



Dipl.-Ing. Dr. Ingo Siller,  
Produktentwicklung Warmarbeitsstahl,  
Kunststoffformenstahl  
Böhler Edelstahl GmbH, Kapfenberg, Österreich



Ing. Herbert Schweiger,  
Produktentwicklung Warmarbeitsstahl,  
Böhler Edelstahl GmbH, Kapfenberg, Österreich

## **Einfluss von thermomechanischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften auf die Brandrissbeständigkeit von Warmarbeitsstählen für Druckgussanwendungen**

I. Siller\*, H. Schweiger\*

\* Böhler Edelstahl GmbH, Kapfenberg, Austria

### **Abstract**

Die Schädigung von Werkzeugoberflächen aufgrund von wechselnden thermischen Belastungen resultiert aus einer sehr komplexen Belastungssituation, die von einer Vielzahl von unterschiedlichen Kenngrößen bestimmt wird. Zu diesen Bestimmungsgrößen gehören die Parameter des Druckgussprozesses, die Bauteilgeometrie, die einen besonders signifikanten Einfluss auf die Belastungssituation hat, und die thermomechanischen und die thermophysikalischen Eigenschaften des eingesetzten Warmarbeitsstahls.

Um die Brandrissbeständigkeit unterschiedlicher Warmarbeitsstähle quantifizieren zu können, wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm unter Einsatz eines Temperaturwechselprüfstandes mittels gepulster Laserstrahlung durchgeführt. Im Zuge dieser Tests wurden scheibenförmige Proben an der Oberfläche rasch erwärmt und wieder abgekühlt. Die Versuche wurden unter Vakuumbedingungen durchgeführt, um den Einfluss von Oxidation an der Oberfläche zu vermeiden. Um sehr praxisnahe Versuchsbedingungen einzustellen, wurden die Proben auf eine Hintergrundtemperatur von 180°C vorgewärmt. Während der Tests stellen sich maximale Oberflächentemperaturen im Bereich von 550 bis 600°C ein, wobei die

Spitzentemperatur durch die thermophysikalischen Eigenschaften der untersuchten Warmarbeitsstähle bestimmt ist. Die Länge eines Temperaturwechsels betrug 5 Sekunden.

Für die Untersuchungen wurden für den Einsatzbereich des Druckgießens typische 5%-ige Chromstähle herangezogen. Das Temperaturwechselverhalten dieser Werkstoffe wurde durch die Länge der an der Oberfläche entstehenden Brandrisse nach 11000 Temperaturwechseln charakterisiert.

Es konnte gezeigt werden, dass die Temperaturwechselbeständigkeit von Warmarbeitsstählen vorwiegend von der Wärmeleitfähigkeit, der thermischen Stabilität des Werkstoffes und den mechanischen Kennwerten wie Warmfestigkeit und Duktilität bestimmt wird. Ein Warmarbeitsstahl zeichnet sich somit nur durch eine ausgewogene Kombination dieser Werkstoffkenngrößen als brandrissbeständig aus.

## **Einleitung**

Die zwei Hauptursachen für den Ausfall einer Druckgussform sind gross cracking, also frühzeitiger Formbruch und Brandrissnetzwerke, die zu einem massiven Nachbearbeitungsaufwand der Druckgussteile führen können.

Während gross cracking auf eine Überbelastung des Werkzeugwerkstoffes zurückzuführen ist, die oftmals in einer geometriebedingten Belastungskonzentration oder einer unzureichenden Wärmebehandlung begründet ist, unterliegen die Rissbildung und das Risswachstum von Temperaturwechselrissen sehr komplexen Vorgängen, welche von der Belastungssituation während des Druckgießens und von den Werkstoffkenngrößen des Werkzeugwerkstoffes bestimmt sind.

