

Lufthärtender duktiler Stahl mit mittlerem Mangangehalt für die Massivumformung

Eine martensitische Härtebarkeit von geschmiedeten Massivbauteilen an Luft bietet die Möglichkeit, auf die energieaufwendige Vergütungsbehandlung zu verzichten. Gleichzeitig sollte der Werkstoff zum Vergütungsstahl vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen. Ein Ansatzpunkt dazu liegt in der Entwicklung eines neuen Legierungskonzepts mit mittlerem Mangangehalt, der im Eigenschaftsbereich der Vergütungsstähle liegt und eine Prozesskette ähnlich der AFP-Stähle aufweist.

AUTOREN



Dipl.-Ing. Andreas Stieben

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH-Aachen



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

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



Dipl.-Ing. Steffen Schönborn

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF Darmstadt

Für die Herstellung von geschmiedeten Massivbauteilen sind martensitische Vergütungsstähle sowie Ausscheidungshärtende-Ferritisch-Perlitische Stähle (AFP-Stähle) weit verbreitet. Die Vergütungsstähle, beispielsweise der Stahl 42CrMo4, erfordern in der Anwendung hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften eine zeit- und energieaufwendige Prozessfolge, bestehend aus Härten und Anlassen.

AFP-Stähle, wie der Stahl 38MnVS6, erreichen ihre Gebrauchseigenschaften nach einer gezielten Abkühlung an Luft aus der Schmiedewärme. Allerdings sind sie in ihren Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften beschränkt und den Vergütungsstählen im Allgemeinen unterlegen [1], [2]. Jedoch weisen diese Stähle herstellungsbedingt geringeren Verzug auf, was sich im Vergleich zu den Vergütungsstählen vorteilhaft auf die spanende Endbearbeitung auswirkt [2].

In jüngster Zeit wurden außerdem verschiedene Schmiedestähle entwickelt, die bei der kontinuierlichen Abkühlung aus

