

NEUE MASSIVUMGEFORMTE STÄHLE ENERGIEEFFIZIENTE LÖSUNGEN FÜR LEISTUNGSFÄHIGERE BAUTEILE

Das Schmieden beziehungsweise Massivumformen zählt zu den ausgereiften Disziplinen des Automobil- und Maschinenbaus, könnte man meinen. Neben schmiedetechnischen Entwicklungen gibt es aber signifikante Fortschritte bei Stählen für die Massivumformung. So bieten hochfeste duktile Bainite (HDB) interessante Eigenschaften bei niedrigen Kosten für Werkstoff und Verarbeitung. Im Bereich der Einsatzstähle sind werkstofftechnisch basierte Kostenoptimierungen möglich. Diese und weitere Neuheiten stellen Hirschvogel Automotive und der Industrieverband Massivumformung in einem Überblicksbeitrag vor.

AUTOREN



DR.-ING. HANS-WILLI RAEDT
ist Leiter Produktentwicklung bei der Hirschvogel Automotive Group in Denklingen.



ULRICH SPECKENHEUER
ist Leiter des Arbeitskreises Werkstoffe im Industrieverband Massivumformung e. V. und Leiter Werkstofftechnik und Wärmebehandlung bei den Siepmann-Werken GmbH & Co. KG in Warstein.



DIPL.-ING. KLAUS VOLLRATH
ist Fachjournalist in Aarwangen (Schweiz).

WICHTIGE WERKSTOFFGRUPPE

Stähle sind für viele technische Anwendungen die wichtigste Werkstoffgruppe. Gründe hierfür sind neben ihrem weiten Eigenschaftsspektrum auch günstige Kosten sowie ihre Recyclingfähigkeit. Zunächst werden die konventionellen Massivumformstähle vorgestellt. Anschließend werden aktuelle Neuentwicklungen diskutiert. Abgerundet wird der Beitrag durch einige Anregungen aus Sicht der Massivumformer.

KONVENTIONELLE STAHLWERKSTOFFE FÜR DIE MASSIVUMFORMUNG

Stähle sind Eisenlegierungen, deren Kohlenstoffgehalt unter 2 % liegt. Hierzu zählen unlegierte Kohlenstoffstähle, Einsatzstähle, Vergütungsstähle, AFP-Stähle, induktiv härtbare Stähle, Nitrierstähle, Wälzlagerstähle und rostfreie Stähle, die im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

UNLEGIERTE KOHLENSTOFFSTÄHLE

Bei geringeren mechanischen Anforderungen empfehlen sich unlegierte Kohlenstoffstähle. Typische Vertreter sind C15 oder C45. Bei niedrigem Kohlenstoffgehalt können diese Stähle kalt umgeformt werden. Für höhere Festigkeiten kann der Kohlenstoffgehalt angehoben werden, wobei dann höhere Verarbeitungstemperaturen (halbwarm oder warm) angezeigt sind. Weitere Legierungselemente werden nicht vorgegeben, was zu günstigen Kosten führt. Weniger erfahrene Konstrukteure geben teilweise selbst für Anwendungen mit geringen mechanischen Ansprüchen statt reiner C-Stähle den Einsatzstahl 16MnCr5 vor, was unnötige Kosten verursacht.

EINSATZSTÄHLE UND VERGÜTUNGSSTÄHLE

Bauteile aus Einsatzstählen werden einsatzgehärtet. Dabei dringt Kohlenstoff in die Randschicht ein. Beim nachfolgenden Härtevorgang erreicht diese Randschicht deshalb Härten von etwa 60 HRC, während der Kern relativ weich und zäh bleibt. Dieser „Verbundwerkstoff“ erträgt Hertzische Belastungen und Wälzkontakte. Einsatzstähle haben Kohlenstoffgehalte von circa 0,15 bis 0,3 %. Fallweise wird Chrom,

Molybdän oder Nickel zulegiert, wenn direkt unter der harten Randschicht eine höhere Festigkeit zur Abstützung der Randschale verlangt wird. Nickel erhöht die Zähigkeit insbesondere bei tiefen Temperaturen.

Vergütungsstähle erlangen durch eine Vergütungsbehandlung (Härten und Anlassen) ein martensitisches Gefüge mit hoher Härte und Festigkeit. Bei einfachen niedriglegierten Kohlenstoffstählen wie dem C30 reicht die Härbarkeit bei größeren Querschnitten nicht für eine Durchhärtung bis in den Kern aus. Dann müssen härbarkeitssteigernde Elemente wie Chrom, Molybdän oder Nickel zulegiert werden. Typische Vergütungsstähle sind der C45, der 41Cr4 oder der 42CrMo4.

