

Moderne Werkzeugwerkstoffe für das Presshärten von Stahlblechen

R. Rahn, I. Schruff

Kind & Co., Edelstahlwerk, KG, Wiehl

1. Einleitung

Aspekte wie Crashesicherheit und Gewichtsreduzierung veranlassen die Automobilindustrie, PKW-Strukturbauteile vermehrt aus hochfesten Stahlblechen zu fertigen. Die für die Verarbeitung dieser Stahlbleche verwendeten Werkzeuge erfordern sorgsam auf einander abgestimmte Eigenschaften wie Härte und Zähigkeit, Anlassbeständigkeit sowie Druckfestigkeit und Verschleißwiderstand und schließlich Wärmeleitfähigkeit. Die Auswahl der geeigneten Werkzeugstähle sollte darüber hinaus auch noch die Aspekte der mechanischen Bearbeitbarkeit und Schweißbarkeit und schließlich auch noch die notwendige Wärmebehandlung berücksichtigen.

Unter besonderer Berücksichtigung der auftretenden Werkzeugbeanspruchungen beschreibt der vorliegende Bericht zunächst den Prozess des Presshärtens bzw. der Warmumformung von hochfesten Stahlblechen. Daraus werden charakteristische Eigenschaften geeigneter Werkzeugstähle abgeleitet. Abschließend werden Hinweise zum Werkzeugdesign gegeben, die zu einer Verkürzung der Taktzeiten beitragen können.

2. Anforderungen an geeignete Werkzeugstähle

Die wesentlichen Schritte des Presshärtens sind das Aufheizen der Platinen sowie das zeitgleiche Umformen und Abschrecken der Blechteile. In dieser Arbeit soll ausschließlich das kombinierte Umformen und Abschrecken behandelt werden.

Ein häufig verwendeter Blechwerkstoff für das Presshärten ist der Stahl 22MnB5 (W.-N. 1.5528). Er erfordert eine Härtetemperatur von 950 – 980 °C. Die auf diese Temperatur erhitzten Platinen werden zwischen die Presswerkzeuge gebracht und dort unter Einwirkung hoher Druckkräfte in die gewünschte Form gepresst. Die rasche Abfuhr der Wärme aus den Platinen in die gekühlten Werkzeuge führt schließlich zur Härtung der Blechteile.

In der Literatur findet man verschiedene Untersuchungen /u. a. 1/, die sich mit den thermischen Reaktionen der Umformwerkzeuge befassen. Sie alle stellen dicht unter der Oberfläche der Werkzeuge gemessene Temperaturkurven vor, berücksichtigen jedoch nicht die Temperaturen in der Kontaktzone der Werkzeugoberfläche. Salomonsson /2/ beschreibt die Entwicklung der Kerntemperatur von Umformwerkzeugen und stellt dar, dass sich der Kern der Werkzeuge innerhalb der ersten Zyklen bereits auf 55 – 60 °C erhitzt. Untersuchungen aus dem Bereich der

Gesenkschmiedeanwendungen /3/ beschreiben die Temperatur in der Kontaktzone direkt über die Formel

$$T_s = 0,5 * (T_b + T_t)$$

mit

T_s : Temperatur in der Kontaktfläche in °C,

T_b : Blechtemperatur in °C und

T_t : Werkzeugtemperatur in °C.

