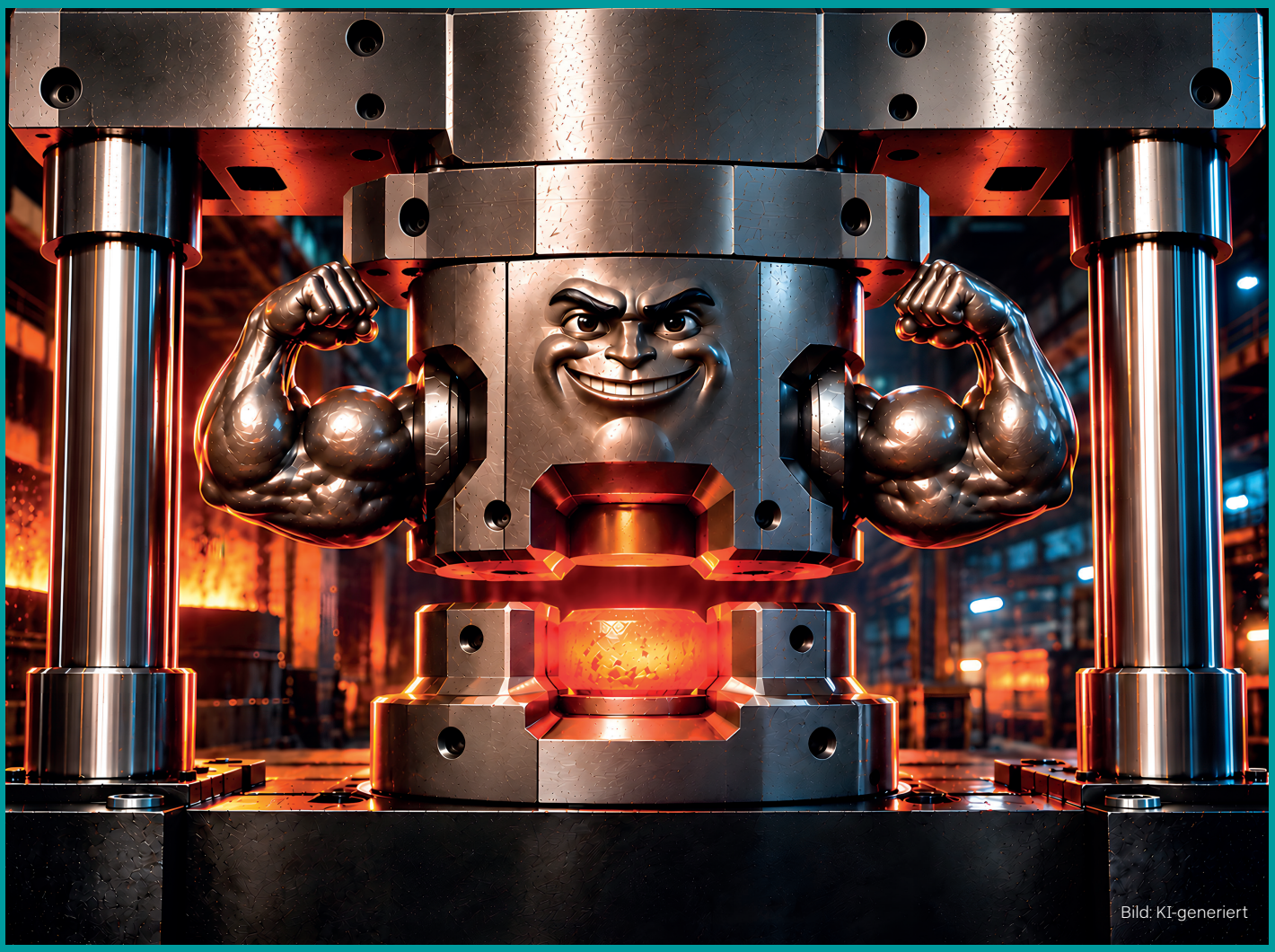
Standmengensteigerung von Warmumformwerkzeugen durch Ermüdungssimulation mit experimentell ermittelten Werkstoffkennwerten



