

Einfluss von Materialinhomogenitäten auf das temperatur- und geschwindigkeitsabhängige Festigkeits-, Verformungs- und Versagensverhalten

S. Henschel, L. Krüger



Sicherheitsbauteile können in der Anwendung schlagartigen Beanspruchungen ausgesetzt sein. Sowohl das Fließspannungs- als auch das Versagensverhalten unterscheiden sich oft von dem unter quasistatischer Beanspruchung gemessenen Werkstoffverhalten erheblich. Insbesondere durch Einschlüsse werden bei höherfesten und hochfesten Werkstoffen das Versagensverhalten beeinflusst und die Zähigkeitseigenschaften verschlechtert.

Ziel des Teilprojektes C5 ist die Erforschung der Rolle von Materialinhomogenitäten, besonders der Wirkung von Verunreinigungen in Form von nichtmetallischen Einschlüssen, auf das von der Dehnrates und der Temperatur abhängige Werkstoffverhalten. Die durch unterschiedliche Methoden der Schmelzefiltration hergestellten Werkstoffzustände sollen eingehend hinsichtlich der Wirkung von nichtmetallischen Einschlüssen auf das Festigkeits-, Verformungs- und Zähigkeitsverhalten untersucht und das Potential zur Verbesserung der Werkstoffqualitäten durch innovative Methoden der Schmelzefiltration aufgezeigt werden.

Im Folgenden soll vor allem die Auswirkung der Einschlusstypen Al_2O_3 und MnS auf die Zähigkeitseigenschaften des hochfesten Vergütungsstahls G42CrMo4+QT betrachtet werden. Nichtmetallische Einschlüsse, die nicht filtriert (exogen) bzw. während der Abkühlung und Erstarrung gebildet worden sind (endogen), liegen innerhalb der metallischen Matrix vor. Es zeigte sich, dass es zur Agglomeration von endogenen Al_2O_3 -Teilchen kommt. Die einzelnen Bestandteile dieser Agglomerate sind sehr klein (wenige μm). Jedoch können Agglomeratgrößen bis über 100 μm auftreten, die bei mechanischer Beanspruchung als großes Teilchen wirken.

Die negative Auswirkung von nichtmetallischen Einschlüssen zeigt sich besonders anhand des Ausmaßes der Rissabstumpfung bevor es zur Rissinitierung kommt. Hohlrumbildung, Hohlraumwachstum und schließlich Hohlraumkoaleszenz sind dabei die dominierenden Schädigungsmechanismen. Die Hohlrumbildung kann dabei durch Ablösen des nichtmetallischen Einschlusses von der metallischen Matrix bzw. durch Brechen des Einschlusses eingeleitet werden. Während Al_2O_3 -Einschlüsse aufgrund ihrer relativ geringen Grenzflächenfestigkeit zur metallischen Matrix abgelöst werden, konnte im Fall der MnS-Einschlüsse mehrfach der Teilchenbruch nachgewiesen werden. Al_2O_3 -Einschlüsse können als Keimstellen für MnS-Einschlüsse wirken. Spannungskonzentrationsstellen in einem solchen mehrphasigen nichtmetallischen Einschluss führen ebenso zum Brechen des Teilchens.

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung von Größe und Anordnung der nichtmetallischen Einschlüsse treten sowohl stark als auch kaum abgestumpfte Bereiche entlang der Ermüdungsrissfront auf. Durch langgestreckte Einschlüsse bzw. Einschlussketten vor der

Risspitze wurden zudem Rissablenkungen nachgewiesen, die den Effekt des verminderten Widerstands gegen Risseinleitung abmildern können.

Der untersuchte Vergütungsstahl weist im Temperaturbereich -40 °C bis 20 °C eine geringe Temperaturabhängigkeit des Widerstandes gegen Risseinleitung auf, siehe Abb. 1. Dies wird auf die selbst bei -40 °C vorliegende stabile Rissausbreitung infolge des duktilen Versagens zurückgeführt. Eine weitere Verringerung der Temperatur auf -60 °C und eine Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit führt zur Absenkung des Widerstands gegen Rissinitiierung aufgrund von lokal ausgebildetem Spaltbruch.