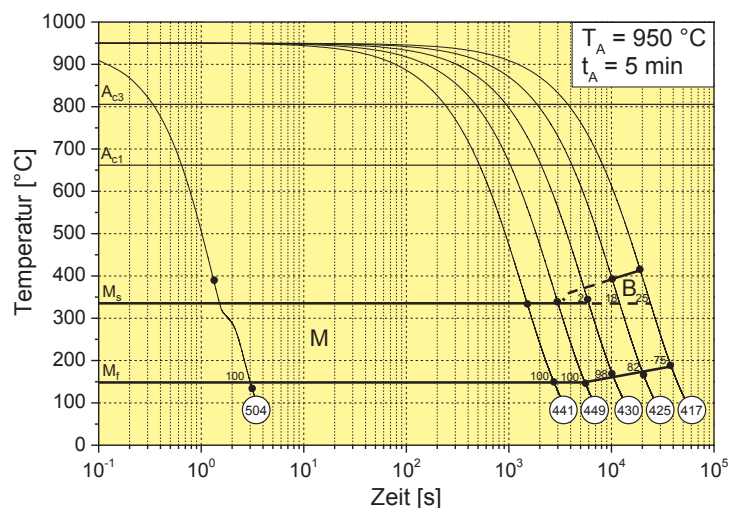


Bild 1: ZTU-Schaubild der Pilotschmelze LHD-P2

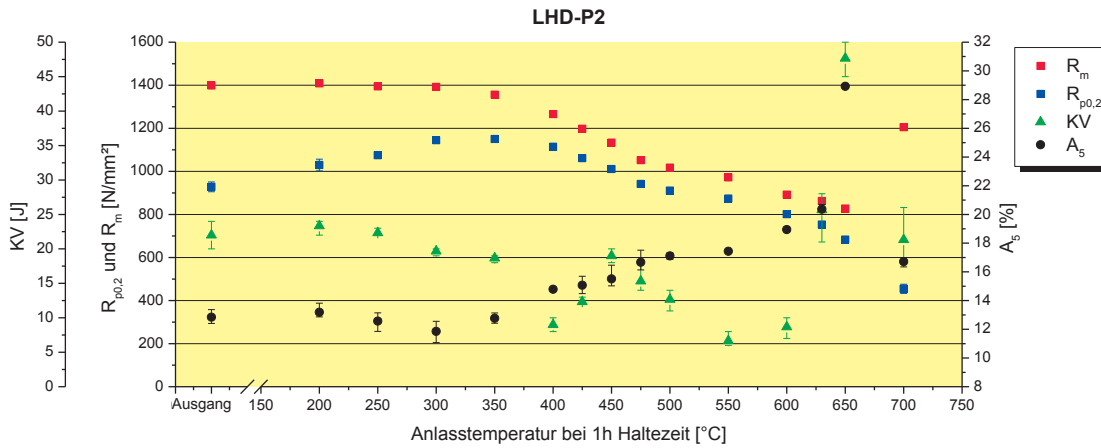


Bild 2: Anlassschaubild des Werkstoffs LHD-P2

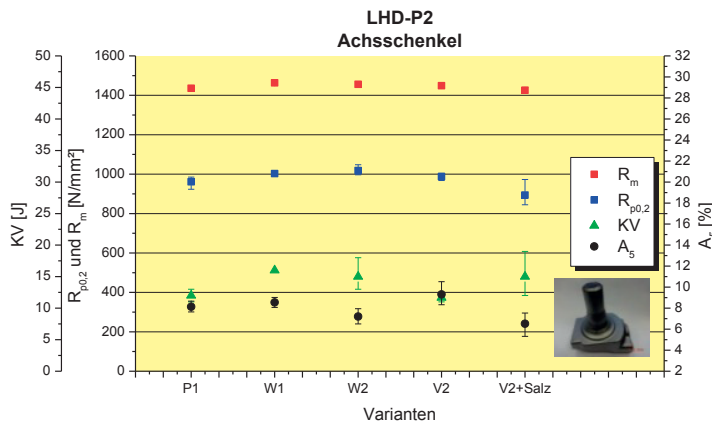


Bild 3: Mechanische Kennwerte der Achsschenkel aus dem Stahl LHD-P2

- P1:** Beschleunigtes Abkühlen mit einem Ventilator nach Ablegen mehrerer Teile auf einer Palette
- V2:** Beschleunigtes Abkühlen einzelner Achsschenkel auf einem Ventilator liegend bis Raumtemperatur
- V2+Salz:** Beschleunigtes Abkühlen einzelner Achsschenkel auf einem Ventilator liegend auf etwa 200 °C mit anschließender Anlassbehandlung im Salzbad bei 200 °C für 1 Stunde
- W2:** Beschleunigtes Abkühlen unter einer Wasserdusche bis Raumtemperatur
- W1:** Beschleunigtes Abkühlen unter einer Wasserdusche bis 130 °C mit anschließender Abkühlung an ruhender Luft

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Ti	B	N
LHD-P2	0,18	0,50	3,85	0,01	0,01	0,027	0,09	0,11	0,046	0,0058	0,0078

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung (in Massen-%) der Pilotschmelze LHD-P2

der Schmiedewärme ein bainitisches Gefüge ausbilden. Obwohl diese Stähle die mechanischen Eigenschaften und insbesondere die Duktilität der AFP-Stähle deutlich übertreffen, treten andere Herausforderungen auf. So kann sich das Streckgrenzenverhältnis durch eine unzureichende Kontrolle des Abkühlprozesses verschlechtern. Für diese Stahlgruppe ist daher eine genaue Temperaturkontrolle beim Herstellprozess bis hin zur Umgebungstemperatur notwendig, sodass diese Stähle in Abhängigkeit der Kundenanforderungen nur bauteilspezifisch und nicht in der Bandbreite der Vergütungs- oder AFP-Stähle eingesetzt werden können.

VORGEHENSWEISE

Das Ziel des Forschungsvorhabens, über welches hier berichtet wird, ist die Entwicklung von lufthärtenden Schmiedestählen mit erhöhten Mangangehalten (drei bis zehn Gewichtsprozent). Um den Rohstoffeinsatz möglichst gering zu halten, wurden Legierungssysteme Fe-C-Mn-Si untersucht. Ergänzend wurden auch Variationen mit Titan, Bor sowie Molybdän aufgegriffen und analysiert. Das neue Werkstoffkonzept soll mit dem kommerziell weit verbreiteten Vergütungsstahl 42CrMo4 konkurrieren

und vergleichbare Festigkeits-, Duktilitäts- und Zähigkeitswerte aufweisen. Als Ziel soll eine Zugfestigkeit größer 1.200 N/mm², eine Dehngrenze größer 940 N/mm², eine Bruchdehnung größer 10 Prozent und eine Kerbschlagbiegearbeit bei Raumtemperatur größer 30 J erreicht werden.