Das Ermüdungsversagen infolge hoher zyklischer thermomechanischer Belastungen zählt zu den wesentlichen Ursachen für das vorzeitige und teilweise plötzliche Versagen von Warmumformwerkzeugen. Durch Ermüdungssimulationen auf Basis experimentell ermittelter Werkstoffkennwerte können kritische Bereiche identifiziert und hinsichtlich ihrer lokalen Beanspruchung bewertet werden. Im Rahmen der IMU-Studie 79 „Ermüdungsdaten für Werkzeugstähle der Warmumformung“ wurden drei Werkzeugstähle in sechs Zuständen experimentell untersucht und die entsprechenden Ermüdungsmodelparameter wurden ermittelt. Dies ermöglicht eine gezielte Optimierung der Werkzeuggeometrie und kann dadurch zu einer Erhöhung der Standmenge und einer verbesserten Betriebssicherheit beitragen.

AUTOREN



Dr.-Ing.
Artem Alimov

ist akademischer Mitarbeiter
im Fachgebiet Hybride Fertigung
an der Brandenburgischen Technischen
Universität (BTU) Cottbus-Senftenberg



Dr.-Ing.
Hans-Willi Raedt

ist Geschäftsführer
der prosimalys GmbH
in Bad Wörishofen

> FE-Simulationen sind ein wichtiger Bestandteil der Prozessentwicklung und Werkzeugauslegung und tragen wesentlich zur Verbesserung technologischer Prozesse bei.
>
> **Dr. Artem Alimov**

> Die Werkzeugkosten sind ein wesentlicher Bestandteil der Stückkosten. Die systematische Erhöhung der Werkzeuglebensdauer mit Hilfe experimentell belegter Lebensdauerdaten, einfach innerhalb der Umformsimulation, kann die Wirtschaftlichkeit signifikant erhöhen.
>
> **Dr. Hans-Willi Raedt**

ERMÜDUNGSVORHERSAGE BEIM WARMSCHMIEDEN

Warmumformwerkzeuge sind während des Schmiedeprozesses einer komplexen zyklischen thermomechanischen Beanspruchung ausgesetzt. Bei jedem Umformhub steigt die Oberflächentemperatur des Werkzeugs durch den Kontakt mit dem heißen Werkstück an, und gleichzeitig entstehen durch den Kontakt und die Umformkräfte hohe mechanische Spannungen. Auch wenn diese Spannungen lokal im elastischen Bereich bleiben, können sie aufgrund der zyklischen Belastung zu einer Ermüdung und schließlich zum Versagen des Werkzeugs führen. Insbesondere in kritischen Bereichen mit kleinen Radien, Übergängen oder geometrischen Kerben, können sich thermische und mechanische Belastungen lokal überlagern und konzentrieren, wodurch die Rissbildung begünstigt wird.

Eine rein statische Spannungsbewertung reicht daher nicht aus, um die Festigkeit und die Lebensdauer des Werkzeugs zuverlässig vorherzusagen. Entscheidend ist vielmehr die Analyse der zyklischen Beanspruchung und deren Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit und Lebensdauer des Werkzeugs. Dabei müssen die Höhe und Verteilung der lokalen Spannungen berücksichtigt werden.

Für die Lebensdauervorhersage wurde das Ermüdungsmodell nach Basquin verwendet. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen der Spannungsamplitude und der Lastspielzahl bis zum Ermüdungsversagen. Zur Berücksichtigung des Einflusses einer nicht symmetrischen Spannungsbeanspruchung wurde die Morrow-Korrektur eingesetzt. Das für die Lebensdauervorhersage verwendete Modell wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \left(\sigma'_f - \sigma_m\right)(2N_f)^b$$

Dabei bezeichnet σ_a die Spannungsamplitude, $\Delta\sigma$ die Spannungsdifferenz, σ'_f den Ermüdungsfestigkeitskoeffizienten, σ_m die Mittelspannung, N_f die Anzahl der Lastspiele bis zum Ermüdungsversagen und b den Ermüdungsfestigkeitsexponenten.

Damit kann die lokale Beanspruchung aus einer numerischen thermomechanischen Simulation direkt mit der materialspezifischen Ermüdungsfestigkeit verknüpft werden. Für jeden relevanten Bereich des Werkzeugs lässt sich somit bestimmen, wie viele Lastwechsel unter den gegebenen thermomechanischen Bedingungen bis zum Erreichen eines definierten Ermüdungskriteriums zu erwarten sind.

