

Technological Characteristics of AFP Steel in the Range between Room Temperature and 500 °C

The economic advantages of forming in the temperature range below 500 °C directly from the forging heat result from the use of process heat and the possibility to integrate another forming stage in the entire process chain after forging and targeted heat treatment. The use of residual heat from the forging process allows an improvement of the energy footprint of the entire process chain

because chemical or thermal hardening processes for the AFP steel forging parts are eliminated. An integration of the forming in the temperature range between room temperature (RT) and 500 °C into the entire process chain can furthermore achieve high quantities and thus lower piece production cost significantly.

Technologische Eigenschaften von AFP-Stahl im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 500 °C

Dipl.-Ing. Ehsan Hajyheydari,
Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA,
Dr.-Ing. Alexander Felde, Stuttgart

Die wirtschaftlichen Vorteile durch die Umformung im Temperaturbereich unterhalb von 500 °C direkt aus der Schmiedehitze ergeben sich durch die Nutzung der Prozesswärme und die Möglichkeit, eine weitere Umformstufe innerhalb der Gesamtprozesskette nach Schmiedung und gezielter Wärmebehandlung zu integrieren. Die

Nutzung der Restwärme aus dem Schmiedeprozess ermöglicht eine Verbesserung der energetischen Bilanz der gesamten Prozesskette durch den Entfall chemischer oder thermischer Härteverfahren für die Schmiedeteile aus AFP-Stahl. Darüber hinaus können durch eine Integration der Umformung im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur (RT) und 500 °C in die Gesamtprozesskette hohe Mengenleistungen erzielt und so die Fertigungskosten pro Stück signifikant gesenkt werden.

Dieser Beitrag stellt die technologischen Maßnahmen zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen des nachfolgenden Umformens von Schmiedeteilen aus hochfesten Stählen durch gezielte Nutzung der Schmiedehitze im Temperaturbereich unterhalb von 500 °C dar. Im Vergleich zu spanenden Verfahren oder inkrementellen Umformverfahren können dadurch wirtschaftliche und funktionelle Vorteile erzielt werden, die eine Herstellung von Net-Shape-Geometrien mit optimierten mechanischen Eigenschaften von Schmiedeteilen aus ausscheidungshärtenden ferritisch-perlitischen (AFP-)Stählen erlauben.

Einleitung

Die Anwendung einer direkten, kontinuierlichen Abkühlung der Schmiedeteile von der Schmiedetemperatur (ohne Variation der Abkühlbedingungen während der Abkühlung) ist heute in vielen Schmiedebetrieben gängige Praxis [1, 2]. Die bisher derart hergestellten Schmiedeteile, hauptsächlich auf Basis der Legierung 38MnSiVS5 - 1.5231, weisen aber

seit ihrer Einführung niedrigere Zähigkeiten im Vergleich zu den konventionellen Vergütungsstählen auf. Dieser Nachteil hat ihren Anwendungsbereich auf nicht schlagartig beanspruchte Bauteile beschränkt. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit die im Hinblick auf die Weiterentwicklung dieser Stähle wichtigen Fragen beantwortet, inwieweit durch eine gezielte Variation der Prozessparameter während der kontinuierlichen Abkühlung eine verbesserte Kombination der Festigkeits-Zähigkeits-Eigenschaften erreicht werden kann.

In Schmiedebetrieben wird in der Regel im Hinblick auf niedrige Umformkräfte und niedrigen Werkzeugverschleiß mit hohen Umformtemperaturen gearbeitet. Andererseits beeinflusst der zu Beginn der γ/α -Umwandlung vorliegende Zustand des Austenits wesentlich das Umwandlungsgefüge. Eine durch Absenkung der Umformtemperatur erzielbare geringere Austenitkorngröße beziehungsweise ein verformter, nicht rekristallisierter Austenit lässt die Bildung eines feinkörnigeren Ferrit-

Perlit-Gefüges mit verbesserter Zähigkeit erwarten. In ähnlicher Weise sollte eine Zunahme der Abkühlgeschwindigkeit zur Verfeinerung des Gefüges und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften führen.