Die neuen Legierungskonzepte wurden im Labor erstellt und untersucht. Ausgehend von den Ergebnissen der Legierungskonzepte aus dem Labormaßstab, wurde eine Pilotschmelze im Industriemaßstab (zweimal 2,8 t) erstellt. Diese wurde zu Halbzeugen und Demonstratorteilen weiter verarbeitet und untersucht. Die chemische Zusammensetzung der Pilotschmelze LHD-P2 ist in Tabelle 1 gezeigt.

UMWANDLUNGSVERHALTEN UND MIKROSTRUKTUR

Zur Beschreibung des Gefüges nach der Abkühlung aus dem Austenit wurden Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubilder (ZTU-Schaubilder) herangezogen. Das ZTU-Schaubild des Stahls LHD-P2 ist in Bild 1 dargestellt. Die kritische t_{8/5} Zeit beträgt 1.350 Sekunden. Die Korngröße, die sich während der Austenitisierung bei 950 °C einstellt, beträgt im Mittel 26 µm,

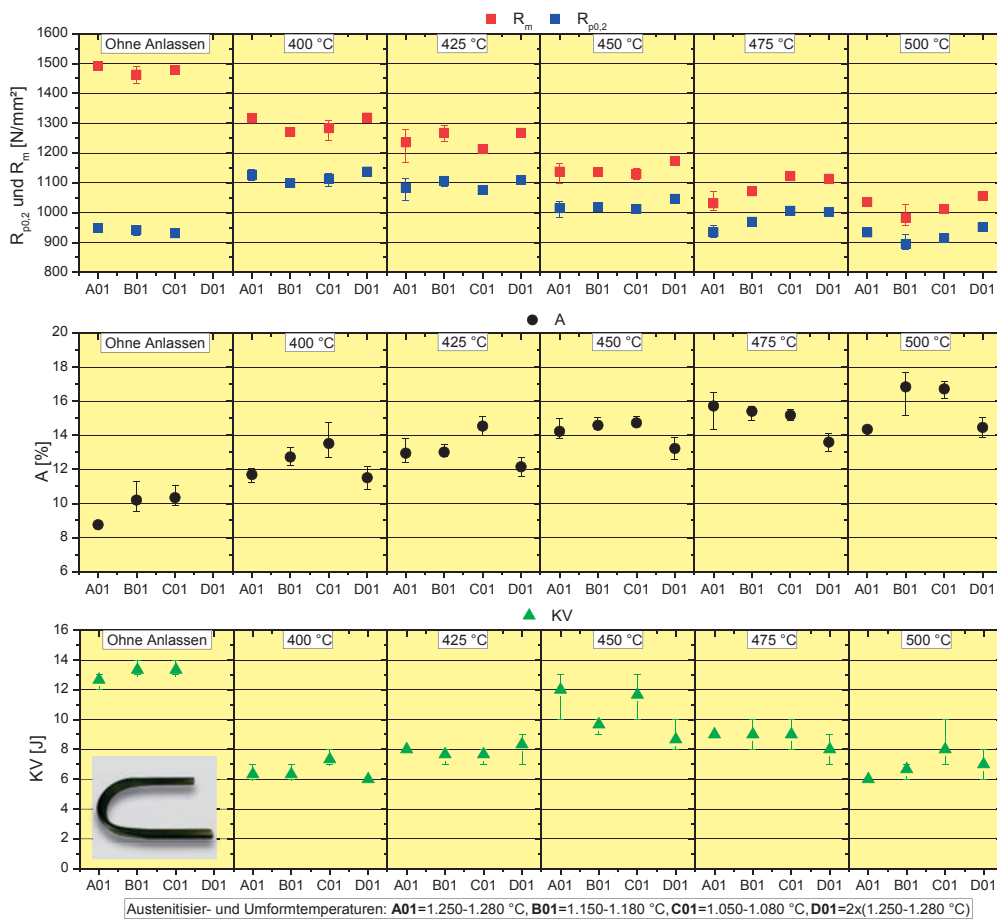


Bild 4: Mechanische Kennwerte der Federbügel aus dem Stahl LHD-P2

	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]	A_g [%]	A_5 [%]	Z [%]	KV bei RT [J]
Ring 796 kg LHD-P2	915	1.267	0,72	5,9	12,5	43	9