ERMITTLUNG DER ERMÜDUNGSDATEN FÜR WERKZEUGSTÄHLE DER WARMUMFORMUNG

Eine wesentliche Voraussetzung für eine belastbare Lebensdauersimulation sind geeignete Werkstoffkennwerte. Im Rah-

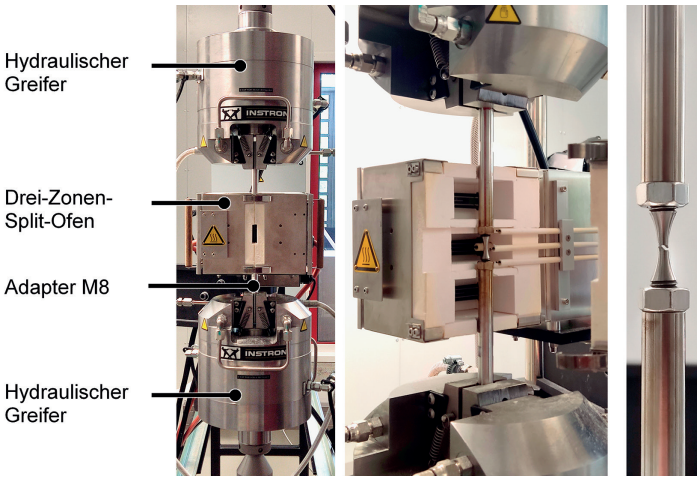


Bild 1: Prüfmaschine Instron 8801 und Versuchsaufbau

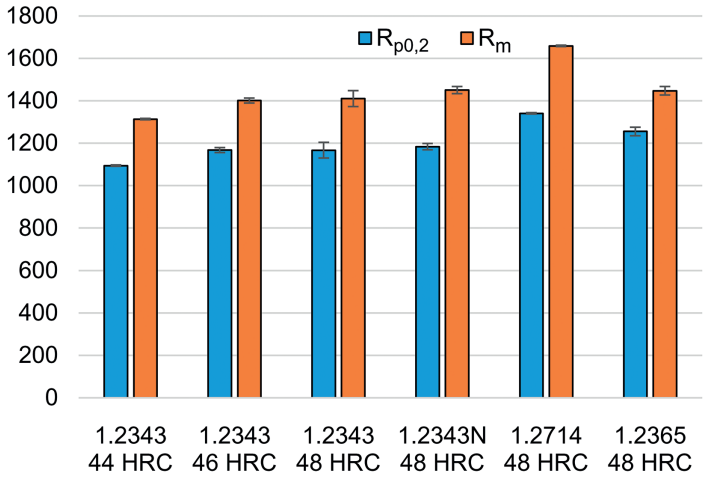


Bild 2: Ermittelte statische mechanische Kennwerte der untersuchten Werkstoffe

men der IMU-Studie 79 „Ermüdungsdaten für Werkzeugstähle der Warmumformung" wurden daher folgende Werkzeugstähle experimentell untersucht:

Werkstoffzustand	Ermüdungskoeffizient σ'_f MPa	Ermüdungsexponent b
1.2343 – 44 HRC	2141.185	-0,092
1.2343 – 46 HRC	3054.452	-0,119
1.2343 – 48 HRC	3098.157	-0,120
1.2343 – 48 HRC, nitriert	1920.270	-0,078
1.2714 – 48 HRC	2629.494	-0,103
1.2365 – 48 HRC	3094.745	-0,110

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einer servohydraulischen Ermüdungsprüfmaschine Instron 8801 bei einer Prüftemperatur von 200 °C durchgeführt. Alle Versuche wurden mit jeweils drei Wiederholungen durchgeführt, für die Berechnung der Lebensdauerkoeffizienten wurden die Mittelwerte verwendet. Die Prüfmaschine und der Versuchsaufbau sind in Bild 1 dargestellt. Die Erwärmung der Proben erfolgte in einem Drei-Zonen-Split-Ofen. Zur Befestigung der Proben wurde ein M8-Adapter verwendet. Die Fixierung erfolgte mittels Kontermuttern, wodurch das Spiel im Gewinde vollständig beseitigt und eine spielfreie sowie definierte Krafteinleitung während der Prüfung gewährleistet war.