AFP-STÄHLE

Ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle (AFP-Stähle) wurden als kostengünstigere Alternative zu Vergütungsstählen entwickelt. AFP-Stähle sind Kohlenstoffstähle mit zusätzlich circa 0,1 bis 0,4 % Anteil von Vanadium. Beim Warm Schmieden (circa bei 1250 °C) ist das Vanadium vollständig im austenitischen Gefüge gelöst. Beim kontrollierten Abkühlen entsteht ein ferritisch-perlitisches Gefüge mit feinen Ausscheidungen aus Vanadiumcarbiden oder -carbonitriden. Diese behindern die Bewegung von Versetzungen, weshalb Streckgrenze und Zugfestigkeit fast auf das Niveau von Vergütungsstählen ansteigen. Durch Entfall des Abschreckvorgangs können auch keine Härterisse entstehen; auf entsprechende Prüfungen kann verzichtet werden.

INDUKTIV HÄRTBARE STÄHLE UND NITRIERSTÄHLE

Stähle, deren Randschicht induktiv härtbar sein soll, benötigen einen für die martensitische Umwandlung ausreichenden Kohlenstoffgehalt. Geeignet sind unter anderem unlegierte Kohlenstoffstähle, AFP-Stähle oder Vergütungsstähle. Da die induktive Härtung nur die Randschicht erfassen soll, eignen sich auch Stähle ohne härbarkeitssteigernde Legierungselemente. Bei höheren Anforderungen an die Kernfestigkeit kann eine induktive Härtung jedoch auch an vorvergüteten Bauteilen aus höherlegierten Vergütungsstählen durchgeführt werden.

Bei Nitrierstählen wird eine erhöhte Verschleißbeständigkeit der Oberfläche durch einen Nitriervorgang bewirkt. Der Stickstoff diffundiert im Rahmen eines Wärmebehandlungsvorgangs in die Rand-schicht ein und bewirkt dort eine deutliche Härtesteigerung. Im Prinzip sind alle Stahlsorten nitrierbar. Besonders hohe Randhärten und Nitriertiefen erreichen Nitrierstähle, die zusätzlich zum Beispiel Aluminium enthalten, um Ausscheidungen zu bilden. Oft wird die Nitrierschicht auf einem vergüteten Kern gut abgestützt.

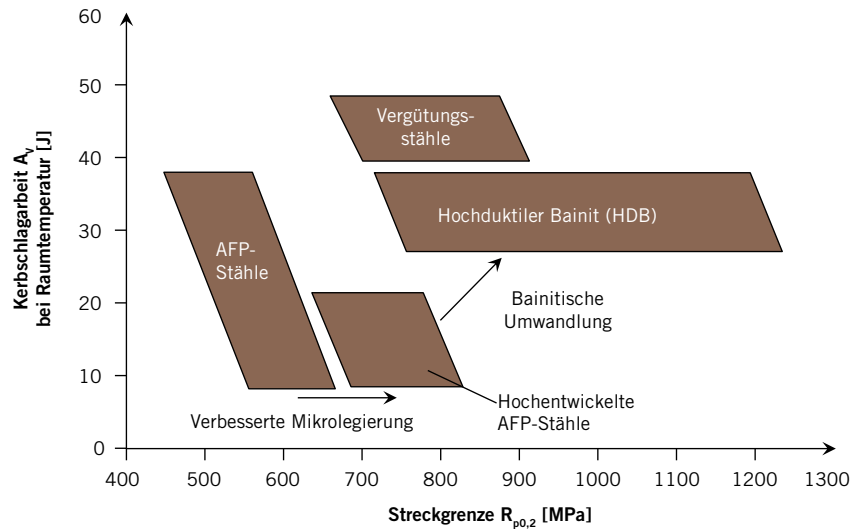
WÄZLAGERSTÄHLE UND ROSTFREIE STÄHLE

„Klassischer“ Vertreter der Gruppe der Wälzlagerstähle ist der 100Cr6. Diese Stähle können bis in den Kern auf eine hohe Härte von etwa 60 HRC vergütet werden. Mittlerweile wurden viele Einsatzbereiche von hoch kohlenstoffhaltigen Legierungen auf induktiv härtbare Stähle umgestellt [1].

