere kohlenstoffarme Stähle bis zu einem C-Gehalt bis 0,2% gut umformbar. Mit weiter steigendem Kohlenstoffgehalt nimmt der Grenzumformgrad ab und die benötigten Presskräfte steigen an. Der Stickstoffgehalt wird auf weniger als 0,01% beschränkt [Lan08].

Eine Wärmebehandlung der Werkstücke findet je nach Anforderung eventuell nach dem Umformen, häufig aber auch vor und gegebenenfalls zwischen den einzelnen Umformstufen statt. Dies hat den Zweck, ein für die Kaltumformung günstiges Werkstoffgefüge zu erzeugen. Vor dem ersten Arbeitsgang ist meistens ein Weichglühen notwendig. Hierbei handelt es sich um eine Wärmebehandlung bei einer Temperatur dicht unterhalb AC_1 (680°C-720°C für Kaltfließpresstähle) und anschließendem langsamen Abkühlen, mit dem Ziel, ein weiches und spannungsarmes Gefüge zu erreichen. Dadurch werden die Fließspannung herabgesetzt und das Umformvermögen erhöht. Eine besondere Form des Weichglühens ist das GKZ-Glühen,

wobei die Umwandlung von lamellarem zu kugeligem Zementit erfolgt. Es ist verbunden mit längeren Haltezeiten bei Temperaturniveaus, die unterhalb oder um AC_1 liegen. Insbesondere bei Stählen mit Kohlenstoffgehalten über 0,5% und Werkzeugstählen ist es notwendig, das Gefüge in kugelige Karbide in ferritischer Matrix zu überführen. Die weiche Matrix übernimmt den Werkstofffluss, wobei die Zementitkörner diesen nur noch wenig behindern. Dadurch wird eine wesentlich bessere Umformbarkeit erreicht [Lan08].

Die Rekristallisationsglühung wird zwischen einzelnen Umformstufen der Kaltmassivumformung durchgeführt, wenn das Umformvermögen des Werkstoffs erschöpft ist. Ein Gefüge mit verformten Körnern und hoher Versetzungsdichte wird aufgelöst und neu gebildet, wodurch Verfestigungen eines vorherigen Umformschritts rückgängig gemacht werden. Dadurch wird ein weiteres Umformen ermöglicht. Die Rekristallisationsglühung findet bei Stahlwerkstoffen zwischen 550°C bis 650°C unterhalb des AC_1 -Punktes statt [Lan08]. Bei richtiger Abstimmung von Umformgraden und Glühentemperatur wird durch die Rekristallisationsglühung ein feinkörniges Gefüge eingestellt. Dieses weist eine höhere Festigkeit und Zähigkeit als ein grobkörniges Gefüge auf. Gering umgeformte Werkstoffe (niedrige Umformgrade) sollten nicht rekristallisationsgeglüht werden, da in diesem Fall mit der oben genannten Wärmebehandlung lediglich eine Erholung stattfindet [Lan08].

Neuere Entwicklungen von Stählen für die Kaltmassivumformung beziehen sich auf niedrig legierte Borstähle, die im gewalzten Zustand ein gutes Umformvermögen zeigen, durch die

geringe Verfestigung keine Zwischenglühung benötigen und beim Härten einen Lanzettmartensit mit optimalem Härte/Duktilitätsverhältnis bilden, so dass kein Anlassen notwendig ist. Dadurch lassen sich einige energieintensive Zwischenschritte einsparen und die gesamte Prozesskette gestaltet sich entsprechend rationeller. Falls nötig lassen sich diese Stähle aber auch Einsatzhärten [Oll00]. Des Weiteren werden Maraging-Stahlgüten angeboten, die bei der Kaltmassivumformung eine geringe Verfestigung aufweisen, aber durch eine Aushärtebehandlung Festigkeitsniveaus von bis 2000 MPa erreichen können [Web01]. Die gegebenenfalls höheren Werkstoffkosten müssen jedoch mit den Einsparungen in der Prozesskette oder mit den verbesserten Bauteileigenschaften ins Verhältnis gesetzt werden.

Beim Normalglühen wird das Ziel verfolgt, aus einem grobkörnigen ein gleichmäßig feinkörniges Gefüge zu erzeugen. Dabei wird auf 30 °C bis

50 °C oberhalb von AC_3 erwärmt und das Gefüge vollständig austenitisiert. Die Abkühlung erfolgt schneller als bei den vorher genannten Verfahren an ruhiger Luft. Dabei findet eine zweimalige Gefügeumwandlung (Erwärmen, Abkühlen) statt. Im Gegensatz zum Weichglühen wandelt sich kugelig in lamellaren Zementit um und Kaltverfestigungen werden abgebaut. Ohne wesentliche Gefügeveränderungen hingegen erfolgt das Spannungsarmglühen von Stahllegierungen weit unterhalb von AC_1 bei 450 °C bis 650 °C mit dem Ziel, bei der Umformung entstandene innere Spannungen (Eigenspannungen 1. Art) abzubauen [Lan08].