Die Zugversuche wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Die ermittelten mechanischen Kennwerte sind in Bild 2 dargestellt. Die Ermüdungsversuche erfolgten unter Spannungssteuerung mit einer Frequenz von 20 Hz und einem Spannungsverhältnis von R = -1. Bei einer möglichen adiabatischen Erwärmung der Proben infolge der zyklischen Belastung wurde die Prüffrequenz reduziert, um einen zusätzlichen Temperatureinfluss auf die ermittelten Ermüdungskennwerte zu vermeiden.

Die Ermüdungsversuche wurden in einem Spannungsamplitudenbereich von 60 bis 95 Prozent der Streckgrenze $R_{p0,2}$ durchgeführt. Bild 3 zeigt die für die untersuchten Werkstoffe ermittelten Wöhlerkurven.

Die aus den Versuchen ermittelten Wöhlerkurven wurden anschließend mithilfe der Basquin-Gleichung approximiert. Aus der Anpassung wurden der Ermüdungsfestigkeitskoeffizient σ'_f und der Ermüdungsfestigkeitsexponent b bestimmt, die in der Tabelle zusammengefasst sind. Diese Werkstoffkennwerte können anschließend für die Ermüdungslebensdauersimulation und -modellierung der untersuchten Werkstoffe verwendet werden.

ANWENDUNGSBEISPIELE

Die ermittelten Ermüdungswerte aus der Studie wurden nach Freigabe des Ausschusses Forschung und Technik des Industrieverbands Massivumformung e. V. in die Datenbank für Werkzeuglebensdauerkennwerte von QForm UK in der Version 12.0.5 eingefügt. Sie stehen damit jedem Anwender ohne weiteren Aufwand direkt zur Verfügung. Die Umformsimulation kann mit elastischen Werkzeugen anhand dieser Daten durchgeführt werden. Dann kann die Werkzeuglebensdauer einfach für jeden Punkt des Werkzeugs direkt innerhalb der Umformsimulationsumgebung berechnet werden.

Für die numerische Untersuchung wurde zunächst der reale Umformprozess thermomechanisch abgebildet. Die dabei ermittelten Temperatur-, Spannungs- und Dehnungsverläufe wurden anschließend für die Ermüdungsbewertung verwendet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Beanspruchung innerhalb des Werkzeugs deutlich heterogen verteilt ist. Während große Bereiche des Werkzeugs nur vergleichsweise geringe Ermüdungsbeanspruchungen erfahren, treten in geometrisch kritischen Bereichen deutlich höhere lokale Belastungen auf.

Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass verschiedene Varianten, das heißt beispielsweise unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe, Änderungen in der Stadienfolge oder verschiedene Armierungskonzepte bereits virtuell miteinander verglichen werden können. Dadurch lässt sich der Prozess hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung optimieren, bevor kosten- und zeitintensive Versuche mit realen Werkzeugen durchgeführt werden.

