

# Kupferlegierter AFP-Stahl für die Kaltmassivumformung



Leichtbaukonzepte im Bereich des Fahrzeugbaus wirken sich sowohl auf die Gestaltung von fließgepressten Bauteilen als auch auf die Anwendung von Werkstoffen zu deren Fertigung aus. Besonders hoch- und höchstfeste Stähle werden verstärkt verlangt und eingesetzt, deren Verwendung aber auch neue Herausforderungen hervorruft.

AUTOREN



**Stefan Meiler, M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Stahl und Schwermetalle am Institut für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg



**Dipl.-Ing. Frank Hoffmann**

leitet die Arbeitsgruppe Stahl und Schwermetalle am Institut für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg



**Hannah Schwich, M.Sc.**

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen



**Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. mult. Rudolf Kawalla**

ist Direktor des Instituts für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg



**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck**

leitet das Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) an der RWTH Aachen



**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Prahl**

leitet die Professur für Umformtechnik am Institut für Metallformung der TU Bergakademie Freiberg

Deutlich erhöhte Umformkräfte bei der Kaltumformung beeinträchtigen unter anderem Werkzeugstandzeiten und Energieeffizienz. Einen möglichen Lösungsweg bietet die konventionelle Herstellungstechnologie über das Vergüten der kaltfließgepressten Bauteile, die jedoch zusätzliche Kosten durch Verlängerung der gesamten Prozesskette durch Anwendung des GKZ-Glühens vor und des Vergütens nach der Kaltumformung verursacht und zudem mit Materialverlusten in Form der Zunderbildung oder mit der Anwendung von Schutzatmosphären beim Glühen verbunden ist [1]. Einen weiteren Nachteil stellt der möglicherweise auftretende Verzug infolge der martensitischen Phasenumwandlung dar, der durch eine Nachbearbeitung des harten Bauteils oder einen Richtprozess kompensiert werden muss. Daher sind neue Konzepte in der Entwicklung gefordert, die sich der Suche nach einem sowohl in der Herstellung als auch in der Weiterverarbeitung prozessschrittarmeren Werkstoffs entsprechender Festigkeit annehmen.

**PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG**

Eines dieser Konzepte stellt die Entwicklung eines neuartigen, kupferlegierten AFP-Stahls dar [2 – 4]. Die wesentliche Innovation besteht in der Führung des Herstellungsprozesses der Halbzeuge, die für die Massivumformung eingesetzt werden. Das Halbzeug soll aus der Walzhitze so abgekühlt werden, dass die im Ferrit ausscheidungsfähigen Anteile an Legierungselementen (Cu) in Lösung bleiben. Sie werden sich daher im Halbzeug nur als Mischkristallverfestiger auswirken. Der wesentliche ausscheidungshärtende Beitrag soll erst nach der Kaltumformung, während der Auslagerung im Temperaturbereich unterhalb der Rekrystallisation des Ferrits zur Geltung kommen. Es werden dabei Feinstausscheidungen in einem kalt umgeformten, insgesamt sehr feinkörnigen Gefüge erzeugt. Es wird

angestrebt, durch die Optimierung der Prozessführung die beste Kombination aus Festigkeit und Zähigkeit einzustellen. Im Ferrit sollen dabei nur Erholungsvorgänge stattfinden. Die Festigkeit der Bauteile (zum Beispiel Verbindungselemente) soll sich damit aus der Festigkeit des Halbzeugs, dem Betrag der Kaltverfestigung bei der Fertigung durch Kaltmassivumformen – verringert um den Betrag der Entfestigung durch Erholung im Ferrit – und der Ausscheidungshärtung der Legierungselemente zusammensetzen.

**VORGEHENSWEISE**

Die numerische Entwicklung eines industriell erzeugbaren AFP-Stahls mit niedrigem C-Gehalt und mit Cu im Legierungsbereich bis zirka 1,5 Prozent wurde am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen durchgeführt. Dies beinhaltete eine thermodynamische Simulation zur Entwicklung des Mikrolegierungskonzepts mittels ThermoCalc zur Berechnung von Gleichgewichtsdiagrammen sowie einer MatCalc-Simulation zur Berechnung der Ausscheidungskinetik. Auf der Grundlage dieser Simulationsergebnisse wurden Legierungen und Prozessrouten vorgeschlagen.