Nichteisenmetalle

Nichteisenmetalle werden in der Kaltfließpresstechnik im Vergleich zu den jährlich verarbeiteten Volumen und Mengen von Stahlwerkstoffen eher selten eingesetzt. Die relativ größte Bedeutung weisen Aluminium, Kupfer

sowie Nickel, Kobalt und ihre Legierungen auf. Die Bedingungen, unter denen die Umformung dieser Nichteisenmetalle erfolgt, unterscheiden sich von denen bei der Umformung des Stahls unter anderem durch die Höhe der Umformtemperatur und die Umformwiderstände sowie durch spezifische Reibungs- und Verschleißproblematiken. Im Allgemeinen lässt sich Aluminium mit einem geringen Kraftbedarf sehr gut umformen [Lan08].

Durch den hohen Preis von Titan und Titanlegierungen wird dieser Werkstoff meist nur in der Luft- und Raumfahrttechnik, bei Sonderfällen im Maschinenbau sowie in der Medizintechnik angewendet. Kupfer und Messing finden ihr Einsatzgebiet hingegen im Armaturenbau, in der Elektrotechnik und in der Feinmechanik. Sie zeichnen sich durch Korrosionsbeständigkeit und gute elektrische beziehungsweise elektrisch leitende Eigenschaften aus [Lan88].

5. Kaltumformung mit erhöhter Rohteiltemperatur

Auf der Suche nach Lösungen zur wirtschaftlichen Herstellung von Massivumformteilen von hoher Qualität im Rahmen des technologischen Fortschritts und aufgrund einiger verfahrenstechnischer Nachteile von Kalt- und Halbwarmumformung wird auch der Ansatz verfolgt, mit (gegenüber RT) erhöhter Rohteiltemperatur in den Prozess hineinzugehen. Von besonderem Interesse sind für Stahlwerkstoffe Temperaturbereiche oberhalb der Blausprödigkeit zwischen 300 °C und 500 °C, die sich durch hohe Duktilität und leicht erniedrigte Fließspan-

nungen auszeichnen. In zahlreichen Prozessen werden die Abschnitte/Rohteile jedoch auch nur leicht zwischen RT und 300 °C erwärmt, um den Energiebedarf für die erforderliche Umformarbeit zu senken und Werkzeugbelastungen zu reduzieren. Die Bezeichnung „Umformen bei erhöhten Temperaturen“ ist für solche Prozessführungen gut geeignet und steht in keinem Widerspruch zur Verwendung des Begriffs „Halbwarmumformen“ seit Mitte der 1970er Jahre im Bereich zwischen 700 °C und 950 °C. In der Zwischenzeit wird für die Benen-

nung dieses Temperaturbereichs und entsprechender Prozessführungen in der Praxis auch der Begriff „Lauwarmumformung“ verwendet. Die Temperaturzone der Blausprödigkeit kann bei weichen Kohlenstoffstählen aus energetischen Gründen hierbei also als untere Grenztemperatur für die Umformung bei erhöhten Temperaturen angesehen werden. Bei der Umformung im Temperaturbereich unterhalb des oben genannten Temperaturintervalls der Halbwarmumformung wird versucht, unter wirtschaftlich optimalen Bedingungen die technologischen Vorteile der konventionellen Kalt- mit denen der etablierten Halbwarmumformung zu kombinieren.

Die Vorwärmung von Rohteilen kann dazu genutzt werden, das Formänderungsvermögen gerade soweit zu erhöhen, um durch konventionelles Kaltfließpressen nicht mehr prozesssicher herstellbare Bauteile dennoch mit bestmöglichen Oberflächen-, Genauigkeits- und Werkstückeigenschaften ausformen zu können. Eine Anwärmung von Rohteilen macht auch dann Sinn, wenn gegenüber der Kaltumformung eine oder mehrere Umformstufen eingespart werden können, Zwischenglühbehandlungen entfallen oder aus tribologischen Gründen auf Schritte im Rahmen der Oberflächenbehandlung (zum Beispiel Phosphatierung) verzichtet werden kann. Die Umformung im Temperaturbereich der „Lauwarmumformung“ findet zum heutigen Zeitpunkt im industriellen Umfeld nur vereinzelt Anwendung, da dazu bisher das Materialverhalten typischer Fließpresswerkstoffe und die tribologischen Gegebenheiten wenig erforscht sind.

Bei der „Lauwarmumformung“ lässt sich Potenzial für zukünftige Entwicklungen erkennen. Dazu ist vor allem die Charakterisierung von Werkstoffen für den Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 500 °C von enormer Wichtigkeit, um die Prozesse zu beherrschen [Me10].

Halbwarmumformung

Unter der Bezeichnung der „Halbwarmumformung“ wird ein Umformvorgang verstanden, vor dem das Werkstück soweit angewärmt wird, dass die Fließspannung insgesamt deutlich sinkt, während der Umformung aber dennoch eine beabsichtigte Verfestigung des Werkstückwerkstoffs eintritt. Diese Definition bedeutet, dass die Umformung unterhalb der Rekristallisationstempe-

ratur durchgeführt wird. In der Praxis wird der Begriff „halbwarm“ auch für Temperaturen verwendet, die oberhalb der Rekristallisationstemperatur des Werkstoffs liegen. Man bezeichnet damit das Umformen (von Stahl) im Temperaturbereich von 700 °C bis etwa 950 °C. Die Untergrenze ist dabei durch die Blausprödigkeit gegeben, während die Obergrenze durch eine verstärkte Zunderbildung gesetzt ist. Daneben wird in manchen Fällen auch bei tieferen Temperaturen zwischen 160 °C bis 350 °C umgeformt (siehe oben), wobei sich eine signifikante Verbesserung der Fließpresseignung ohne Veränderung des Grundwerkstoffs ergibt [Lan08].