Unter der Annahme eine Blechtemperatur (T_b) von 920 °C und einer Werkzeugtemperatur (T_t) von 60 °C ergibt sich eine Kontaktflächentemperatur (T_s) von 490 °C. Dieser Wert verdeutlicht die hohe thermische Beanspruchung, der die Kontaktflächen der Werkzeuge kurzzeitig, jedoch langfristig zyklisch ausgesetzt werden. Diese einfache Gleichung ermöglicht eine leichte Abschätzung der thermischen Beständigkeit der Werkzeugwerkstoffe. Die vollständige martensitische Umwandlung des Blechwerkstoffes 22MnB5 erfordert eine Mindestabschreckrate von 30 K/sec /4/. Die Wärmeableitung aus dem Blechwerkstoff in das Kühlsystem der Werkzeuge hängt u. a. von Einflussgrößen wie Anpressdruck oder Oberflächenbeschaffenheit der Bleche (unbeschichtet oder beschichtet) und der Werkzeuge (nitriert, beschichtet, unbeschichtet) ab. Nach Merklein et al. /5/ beeinflussen Werkzeugbeschichtungen den Wärmeübergangskoeffizienten erheblich. Für den Wärmefluss aus der Kontaktfläche in das Kühlsystem ist jedoch die Wärmeleitfähigkeit des Stahles die verantwortliche Eigenschaft, die damit zugleich die martensitische Umwandlung des Blechs mitbestimmt.

Im Verlauf der Presshärtezyklen kommt es an den Werkzeugoberflächen durch das Fließen der Bleche über die konvexen Werkzeugkonturen zum abrasiven Verschleiß der Oberflächen. Das Ausmaß und die Verschleißrate hängen dabei davon ab, ob unbeschichtete oder beschichtete Bleche verarbeitet werden.

Um die während des Umformprozesses in den Werkzeugen auftretenden mechanischen und thermischen Spannungen kompensieren zu können, bedarf es einer ausreichenden Zähigkeit des eingesetzten Warmarbeitsstahles. Je dichter die Kühlkanäle unter der Wirkfläche der Werkzeuge liegen, desto wichtiger ist die Zähigkeit des eingesetzten Stahles, da die Spannungen mit geringer werdender Wandstärke zunehmen.

Mit Hilfe des „Tailored Tempering“ ist es möglich, in einzelnen Bereichen eines pressgehärteten Blechteils ein niedrigeres Festigkeitsniveau einzustellen. Hierzu werden die korrespondierenden Werkzeugsegmente auf über 500 °C erhitzt und somit die Abschreckwirkung reduziert. Presshärte-Werkzeuge für das Tailored Tempering erfordern deshalb zusätzlich eine ausreichende Langzeit-Anlassbeständigkeit.

Aus den obigen Beschreibungen können die nachfolgenden Hauptanforderungen an Werkzeugstähle für Presshärtewerkzeuge definiert werden:

- Hohe Anlassbeständigkeit und Langzeit-Anlassbeständigkeit
- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Ausreichender Verschleißwiderstand
- Hohe Zähigkeit
- Gute Schweißbarkeit für Reparaturen und Designänderungen
- Gutes Verhalten bei der Vakuum-Wärmebehandlung

3. Geeignete Warmarbeitsstähle für Presshärte-Werkzeuge

Die Palette der derzeitig genutzten Werkzeugstähle reicht vom gegossenen Kaltarbeitsstahl bis zum geschmiedeten Warmarbeitsstahl. Die Verfasser dieses Berichtes empfehlen aufgrund der zuvor beschriebenen Anforderungen geschmiedete Warmarbeitsstähle für diese Anwendung, da diese Stähle die notwendigen Eigenschaften in guter Weise kombinieren. Unter den empfohlenen Stählen (Tabelle 1) sind nicht nur die international genormten /6/ Stähle X40CrMoV5-1 (W.-Nr. 1.2344) und X38CrMoV5-3 (W.-Nr. 1.2367), sondern auch zwei Sonderstähle.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzungen für das Presshärten empfohlener Werkzeugstähle

Stahlbezeichnung		Legierungsgehalt in Massen-%						
W.-Nr.	Marke	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
1.2344	USD	0,40	1,00	0,40	5,20	1,30	1,00	---
1.2367	RPU	0,38	0,40	0,40	5,00	2,80	0,60	---
---	CR7V-L	0,42	0,50	0,40	6,50	1,30	0,80	---
---	HTR	0,32	0,20	0,30	2,20	1,20	0,50	3,80