Einstufiger Abkühlprozess mit Hilfe von Umluft-Kammerofen

Mithilfe von aufgenommenen Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern (ZTU) beziehungsweise Umformung-Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern (UZTU) für den AFP-Stahl wurden im Rahmen dieser Untersuchungen thermomechanische Prozessketten für das Schmieden von Scheiben (Primärproben) aus dem Stahl 38MnSiVS5 - 1.5231 festgelegt. Ziel der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Technologie ist die Einstellung eines Ferrit-Perlit-Gefüges mit homogen verteiltem Ferrit, kombiniert mit einem härteren Perlit, um so eine ausreichend hohe Duktilität bei gleichzeitig guter Festigkeit zu gewährleisten. Das Verfahrensprinzip der einstufigen Abkühlung wird in Bild 1 verdeutlicht.

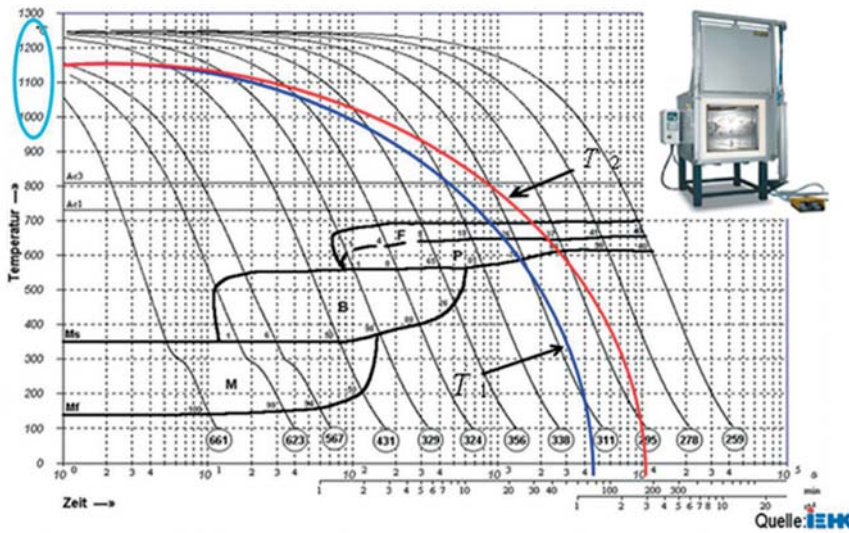


Bild 1: ZTU-Diagramm des AFP-Stahls 38MnVS6.

Bild: IEHK

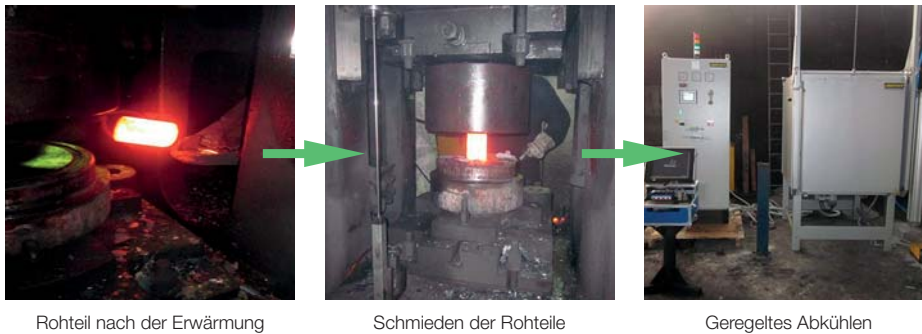


Bild 2: Prozesskette in Schmiedeversuchen mit AFP-Stahl 38MnVS6.

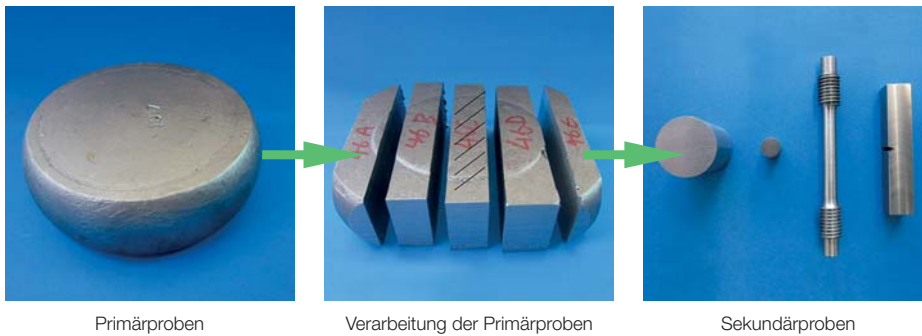


Bild 3: Fertigung der Sekundärproben.