Anschließend wurden Laborschmelzen von je 80 kg hergestellt und mithilfe der Universalumformpresse am Institut für Metallformung (imf) der TU Bergakademie Freiberg weiterverarbeitet. Für die Entwicklung einer definierten Warmumformstrategie und einer an die Kaltumformung abgestimmten Wärmebehandlungstechnologie wurden Laboruntersuchungen an Multifunktions- und Simulationsanlagen Gleeble und Bähr durchgeführt. Hierbei bestand das Ziel in der Ermittlung von optimalen Aufheizbedingungen, der optimalen Warmumformtemperatur und der Bestimmung von optimalen Abkühlbedingungen. Die Charakterisierung des Lösungszustands nach der Warmumformung erfolgte



Bild 1: Semiindustrielle Herstellungsrouten der Demonstratorbauteile

mittels Rasterelektronenmikroskop-(REM-)Untersuchungen. Einen weiteren Schwerpunkt stellt die Beschreibung des Effekts der Ausscheidungshärtung nach der definierten Kaltumformung in Kombination mit den Bedingungen der Wärmebehandlung dar. Dazu wurden Auslagerungstemperatur und -dauer sowie der Umformgrad bei der Kaltumformung variiert und die verschiedenen Versuchsbedingungen mittels Härtemessung untersucht. Die Validierung der Laborergebnisse wurde an Demonstratorbauteilen in Form von Schrauben und Gewindestangen sowie an gezogenen Stäben durchgeführt. Dazu wurde das geschmiedete Vormaterial mit einem Querschnitt von 45 x 45 mm in semiindustriellem Maßstab entsprechend der entwickelten Warmwalztechnologie am Institut für Metallformung auf einen Durchmesser von 15,5 mm warmgewalzt und gesteuert abgekühlt. Anschließend wurden die Stäbe von einem Ausgangsdurchmesser von 15,5 mm auf Enddurchmesser von 12,5 beziehungsweise 10,5 mm gezogen, um verschiedene Kaltumformgrade zu realisieren. Aus den gezogenen Stäben wurden Schrauben M10 aus 10,5 mm-Stäben und Schrauben M12 aus 12,5 mm-Stäben hergestellt (Bild 1). Die Auslagerung erfolgte sowohl an den hergestellten Schrauben als auch an Stababschnitten der zwei unterschiedlichen Endwalzdurchmesser.

## ERGEBNISSE

Auf Grundlage der numerischen Simulation der Kinetik der Kupferausscheidungen und der Gleichgewichtsdiagramme wurden optimale Kupfergehalte für die Ausscheidungshärtung

bestimmt. Um das Kupfer nach der Warmumformung in Lösung zu halten, ist eine präzise und schnelle Abkühlrate nötig. Da ein vorzeitiges Ausscheiden von Kupfer mit steigenden Kupfergehalten ab 1 Gew.-% jedoch zunehmend schwieriger zu verhindern ist und Vorversuche zum Ausscheidungsverhalten gezeigt haben, dass Kupfergehalte von 1,5 Gew.-% gegenüber Kupfergehalten von 0,8 Gew.-% keine Vorteile bei der Ausscheidungshärtung mit sich bringen, wurde die in Tabelle 1 dargestellte Legierungsvariante gewählt. Es zeigte sich, dass bei dieser Variante die Ausgangshärte von 193 HV ( $\approx$  618 MPa) nach der Warmumformung für diverse im Projekt anvisierte Anwendungsbereiche, wie die Herstellung kaltumgeformter Massivbauteile, zu hoch ist. Daher wurde eine zweite Legierungsvariante mit herabgesetzten Kohlenstoff- und Mangangehalten entwickelt, die eine Ausgangshärte von 168 HV ( $\approx$  538 MPa) aufweist (Tabelle 2).

Entsprechend den Untersuchungen am Umformsimulator Bähr und den erstellten U-ZTU-Schaubildern stellt eine Austenitisierung bei 1100 °C und 3 Minuten sicher, dass Kupfer komplett gelöst ist und die Bildung von Grobkorn und Widmannstättenferrit unterdrückt wird [5]. Die Warmumformung erfolgte zwischen 1.050 und 900 °C und zeigte in diesem Temperaturbereich stabile Eigenschaften. Zur Erreichung einer ferritisch-perlitischen Struktur und um das zulegierte Kupfer in Lösung zu halten, muss nach der Umformung zweistufig (ohne Haltezeit) abgekühlt werden. Zunächst relativ schnell mit 5 K/s auf 700 °C und in der zweiten Stufe dann mit 1 K/s bis auf Raum-

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	N	Al
[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[ppm]	[Gew.-%]
0,24	1,12	0,11	0,003	0,002	0,20	0,041	0,80	0,40	110	0,039

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Legierungsvariante 1

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	N	Al
[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[Gew.-%]	[ppm]	[Gew.-%]
0,16	0,85	0,10	0,005	0,003	0,20	0,043	0,77	0,40	130	0,038