Aufgrund ihrer Eigenschaftsprofile sind die beiden genormten Stähle 1.2344 und 1.2367 vielseitig verwendbare Warmarbeitsstähle. Beim Stahl CR7V-L fallen die erhöhten Kohlenstoff- und Chromgehalte auf. Beim Stahl HTR wurden zugunsten einer besseren Wärmeleitfähigkeit die Kohlenstoff- und Chromgehalte abgesenkt. Der auffällig hohe Wolframgehalt dient der hohen Warmfestigkeit des Stahles. Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung wird der Stahl HTR ausschließlich im Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren erzeugt.

Das Anlassverhalten dieser vier Stähle wird in Abbildung 1 beschrieben. Alle vier Stähle weisen ein deutliches Sekundärhärtemaximum auf. Mit einem Wert von 56 HRC erreicht der Sonderstahl CR7V-L ein deutlich höheres Sekundärhärtemaximum

als 1.2344 oder 1.2367. Beim Stahl HTR ist das Sekundärhärtemaximum zu einer deutlich höheren Anlasstemperatur (ca. 590 °C) verschoben. So wird seine oberhalb von 600 °C deutlich bessere Anlassbeständigkeit verdeutlicht.

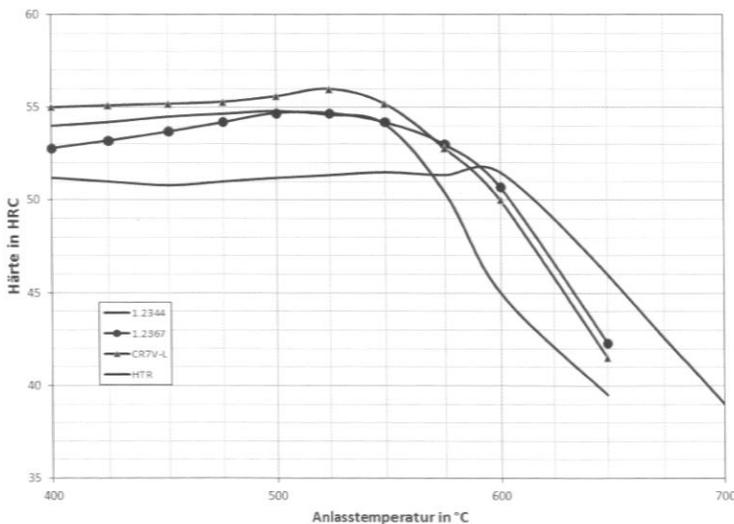


Abbildung 1: Anlassverhalten ausgewählter Warmarbeitsstähle

Weitere wesentliche Eigenschaften der in Frage kommenden Warmarbeitsstähle sind ihre Wärmeleitfähigkeit und ihr Verschleißwiderstand. Die entsprechenden Kennwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Daten für Wärmeleitfähigkeit und abrasiven Verschleißwiderstand

Stahlbezeichnung		Wärmeleitfähigkeit in W / (m * K) bei einer Prüftemperatur von °C				Legierungs- kennzahl Lk in %
W.-Nr.	Marke	20	200	400	600	
1.2344	USD	25,5	27,1	27,7	27,6	63
1.2367	RPU	29,9	29,7	30,1	29,7	62
----	CR7V-L	23,8	27,3	28,2	28,7	67
----	HTR	35,2	34,6	33,0	30,5	55

Die Legierungskennzahl Lk ermöglicht über den Gehalt Carbid bildender Legierungselemente Chrom, Wolfram, Molybdän und Vanadin eine Abschätzung des Verschleißwiderstandes /7/

$$Lk = 2x (\% Cr) + 5x (\% W) + 10x (\% Mo) + 40x (\% V).$$

Zunehmende Werte der Legierungskennzahl Lk bedeutenden steigenden Verschleißwiderstand.