Rostfreie Stähle werden bei korrosiven Belastungen eingesetzt. Hauptmerkmal ist ein Chromgehalt von über 10,5 %. Für Korrosionsschutz sorgt eine dichte Chromoxidschicht auf der Oberfläche. Weitere Legierungszugaben stellen den Stahl gezielt auf die jeweilige Anwendung ein, zum Beispiel höchste Korrosionsbeständigkeit gegen Meerwasser, hohe Härten und Festigkeiten etc.

ERSTE ZUSAMMENFASSUNG UND ZWISCHENFAZIT

Vorstehend wurden die im Bereich der Massivumformung eingesetzten Stahlgruppen kurzgefasst mit Blick auf ihre Eigenschaften charakterisiert. Zur schnellen Beurteilung neuerer Stahlentwicklungen eignet sich besonders ❶. Es zeigt die Einteilung der Stahlgruppen relativ im Verhältnis von ihrer Streckgrenze zur Kerbschlagarbeit. Eine weitere Lücke im Werkstoffspektrum zeigt die werkstoffkundlich basierte Darstellung in ❷. Dargestellt wird die Zugfestigkeit von Stahlgruppen über der Umwandlungstemperatur vom Austenit in die Zielgefügestruktur. Man erkennt das offene Temperatur- und Festigkeitsfenster (400 bis 600 °C) zwischen den martensitischen und ferritisch-perlitischen Werkstoffen, das durch bainitische Stähle besetzt werden kann.



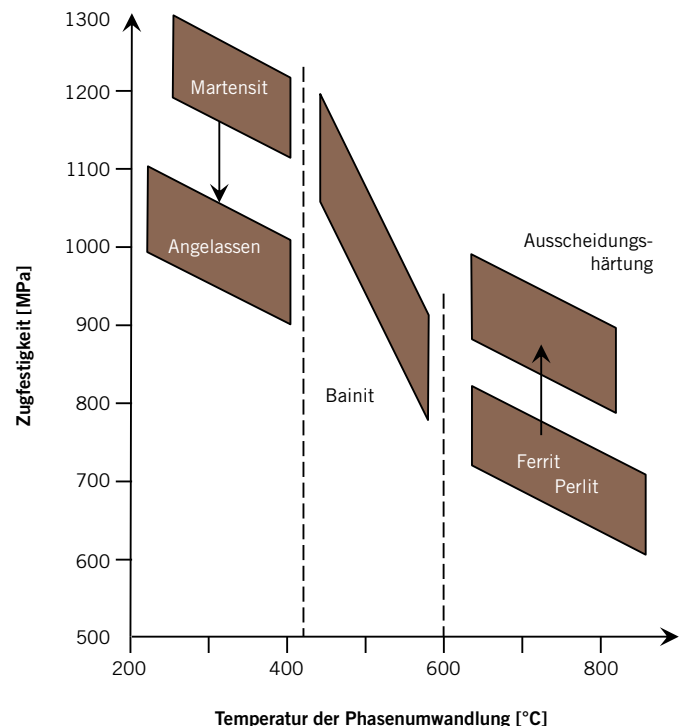
❶ Übersicht der Stahlgruppen nach Streckgrenze und Kerbschlagarbeit [8]

AKTUELLE NEUENTWICKLUNGEN BEI STÄHLEN FÜR DIE MASSIVUMFORMUNG

Bisher wurden die konventionellen Stahlwerkstoffe für die Massivumformung vorgestellt. Nun folgen die aktuellen Neuentwicklungen hinsichtlich Fortschritten bei den Werkstoffen und Fortschritten beim Grundlagenverständnis zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Werkstoffen.

FORTSCHRITTE BEI EINSATZSTÄHLEN

Möglichkeiten zur Substitution von Nickel und Molybdän zur Kostensenkung untersuchen Schifferl et al. [2]. Referenzwerkstoff ist der Einsatzstahl 18CrNiMo7-6. Ein völliger Ersatz von Molybdän und Nickel durch alleinigen Borzusatz bei verringerten Chrom- und Mangangehalten gelingt nicht, ❸. Zusätzliche Nickelgehalte bewir-



❷ Übersicht der Stahlgruppen nach Zugfestigkeit und Umwandlungstemperatur [10]

ken Verbesserungen von Härtebarkeit und Schlagzähigkeit. Gemeinsam mit einem Stahlhersteller entwickelte die Hirschvogel Automotive Group den Stahl H2 mit sehr preiswerter Legierungslage, der sehr gute Härtebarkeit im Stirnabschreckversuch zeigt und deutlich teurere Einsatzstähle ersetzen kann. In 4 wird der H2 mit 18CrNiMo7-6 und 20MnCrMo7 verglichen.