Erst in den 1970er Jahren wurde die Halbwarmumformung vom Forschungsstatus in industrielle Anwendungen überführt. Ziel der Halbwarmumformung ist es, die Vorteile des Kaltfließpressens mit denen des Warm Schmiedens zu verbinden. Im Vergleich zur Kaltumformung erlaubt die Halbwarmumformung größere Formgebungsmöglichkeiten und im Vergleich zur Warmumformung höhere Genauigkeiten. Die Temperaturerhö-

hung erlaubt es auch, höherlegierte Werkstoffe als beim Kaltfließpressen üblich zu benutzen und Zwischenglühoperationen einzusparen, wobei das Teilespektrum im Wesentlichen weiterhin den rotations-symmetrischen Bauteilen des Kaltfließpressens entspricht. Härtesteigerungen ähnlich der Umformung bei Raumtemperatur können jedoch nicht erwartet werden. Da die Fließspannung im erwähnten Temperaturbereich noch immer etwa zwei- bis dreimal so hoch wie beim etablierten Warm Schmieden von Stählen ist, stellt sich eine ebenfalls proportional höhere Werkzeugbeanspruchung ein. Daraus folgt, dass sich die Werkzeugtechnik für das Halbwarmumformen teilweise an den bekannten Konstruktionskonzepten von Werkzeugen für die Kaltumformung orientiert, das heißt, sie müssen entsprechend armiert sein und in Zonen mit Hohlkehlen und bruchgefährdeten Stellen geteilt ausgeführt werden. Ausserdem unterscheiden sie sich durch das zusätzliche Kühl- und Schmiersystem. Exemplarisch ist in Abbildung 14 eine durch Halbwarmumformung hergestellte Mittenwelle dargestellt.



Abbildung 14: Durch Halbwarmumformung hergestellte Mittenwelle

Um den Prozess der Halbwarmumformung zu beherrschen, müssen für die Schmierung besondere Vorkehrungen getroffen werden. Hierbei hat sich eine Kombination von Werkzeug- und Werkstückschmierung durchgesetzt. Im praktischen Einsatz haben sich für solche Funktionen Schmierstoffsysteme wie Wasser/Graphit-, Öl/Graphit- oder Wasser/Öl/Graphit-Gemische bewährt, die zumeist durch zusätzliches Sprühen auf die Gravur des Werkzeugs aufgebracht werden [Sch92], [Kör98]. Das bedeutet, dass die Werkzeugbeziehungsweise Prozesstechnik sowohl die Zuführung als auch den Abfluss dieser Schmiermittel berücksichtigen muss. Darüber hinaus werden die Werkstücke oftmals graphitiert, was zu einem zusätzlichen Oxidationsschutz während der Erwärmung führt.

Eine Wärmebehandlung vor der Umformung, wie sie beim Kaltfließpressen bisweilen üblich ist, benötigt die Halbwarmumformung, wie sie heute in der Praxis eingesetzt wird, im Allgemeinen nicht. Mit zunehmender Rohteiltemperatur stellt sich eine geringere elastische Verformung des Werkzeugs ein, die Schwindung des Werkstücks während des Abkühlens ist jedoch größer. Daraus resultierend stellt sich die Genauigkeit bei der Halbwarmumformung um ein bis zwei ISO-Qualitäten schlechter ein als bei einem vergleichbaren Kaltumformvorgang. Hierbei können zum Beispiel werkzeuggebundene Maße zwischen den ISO-Qualitäten IT 9 bis IT 12 liegen [Klo06], [Sch92]. Die Oberflächenbeschaffenheit der halbwarmumgeformten Teile ist unter anderem abhängig von der Umformtemperatur und dem Schmierstoff. Die Rauheitswerte der Werkstückoberfläche neh-

men mit wachsender Temperatur zu. Insbesondere bei Rohteiltemperaturen über 700 °C ist eine wesentliche Steigerung der Rautiefe zu beobachten. Die Vermeidung der Zunderbildung ermöglicht Oberflächenqualitäten zwischen $Rz = 20 \mu\text{m}$ und $Rz = 60 \mu\text{m}$ [Klo06]. Ob eine Schlussbehandlung (Gefüge, Oberfläche) des Werkstücks notwendig wird, ist von seinem späteren Einsatzgebiet sowie vom Werkstoff abhängig. Da diese Umformvorgänge im Rekristallisationsgebiet des jeweiligen Werkstoffs und eventuell auch in dessen Phasenumwandlungsgebiet stattfinden sollen, müssen Ausgangsgefüge, Umformtemperatur und Abkühlgeschwindigkeit aufeinander abgestimmt sein. Auf eine finale Wärmebehandlung kann verzichtet werden, wenn eine definierte Endfestigkeit beziehungsweise ein definiertes Gefüge nach dem letzten Umformvorgang erreicht wird.