Tabelle 2: Mechanische Kennwerte des Rings aus dem Stahl LHD-P2

wobei dieser Wert zwischen 13 und 43 μm schwankt. Im neuen Legierungskonzept ist das Bainitgebiet zu langen Abkühlauern verschoben, sodass der Stahl über einen weiten Bereich martensitisch umwandelt. Der sich ausbildende Martensit hat eine lanzettenförmige Ausprägung mit Zementitpartikeln innerhalb der Martensitplatten.

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Das Anlassschaubild der Pilotschmelze LHD-P2 ist in Bild 2 gezeigt. Die Kennwerte sind an einem Rundstab mit \varnothing 23 mm, der nach dem Walzen an ruhender Luft abgekühlt ist, ermittelt worden. Auffällig ist bei diesem Werkstoffkonzept der Anstieg der Dehngrenze mit zunehmender Anlassstemperatur. Beim Stahl LHD-P2 erhöht sich die Dehngrenze um 222 N/mm² auf 1.150 N/mm² nach Anlassen bei 350 °C für eine Stunde. Eine Hypothese zur Beschreibung dieses Verhaltens besteht darin, dass sich bei der martensitischen Umwandlung nach langsamer Abkühldauer viele freie Versetzungen bilden. Diese werden nach Anlassen bei tiefen Temperaturen durch Belegung mit Kohlenstoff und Ausbildung von Karbiden blockiert, weshalb für die Bewegung der Versetzungen eine höhere Spannung aufgebracht

werden muss. Der Werkstoff zeigt bei 400 °C eine Versprödung. Der Zähigkeitsabfall kann zum einen durch die Segregation von Spurenelementen entlang der Korngrenzen begründet werden [3], [4]. Zum anderen erfolgt in diesem Temperaturbereich eine Ausbildung und Einförmung von Karbiden, die die Zähigkeit beeinflussen können [4].

Aus der Pilotschmelze wurden Federbügel mit 2 kg (Flockenhaus und Söhne GmbH), Achsschenkel mit 33 kg (Hammerwerk Fridingen GmbH) und ein Ring mit 796 kg (Karl Diederichs KG – Dirostahl) gefertigt. Der Ring wurde entsprechend der üblichen Prozessroute gewalzt und anschließend in einem Polymerbad gebrochen gehärtet. Nach dem letzten Abschrecken auf 320 °C ist der Ring an ruhender Luft abgekühlt. Bei 200 °C wurden Risse beobachtet, die aufgrund der schlechteren Wärmeleitfähigkeit, bedingt durch den höheren Legierungsgehalt, hervorgerufen wurden.

Die mechanischen Kennwerte des Rings sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Probenentnahme erfolgte in einem Abstand von 25 mm zum Rand in Längsrichtung. Trotz des großen Quer-