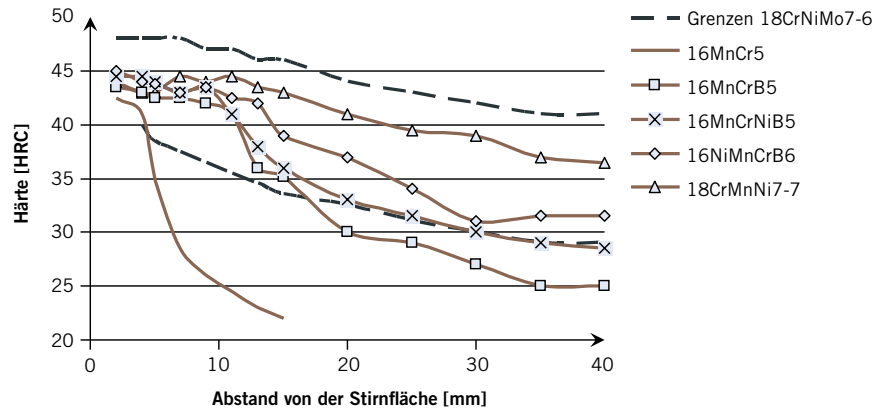
Gleiche Härtebarkeit wie hochlegierte Güten zeigt auch der neue Werkstoff 20MnCrMo7, der besser härtbar ist als der nickellegierte 18CrNiMo7-6. Ziel sind Anwendungen unter anderem im Getriebebereich [11].

Höhere Temperaturen beim Einsatzglühen ermöglichen die Einsparung teurer Ofenzeit. Feinkornstabilität soll dabei unerwünschtes Grob- oder Mischkorn vermeiden. Einflussmöglichkeiten hierzu bei molybdänlegierten Einsatzstählen untersucht Hippenstiel [3]. Besonderes Interesse gilt dabei Mikrolegierungselementen wie Niob. Diese fixieren die Austenitkorngrößen durch Ausscheidungen und unterdrücken so das Kornwachstum, 5. Einige Legierungen sind inzwischen am Markt erhältlich.

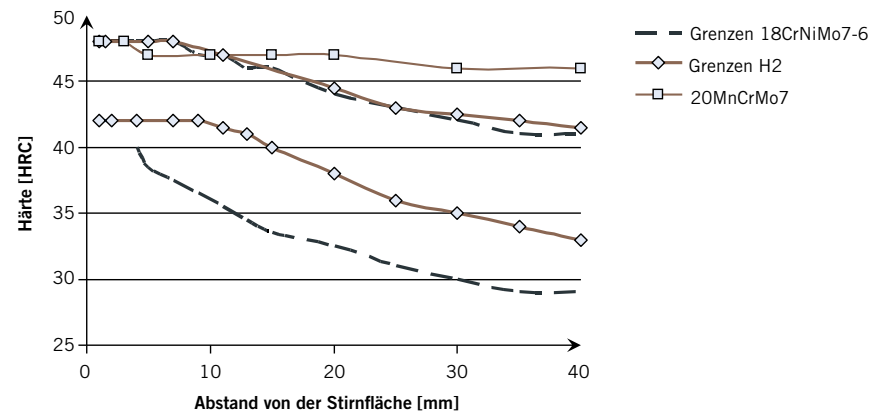
FORTSCHRITTE BEI VERGÜTUNGSSTÄHLEN

Bei Bolzen und Schrauben ermöglichen Borzugaben preisgünstige Alternativen zu klassischen CrMo- und CrNiMo-Vergütungsstählen. Riedner et al. [4] untersuchen Legierungen speziell mit Blick auf ihre Eignung für Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9. Der 36CrB4 zeigt merkliches Potenzial als preisgünstigere Alternative zum 42CrMo4 auch für Kurbeltriebe und Wellen, 6.