6. Verfahrenskombinationen

Um Bauteile möglichst endkonturnah, das heißt mit einem Minimum an noch erforderlicher spanender Weiterbearbeitung herzustellen, werden in der Praxis häufig Kombinationen der Grundverfahren des Massivumformens eingesetzt.

Verfahrenskombination Warm- und Kaltmassivumformung

Die Kombination von Verfahren der Warm- und Kaltmassivumformung ist besonders häufig anzutreffen, weil sich so der sehr hohe Umformgrad der Warmumformung mit der Präzision und Oberflächen-güte der Kaltumformung verknüpfen

lässt. Auf diese Weise können selbst komplexe Funktionsflächen an geschmiedeten Bauteilen einbaufertig (net-shape) hergestellt werden. Nach dem Warm Schmieden wird die Oberfläche der Zwischenerzeugnisse zunächst gestrahlt oder auf andere Weise gereinigt. Anschließend erfolgt das sogenannte Kaltkalibrieren. Dieser Arbeitsschritt korrigiert maßliche Abweichungen des Bauteils aufgrund von thermischer Schrumpfung und verschleißbedingten Veränderungen der Geometrie der Schmiedegesenke. Gleichzeitig werden die Funktionsflächen geglättet, wodurch eine hohe geometrische Präzision mit engen Maß- und Formtoleranzen erzielt wird. Der Einsatz dieser Verfahrenskombination, die den Präzisionsschmiedeverfahren zuzurechnen ist, hat der

Massivumformung wichtige zusätzliche Einsatzfelder bei der Herstellung von net-shape-Bauteilen erschlossen. Beispiele für die diesbezügliche Formenvielfalt sind präzisionsgeschmiedete Kegelräder, bei welchen die Zahnfußtragfähigkeit durch eine belastungsgerechte Kornorientierung um circa 25 % gegenüber spanend gefertigten Referenzbauteilen erhöht werden konnte. Für die Neukonstruktion derartiger Bauteile wird seit zwei Jahrzehnten erfolgreich die Finite Elemente Methode (FEM) zur Simulation des Formgebungsvorgangs eingesetzt. Mit Hilfe vorgegebener Randbedingungen sowie rechnergestützter Optimierungsprogramme ist es möglich, die bestmögliche Grundverzahnung für den jeweiligen Anwendungsfall zu ermitteln [Wit11].

Verfahrenskombination Halbwarm- und Kalt- massivumformung

Wie bereits ausgeführt, weist jedes der verschiedenen Umformverfahren charakteristische Besonderheiten auf, die spezifische maßliche und gefügesteigenschaften der so hergestellten Werkstücke bedingen. Da die Bedeutung der Präzisionsumformung von Stahl insbesondere im Automobilsektor noch weiterhin stark zunimmt, erlangten neben der Verknüpfung von Warm- und Kaltumformung noch weitere Varianten der Präzisionsumformung wie die Kombination von Halbwarm- und Kaltumformung große Bedeutung. Wichtiger Vorteil der Halbwarmumformung im Vergleich zur Warmumformung sind weniger Schrumpfung und Verzug sowie eine geringere Verzunderung der Bauteile. Die höhere maßliche Genauigkeit ist beim abschließenden Kaltkalibrieren ein wesentlicher Pluspunkt. Durch Kombination von Halbwarm- und Kaltmassivumformung lassen sich Werkstücke immer dann wirtschaftlich herstellen, wenn zum einen bestimmte Werkstückabmessungen mit hoher Genauigkeit hergestellt werden müssen, zum anderen aber der Umformgrad so groß ist, dass beim Kaltpressen mindestens einmal eine Zwischenglühoperation eingesetzt werden müsste. Die Prozessfolge entspricht dann im Wesentlichen einer Aneinanderreihung dieser Prozessschritte. Die in Abbildung 15 abgebildeten Tripoden-Wellen für Gleichlauf-Schiebelenke sind aus dem Werkstoff Cf53 gefertigt, der nur begrenzt kalt umformbar ist. Nach der Halbwarmumformung werden die Rohteile beschichtet und lediglich kalt abgestreckt.

Mit dieser Vorgehensweise lassen sich Rollenlaufbahnbreiten in der Innenkantur herstellen, die eine Toleranz



Abbildung 15: Durch die Kombination aus Halbwarm- und Kaltmassivumformung hergestellte Tripoden-Welle

von $\pm 0,03\text{mm}$ aufweisen, sodass innen keine spanende Nacharbeit nötig ist. Nach dem Induktionshärten müssen die hochpräzisen Bauteile für den Einsatz im Fahrzeug eine Laufbahntoleranz von $\pm 0,05\text{mm}$ aufweisen. Eventuelle Härteverzüge werden bei diesem Konzept bereits vorgehalten.

Auch das in Abbildung 16 dargestellte Gelenkwellenteil wird aus dem induktiv härtbaren Stahl Cf 53 hergestellt. Bei diesem Bauteil werden sehr hohe Anforderungen an die Maß- und Formtoleranzen der innenliegenden Laufbahnen gestellt, um die sehr aufwendige spanende Endbearbeitung zu beschränken. Da diese Toleranzen

durch eine Warmmassivumformung nicht erreichbar sind und der Umformgrad für eine reine Kaltmassivumformung viel zu groß ist, werden diese Bauteile durch eine Kombination von Halbwarmfließpressen und anschließendem Kaltkalibrieren hergestellt. Während der Umformoperationen wird der Zapfen mit einer Durchmesser-toleranz von $0,3\text{mm}$ in mehreren Stufen bei ca. 850°C geformt. Die Durchmesser der kaltgepressten Kugellaufbahnen auf der Innenseite der Gelenkwellen erreichen so eine Genauigkeit von $\pm 0,1\text{mm}$. Nach dem Härten müssen die Kugellaufbahnen auf Fertigmaß spanend bearbeitet werden.