Die Einstellung der Werkstoffeigenschaften Härte, Verschleißwiderstand, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit stellt immer einen Kompromiss dar. Während mit zunehmender Härte die Zähigkeit sinkt, steigt der Verschleißwiderstand an. In Presshärtewerkzeugen haben Härte und Verschleißwiderstand primäre Bedeutung, während die Zähigkeit als zweitrangig angesehen werden kann. Die Werkzeugbeanspruchungen resultieren im Wesentlichen aus der Presskraft und dem Fließen des Blechmaterials über die Werkzeugkanten. Gerade dabei bietet der Stahl CR7V-L ein hohes Potenzial für einen erhöhten Verschleißwiderstand. Aufgrund seines hohen Chromgehaltes bildet er erheblich höhere Carbidgehalte als die übrigen oben beschriebenen Stähle. Schließlich weist CR7V-L mit seinem Sekundärhärtemaximum von 56 HRC ein deutlich höheres Härteniveau als die übrigen zuvor beschriebenen Werkzeugstähle auf und ermöglicht damit den Verzicht auf verschleißmindernde Beschichtungen, die den Wärmeübergang beeinflussen /5/.

In den letzten 10 Jahren wurden zahlreiche Stähle mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit entwickelt. Beim Presshärten spielt diese Technologie eine große Rolle beim Abschrecken der Blechteile zwischen den Umformwerkzeugen. Vor dem Hintergrund ständig erhöhter Produktivität und reduzierten Zykluszeiten kommt der Verkürzung des Kühlprozesses eine besondere Bedeutung zu /8/.

Der Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die Wärmeleitfähigkeit von Stählen wurde bereits vor Jahrzehnten von Eckstein /9/ beschrieben. Gerade die Legierungselemente wie Kohlenstoff, Chrom und Wolfram reduzieren die Wärmeleitfähigkeit der Stähle (Abbildung 2). Andererseits wirken genau diese Elemente positiv auf die mechanischen Eigenschaften wie Anlassbeständigkeit, Warmfestigkeit und Verschleißwiderstand /10/.

Demnach ist die beste Wärmeleitfähigkeit in weichgeglühten Eisenlegierungen mit niedrigsten Gehalten an Kohlenstoff, Chrom und Wolfram zu erwarten. Derartige Stähle können jedoch keineswegs die erforderlichen Eigenschaften aufweisen, um den beim Presshärten von Stahlblechen auftretenden mechanischen Beanspruchungen zu widerstehen.

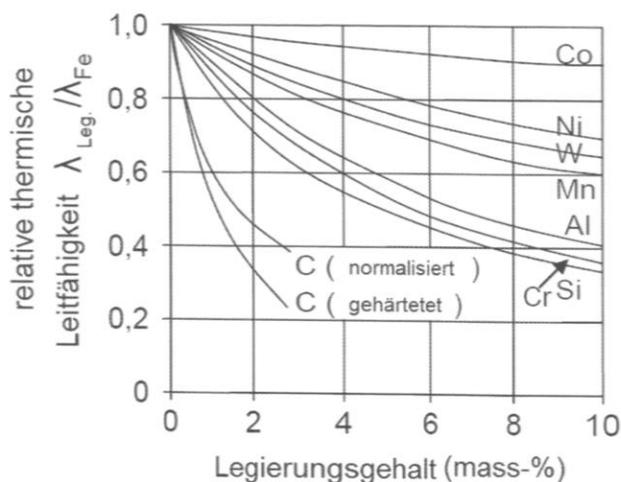


Abbildung 2: Einfluss von Legierungselementen auf die Wärmeleitfähigkeit binärer Eisenlegierungen /11, nach /10//

Nach Zöllner /12/ hängt die Temperaturdifferenz zwischen der Arbeitsfläche eines Werkzeugs und den darunter liegenden Kühlkanälen von der Wärmeleitfähigkeit des Stahles und dem Abstand zwischen Kühlkanal und Oberfläche ab. Der Einfluss eines geringer werdenden Abstandes bei im Übrigen konstant gehaltenen Parametern wird in Abbildung 3 graphisch dargestellt. Damit wird verdeutlicht, dass mit geringer werdendem Abstand die Wärmeabfuhr exponentiell verbessert wird. Die Wärmeleitfähigkeit hat hingegen lediglich einen linearen Einfluss.