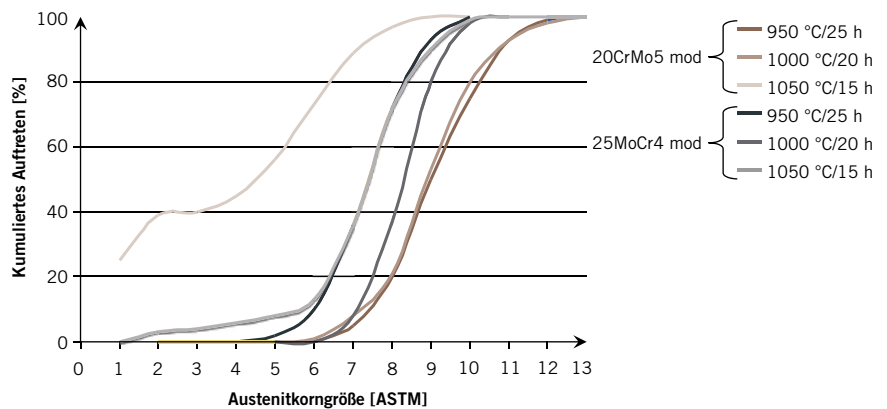
Schifferl et al. [2] versuchen ausgehend vom Vergütungsstahl 42CrMo4 Molybdän teilweise oder vollständig durch Mangan zu ersetzen. Ein vollständiger Ersatz von Molybdän durch Mangan verschlechtert allerdings die Tieftemperatur-Kerbschlagzähigkeit. Eine Alternative zum C45Pb suchen Janßen und Engineer [5]. Bei der Bearbeitung von Diesel-Einspritzdüsenkörpern aus C45Pb sorgen Zugaben von Schwefel und Blei für leichtere Zerspanbarkeit, vermindern jedoch die Dauerfestigkeit. Der als Alternative entwickelte Stahl JE 607 hat ähnliche Zusammensetzung, jedoch weder Blei- noch Schwefelzugaben.



3 Vergleich der Härtebarkeit des 18CrNiMo7-6 (Härtebarkeitsgrenzen als Referenz) mit der von mangan-, bor- und nickellegierten Ersatzgüten



4 Härtebarkeit zweier neu entwickelter Einsatzstähle mit kostengünstigerer Legierungslage im Vergleich zu einem hochlegierten konventionellen Einsatzstahl (H2)



5 Kornwachstumsverhalten der Schmelzen 20CrMo5 (modifiziert) und 25MoCr4 mod. im ferritisch-perlitisch gegläuteten Zustand bei verschiedenen Temperaturen und Haltezeiten [3]

FORTSCHRITTE BEI AFP-STÄHLEN

DIN-EN 10267 beinhaltet fünf AFP-Stähle mit einem breiten Festigkeits- und Zähigkeitsspektrum. Zahlreiche Sondervarianten übertreffen die mechanischen Eigen-

schaften der Norm inzwischen deutlich [6]. In [7] wird in einem Forschungsprojekt ein schweißbarer Werkstoff für Anwendungen wie zum Beispiel Achsen für den schweren Nutzfahrzeugbau gesucht. Ein höheres Festigkeitsniveau soll höhere

Nutzlasten ermöglichen. Modifizierte Werkstoffe dieses Typs werden schon erfolgreich für Nutzfahrzeugachsen eingesetzt.

Grundlagen der Legierungsgestaltung für hochfeste AFP-Stähle werden in [8] untersucht. Ziel ist es, die Grenzen dieses Werkstoffkonzeptes im Hinblick auf maximale Festigkeit und Zähigkeit auszuloten [9]. Referenzmaterial ist der AFP-Stahl 38MnVS6 mit 0,1 % Vanadium. Untersucht werden zusätzliche Gehalte an Niob, Titan und Vanadium. Eine gleichzeitige deutliche Steigerung von Festigkeit und Zähigkeit lässt sich jedoch nicht sicher erreichen.

FORTSCHRITTE BEI BAINITISCHEN STÄHLEN

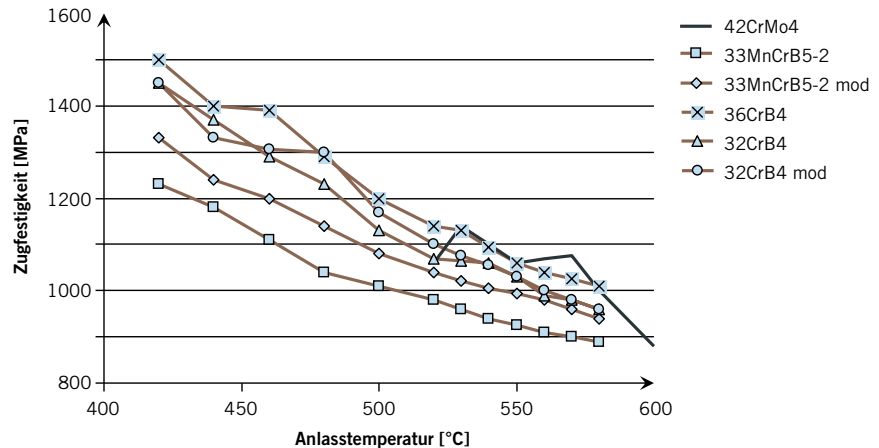
Vergütungsstähle erreichen höhere mechanische Kennwerte als AFP-Stähle, sind jedoch teurer. Hochfeste duktile bainitische Stähle (HDB-Stähle) könnten die zwischen beiden Werkstoffgruppen klaffende Lücke schließen.