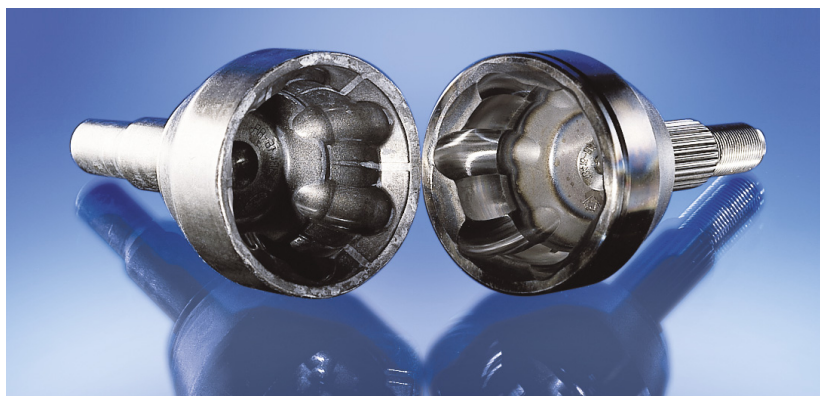


Abbildung 16: Durch die Kombination von Halbwarmfließpressen und Kaltkalibrieren hergestelltes Gelenkwellenteil (links Rohteil, rechts fertig bearbeitet)

Fügen durch Umformen

Üblicherweise werden im Maschinenbau reib- oder formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen durch Fügen von bearbeiteten Bauteilen erzeugt. Gegenüber Pressverbindungen ist das Fügen durch Umformen ein Verfahren, bei dem eine unlösbare Verbindung zweier Halbzeuge durch plastische Deformation entsteht und damit wird eine Reihe von neuen Möglichkeiten aufgezeigt. Aktuelle Untersuchungen von umformtechnisch hergestellten Welle-Nabe-Verbindungen beziehen sich beispielsweise auf das Erzeugen von reibschlüssigen Verbindungen zwischen einer zylindrischen Welle und einer zylindrischen Naben-Innenkontur durch Quer-Fließpressen (Abbildung 17). Die bei Presspassungen

oft entstehende Reibkorrosion wird minimiert, da das Fügenspiel ausgeglichen und der Fügedruck erhöht wird. Außerdem können Fertigungsschritte reduziert werden, da nur ein Fügepartner, in diesem Falle die Nabe mit einer geeigneten Innenkontur, umformtechnisch hergestellt werden muss [Dör12]. Derzeit werden auch andere Fügekonzepte untersucht, bei denen auch Teile des Nabenkörpers plastisch verformt werden und in eine entsprechende, auf der Welle vorgefertigte Geometrie eingreifen. Weitere Varianten bilden das Fügen mittels Fügekörpern, die plastisch derart verformt werden, dass die vorgefertigten, korrespondierenden Geometrien des Wellen- sowie des Nabenkörpers durch Bildung von Hinterschnitten nicht lösbar miteinander verbunden werden können. Diese

Verfahren zeigen wirtschaftliche Potenziale insbesondere bei kleinen und mittleren Produktionsvolumen, bei hybriden Baukonzepten solcher rotierender Systeme und auch bei gesteigerten Leichtbauanforderungen.



Abbildung 17: Durch Quer-Fließpressen hergestellte Wellen-Nabe-Verbindung (teilweise aufgeschnitten)

7. Entwicklungstendenzen und Perspektiven

Die Kaltmassivumformung eignet sich besonders in der Großserienproduktion für ein weites Spektrum an Bauteilen mit hohem Qualitätsniveau. Die Verwendung kostengünstiger Werkstoffe durch spätere Verfestigung im Umformprozess, die effiziente Entwicklung durch Einsatz verschiedenster Simulationstools und die hohe Präzision, Mechanisierung und Automation tragen dazu bei, kostengünstige Bauteile mit geringster spanender Nachbearbeitung fertigen zu können. Die aktuellen Entwicklungstendenzen auf diesem Gebiet lassen sich durch folgende Stichpunkte kennzeichnen:

