

Rissinitiierungs- und -ausbreitungseigenschaften von Pipelinestählen für den Transport wasserstoffhaltiger Gemische

Kurzzusammenfassung

Experimentelle Charakterisierung eines Pipelinestahls unter Wasserstoffeinfluss

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden Zugversuche an verschiedenen Probengeometrien eines Pipelinestahls API 5L X70 unter quasi-statischen Bedingungen durchgeführt. In zwei Versuchsreihen wurde der Einfluss von Wasserstoff und des Spannungszustandes auf das plastische Verformungs- und Schädigungsverhalten mit ex-situ und in-situ Beladung der Proben untersucht. Dabei konnte bei Ersterem ein Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften durch den HELP-Mechanismus und einen „Pinning“-Effekt festgestellt werden. Bei der in-situ Beladung zeigte sich eine stärkere Ausprägung der Versprödung, welche auf HELP, HEDE, AIDE-Mechanismen zurückzuführen sind. Auf Basis der experimentellen Daten erfolgte die Kalibrierung von Materialmodellen zur Abbildung des plastischen Verformungs- und Schädigungsverhaltens sowie von Mechanismen der Wasserstoffversprödung (Hydrogen Embrittlement, HE) in Abhängigkeit von der Wasserstoffkonzentration im Stahlgefüge.

Experimentelle Charakterisierung eines Pipelinestahls unter Temperatureinfluss

In einem Temperaturbereich von +20°C bis -120°C fanden weitere quasi-statische Zugversuche statt, um den Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften des Pipelinestahls API 5L X70 quantifizieren zu können. Die Verwendung von verschiedenen Probengeometrien ermöglichte es, das Schädigungsverhalten in einem breiten Bereich an Spannungszuständen zu erfassen. Die Kalibrierung von Materialmodellen konnte im Anschluss anhand der experimentellen Daten durchgeführt werden.

UOE-Umformprozess von Großrohren

Weiterhin wurden numerische Verfahren entwickelt, um verschiedene Effekte modellieren zu können, die das Szenario eines langlaufenden duktilen Risses (Running Ductile Fracture, RDF) betreffen. So konnte ein Modellierungsansatz die aus dem UOE-Umformprozess zur Herstellung von längsnahtgeschweißten Großrohren, resultierenden Verformungen und Eigenspannungen bei Verwendung eines kombiniert isotropen-kinematischen Verfestigungsmodells in der Simulation des RDF-Szenarios Berücksichtigung finden. Der Einfluss der Verformungshistorie auf das Rissausbreitungsverhalten zeigte sich deutlicher ausgeprägt als die Effekte der kinematischen Verfestigung.

Erdhinterfüllung bei Onshore-Pipelines

Als weiterer Aspekt war die Modellierung der Erdhinterfüllung bei Onshore-Pipelines Gegenstand numerischer Untersuchungen. Untersucht wurden die räumliche Diskretisierung der Erdfläche sowie das geomechanische Verhalten des Erdreichs. Die Variation der

Modellparameter zeigte nur eine geringe Sensitivität hinsichtlich des duktilen Rissausbreitungs- und -arrestverhaltens.

Dekompressionsverhalten von wasserstoffhaltigen Gasgemischen

In numerischen Simulationen auf Bauteilebene konnte das Dekompressionsverhalten von Erdgas-Wasserstoffgemischen modelliert und untersucht werden. So zeigte sich eine Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Erdgases (Anteil an schwereren Kohlenwasserstoffen Methan, Ethan, Propan). Durch die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgasgemischen wird die Dekompressionswellengeschwindigkeit signifikant erhöht, wodurch sich ein wesentlich geringeres Druckniveau im Bereich vor der Risspitze einstellt. Infolge dieses weniger kritischen Belastungszustandes wird das Arrestverhalten beim duktilen Rissausbreitungsszenario positiv beeinflusst.