In der ersten Abkühlroute mit höherer Abkühlgeschwindigkeit \dot{T}_2 wurden die Primärproben innerhalb von 1,5 Stunden von einer Schmiedetemperatur von 1.100 °C auf 500 °C in einem Umluft-Kammerofen geregelt abgekühlt. In der zweiten Abkühlroute erfolgt eine Abkühlung der geschmiedeten Scheiben mit einer niedrigen Abkühlgeschwindigkeit \dot{T}_2 in etwa 3 Stunden von 1.100 °C auf 500 °C. Den Unterschied zwischen den beiden Abkühlrouten stellen einerseits der Anteil des gebildeten Ferrit- und Perlitgefüges und andererseits die Veränderung der Korngröße dar.

Varierte Prozessparameter

Durch die oben beschriebene Variation von Umformgrad und Abkühlroute wurden unterschiedliche ferritisch-perlitische Ge-

füge in den Primärproben (geschmiedeten Scheiben) eingestellt. Das vom Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH-Aachen aufgenommene ZTU-Schaubild (Bild 1) zeigt, dass Schmiedetemperatur und Abkühldauer einen deutlichen Einfluss auf die Härte des Versuchswerkstoffes haben. Nach dem ausgeführten Versuchsplan wurden die Rohteile auf drei Temperaturniveaus 1.000 °C, 1.150 °C und 1.250 °C erwärmt, mit drei Umformgraden geschmiedet und in zwei Abkühlrouten (1,5 und 3 Stunden) geregelt abgekühlt. Zur gleichmäßigen isothermen Phasenumwandlung des AFP-Stahls wurde ein Umluft-Kammerofen eingesetzt. Die Variation des Umformgrades erfolgte durch den Einsatz von zylindrischen Halbzeugen gleichen Volumens und mit unterschiedlichen Durchmesser-Längen-Verhältnissen.

Durchführung der Schmiedeveruche

Für die Durchführung der Umformversuche wurde eine Spindelpresse des Herstellers Siempelkamp GmbH & Co. KG mit einer Nennkraft von 8.000 kN und einem Stößelhub von 500 mm verwendet. Die Proben wurden induktiv erwärmt, an der Induktionsanlage wurde in Abhängigkeit der Schmiedetemperatur und des Probendurchmessers eine Taktzeit zwischen 15 und 25 Sekunden und eine Leistung von 290 bis 390 kW eingestellt. Die Werkstücke wurden mit Hilfe eines Schiebers in die Induktionsspule eingeführt und auf die gewünschte Schmiedetemperatur erwärmt, wobei die Temperaturmessung mit Hilfe eines Pyrometers erfolgte. Nach dem Erreichen der erforderlichen Temperatur wurden die Proben an die Presse weitergegeben und auf einen im Schmiedewerkzeug eingestellten Umformgrad gestaucht. Danach wurden die Proben aus dem jeweiligen thermischen Zustand auf 500 °C im Umluft-Kammerofen geregelt abgekühlt. Dieser Vorgang dient zum einen dazu, dass gezielt ein ferritisch-perlitisches Gefüge des AFP-Stahls eingestellt wird und zum anderen zu einer gleichmäßigen Verteilung dieses Gefüges im Probenvolumen. Bild 2 zeigt die im Rahmen einer Versuchsreihe bei der Hammerwerk Fridingen GmbH realisierte Prozesskette von der induktiven Erwärmung der Bauteile, über den Schmiedeprozess bis hin zur anschließenden geregelten Abkühlung.

Ermittlung technologischer Eigenschaften geschmiedeter und gezielt abgekühlter Proben

Nach der Durchführung der Warmumform- und Abkühlversuche erfolgte die Entnahme von Sekundärproben. Bild 3 zeigt die Vorgehensweise der Probenentnahme und die Sekundärproben für Zug-, Stauch- und Kerbschlagbiegeversuchsproben, sowie Proben zum Verjüngen beziehungsweise Vollvorwärts-Fließpressen.

Die geschmiedeten Primärproben entsprechend einzelnen Prozessvarianten wurden metallographisch untersucht und mit dem Ausgangszustand verglichen. Bild 4a stellt das Gefüge im Ausgangszustand dar. Der Ferritanteil beträgt 22 Prozent (weiße, schuppige Bestandteile an den früheren Austenit-Korngrenzen) und ein Perlitanteil in der Höhe von 78 Prozent Perlit (Rest). Die grauen Streifen in der Mitte stellen Mangansulfide dar. Bild 4b zeigt zum Vergleich das Gefüge einer mit einer Schmiedetemperatur von 1.000 °C auf einen Umformgrad $\varphi = 0,8$ gestauchten und innerhalb von 1,5 Stunden geregelt abgekühlten Scheibe. Dieses Gefüge weist einen sichtbar höheren Perlit-Anteil auf.