Untersuchungen am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen [8, 10] zielen auf die Entwicklung einer bainitischen Legierung. Gefunden werden Legierungen, bei denen sich Bainit durch kontrollierte Abkühlung aus der Schmiedehitze erzielen lässt. Dies erfordert die Kontrolle des Abkühlungsprozesses bis herab zu Temperaturen unterhalb von 400 °C.

Bereits am Markt verfügbar ist der bainitische Schmiedestahl 20MnCrMo7 [11]. Die Ausbildung eines bainitischen Gefüges wird allein durch Mangan, Chrom sowie etwas Molybdän erzielt. Auch die kostengünstige H2-Stahlgüte erreicht in bainitischem Gefüge attraktive Festigkeitswerte ohne Vergütungsbehandlung bei niedrigen Legierungskosten. Wichtiger Aspekt bei neuen Schmiedewerkstoffen ist auch ihre Bearbeitbarkeit. Biermann et al. [12] vergleichen beim 20MnCrMo7 die Bearbeitbarkeit beim Drehen und Tieflochbohren mit derjenigen des Vergütungsstahls 42CrMo4. Der bainitische Stahl ist schwerer bearbeitbar, vor allem wegen seiner höheren Härte.

FORTSCHRITTE BEI TRIP-STAHL

Der Trip-Effekt (Transformation Induced Plasticity) beruht auf 5 bis 10 % metastabilen kohlenstoffreichen Austenit im Ge-



6 Zugfestigkeit (bei Raumtemperatur RT) verschiedener molybdänarmer Vergütungsstähle in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur [4]

füge, der bei plastischer Verformung in Martensit umwandelt. Belastete Bauteilbereiche werden so aufgehärtet; zudem bilden sich Druckeigenspannungen aus. Beides zusammen bewirkt eine sehr hohe Ermüdungsfestigkeit. Interessant ist dies zum Beispiel für Common Rails für Dieselmotor-Einspritzsysteme. Sugimoto et al. [13, 14] untersuchen die Eigenschaften von Trip-Stählen speziell mit Blick auf den Einsatz im Common-Rail-Bereich. Proben erreichen 10⁷ Lastspiele bei 3000 bar ohne Versagen. Ein Anfang 2011 gestartetes Gemeinschaftsforschungsprojekt [15] will sogar Legierungen finden, welche den Trip-Effekt schon bei kontrollierter Abkühlung an Luft erzielen.

FORTSCHRITTE BEIM GRUNDLAGEN-VERSTÄNDNIS ZUR ERHÖHUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT VON WERKSTOFFEN

Auch die Grundlagenforschung trägt zur Weiterentwicklung der Stahltechnik bei. Mittels Simulationsmethoden mit thermodynamischen Ansätzen lassen sich Legierungslagen analysieren sowie Bildung und Wachstum von Einschlüssen simulieren. Auch die Anwendung von linear-elastischen oder elastisch-plastischen FE-Methoden trägt zu weiterer Einsicht in das Werkstoffverhalten bei [16].

Der beim Schmieden und Walzen durch ausgerichtete und gestreckte MnS-Einschlüsse entstehende Faserverlauf führt zu anisotropem Werkstoffverhalten. Schuster [17] untersucht das Verhalten der Einschlüsse bei verschiedenen Umformrich-

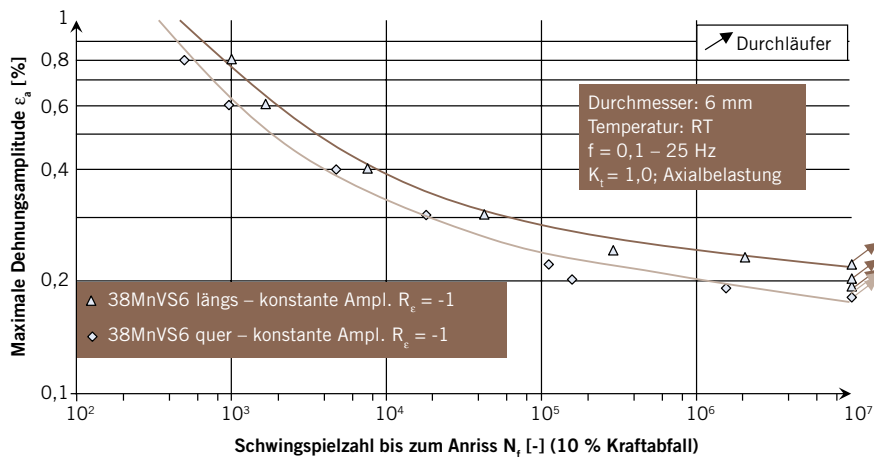
tungen und welchen Einfluss dies auf die mechanischen Eigenschaften hat.