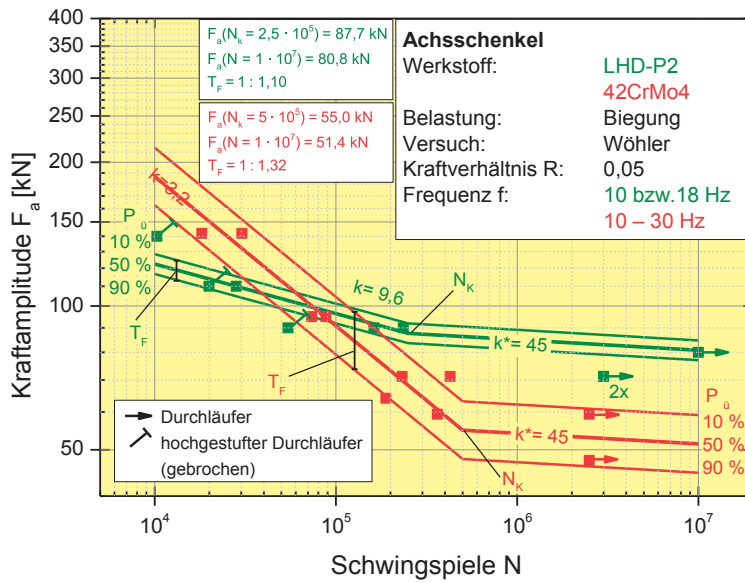


Bild 5: Vergleich der Wöhlerlinien für den Achsschenkel aus den Stählen 42CrMo4 und LHD-P2 [5], [6]
Bilder: Autoren

	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}/R_m$ [-]	A_g [%]	A_5 [%]	Z [%]	KV bei RT [J]
Achsschenkel 42CrMo4	959	1.091	0,88	4,9	13,0	51	-
Achsschenkel LHD-P2	970	1.100	0,88	-	13,0	55	8

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte der im zyklischen Versuch untersuchten Achsschenkel

schnitts zeigt der Werkstoff eine hohe Dehngrenze von über 900 N/mm² und eine Zugfestigkeit von über 1.200 N/mm². Die geringe Zähigkeit mit 9 J ist auf das sehr große ehemalige Austenitkorn, welches oberhalb von 150 µm liegt, zurückzuführen.

Der Schmiedeablauf bei der Herstellung der Achsschenkel verlief entsprechend einer Serienteilfertigung des Achsschenkels aus 42CrMo4. Die Demonstratorsteile wurden jedoch aus der Schmiedewärme unterschiedlichen Abkühlvariationen unterzogen, die in Bild 3 erläutert sind. Alle aufgeführten Abkühlbehandlungen haben zu einem martensitischen Grundgefüge im Zapfeninneren (Ø 80 mm) geführt. Die am Zapfen bestimmten mechanischen Kennwerte der Achsschenkel sind ebenfalls in Bild 3 gezeigt. Die mechanischen Eigenschaften verhalten sich weitgehend unabhängig von den Abkühlbedingungen. So zeigen die Festigkeits- und Duktilitätseigenschaften aber auch die Zähigkeitswerte nur geringe Unterschiede auf.

Bei der Herstellung der Federbügel wurden drei verschiedene Austenitisier- und Schmiedetemperaturen untersucht, zu denen jeweils fünf verschiedene Anlasstemperaturen zwischen 400 °C und 500 °C angeschlossen wurden. Die Austenitisierung vor der Umformung erfolgte induktiv innerhalb von 20 Sekunden. Im Anschluss wurden die Federbügel an ruhender Luft abgekühlt und bei der jeweiligen Temperatur für 3 Stunden angelassen. Die mechanischen Kennwerte am Federbügel sind in Bild 4 wiedergegeben. Die Analyse zeigt, dass die Festigkeitseigenschaften unabhängig von den untersuchten Austenitisiertemperaturen sind. Auch die Zähigkeitseigenschaften sind trotz der großen variierten Temperaturspanne zwischen 1.050 °C und 1.250 °C nahezu identisch. Das kann durch die gleichbleibende Korngröße begründet werden. Einzig die Bruchdehnung zeigt mit abnehmender Austenitisiertemperatur eine Tendenz zu größeren

Werten. Diese Tendenz könnte durch die stärkere Ausscheidung kritischer Karbide begründet werden.

ZYKLISCHE EIGENSCHAFTEN

Für die zyklische Untersuchung des Achsschenkels aus dem Stahl LHD-P2 wurden Achsschenkel verwendet, die auf einer Palette mittels Gebläse von der Schmiedetemperatur auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend im Salzbad bei 450 °C für zwei Stunden angelassen wurden. Das Referenzbauteil aus dem Stahl 42CrMo4 ist einer Serienfertigung entnommen worden und liegt im vergüteten Zustand vor. Die mechanischen Kennwerte beider Werkstoffe sind in Tabelle 3 gezeigt. Die zyklischen Untersuchungen der Achsschenkel aus dem LHD-P2, welche aufgrund der begrenzten Bauteilanzahl nur stichprobenartig an sechs Bauteilen erfolgten, sowie dem 42CrMo4 sind am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt durchgeführt worden [5], [6].