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Legierungsvariante 2

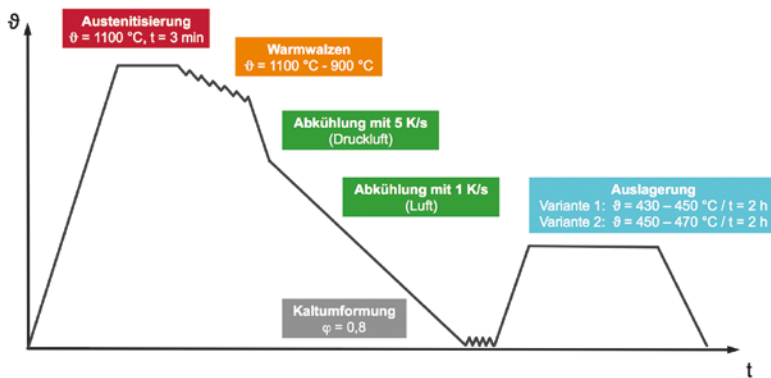


Bild 2: Optimale Warmwalztechnologie und Variation der Auslagerungsparameter

temperatur. Die optimale Warmwalztechnologie wurde für beide Legierungsvarianten gleichermaßen angewendet und ist zusammen mit der durchgeführten Variation der Auslagerungsbedingungen in Bild 2 dargestellt. Bei der Auslagerung ohne vorherige Kaltumformung zeigen sich kaum Härtesteigerungen, was darauf schließen lässt, dass die Ausscheidungshärtung stark verformungsinduziert ist. Die optimale Auslagerungstemperatur liegt für die Legierungsvariante 1 zwischen 430 °C und 450 °C und für die Legierungsvariante 2 zwischen 450 °C und 470 °C bei einer Auslagerungsdauer von 2 Stunden und einem Kaltumformgrad von  $\varphi = 0,8$ . Hohe Auslagerungstemperaturen wirken sich besonders bei langer Auslagerungsdauer negativ aus. Die ermittelten Härtewerte für die optimalen Auslagerungsbedingungen der jeweiligen Legierungsvariante sind in Bild 3 dargestellt.

Bei allen untersuchten Demonstratorbauteilen kann eine Festigkeitssteigerung durch die Auslagerung unterhalb von 500 °C festgestellt werden. Im Gegensatz zu den im Labormaßstab untersuchten Proben der Legierungsvariante 2 fällt unter den industrienahe Bedingungen die Härtesteigerung bei einer Auslagerung bei 450 °C geringfügig höher aus als bei einer Auslagerung bei 470 °C. Der Vergleich der ausgelagerten Schrauben M12 beider Legierungsvarianten zeigt, wie auch bei den Laborproben nach der Kaltumformung eine geringere Festigkeit der Variante 2 gegenüber Variante 1 durch die herabgesetzten Kohlenstoff- und Mangengehalte. Die Härtesteigerung durch Auslagerung liegt bei beiden Varianten ungefähr auf dem gleichen Niveau (Bild 4).