Die wichtigsten Werkstoffeigenschaften, die das Temperaturwechselverhalten von Werkzeugwerkstoffen bestimmen, sind [1]:

- eine hohe Warmfließgrenze zur Vermeidung oder Reduzierung von plastischer Deformation;
- eine hohe thermische Stabilität, um die Härte bzw. Festigkeit auch über eine lange Einsatzdauer auf einem konstanten Niveau zu halten;
- ein gutes Duktilitätsverhalten bei starker plastischer Deformation;
- eine hohe Wärmeleitfähigkeit zur Verringerung der auftretenden Spitzentemperaturen und Temperaturgradienten.



Abb. 1: Brandrissnetzwerk an der Oberfläche eines Druckgusswerkzeuges nach ca. 110.000 Zyklen.

## **Druckgussprozess**

Um grundlegende Informationen über die thermische und thermomechanische Belastungssituation während eines Druckgussprozesses zu erhalten, ist es notwendig, eine umfangreiche Finite Elemente–Simulation des Füll-, Erstarrungs- und Sprühprozesses durchzuführen. Ein Beispiel für eine FEM-Simulation eines Druckgussprozesses eines Getriebegehäuses aus Aluminium zeigt Abb. 2.

Wie dargestellt, steigt nach dem Füllvorgang die Temperatur an der Oberfläche sehr rasch an, wobei an exponierten Stellen, wie Kernstiften, Spitzentemperaturen an der Oberfläche von 500 bis 600°C auftreten können. Nachdem die Aluminiumschmelze vollständig erstarrt ist, wird die Form geöffnet und das Bauteil aus der Druckgussform entnommen.

Während des Sprühvorganges kommt es zu einem signifikanten Abfall der Temperatur an der Oberfläche, wodurch Temperaturdifferenzen von bis zu 350°C auftreten können. Am Ende des Druckgussprozesses werden die Formhälften wieder geschlossen, worauf noch ein Homogenisierungsintervall folgt.

Die auftretenden maximalen Oberflächentemperaturen und die Temperaturgradienten in das Werkzeuginnere sind durch die Prozessparameter, wie die Gießtemperatur und die Gießgeschwindigkeit, aber auch besonders durch die thermophysikalischen Werkstoffkenngrößen wie die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität des Warmarbeitsstahls bestimmt.

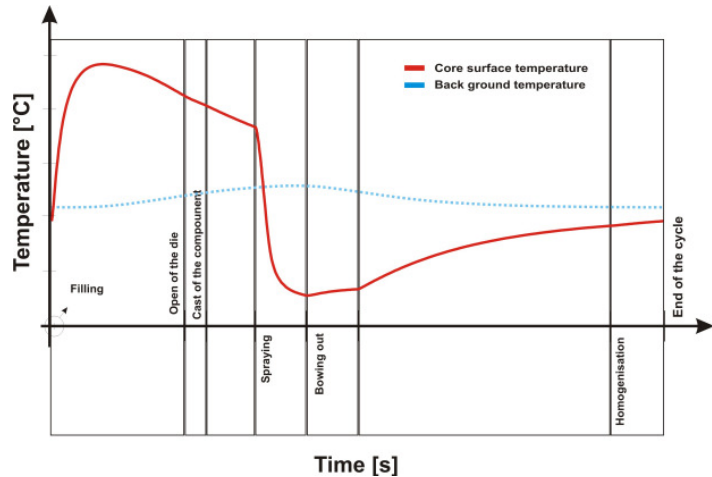
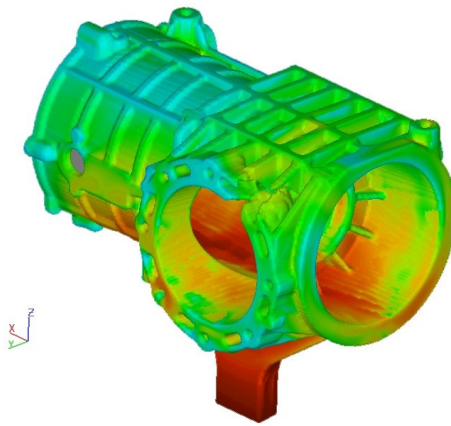


Abb. 2: Beispiel für eine FEM-Simulation eines Gießprozesses eines Getriebegehäuses aus Aluminium mit dem Temperaturverlauf an der Werkzeugoberfläche.