- Entwicklung neuer Werkstück- sowie Werkzeugwerkstoffe
- Erweiterung der Verfahrensgrenzen durch optimierte Schmierung und Tribologie sowie Pressentechnologie
- Entwicklung von topologieoptimierten Bauteilen durch Nutzung moderner FEM-Methoden und fortschritt-

lichen Belastungssimulationen

- Reduktion von Prozessschritten durch kombinierte Fließpressverfahren

Bainitische Stähle

Durch isotherme Umwandlung aus dem Austenitgebiet zwischen der Perlit- und der Martensitstufe entstehen sogenannte HDB-Stähle (hochfeste, duktile, bainitische Stähle). Sie besitzen eine vorteilhafte Kombination von guten Festigkeitseigenschaften (Streckgrenzen $R_{p0,2} > 850$ MPa, Zugfestigkeit $R_m > 1200$ MPa), hoher Duktilität (Bruchdehnung $A_5 > 10\%$) sowie hoher Zähigkeit ($A_v > 27\%$) [Urb09]. Ein Mischgefüge aus Bainit und Perlit sowie Bainit und Martensit würde zu einer Reduzierung in der Zähigkeit führen [Som02]. Aktuelle Entwicklungsarbeiten zielen auf den Einsatz der bainitischen Stähle im Lauwarm-Temperatur-

bereich ab. Sie sind ein Fortschritt auf dem Weg zum „idealen Werkstoff“ mit höchster Festigkeit und Zähigkeit bei guten Formänderungsvermögen. In der industriellen Anwendung sind sie jedoch vorzugsweise für den Warmbeziehungsweise Halbwarmtemperaturbereich geeignet.

Hartmetall im Umformwerkzeug

Der verstärkte Einsatz von Hartmetall als Werkzeugwerkstoff bietet enormes Potenzial hinsichtlich einer höheren Standzeit der Werkzeuge sowie Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit der Werkstücke, womit sich der Trend zur umformtechnischen Herstellung einsatzfertiger Werkstücke zu echten Net-Shape-Bauteilen weiter fortsetzen wird. Durch verschiedene Variationsmöglichkeiten der Karbid-

korngroße sowie des Binderanteils des Hartmetalls sind heute Kennwerte der Zähigkeit dieser Werkstoffe nahe denen von pulvermetallurgisch hergestellten Stählen erreichbar, welche gleichzeitig eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit aufweisen [Mon12].

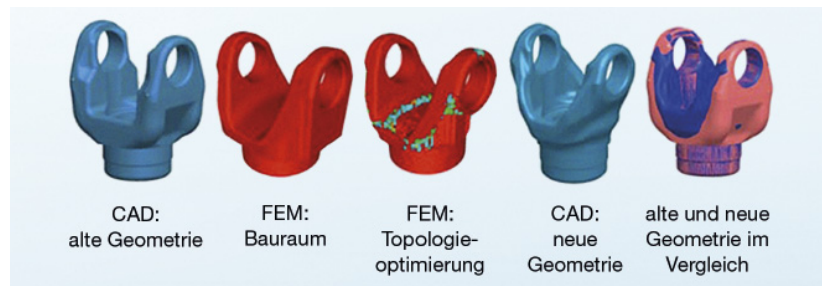


Abbildung 18: Rechnergestützte Topologieoptimierung einer geschmiedeten/gespressten Kardan-Gabel

Topologieoptimierte Bauteile

Aufgrund des stark zunehmenden Einsatzes moderner FEM-Methoden für die Bauteilauslegung verstärkt sich auch die Entwicklung von sogenannten topologieoptimierten Bauteilen. Durch Vorgabe des maximal zur Verfügung stehenden Bauraumes (Package) für ein Bauteil (zum Beispiel rotierendes Bauteil) und seiner Last- und Lagerungsrandbedingungen werden heute von speziellen numerischen Berechnungssystemen gering belastete und für die Steifigkeit unkritische Teilbereiche des Werkstückvolumens entfernt, wodurch das Potenzial für die Festlegung der Bauteilgeometrie besser ausgeschöpft und bei richtiger Auslegung Material sowie Bearbeitungszeit eingespart werden können. In Abbildung 18 ist schematisch eine Stadienfolge der Topologieoptimierung dargestellt.

Schmierstoff/Tribologie

Neue Auflagen zum Schutz von Mensch und Umwelt sowie angestrebte Bemühungen, Kosten und Produktionszeit zu senken, führen derzeit zu weiteren Forschungsarbeiten im Bereich der Schmierstoff- und Tribologie-Systeme in der Kaltfließpresstechnik. Die Substitution einer aufwändigen Phosphatierung des Rohlings und anschließender Schmierstoffaufbringung wird durch neue, umweltfreundliche Beschichtungsformen erreicht. Zum Beispiel kann mit wesentlich reduzier-

tem Zeitaufwand in einem Arbeitsgang eine Doppelschicht aus anorganischem Salz und organischen Schmierstoff auf den Rohling aufgebracht werden. Die beiden Komponenten liegen in einer Wasserlösung vor, welche beim Trocknen beziehungsweise durch die beim Umformen entstehende Prozesswärme verdampft. Dadurch entsteht eine Doppelschicht auf dem Rohling, wobei das Salz als Trägerschicht wirkt sowie vor Kaltaufschweißungen schützt, und während der Schmierstoff die Reibung während des Umformprozesses reduziert [Bay11]. Bei den Umformwerkzeugen ermöglichen zum Beispiel neue Entwicklungen von Mehrphasenstählen aus stickstofflegiertem Pulverstahl den Verzicht auf aufwändige Oberflächenbeschichtungen. Dies wird durch feinverteilte, reibungsarme Nitride in der Werkstoffmatrix induziert und bietet eine exzellente Kombination aus Widerstand gegen Kaltaufschweißungen und adhäsiven Verschleiß [Bay11]. Des Weiteren können durch einen Laser kreisförmig Mikroschmierstofftaschen auf die Werkzeugoberfläche aufgebracht werden, welche den Schmierstoff in der Textur auffangen und Standzeiten verlängern [Bay11].