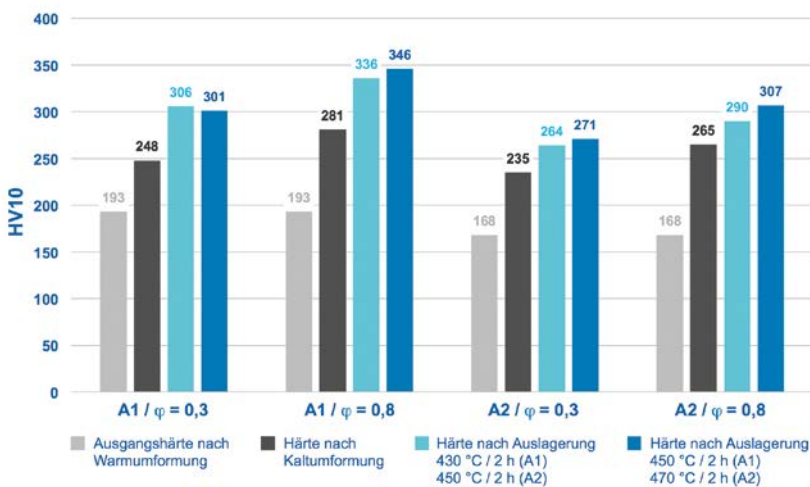


Bild 3: Ergebnisse der Härtemessung bei optimalen Auslagerungsbedingungen

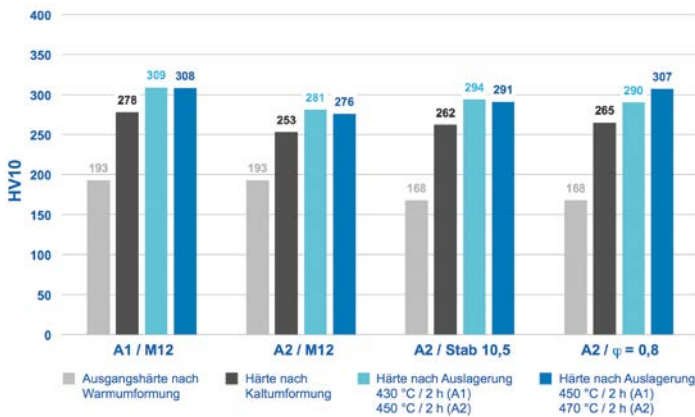


Bild 4: Ergebnisse der Härtemessungen an Demonstratorbauteilen

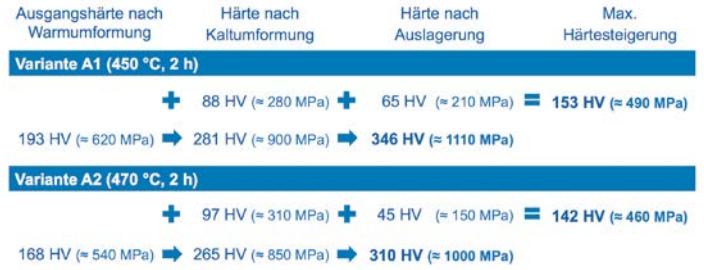


Bild 5: Härtesteigerungen der beiden Legierungsvarianten

Bilder: Autoren

Die Härte nach der Kaltumformung bei den gezogenen Stäben mit einem Durchmesser von 10,5 mm erreicht durch den höheren Umformgrad einen höheren Wert als bei den Schrauben M12, die aus Stäben mit einem Durchmesser von 12,5 mm hergestellt wurden. Die Härtesteigerung durch Auslagerung liegt auch hier ungefähr auf dem gleichen Niveau. Der Umformgrad, der beim Ziehen der Stäbe von einem Ausgangsdurchmesser von 15,5 mm auf einen Enddurchmesser von 10,5 mm erreicht wird, liegt etwa bei  $\varphi = 0,78$ , weshalb diese gut mit den Laborproben vergleichbar sind, die durch Stauchung eine Kaltumformung mit einem Umformgrad von  $\varphi = 0,8$  erfahren haben. Wie in Bild 5 zu erkennen ist, weisen beide Proben sowohl nach der Kaltumformung, als auch nach der Auslagerung bei 450 °C in etwa die gleichen Festigkeitswerte auf. Lediglich die Härtesteigerung bei Auslagerung bei 470 °C ist bei den Laborproben größer als bei den gezogenen Stäben.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der hier betrachtete neue AFP-Stahl mit einem Kupfergehalt von 0,8 Prozent in den beiden Varianten 1 und 2 erreicht mit der entwickelten Herstellungstechnologie und den optimalen Auslagerungsbedingungen eine Festigkeitssteigerung von insgesamt 490 MPa für die Variante 1 beziehungsweise 450 MPa für die Variante 2 (Tabelle 2). Mit der Validierung der Laborversuche mit Demonstratorbauteilen in Form von Schrauben wurde gezeigt, dass eine industrielle Nutzung beispielsweise für Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 in Frage kommt. Bei der Herstellung wird hierbei auf den konventionellen Vergütungsprozess verzichtet, sodass aufwendige und teure Arbeitsschritte in der Nachbearbeitung durch auftretenden Verzug der Bauteile eingespart werden.



Das IGF-Vorhaben 18167 BG der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**



**IGF**  
Industrielle  
Gemeinschaftsforschung

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



- [1] DIN EN 10263-4:2002: Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpresstählen, Teil 4: Technische Lieferbedingungen für Vergütungsstähle, Februar 2002
- [2] Engineer, S. et al.: Verwendung von AFP-Stählen für erhöhten Temperaturen ausgesetzte Bauteile, Patentschrift DE 40 17973 C2, 1993
- [3] DIN EN 10267:1998: Von Warmformgebungstemperatur ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle, Februar 1998
- [4] Fleischer, H.-J. et al.: Verwendung von AFP-Stählen für die Herstellung von Werkzeugen, Patentschrift DE 4137240 C2, 1993
- [5] Prahl, U.; Schwich, H.; Bleck W.; Hoffmann, F.; Kawalla, R.: Aushärtbarer AFP-Stahl für kaltumgeformte, hochfeste Massivbauteile, NEMU 2017, Tagungsband, S. 81 – 86