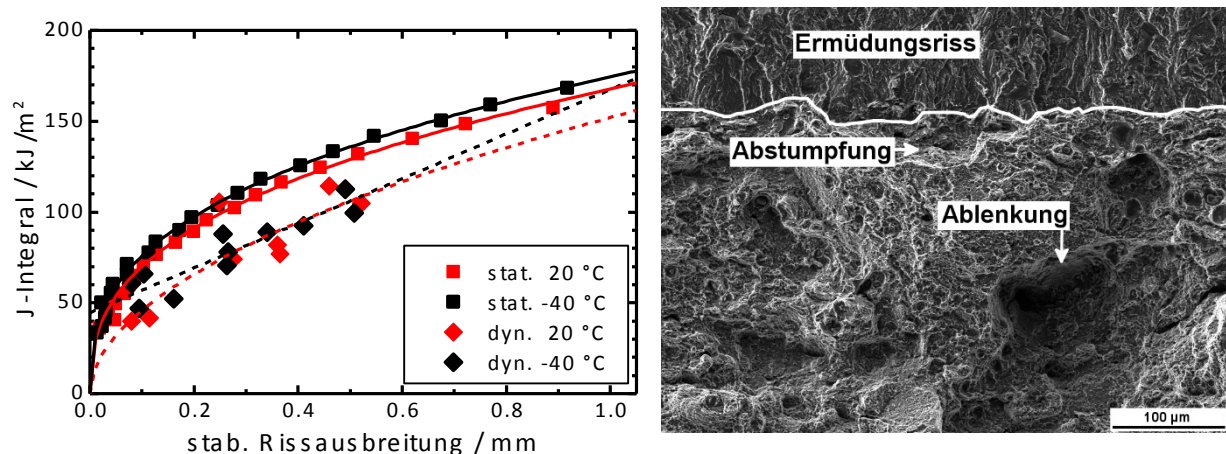


Abb. 1: Links: Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der Risswiderstandskurve eines mit Al_2C verunreinigten G42CrMo4. Statische Versuche: Einprobentechnik (Teilentlastungsverfahren), Dynamische Versuche: Mehrprobentechnik (Low-Blow), $dK/dt = 10^5\text{ MPa m}^{0.5}\text{ s}^{-1}$. Rechts: starke Rissabstumpfung in Bereichen ohne nichtmetallische Einschlüsse; Rissfrontablenkung durch Einschlussanhäufungen (dynamisch, -40 °C).

Die Rissinitiierung bei tiefen Temperaturen und dynamischer Beanspruchung im instrumentierten Pendelschlagwerk konnte dabei zusätzlich mittels einer lasergestützten Durchbiegungsmessung ermittelt werden. Hierbei wird die Steifigkeitsänderung bei Rissinitiierung und die damit verbundene Änderung des Schwingungsverhaltens des Systems genutzt, um den Zeitpunkt der Rissinitiierung zu bestimmen.

Ein neu entwickelter Split-Hopkinson-Pressure-Bar-Versuchsstand wurde genutzt, um das Zähigkeitsverhalten bei sehr hohen Raten des Spannungsintensitätsfaktors zu bestimmen. Trotz der sehr kurzen Beanspruchungszeit von weniger als $100\text{ }\mu\text{s}$ bis zur Rissinitiierung und der damit verbundenen Trägheit des Werkstoffs gegen plastische Verformung ist kein Wechsel des Verformungsmechanismus feststellbar. Die Risseinleitung und -ausbreitung beruhen somit im untersuchten Stahl auch bei einer Erhöhung von dK/dt auf ca. $10^6\text{ MPa m}^{0.5}\text{ s}^{-1}$ jeweils auf dem duktilen Bruch der metallischen Matrix.