Divided Flow-Methode

Die Kombination von verschiedenen Grundverfahren des Fließpressens (zum Beispiel Querfließpressen in Kombination mit dem Napfen) in einer

Stufe ruft unter anderem einen geteilten Werkstofffluss in der Werkzeugkavität hervor, bei dem der Werkstoff in unterschiedlichen Bauteilbereichen in verschiedene Richtungen fließt. Die Herstellung komplexerer Bauteile wird oftmals nur mit Hilfe solcher Verfahrenskombinationen möglich. Untersuchungen an einem Fertigungsverfahren des Kalt-Querfließpressens von Zahnrädern in einem Schließwerkzeug haben gezeigt, dass sich durch eine spezifische Kinematik der Werkzeugkomponenten ein geteilter Werkstofffluss im Umformgut einstellt. Dies ermöglicht eine Verringerung der Prozesskräfte bei gleichzeitiger Verbesserung der Formfüllung und einer wesentlichen Verlängerung der Werkzeugstandzeiten [Kon05] [Kon07]. Zudem wird form- oder stoffschlüssiges Zusammenfügen von mehreren Halbzweigen vermieden und überdimensionierte Bauteile werden wirtschaftlicher ausgeführt. Durch die Einsparung von Umformstufen können außerdem die Werkzeugfertigungskosten und Produktionszeit reduziert werden.

Die Entwicklungstendenzen zeigen, dass die Möglichkeiten, die Kaltmassivumformung noch wirtschaftlicher und qualitativ hochwertiger zu gestalten, nicht ausgeschöpft sind. Aus der Notwendigkeit, die Rohstoffe effizienter zu nutzen und dem steigenden Konkurrenzdruck standzuhalten, ergibt sich, dass die Entwicklungsarbeiten auch in Zukunft kontinuierlich fortgesetzt werden müssen.

Begriffsdefinitionen

Umformung

Nach DIN 8580 ist das Umformen definiert als bildsames oder plastisches Ändern der Form eines festen Körpers, wobei sowohl die Masse als auch der Stoffzusammenhalt beibehalten wird.

Quelle: Beuth-Verlag

Warmumformung:

Bei der Warmumformung werden die Abschnitte auf eine Temperatur erwärmt, bei der Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge, während und direkt nach der Umformung ablaufen. Dadurch werden Kraftbedarf und Spannungen herabgesetzt und das Umformvermögen des Werkstoffs vergrößert. Bei Stahlwerkstoffen liegt die Ausgangstemperatur üblicherweise bei ca. 1200°C.

Quelle: Hirschvogel, Massivumgeformte Komponenten, November 2010

Verfestigung

Die Werkstoffverfestigung bezeichnet in der Werkstoffwissenschaft die zunehmende Anzahl von Versetzungen in den Atomgittern. Diese werden unter anderem durch plastische Deformation hervorgehoben und bleiben nach Aufhebung der äußeren Kräfte erhalten. Mit zunehmender Anzahl der Versetzungen werden immer höhere Spannungen notwendig, um den atomaren Verband zum Weitergleiten zu bewegen, das heißt, der Werkstoff verfestigt sich mit steigendem Umformgrad.

Quelle: siehe [Lan08]

Grenzumformgrad

Wird ein Körper mit einem definierten Volumen durch äußere Kräfte in eine andere Gestalt gebracht, so ist die Größe dieser Veränderung durch die so genannte „Formänderung“ gekennzeichnet. Tritt bei dieser Umformung ein duktiler Bruch auf, so wird der Grenzumformgrad überschritten und damit eine zu große Formänderung in den Werkstoff eingebracht.

Quelle: Prof. Eckhard Doege, Handbuch der Umformtechnik, November 2011

Bilderverzeichnis

Titelbild:	Bauteilabbildung: Schondelmaier GmbH Presswerk, www.fotolia.com, Stahlplatte 2, Jörg Vollmer, Grafik Design Peter Kanthak, Wickede (Ruhr)
Abbildung 1:	Industrieverband Massivumformung e. V.
Abbildungen 2 und 3:	Dold Kaltfließpressteile GmbH
Abbildung 6:	Metaldyne Holzer
Abbildung 8:	ThyssenKrupp Presta AG
Abbildung 9:	[Ros11]
Abbildung 11:	Sieber Forming Solutions GmbH
Abbildung 12:	A. u. E. Keller GmbH & Co.
Abbildung 17:	Institut für Umformtechnik (IFU), Stuttgart
Alle anderen Abbildungen:	Hirschvogel Automotive Group