Bild 5a vergleicht die an den mit unterschiedlicher Temperatur auf einen konstanten Umformgrad $\varphi = 1,2$ gestauchten und unterschiedlich abgekühlten Primärproben gemessene Härte nach Vickers. Die bei einer

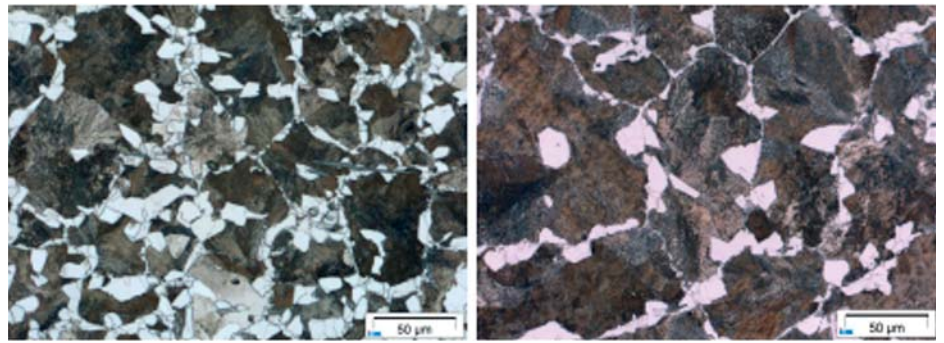


Bild 4: a) Ferritisch-perlitisches Gefüge im Ausgangszustand; b) Ferritisch-perlitisches Gefüge nach dem Schmieden und Abkühlen ($T_{\text{Schmiede}} = 1.000 \text{ °C}$; $\varphi = 0,8$; Abkühlroute = 1,5 Stunden).

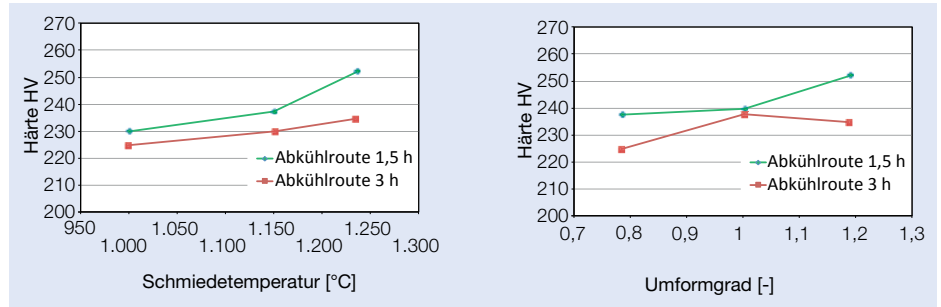


Bild 5: Ergebnisse der Härtemessung an geschmiedeten Primärproben a) bei einem konstanten Umformgrad $\varphi = 1,2$ und b) bei einer konstanten Schmiedetemperatur von 1.250 °C