### Werkzeugwerkstoff

Wie bereits ausführlich beschrieben, sind die wichtigsten Werkstoffkennwerte des Werkzeugs, die den Widerstand gegen Temperaturwechselschädigung verbessern, eine hohes Zähigkeits- und Duktilitätsniveau in Verbindung mit einer guten thermischen Stabilität und einer hohen Wärmeleitfähigkeit. In den letzten Jahren sind am Markt neue Warmarbeitsstahlgüten verfügbar, die über eine sehr homogene Mikrostruktur, eine ausgezeichnete Reinheit und konsequenterweise über exzellente mechanische Eigenschaften verfügen. Diese Eigenschaftsmerkmale können bei Warmarbeitsstählen durch die Herstellung über Verfahrensrouten wie das Elektroschlack-Umschmelzverfahren (ESU) oder das Vakuum-Umschmelzverfahren (VMR) erzielt werden. Eine Liste von Warmarbeitsstählen für den Bereich Druckgussanwendungen mit diesen verbesserten Werkstoffeigenschaften zeigt Tabelle 1.

Böhler name	DIN name	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Toughness, ductility	Thermal stability	Thermal conductivity
1.2343 ESR	1.2343	0.38	1.1	0.40	5.0	1.3	0.4	↑↑	↑↑	↑
W400 VMR	~1.2343	0.36	0.2	0.25	5.0	1.3	0.5	↑↑↑	↑↑	↑↑↑
W303 ISOBLOC	1.2367	0.38	0.4	0.40	5.0	2.8	0.5	↑↑	↑↑↑	↑↑
W403 VMR	~1.2367	0.38	0.2	0.25	5.0	2.8	0.7	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑

Tab. 1: Nominelle chemische Zusammensetzung unterschiedlicher Warmarbeitsstähle. ISOBLOC ... Elektroschlack-Umgeschmolzen (ESU), VMR ... Vakuum-Umgeschmolzen [2, 3].

## Temperaturwechseluntersuchungen

Um die Temperaturwechselbeständigkeit unterschiedlicher Warmarbeitsstähle quantifizieren zu können, wurden Versuche mittels gepulster Laserstrahlung durchgeführt. Eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung zeigt Abb.3.

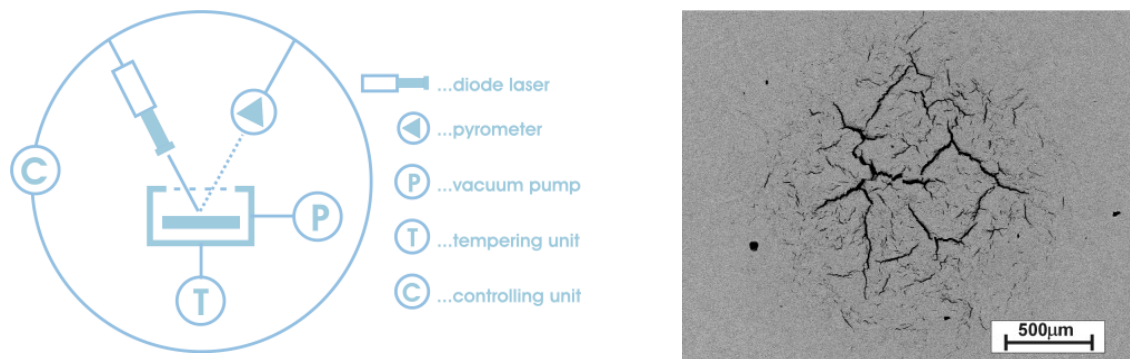


Abb. 3: Schematische Darstellung der Temperaturwechselprüfeinheit und ein Beispiel für ein erzeugtes Brandrissnetzwerk an der Probenoberfläche eines Warmarbeitsstahls DIN 1.2343 nach 11.000 Zyklen.