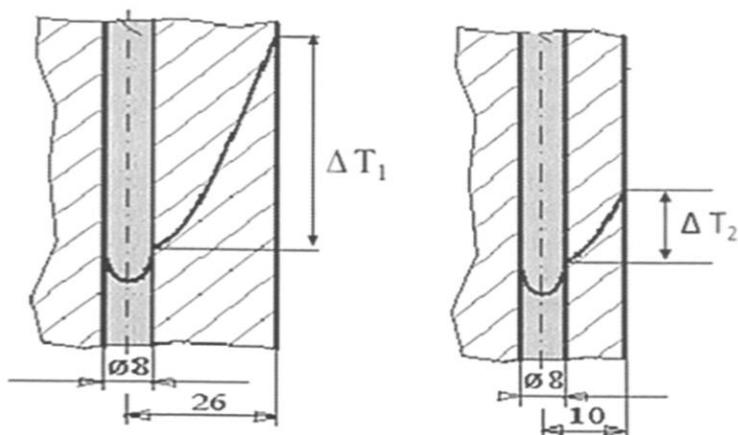


Abbildung 3: Schematisches Temperaturprofil in einem Presshärtezeug in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Oberfläche und Kühlkanal

Dieser Zusammenhang lässt sich technisch nutzen, wenn man das Werkzeugdesign so auslegt, dass die Kühlkanäle sehr eng der Werkzeugkontur folgen (Abbildung 4). Unter Verwendung verbesserter Werkzeugstähle (Tabelle 1) ermöglicht dieses Werkzeugkonzept deutlich verkürzte Kühlphasen und damit eine erhöhte Produktivität des Presshärtens.