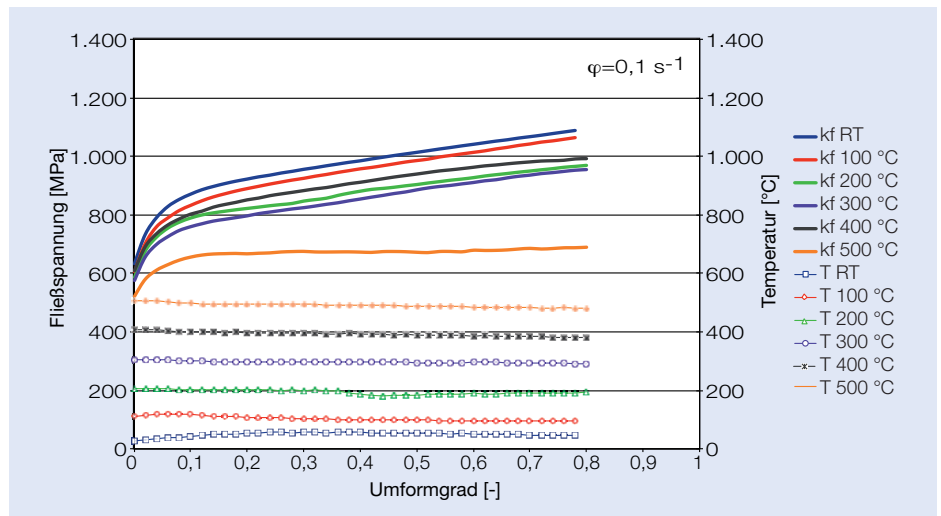


Bild 6: Fließkurven des AFP-Stahls für eine Kombination der Versuchsparameter im Temperaturbereich bis 500 °C ($T_{\text{Schmiede}} = 1.000 \text{ °C}$; $\varphi = 1,2$; Abkühlroute = 3 Stunden).

höheren Schmiedetemperatur erzeugten Primärproben zeigen eine signifikant höhere Härte. Die in Bild 5b aufgeführten Härteverläufe über dem Umformrad bei einer konstanten Schmiedetemperatur und zwei unterschiedlichen Abkühlrouten weisen eine höhere Vickers-Härte bei größeren Umformgraden auf. Beide Diagramme in Bild 5 deuten auf geringere Härtewerte bei der längeren Abkühlroute hin.

Aufnahme von Fließkurven im Temperaturbereich zwischen RT und 500 °C

Im nächsten Schritt wurden zunächst die Sekundärproben beziehungsweise die Stauchproben zur Fließkurvenermittlung verwendet. Hierbei kam das thermo-mechanische Prüf-

system GLEEBLE 3800c des Institutes für Umformtechnik der Universität Stuttgart zum Einsatz. Die Stauchversuche mit dem Stahl 38MnVS6 - 1.5231 wurden bei einer Umformgeschwindigkeit von 0,1 s⁻¹ und bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur (RT) und 500 °C mit dreifacher Versuchsbelegung durchgeführt.

In Bild 6 sind Fließkurven für eine Parameterkombination: Schmiedetemperatur von 1.000 °C, Umformgrad $\varphi = 1,2$ und eine Abkühlroute von 3 Stunden dargestellt. Das Diagramm zeigt zusätzlich die gemessenen Proben temperaturverläufe in der Mitte der Probe während des Stauchvorgangs.

Bild 7 vergleicht Fließkurven zweier Ab-

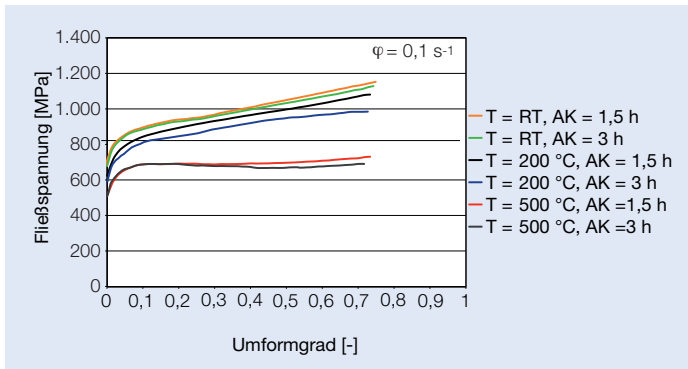


Bild 7: Fließkurven des AFP-Stahls in Abhängigkeit der Abkühldauer für eine Kombination der Schmiedeversuchsparameter ($T_{\text{Schmiede}} = 1.150 \text{ °C}$; $\varphi = 1,2$) bei Stauchversuchen unter unterschiedlichen Temperaturen.

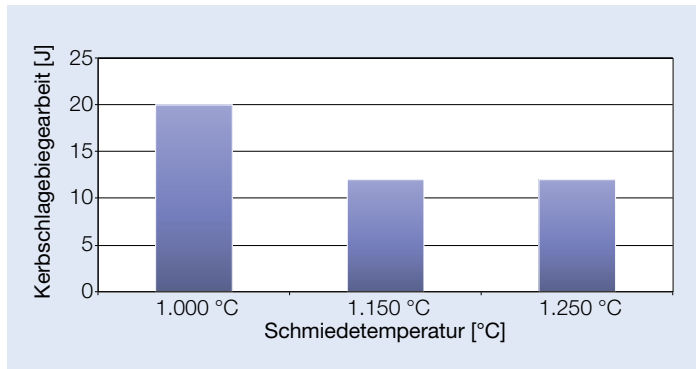


Bild 8: Einfluss der Schmiedetemperatur auf die Kerbschlagbiegearbeit ($\varphi = 0,8$; Abkühlroute = 1,5 Stunden).