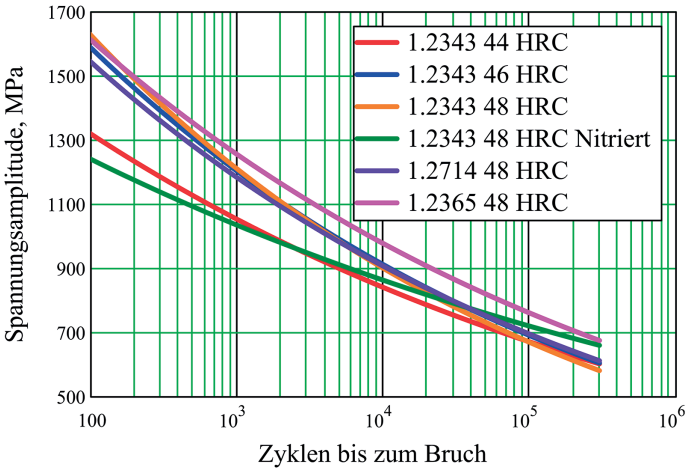


Bild 3: Ermittelte Wöhlerkurven der untersuchten Werkstoffe

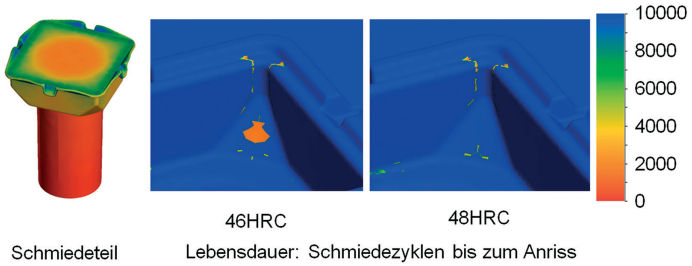


Bild 4: Simulation der Werkzeuglebensdauer mit QForm UK, Bilder: Autoren

Bild 4 zeigt den Vergleich der Werkzeuglebensdauer bei einem industriellen Schmiedevorgang für einen Werkzeugstahl 1.2343 mit 46 HRC und 48 HRC. Während für Werkzeugstahl mit 46 HRC an der kritischen Stelle eine Lebensdauer von nur zirka 1.500 Hüben berechnet wird, verschwindet dieses kritische Feld für den Werkstoff mit 48 HRC. Hier ist deutlich erkennbar, dass bei diesem Prozess die höhere Härte zu einer besseren Lebensdauer des Gesenks führt. So lassen sich schnell verschiedene Werkzeugstähle und Härten miteinander vergleichen. Für den konkreten Fall kann die optimale Auswahl also schon in der Konstruktionsphase bestimmt werden.

NUTZUNGSPOTENZIAL FÜR SCHMIEDEBETRIEBE UND WERKZEUGKONSTRUKTEURE

Die Kombination aus experimenteller Werkstoffcharakterisierung und numerischer Ermüdungssimulation bietet für die industrielle Werkzeugauslegung mehrere Vorteile.
Damit kann ein Unternehmen

- die zu erwartende Lebensdauer von Werkzeugen genauer abschätzen,
- kritische Bereiche bereits während der Konstruktion identifizieren,
- unterschiedliche Werkzeugstähle und Härtezustände miteinander vergleichen,
- den Einfluss einer Oberflächenbehandlung, beispielsweise einer Nitrierung, quantitativ bewerten,
- geometrische Schwachstellen gezielt optimieren,
- eine unnötige Überdimensionierung von Werkzeugen vermeiden und
- Werkzeugwechsel sowie ungeplante Maschinenstillstände reduzieren.

prosimalys GmbH
Messerschmittstrasse 2
86825 Bad Wörishofen
Telefon: +49 173 562 6178
E-Mail: DrRaedt@prosimalys.de
Internet: www.prosimalys.de

Insbesondere die Verwendung experimentell bestimmter, werkstoff- und zustandsspezifischer Ermüdungskennwerte verbessert dabei die Aussagekraft der Lebensdauersimulation.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse zeigen das Potenzial einer kombinierten experimentellen und numerischen Vorgehensweise zur Vorhersage und Verbesserung der Lebensdauer von Warmumformwerkzeugen. Die experimentelle Bestimmung der Ermüdungskennwerte ermöglicht eine realitätsnähere Beschreibung des Werkstoffverhaltens als die Verwendung allgemeiner Kennwerte.

Durch die Nutzung dieser Daten direkt in der Umformsimulation können kritische Werkzeugbereiche identifiziert und hinsichtlich ihrer Ermüdungsbeanspruchung bewertet werden. Die Methodik schafft damit die Grundlage für eine gezielte Optimierung von Werkzeuggeometrie, was zu einer höheren Standzeit des Werkzeugs führt.

Im nächsten Schritt soll die Methodik auf weitere Werkzeugwerkstoffe, Wärmebehandlungszustände und reale Werkzeuggeometrien übertragen und anhand von Produktionsversuchen validiert werden. Ziel ist eine praxisorientierte Lebensdauervorhersage, mit der sich die Standmenge von Warmumformwerkzeugen bereits während der Entwicklungs- und Konstruktionsphase gezielt beeinflussen lässt.

Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg
Fachgebiet Hybride Fertigung
Panta Rhei Gebäude
Konrad-Wachsmann-Allee 17
03046 Cottbus
Telefon: +49 355 69-3156
E-Mail: fg-hybride-fertigung@b-tu.de
Internet: www.b-tu.de