In Bild 5 sind die Wöhlerlinien für die Achsschenkel aus den Stählen 42CrMo4 und LHD-P2 gezeigt. Im Vergleich der ertragbaren Kraftamplitude bei der Lebensdauer von 1·10⁷ Schwingspielen ermittelt für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 50 \%$, zeigen die Bauteile aus LHD-P2 mit $F_a(1 \cdot 10^7, P_{\bar{u}} = 50 \%) = 87,7 \text{ kN}$ eine um 58 Prozent höhere ertragbare Kraftamplitude als diejenigen aus dem Referenzwerkstoff mit $F_a(1 \cdot 10^7, P_{\bar{u}} = 50 \%) = 55 \text{ kN}$. Trotz vergleichbarer quasistatischer Kennwerte und geringer Kerbschlagbiegearbeit weist der Stahl LHD-P2 eine höhere Langzeitfestigkeit auf als der 42CrMo4. Für einen statistisch aussagefähigen Vergleich beider Werkstoffe müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts wurde ein neuer Schmiedestahl mit einem Mangan Gehalt von vier Gewichtsprozent entwickelt, bei dem das Gebrauchsgefüge durch kontrollierte Abkühlung aus

der Schmiedewärme eingestellt werden kann. Die mechanischen Eigenschaften des LHD-Konzepts können die geforderten Anforderungen erreichen und sind über einen großen Querschnittsbereich konstant, was zum einen eine hohe Prozess-toleranz mit sich bringt und zum anderen diesen Stahl für ein weites Spektrum an Bauteilgrößen anwendbar macht.

Erste stichprobenartige Untersuchungen zum zyklischen Verhalten am Achsschenkel zeigen, dass die ertragbare Kraft-amplitude im Langzeitfestigkeitsbereich des LHD-Stahls trotz vergleichbarer Festigkeit und geringerer Zähigkeit mit $F_a(1 \cdot 10^7, P_{\bar{u}} = 50 \%) = 87,7 \text{ kN}$ die des vergüteten Stahls 42CrMo4 mit $F_a(1 \cdot 10^7, P_{\bar{u}} = 50 \%) = 55 \text{ kN}$ um 58 Prozent übertrifft. Dieses Verhalten bietet zusätzliche Chancen des neuen Legierungskonzepts für die Zukunft.



Dieses Forschungsprojekt AVIF A 276 wurde gefördert von der gemeinnützigen Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. Zweck der Stiftung ist die Förderung der Forschung auf dem Gebiet der Stahlverarbeitung und -anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Geprüft wurde das Forschungsvorhaben von einem Gutachtergremium der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e. V. (AVIF), das sich aus Sachverständigen der Stahl anwendenden Industrie und der Wissenschaft zusammensetzt. Begleitet wurde das Projekt von einem Arbeitskreis: „Patengruppe LHD-Stahl im Industrierverband Massivumformung e. V.“ Die Langfassung des Abschlussberichts kann über die Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. beim WSM Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Die Untersuchungen zeigen weiterhin das Potenzial dieses neuen Legierungskonzepts, vergleichbare beziehungsweise bessere Werkstoffeigenschaften eines Vergütungsstahls mit deutlich kürzerer und energiesparenderer Prozesskette zu erzielen. Voraussetzung ist die geeignete Prozessführung während der Schmiedung.



- [1] Bleck, W. et al.: Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag Aachen (2001)
- [2] Wegner, K.-W.: Werkstoffentwicklung für Schmiedeteile im Automobilbau, Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) 12, S. 918 – 927
- [3] Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure; Springer Verlag, 4. Auflage, Berlin (2011)
- [4] Houdremont, E.: Handbuch der Sonderstahlkunde, Springer Verlag, Berlin, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 3. Auflage (1956)
- [5] Wirths, V.; Elek, L.; Bleck, W.; Melz, T.: Schmiedestähle mit verbesserter Betriebsfestigkeit durch verformungsinduzierte Phasenumwandlung, Abschlussbericht, IGF-374 ZN der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. FSV
- [6] Schönborn, S.: Untersuchung der Dauerfestigkeit eines Achsschenkels aus lufthärtendem Stahl, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) im Auftrag des Industrierverbands Massivumformung e. V.