Bilder 2 – 8: Autoren

kühlvarianten bei konstanter Schmiedetemperatur (1.000 °C) und Umformgrad $\varphi = 1,2$ bei drei ausgewählten Stauchtemperaturen. Wobei die Abkühlrouten zwischen 1,5 und 3 Stunden variieren. Mit zunehmender Abkühldauer nimmt die Fließspannung im betrachteten Temperaturbereich ab. Dies lässt sich durch die Reduzierung des Perlitanteils und Zunahme des Ferritanteils begründen.

Kerbschlagbiegeversuche nach ISO V 10X10X55 aus den aus Primärproben hergestellten Proben wurden bei Raumtemperatur (RT) mit einem Kerbschlaghammer 300 J des IEHK an der RWTH Aachen durchgeführt.

Mithilfe dieser Versuche wurde der Einfluss der Prozessparameter auf die Zähigkeit des untersuchten Werkstoffs ermittelt. Das Bild 8 zeigt exemplarisch den Einfluss

der Schmiedetemperatur auf die ermittelte Kerbschlagbiegearbeit bei konstant gehaltenem Umformgrad von $\varphi = 0,8$ und gleicher Abkühldauer von 1,5 Stunden. Der Vergleich zwischen drei Schmiedetemperaturen zeigt, dass Schmieden beim 1.000 °C die maximale Zähigkeit von 20 J aufweist, obwohl die Festigkeit um etwa 10 Prozent abnimmt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Abkühlroute von AFP-Stahl nach dem Schmieden eine bedeutende Rolle für die technologischen und funktionellen Werkstoffeigenschaften hat. Die Härte an geschmiedeten Primärproben nimmt bei höheren Umformgraden, höheren Schmiedetemperaturen und kürzeren Abkühlrouten größere Werte an. Die für eine anschließende Umformung im Temperaturbereich zwischen RT und 500 °C relevante Fließspannung

nimmt mit der Verlängerung der Abkühldauer von 1,5 auf 3 Stunden um zirka 10 Prozent ab. Für die Zähigkeit des auf diese Weise bearbeiteten AFP-Stahls ist im Wesentlichen die Schmiedetemperatur maßgebend.

In den nächsten Schritten dieser Arbeit sollen Untersuchungen zur Ermittlung des Formänderungsvermögens mithilfe der Zugversuche sowie zur Klärung technologischer Fragestellungen am Beispiel des Voll-Vorwärts-Fließpressens durchgeführt werden. Anhand der erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse sollen Richtlinien für Umformung von geschmiedeten Halbzeugen im Temperaturbereich zwischen RT und 500 °C unter Nutzung der Schmiedewärme abgeleitet und Handlungsempfehlungen für die industrielle Auslegung der gesamten Prozesskette erstellt werden. ■

Danksagung

Fünf Hochschulinstitute, das Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen, das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) und das Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover, das Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart und das Institut für Werkstofftechnik (IWT) an der Universität Bremen, arbeiten im Rahmen dieses Vorhabens an sechs Teilprojekten, die prozesskettenübergreifend die Leistungs-

steigerung und wirtschaftliche Herstellung von Bauteilen zum Ziel haben. Zahlreiche namhafte Industrieunternehmen, zu 56 Prozent kleine und mittelständische Unternehmen, begleiten im Rahmen der Lenkungsremien das Vorhaben, das von den AiF-Mitgliedsvereinigungen Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. (AWT), der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) und der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV) getragen wird. Das hier primär behandelte IGF-Vorhaben

FV 10 LN 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 Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann nach Projektabschluss bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Literatur

[1] Weidig, U.; Saba, N.; Steinhoff, K. (2007): Massivumformprodukte mit funktional gradierten Eigenschaften durch eine differenzielle thermo-mechanische Prozessführung; in: wt Werkstatttechnik online 97 (2007) S. 745-752.

[2] Baquet, I.; Thermomechanische Behandlung mit neuartigem Abkühlkonzept zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von mikrolegierten Schmiedestählen, Shaker Verlag, Umformtechnische Schriften, Band 97, 1997.



Dipl.-Ing.
Ehsan Hajyheydari



Prof. Dr.-Ing.
Mathias Liewald MBA



Dr.-Ing.
Alexander Felde