Numerische Modellierung des Strukturverhaltens unter Wasserstoffeinfluss

Zur vollumfänglichen Berücksichtigung des Einflusses von Wasserstoff auf das Strukturverhalten wurde ein ungekoppelter Modellierungsansatz entwickelt. Mit diesem kann im ersten Schritt die spezifischen Diffusionsvorgänge im Pipelinestahl modelliert werden. Die daraus resultierende Verteilung der Wasserstoffkonzentration im Metallgitter kann auf ein Strukturmodell übertragen und das plastische Verformungs- und Versagensverhalten unter Belastung modelliert werden. Die Berücksichtigung von Mechanismen der Wasserstoffversprödung (HE) auf das Versagensverhalten erfolgt mit einem phänomenologischen Ansatz, bei welchem in Abhängigkeit von der Wasserstoffkonzentration im Metallgitter die plastische Vergleichsdehnung bei Versagen reduziert wird. Durch die Anwendung des Modellierungsansatzes beim RDF-Szenario konnte der Einfluss von Wasserstoff auf das Rissausbreitungs- und -arrestverhalten untersucht werden. Bei variierendem Wasserstoffanteil, Zähigkeiten des Pipelinestahls und Sensitivität der HE-Mechanismen konnte trotz einer deutlichen Reduzierung der Zähigkeit (<~50%) infolge der hohen Dekompressionsgeschwindigkeiten von Wasserstoff Rissarrest auftreten (vgl. Abbildung 1). Dies resultiert in einem wesentlich geringeren Druckniveau im Bereich der Risspitze um bis zu $\Delta p = 2.0 \text{ MPa}$ (vgl. Abbildung 2). Im Kontext der erzielten Ergebnisse zeigte sich der Transport von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Gemischen als wenig kritisch in Bezug auf das RDF-Szenario. Vorausgesetzt ist dabei ein lediglich moderater Verlust an Zähigkeit durch HE-Mechanismen.

Entwicklung eines Surrogat-Modells

Mit den durchgeführten numerischen Untersuchungen konnte die Optimierung des FSI-Modells erreicht und dessen Anwendungsbereich erweitert werden. Dieses fand schließlich in einer umfangreichen Parameter-

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

studie in Bezug auf das RDF-Szenario Verwendung, in welcher kritische Belastungsszenarien und Faktoren mit signifikantem Einfluss identifiziert werden konnten. Weiterhin gelang es ein Surrogat-Modell unter Verwendung von Methoden des maschinellen Lernens zu entwickeln. Die dabei generierten Daten wurden verwendet, um künstliche neuronale Netze (ANN) zu trainieren. Mit diesen ist es möglich für ein Betriebsszenario das duktile Rissausbreitungs- und -arrestverhalten von Onshore-Pipelines in Bezug auf das Auftreten von Rissarrest und die korrespondierende

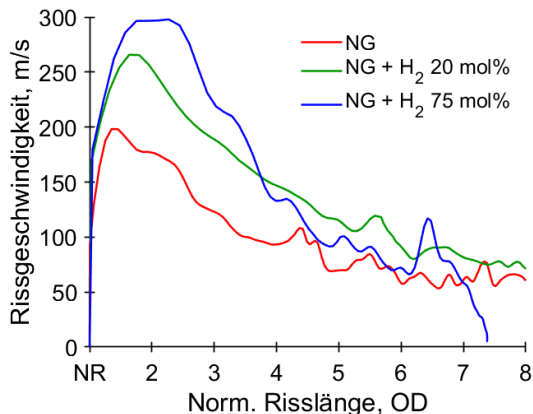


Abbildung 1: Einfluss des Volumenanteils von Wasserstoff (20 mol%, 75 mol%) in einem Erdgasgemisch (NG) auf das Rissausbreitungsverhalten bei der numerischen Simulation des RDF-Szenarios im Bezug auf die Rissgeschwindigkeit.