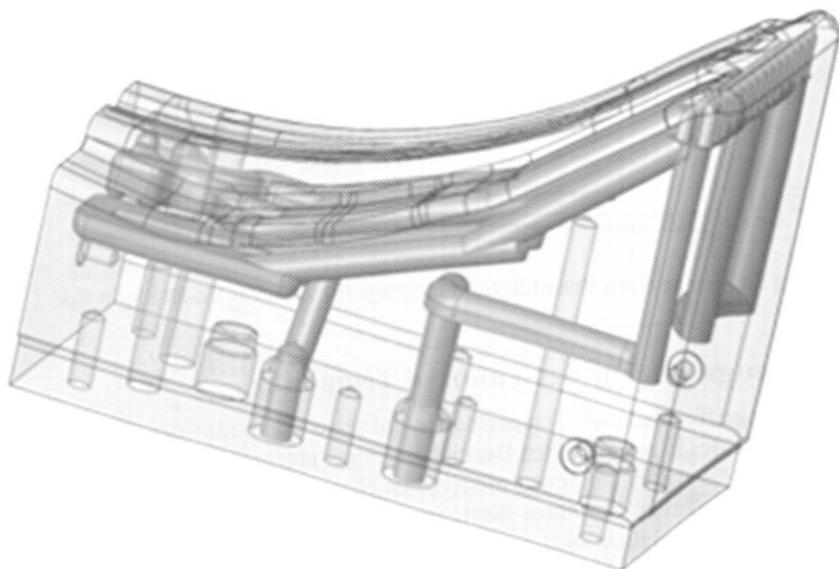


Abbildung 4: Beispiel eines Presshärtewerkzeugs mit konturnahen Kühlungen
/13/

Bei derartigen Werkzeugen werden die Kühlkanäle der Werkzeugkontur folgend in die Oberfläche des Grundkörpers eingefräst. Als Wirkfläche wird eine nur wenige Millimeter starke Platte aus einem der in Tabelle 1 genannten Stähle im Vakuum auf den Grundkörper aufgelötet. Auf diese Weise folgen die Kühlkanäle der Kontur der Arbeitsfläche in nur knapp 8 mm Abstand und ermöglichen sehr hohe Abkühlraten im Presshärtprozess. Derartige Werkzeuge benötigen Werkzeugstähle mit sehr hoher Druckfestigkeit, Anlass- und Verschleißbeständigkeit und Zähigkeit. Ein auf diese Weise gefertigtes und industriell eingesetztes Werkzeug für eine PKW-B-Säule zeigt Abbildung 5.

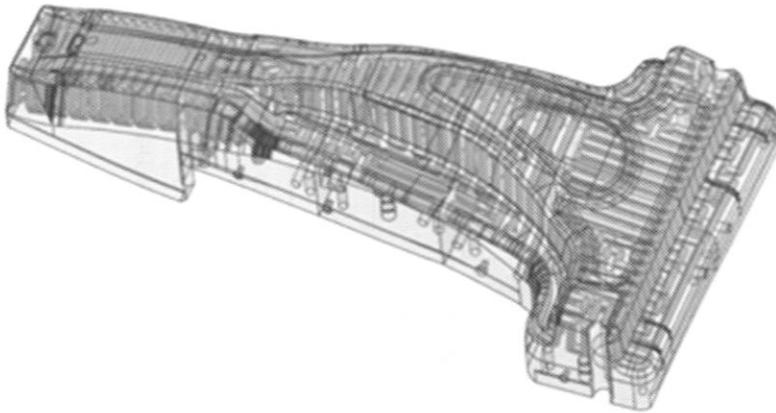


Abbildung 5: Skizze eines Presshärtewerkzeugs für eine PKW-B-Säule /13/

4. Werkzeugstähle für das Tailored Tempering

Mit dem Begriff „Tailored Tempering“ wird eine Methode des Presshärtens bezeichnet, mit der in ausgewählten Bereichen einiger pressgehärteter Komponenten die Härte bzw. Festigkeit auf einem niedrigeren Niveau eingestellt wird. Anders als der Begriff „Tempering“ vermuten lässt, werden die hierfür in Frage kommenden Bereiche nicht nachträglich lokal angelassen. Vielmehr kommen hier segmentierte Presshärtewerkzeuge zum Einsatz, die in den betreffenden Zonen auf Temperaturen von bis zu 550 °C erhitzt werden. Die Abkühlrate des Bleches im Presshärtevorgang wird dadurch drastisch verringert /14/.

Für die Presshärtewerkzeuge bedeutet dies, dass in derartig vorgeheizten Segmenten spezielle Warmarbeitsstähle zum Einsatz kommen müssen, die ihre Härte auch nach langer Betriebszeit noch aufrecht halten. Diese Eigenschaft - eine hohe Langzeit-Anlassbeständigkeit - weisen die Stähle RM10Co (W.-Nr. 1.2888) und HMoD (1.2889) auf, die auch in Druckgussanwendungen mit sehr hohen thermischen Beanspruchungen Verwendung finden. Tabelle 3 gibt ihre chemischen Zusammensetzungen wieder.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzungen von Warmarbeitsstählen mit besonders hoher Langzeit-Anlassbeständigkeit

Stahlbezeichnung		Legierungsgehalt in Massen-%							
W.-Nr.	Marke	C	Si	Mn	Cr	Mo	Co	V	W
1.2888	RM10Co	0,20	0,20	0,50	9,5	2,0	10,0	---	5,5
1.2889	HMoD	0,45	0,30	0,40	4,5	3,0	4,5	2,0	---

Diese beiden Stähle unterscheiden sich von den in Tabelle 1 aufgeführten Stählen durch besonders hohe Chrom-, Kobalt-, Vanadin- und Wolframgehalte.