Die Schwingfestigkeit in Abhängigkeit von Richtung und Dichte des Faserverlaufs beim AFP-Stahl 38MnVS6 wurde am Fraunhofer LBF [18] untersucht. Quer zur Faserrichtung liegt die Schwingfestigkeit im Wöhler-Versuch um bis zu 13 % niedriger als in Längsrichtung, 7. Das Verständnis des Einflusses aller Einschlüsse besonders auf die Ermüdungsfestigkeit wird weiter ausgebaut [19, 20]. Fortschritte sind hier zu erwarten durch die quantitative Berücksichtigung der Verformungen der Einschlüsse zusammen mit der umgebenden Stahlmatrix.

Fluch [21] berichtet von sehr reinen Vergütungsstählen, die trotz höchster Festigkeit keinen durch Einschlüsse verursachten Abfall der Ermüdungsfestigkeit zeigen. Damit lassen sich mechanisch sehr belastbare Bauteile dimensionieren. Auch aus dem Bereich zum Beispiel der Großgetriebebauteile ist die Einstellung eines sehr niedrigen Schwefelgehalts bekannt.

Mit dem Ziel der Steigerung der Temperatur beim Einsatzhärten untersuchen Konovalov et al. [22] die Stabilisierung der Austenitkorngröße durch Titan und Niob beim Einsatzhärten von 18CrNiMo7-6. Ein mathematisches Modell beschreibt Keimbildung, Wachstum und Vergrößerung der Vanadium- und Titancarbonitride bei isothermischem Halten nach einer Vorverformung.

Einen neuartigen Effekt bei AFP-Stählen stellt [23] dar. Nach dem Abkühlen auf die Temperatur der ferritisch-perlitischen Umwandlung entstehen durch eine weitere



7 Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von der Faserrichtung (Wöhler-Diagramm) [18]

Umformung wesentlich feinere Ausscheidungen der Mikrolegierungselemente. Dies erhöht Streckgrenze und Zugfestigkeit. Ein weiteres Thema ist das Einbringen einer extremen Kaltverformung. Erzielt werden außergewöhnliche Festigkeitssteigerungen bei sehr hoher Zähigkeit [24].

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Stahl ist einer der vielseitigsten Werkstoffe. Bedingt durch die unterschiedlichen Legierungslagen und zahlreiche Möglichkeiten der Wärmebehandlung kann ein sehr breites Spektrum an Eigenschaften dargestellt werden. Viele aktuelle Entwicklungen führen zu neuen Legierungen, Prozessrouten und Eigenschaftsprofilen, die zu Kostensenkungen oder einer Steigerung der Leistungsfähigkeit für bestimmte Anwendungen führen. Weiterer Fortschritt erfordert die Kooperation von Stahlhersteller, Weiterverarbeiter und Endkunde. Eine Langversion dieses Beitrags wird in Kürze vom Industrieverband Massivumformung herausgegeben [25].

LITERATURHINWEISE

[1] Eisenberg, S.; Reinhold, P.; Wolff, J.: Einfluss des metallurgischen Reinheitsgrades auf die Lebensdauer von Radlagern, DVM-Tag 2007, „Reifen, Räder, Naben, Bremsen“, 9. – 11. Mai 2007, Berlin
 [2] Schifferl, H.; Zamberger, S.; Jöller, A.: Alternative Alloying Concepts for Heat-treatable Engineering Steels. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011
 [3] Hippenstiel, F.: Improvement Working and Utility Properties of Classical and New Mo-alloyed Carburizing Steels. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011