Literaturverzeichnis

- [Bay11] Bay, N.: New lubricant systems for cold and warm forging – advantages and limitations. 12th International Cold Forging Congress, Stuttgart, 19. Mai 2011
- [Doe07] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen. 2., bearbeitete Auflage. Springer-Verlag, 2007
- [Dör12] Dörr, F.; Funk, M.; Liewald, M.; Binz, H.: Untersuchungen zur Herstellung einer Welle-Nabe-Verbindung durch Quer-Fließpressen. Schmiede JOURNAL März 2012
- [Fel83] Feldmann, H.-D.: Fließpressen von Stahl, Merkblatt 201, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf 1983
- [Got98] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde, Springer, 1998
- [Her89] Herlan, T.: Optimierter Energieeinsatz bei der Fertigung durch Massivumformung. Dissertation, Universität Stuttgart, Springer-Verlag, 1989
- [Ind11] N.N.: Basic Knowledge. Forgings – Significance, Design, Production, Application. Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen, April 2011
- [Klo06] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren. Umformen. 5., neu bearbeitete Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg 2006
- [Kon05] Kondo, K.: Improvement of Product Accuracy in Cold Die Forging. Proc. 6th ICTP (International Conference on Technology of Plasticity), Sept. 19-24, 1999, Nuremberg, Germany, pp. 41 – 48
- [Kon07] Kondo, K.: Net Shape Umformung von Automobilteilen mit geteiltem Werkstofffluss. In: Liewald, M. (Hrsg.), Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt/M., 2007, S. 175 – 184
- [Kör98] Körner, E.; Meyer, A.: Rohlings-Vorbehandlung zum Halbwarmumformen. Werkstatt und Betrieb 131 (1998) 5, S. 431 – 432
- [Lan01] Landgrebe, D., u. a.: Massivumformtechniken für die Fahrzeugindustrie; Verfahren, Werkstoffe und Entwicklung, Verlag Moderne Industrie, 2001
- [Lan08] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: Fließpressen – Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke. Springer-Verlag 2008
- [Lan88] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik, Band 2, Springer, 1988
- [Lie11] Liewald, M.; Felde, A.: Die Produkthanforderungen bestimmen die zukünftigen Kompetenzen in der Massivumformung – ein Situationsbericht des Instituts für Umformtechnik. In: Liewald, M. (Hrsg.), Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt/M., 2011, S. 207– 244

Literaturverzeichnis

- [Lie12] Liewald, M.; Schiemann, T.; Mletzko, C.: Verfahrensentwicklungen zum Fließpressen hohler Leichtbaukomponenten. 27. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, Veranstaltung des VDI Wissensforums, Düsseldorf, 15./16. Februar 2012
- [Mle10] Mletzko, C.; Liewald, M.; Felde, A.: Evaluation of lubricant carrier coatings for bulk metal forming of steel at elevated temperatures using double-cup-extrusion-test. 4th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes. Nizza, Frankreich, 13. Juni 2010
- [Mon12] Monte, M.; Gassler, H.: Hämmer- und Knetprozesse mit Werkzeugen aus Hartmetall. Hartmetall – Leistungsfähig und präzise. 27. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, Veranstaltung des VDI Wissensforums, Düsseldorf, 15./16. Februar 2012
- [Oll00] Ollilainen, V., Hocksell, E.: New Low-Carbon Steel for Hot, Warm or Cold Forging, Advanced Engineering Materials 2000, 2, No. 5
- [Rae02] Raedt, H.-W.: Grundlagen für das schmiermittelreduzierte Tribo-System bei der Kaltumformung des Einsatzstahles 16MnCr5, Dissertation RWTH Aachen 2002
- [Ros11] Roske, J.: Servo-Antriebstechnik in Anwendungen der Massivumformung. In: Liewald, M. (Hrsg.), Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt/M., 2011, S. 111 – 120
- [Sch92] Schmoeckel, D.; Sheljaskow, Sh.; Dübler, A.: Entwicklungstand und Einsatzbereiche der Halbwarmumformung. Forschungsbericht, Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V., Frankfurt, 1992
- [Som02] Sommer, P.: Bainitisieren – eine Maßnahme zur Einsatzoptimierung von hochfesten Bauteilen. In: Der Wärmebehandlungsmarkt 1/2002, Seite 5-8
- [Urb09] Urban, M.; Keul, C.; Bleck, W.; Hirt, G.: High Strength ductile bainitic steel for high stressed forged structural parts. Proceedings of the 5th JSTP International Seminar on Precision Forging, 16.-19.03.2009, Kyoto, Japan, P. 163-166 (CD-ROM)
- [VDI98] N.N.: VDI-Richtlinie 3138 Blatt 1, Kaltmassivumformen von Stählen und NE-Metallen – Grundlagen für das Kaltfließpressen, Beuth Verlag, 1998
- [Web01] Weber, H.R.: Ein neuer martensitahärtender Band-Federstahl für komplexe Geometrien, VDI-Z 143 (2001), Nr. 5 – Mai
- [Wit11] Witt, S.: Präzisionsschmieden im Wandel. In: Umformtechnik-Innovationen aus Industrie und Wissenschaft, 20. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 2011, Seite 19-34

Industrieverband
Massivumformung e. V.

Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
Telefon: +49 2331 958830
Telefax: +49 2331 958730

E-Mail: orders@metalform.de

Weitere Informationen unter:
www.metalform.de

ISBN: 978-3-928726-29-0

Den Veröffentlichungen
des Industrieverbands
liegen die Ergebnisse der
Gemeinschaftsforschung
der im Industrieverband
Massivumformung e. V.
zusammengeschlossenen
Mitgliedsunternehmen
zugrunde.

Stand: Oktober 2012
EI-KM-1012-20 DOM