Die Langzeit-Anlassbeständigkeit beschreibt den Widerstand des Stahles gegen den Härteverlust durch betriebsbedingte Erwärmung eines im Einsatz befindlichen Werkzeugs. Zur Bestimmung der Langzeit-Anlassbeständigkeit wurden auf Gebrauchshärte eingestellte Proben der Stähle RM10Co und HMoD einer bis zu 100stündigen konstanten Temperaturbeanspruchung bei 550 °C bzw. 650 °C ausgesetzt. Die Kurven in Abbildung 6 beschreiben die Zeitabhängigkeit der Härte dieser beiden Stähle.

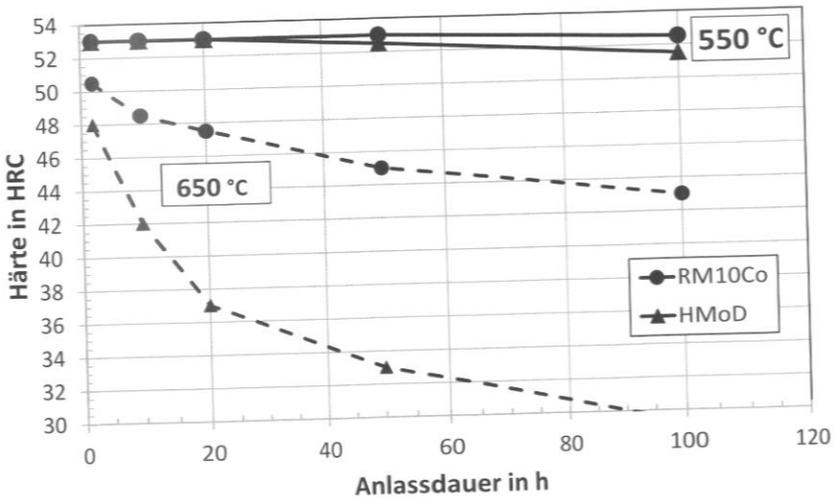


Abbildung 6: Langzeit-Anlassbeständigkeit zweier Warmarbeitsstähle bei 550 °C und 650 °C

Die Kurvenverläufe zeigen, in welchem Ausmaß sich hohe Betriebstemperaturen auf die Härte der Stähle auswirken. Die besonders hohe Beständigkeit des Stahles RM10Co wird dabei gerade bei hohen Temperaturen wie 650 °C erkennbar.

Die wichtigsten weiteren Kennwerte dieser Stähle sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeit und abrasiver Verschleißwiderstand

Stahlbezeichnung		Wärmeleitfähigkeit in $W / (m * K)$ bei einer Prüftemperatur von $^{\circ}C$				Legierungs- kennzahl Lk in %
W.-Nr.	Marke	20	200	400	600	
1.2888	RM10Co	21,1	24,2	27,5	29,6	66,5
1.2889	HMoD	25,5	28,8	32,3	34,0	119

Die Daten verdeutlichen, dass HMoD zwar über einen sehr hohen Verschleißwiderstand bei gleichzeitig guter Wärmeleitfähigkeit verfügt, jedoch in der Langzeit-Anlassbeständigkeit dem Stahl RM10Co deutlich unterlegen ist.

Die Auswahl geeigneter Stähle stellt also in jedem Fall einen Kompromiss zwischen verschiedenen Eigenschaften dar.

5. Zusammenfassung

Bei der Auswahl von Werkzeugstählen, die für das Presshärten von Stahlblechen geeignet sind, spielen Eigenschaften wie Härte, Anlassbeständigkeit, Verschleißwiderstand und Wärmeleitfähigkeit eine große Rolle. Die vielfach intensiv diskutierte Wärmeleitfähigkeit ist jedoch nicht die einzige in Erwägung zu ziehende Eigenschaft bei der Stahlauswahl. Neben den bereits genannten Eigenschaften spielen darüber hinaus auch Aspekte wie eine gute Verfügbarkeit und Zerspanbarkeit der Stähle eine Rolle. Ebenso ist wichtig, dass die Stähle über gut zu reproduzierende Eigenschaften verfügen, um eine verlässliche Werkzeugversorgung aufzubauen.