Die Temperaturwechselversuche wurden an scheibenförmigen Proben unter Vakuumbedingungen durchgeführt, um den Einfluss von Oxidationserscheinungen auf das Absorptionsverhalten der Laserstrahlung und somit auf das Testergebnis zu vermeiden. Bei allen Versuchen betrug der Druck in der Vakuumkammer weniger als  $3 \cdot 10^{-6}$  mbar, wodurch auch bei sehr langen Versuchsdauern eine ausgeprägte Oxidation der Oberfläche vermieden werden konnte. Die Probe wird auf einer temperierten Kupfer-Halterung fixiert, welche auf einer konstanten Temperatur von 180 °C gehalten wird.

Die Oberfläche der Probe wird mittels eines gepulsten 1,8 kW Diodenlasers zyklisch thermisch beansprucht. Die Pulsdauer betrug für alle Tests 2 Sekunden, die Pulspause 3 Sekunden, wodurch sich eine Prüffrequenz von 0,2 Hz ergibt. Die Laserstrahlung wird über einen Lichtleiter, eine Fokussiereinheit und ein transparentes Vakuumkammerfenster an die Probenoberfläche geführt.

Böhler name	DIN name	Pulse shape	Pulse energy	Max. surface temperature	Background temperature	$\Delta T$
1.2343 ESR	1.2343		1444 J	600 °C	180 °C	420 °C
W400 VMR	~1.2343			555 °C		375 °C
W303 ISOBLOC	1.2367			580 °C		400 °C
W403 VMR	~1.2367			550 °C		370 °C

Tab. 2: Maximale Oberflächentemperatur und Temperaturgradienten, welche bei der Untersuchung der unterschiedlichen Warmarbeitsstähle während der zyklisch thermischen Beanspruchung entstehen.

Die Wechselwirkungsfläche mit der Laserstrahlung hat einen Durchmesser von 6 mm, wobei ein Teil (~38%) der Laserstrahlung absorbiert wird und der Rest reflektiert und von einer wassergekühlten Einheit absorbiert wird. Die Temperatur an der Oberfläche wird mittels eines Pyrometers gemessen, wobei das Messintervall des Pyrometers von 250°C bis 1300°C reicht und das Messintervall 15 µs beträgt. Ein Spektralfilter in der Fokussiereinheit des Pyrometers verhindert eine ungewollte Verzerrung der Messergebnisse durch reflektierte oder gestreute Laserstrahlung.

Mittels eines Oszilloskops werden die Temperaturzyklen an der Oberfläche dargestellt. Zusätzlich dienen die Messergebnisse des Pyrometers als Regelungsgrundlage für die Lasersteuerung.

Um sicher zu stellen, dass alle untersuchten Warmarbeitsstahlgüten der gleichen thermischen Belastungen während der Tests unterliegen, wurde für alle Werkstoffe eine Laserpulsenergie von 1444 J gewählt, wodurch sich beim Werkstoff DIN 1.2343 eine Spitztemperatur von 600°C an der Oberfläche einstellt, aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit beim Werkstoff W403 VMR eine Spitztemperatur von nur 550°C. Ein Vergleich der maximal auftretenden Temperaturen und Temperaturgradienten für die unterschiedlichen Warmarbeitsstähle ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Werkstoffe wurden im vergüteten Zustand getestet, wobei 2 Härtniveaus von 44 bis 46 HRc und von 48 bis 50 HRc eingestellt wurden.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der Temperaturwechselversuche für die unterschiedlichen Warmarbeitsstähle nach einer Testdauer von 11000 Zyklen zeigt Abbildung 4.