[4] Riedner, S.; van Soest, F.; Kunow, S.: B-alloyed Quench and Temper Steels – an Option to Classic CrMo and CrNiMo Quench and Temper Steels. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011
 [5] Janßen, P.; Engineer, S.: New Metallurgical Concepts for Improving Machinability of Steels. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011
 [6] Raedt, H.-W.: Schmiedewerkstoffe bauen ihren Vorsprung aus. In: Konstruktion April 4-2005
 [7] Erisir, E.; Prah, U.; Trute, S.; Bleck, W.: Entwicklungspotenzial schweißgeeigneter Feinkornbaustähle zum Einsatz in geschmiedeten Strukturbauteilen. Bericht, Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK), RWTH Aachen, 2006
 [8] Keul, C.; Mosecker, L.; Bleck, W.; Rekersdrees, T.; Stüber, A.; Schliephake, H.; Beyer, C.; Raedt, H.-W.: New Developments in the Material and Process Design of Forged Components in the Automotive Industry. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011
 [9] Projekt AVIF A 228: Neue Werkstoffe und angepasste Prozessketten für höherfeste Stahlwerkstoffe (AFP) in geschmiedeten Strukturbauteilen. Industrieverband Massivumformung (IMU), 2006
 [10] Projekt IFG 260 ZN: Effiziente Prozessketten und neue hochfeste (bainitische) Stähle zur flexiblen Darstellung hoch beanspruchter Strukturbauteile (HDB-Schmiedestahl, Bainite). Industrieverband Massivumformung (IMU), 2007
 [11] Engineer, S.; Justinger, H.; Janßen, P.; Härtel, M.; Hampel, C.; Randelhoff, F.: Technological Properties of the New High Strength Bainitic Steel 20MnCrMo7. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011
 [12] Biermann, D.; Felderhoff, F.; Engineer, S.; Justinger, H.: Machinability of High-strength Bainitic Steel 20MnCrMo7. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011
 [13] Sugimoto, K.-I.; Yoshikawa, N.: Advanced High-Strength Trip-Aided Steels for Ultra High Pressure DI-Diesel Engine Common Rail. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, 2011

[14] Sugimoto, K.-I.; Kobayashi, J.; Arai, G.: Development of Ultra High-strength Low Alloy Trip-aided Steel for Hot-forging Parts. Steel Research Int. 81 (2010), No. 9, pp. 254 – 257
 [15] Projekt IGF 374 ZN: Schmiedestähle mit verbesserter Betriebsfestigkeit durch verformungsinduzierte Phasenumwandlung (Trip-Effekt)“. Industrieverband Massivumformung (IMU), 2011
 [16] Haglund, S.: Influence of Inclusions in Steels during Fatigue. Jernkontorets Forskning, D 801, 2004
 [17] Schuster, A.; Raedt, H.-W.; Tekkaya, A. E.: Influence of a Forging Operation on the Deformation of Inclusions. 10th ICTP Aachen, Sep. 25 – 30, 2011
 [18] Forschungsprojekt AVIF A 245: Einfluss von Faserverlauf und Gefüge auf die Schwingfestigkeit warmmassivumgeformter AFP-Stähle. Industrieverband Massivumformung (IMU), 2007
 [19] Murakami, Y.: Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Butterworth Heinemann, 2002
 [20] Gänsler, H.-P.; Leitgeb, A.; Glinser, K.; Leitner, H.; Eichlseder, W.: Einfluss von Imperfektionen auf die Schwingfestigkeit von Bauteilen. 39. Tagung DVM-Arbeitskreis Bruchvorgänge „Bruchmechanik und Bauteilsicherheit“, 13. – 14. Feb. 2007, Dresden
 [21] Fluch, R.: A High-strength and Super Clean Heat-treatable Steel for Application in the Automotive Industry. 3rd International SCT Conference Steels for Cars and Trucks, June 5 – 9, 2011, Salzburg, Austria, 2011
 [22] Konovalov, S.; Clausen, B.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.; Prah, U.; Bleck, W.: Simulation der Partikelentwicklung entlang der Prozesskette geschmiedeter und einsatzgehärteter Bauteile aus mikrolegiertem 18CrNiMo7-6. HTM – Journal of Heat Treatment and Materials, 01/2011
 [23] Isogawa, S.: Current Status and Future Prospect of Controlled Cooling, Proceedings of the 11th Asian Symposium on Precision Forging, (ASPF2010), Kyoto, Japan, October 24 – 27, 2010
 [24] Valiev, R. Z.; Zehetbauer, M.; Estrin, Y.; Höppl, H. W.; Ivanisenko, Y.; Hahn, H.; Wilde, G.; Roven, H. J.; Sauvage, X.; Langdon, T.: The Innovation Potentials of Bulk Nanostructured Materials. Advanced Engineering Materials 2007, 9, No. 7
 [25] Raedt, H.-W.; Speckenheuer, U.; Vollrath, K.: Massivumgeformte Stähle – Neue ressourcen- und energieeffiziente Lösungen für leistungsfähigere Bauteile. ISBN 978-3-928726-28-3, Industrieverband Massivumformung (IMU), Hagen, 2012, www.metallform.de



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com