So stellen heute Stähle wie RPU (W.-Nr. 1.2367) oder Sonderstähle wie CR7V-L in Kombination mit einem angepassten Werkzeugdesign längst ihre Eignung für Hochleistungs-Presshärtezeuge unter Beweis.

Für Werkzeugsegmente, die in Werkzeugen des Tailored Tempering Verwendung finden, bieten sich Stähle wie RM10Co (W.-Nr. 1.2888) und HMoD (W.-Nr. 1.2889) mit ihrer ausgeprägten Langzeit-Anlassbeständigkeit an.

Literatur

- /1/ Oldenburg, M., Lindkvist, G.: Tool thermal conditions for tailored materials properties; HTM J. Heat Treatm. Mat. 66 (2011), S. 329 – 344, 2011
- /2/ Salomonsson, P.; Oldenburg, M.: Investigation of heat transfer in the press hardening process; Proc. 2nd Int. Conf. Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS², 15. – 17. Juni 2009, Luleå, Schweden, S. 239 – 246
- /3/ Müller, P.; Weinhold, H.; Vogel, H.-R.: Graphitfreie Schmiermittel für das Gesenkschmieden von Stahl; Neue Hütte 33 (1988) 8, S. 312 – 316, 1988
- /4/ George, R.; Bardelcik, A.; Worswick, M.: Development of a hot forming die to produce parts with tailored mechanical properties – Numerical study. Proc. 2nd Int. Conf. Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS², 15. – 17. Juni 2009, Luleå, Schweden, S. 189 – 198
- /5/ Merklein, M. et al.; Investigation of parameters influencing thermal and frictional properties within hot stamping; HTM J. Heat Treatm. Mat. 66 (2011), S. 335 – 341, 2011
- /6/ DIN EN ISO 4957: Werkzeugstähle. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- /7/ Voss, H.; Wetter, E.; Netthöfel, F.: Verschleißverhalten von vergütbaren Gesenkstählen; Archiv für das Eisenhüttenwesen (1967) 5, S. 379 – 387, 1967
- /8/ Steinhoff, K. et al.; Optimized Processes and Products in Hot Sheet Metal Forming; Proc. 2nd Int. Conf. Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS², 15. – 17. Juni 2009, Luleå, Schweden, S. 29 – 41
- /9/ Eckstein, H.-J.; Technologie der Wärmebehandlung von Stahl, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Ausgabe, Leipzig 1977, S. 32, 1977
- /10/ Wilzer, J. et al.; On the relationship of heat treatment, properties, and thermal conductivity of steels: Proc. 9th Int. Tooling Conference, Developing the World of Tooling, 11.-14. September 2012, Leoben, Österreich, S. 143 – 152
- /11/ Meurisse, E.; Ernst, C.; Bleck, W.: Improvement of thermal conductivity of hot-work tool steels by alloy design and heat treatment; Proc. 9th Int. Tooling Conference, Developing the World of Tooling, 11.-14. September 2012, Leoben, Österreich, S. 215 – 224
- /12/ Zöllner, O.: Optimierte Werkzeugtemperierung. Anwendungstechnische Information ATI 1104; Bayer AG, Leverkusen, 1999
- /13/ Maass, W.: Contura MTC GmbH., Menden, 2013
- /14/ Sikora, S., et al.: Tailored Tempering – Einstellung lokaler Festigkeitseigenschaften in warmumgeformten Bauteilen; HTM J. Heat Treatm. Mat. 66 (2011), S. 323 – 328, 2011