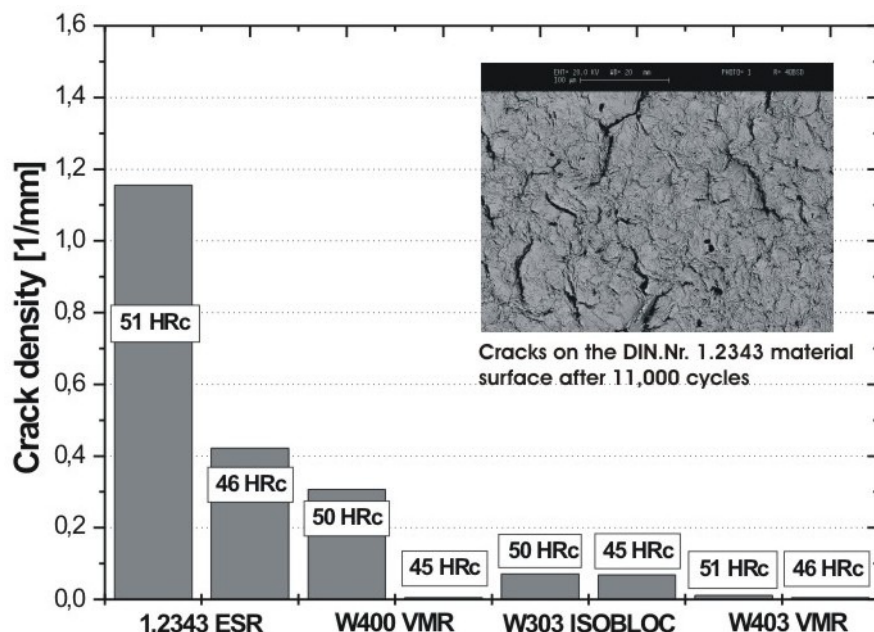


Abb. 4: Gemessene Rissdichte an der Oberfläche unterschiedlicher Warmarbeitsstähle nach 11.000 Zyklen.

Es wurden zwei grundlegende Ergebnisse gefunden. Die Rissdichte nach 11000 Temperaturwechseln verringert sich signifikant durch die höhere Wärmeleitfähigkeit, die die generell auftretenden Unterschiede in den Spitzentemperaturen und den Temperaturgradienten verursacht (siehe Tab. 2), und durch die exzellenten Zähigkeits- und Duktilitätskennwerte in Verbindung mit der guten thermischen Stabilität der W400 VMR und W403 VMR Güten.

Weiters zeigt sich bei allen Werkstoffen, dass eine geringere Härte von 45 bis 46 HRc durch die konsequenterweise höhere Zähigkeit zu einem höheren Widerstand gegen Temperaturwechselrisse führt.

## **Zusammenfassung**

Thermische Ermüdung ist eine der Hauptursachen für das Versagen von Druckgussformen und stellt für den Druckgießer einen enormen Kostenfaktor dar.

Um nun Temperaturwechselrissnetzwerke an der Oberfläche von Druckgusswerkzeugen zu reduzieren bzw. zeitlich hinaus zu zögern, sind Warmarbeitsstähle gefordert, die eine optimale Kombination zwischen thermomechanischen und thermophysikalischen Werkstoffkennwerten anbieten können. Von besonderer Bedeutung sind hier eine hohe, thermisch stabile Warmfließgrenze in Verbindung mit einem ausgewogenes Zähigkeits- und Duktilitätsniveau und eine hohen Wärmeleitfähigkeit.

Erzielt werden kann diese Eigenschaftskombination durch ein intelligentes Legierungskonzept in Verbindung mit modernsten Produktionstechnologien, wie das Vakuum-Umschmelzverfahren. Wie mit Hilfe der Temperaturwechselversuche gezeigt werden konnte, verfügen die untersuchten Warmarbeitsstähle W400 VMR und W403 VMR über eine signifikant verbesserte Temperaturwechselbeständigkeit im Vergleich zum klassischen Werkstoff DIN 1.2343.

## **Literatur**

- [1] S. Babu, D. Ribeiro, R. Shivpuri. Material and Surface Engineering For Precision Forging Dies. Ohio Aerospace Institute and National Center for Manufacturing Sciences, June 10, 1999
- [2] R. Schneider, P. Würzinger, G. Lichtenegger and H. Schweiger. Metallurgie an den technischen Grenzen höchster Reinheitsgrade und niedrigste Spurenelementgehalte. BHM, 145.Jg. (2000). Heft 5, p199-203
- [3] H. Schweiger, H. Lenger, H.-P. Fauland, K. Fisher. A new generation of toughest hot-work tool steels for highest requirements. "Tool steels in the next century" Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Tooling Conference, 29.9-1.10.99, Leoben, Austria