Rissarrestlänge für einen definierten Anwendungsbereich vorherzusagen. Damit besteht die Möglichkeit die Mindestanforderungen an den Pipeline Stahl bezüglich der Zähigkeit zu ermitteln, um so den Nachweis von Rissarrest führen zu können (vgl. Abbildungen 3, 4).

Der Abschlussbericht zu diesem Forschungsvorhaben wird im Rahmen der Veröffentlichungsreihe der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) publiziert und steht der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung.

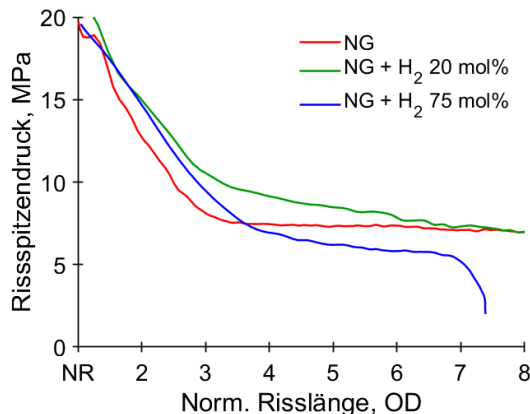


Abbildung 2: Verlauf des Innendrucks im Bereich der Risspitze mit zunehmender Rissausbreitung bei Berücksichtigung eines Erdgasgemisches (NG) und mit Beimischung von Wasserstoff (20 mol%, 75 mol%) während der Simulation des RDF-Szenarios.

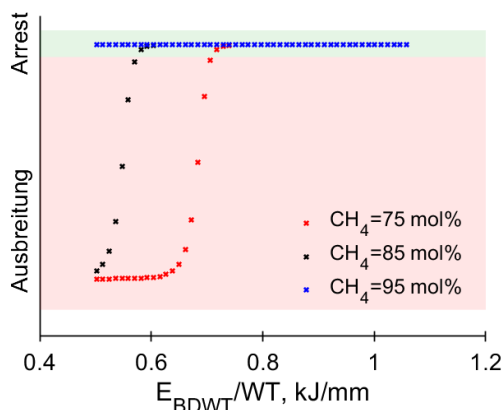


Abbildung 3: Vorhersage des trainierten ANN zum Rissverhalten in Abhängigkeit der Zähigkeit des Pipeline Stahls für drei Erdgasgemische mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe C_xH_x. Die Zähigkeit definiert sich aus der auf die Wanddicke normierten Energie des Fallgewichtsversuches nach Battelle (BDWT).

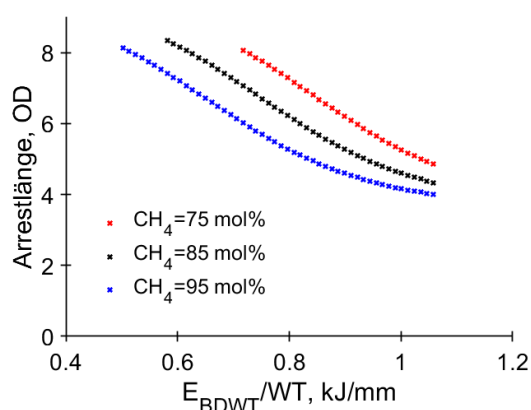


Abbildung 4: Vorhersage des trainierten ANN zur auftretenden Rissarrestlänge in Abhängigkeit der Zähigkeit des Pipeline Stahls für drei Erdgasgemische mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe C_xH_x. Die Zähigkeit definiert sich aus der auf die Wanddicke normierten Energie des Fallgewichtsversuches nach Battelle (BDWT).

Förderhinweis

Das Projekt "Rissinitiations- und -ausbreitungseigenschaften von Pipeline Stählen für den Transport wasserstoffhaltiger Gemische" wurde im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dieses IGF-Vorhaben 01IF22178N / FOSTA-P-1547 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, wurde an der RWTH Aachen und OTH Regensburg durchgeführt.