

Nanoporöse Materialien für die Energietechnik: Von der Synthese bis zur Degradation unter extremen Bedingungen

C. Mitterer, N. Kostoglou, S. Zeiler, V. Maier-Kiener

Department Werkstoffwissenschaft, Montanuniversität Leoben

Aus erneuerbaren Energiequellen gewonnener Wasserstoff stellt den idealen CO₂-neutralen Energieträger dar; dabei ist jedoch seine Speicherung aufgrund der geringen Gasdichte eine der letzten großen Herausforderungen auf dem Weg zu einer weltweiten nachhaltigen Energieversorgung. Im Vergleich zur üblichen Verflüssigung bei 20 K oder zur Hochdruckspeicherung von gasförmigem Wasserstoff bei Drücken von 350 bis 700 bar stellt die Adsorption in nanoporösen Kohlenstoffen bei moderaten Drücken (einige 10 bar) und Temperaturen (z.B. 77 K) aufgrund der vollständigen Reversibilität und schnellen Kinetik der Be- und Entladung eine vielversprechende Möglichkeit dar [1]. Die dazu entwickelten aktivierten nanoporösen Kohlenstoffe mit spezifischen Oberflächen von über 2000 m²/g und Porengrößen von unter 1 nm erlauben es jetzt schon, die vom U.S. Department of Energy geforderten gravimetrischen Speicherkapazitäten von 5,5 Gew.% für 2025 und 6,5 Gew.% als ultimatives Ziel zu erreichen [2]. Im Rahmen dieses Beitrages werden die Möglichkeiten der Synthese, Aktivierung und Funktionalisierung nanoporöser Kohlenstoffe sowie die Relationen zwischen ihrer Porosität und der erzielbaren Speicherkapazität erläutert. Schlussendlich wird auch auf die entwickelten Methoden zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der nanoporösen Kohlenstoffe eingegangen, womit die Neigung zur Degradation unter den extremen Einsatzbedingungen, also bei zyklischer Be- und Entladung mit Wasserstoff zwischen 0 und 50 bar bei 77 K, bewertet werden kann. Zusammenfassend beleuchtet dieser Vortrag die erzielten Fortschritte und die existierenden Herausforderungen bei der Entwicklung innovativer Materialien zur effizienten und nachhaltigen Speicherung von Wasserstoff.

1. N. Kostoglou, C. Koczwara, C. Prehal, V. Terziyska, B. Babic, B. Matovic, G. Constantinides, C. Tampaxis, G. Charalambopoulou, T. Steriotis, S. Hinder, M. Baker, K. Polychronopoulou, C. Doumanidis, O. Paris, C. Mitterer, C. Rebholz, Nanoporous activated carbon cloth as a versatile material for hydrogen adsorption, selective gas separation and electrochemical energy storage, *Nano Energy* 40 (2017) 49-64.
2. S. Stock, N. Kostoglou, J. Selinger, S. Spirk, C. Tampaxis, G. Charalambopoulou, T. Steriotis, C. Rebholz, C. Mitterer, O. Paris, Coffee waste-derived nanoporous carbons for hydrogen storage, *ACS Applied Energy Materials* 5(9) (2022) 10915–10926.

Einfluss der Mikrostruktur auf die Eigenschaften von Thermoelektrika

C. Scheu¹, R. Bueno Villoro¹, L. Abdellaoui¹, G. J. Snyder², S. Zhang¹

¹ Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien GmbH, Düsseldorf, Deutschland

² Materials Science & Engineering, Northwestern University, Evanston, USA

Thermoelektrische Materialien können einen Beitrag zum Sektor der erneuerbaren Energien leisten, indem sie Strom aus Abwärme erzeugen. Sie sollten eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen, während gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit niedrig sein sollte. Darüber hinaus sollten sie eine gewisse mechanische Festigkeit aufweisen, damit thermoelektrische Module hergestellt werden können. Um die Leistungszahl zT von Thermoelektrika zu erhöhen, wird oft das Defektengineering eingesetzt, wobei neben Punktdefekte vor allem Versetzungen und Korngrenzen in das Gefüge eingebracht werden, um Phononen zu streuen und somit die Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren. Im Fall von PbTe, welches eine extrem hohe Leistungszahl besitzt, führt jedoch eine hohe Versetzungsdichte und die Immobilisierung der Versetzungen durch Dotierungselemente, zum Verspröden [1]. Bei Na dotiertem PbTe konnte ein paralleles Versetzungsnetzwerk sowie Cottrell-Atmosphären mittels Rastertransmissionselektronenmikroskopie und Atomsondentomographie nachgewiesen werden, welche sehr effektiv Phononen streuen [2]. Korngrenzen können ebenfalls Phononen effizient streuen, verringern aber oft die elektrische Leitfähigkeit. Durch Korngrenzengineering lässt sich dies verhindern. So konnte an Ti(Co,Fe)Sb-Halb-Heusler-Legierungen eine signifikante Fe-Segregation und Co-Verarmung an den Korngrenzen mittels Atomsondentomographie und energiedispersiver Röntgenspektroskopie im Rastertransmissionselektronenmikroskop detektiert werden [3]. Atomsäulenaufgelöste Aufnahmen zeigen, dass sich eine Korngrenzenphase („complexion“) bildet, die als schneller Ladungsträgerpfad dient. Die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften werden derzeit untersucht.

[1] J. P. Male, L. Abdellaoui, Y. Yu, S. Zhang, N. Pieczulewski, O. Cojocar-Mirédin, C. Scheu, G. J. Snyder, *Advanced Functional Materials*, 2021, 2108006.

[2] L. Abdellaoui, Z. Chen, Y. Yu, T. Luo, R. Hanus, T. Schwarz, R. Bueno Villoro, O. Cojocar-Mirédin, G. J. Snyder, D. Raabe, Y. Pei, C. Scheu, S. Zhang, *Advanced Functional Materials*, 2021, 2101214.

[3] R. Bueno Villoro, M. Wood, T. Luo, H. Bishara, L. Abdellaoui, D. Zavanelli, B. Gault, G. J. Snyder, C. Scheu, S. Zhang, *Acta Materialia*, 2023, 118816.

Über kreislauffähige Werkstoffsysteme - und warum wir diese auch in den Weltraum schicken

F. Mücklich (V), D. Müller, A. Ahmed, S. Lößlein, D. Britz

Universität des Saarlandes, Material Engineering Center Saarland (MECS),
Campus, Geb. D33, 66123 Saarbrücken

Die belebte Natur zeigt uns, wie mit geringer chemischer Diversität, aber optimierten mikrostrukturierten Oberflächen vielseitige Funktionalitäten realisiert werden. Davon sind wir mit unseren technischen Werkstoffen weit entfernt. Im Themennetzwerk Materialwissenschaft und Werkstofftechnik der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften, acatech, haben wir deshalb „kreislauffähige Werkstoffsysteme für technologische Resilienz und geopolitische Unabhängigkeit“ für die deutsche Forschungsförderung thematisiert. In diesem Sinne bauen wir in der Universität der Großregion (UniGR) auch das European Center for Circular Economy of Metals and Materials (CIRKLA) auf. Unsere ganz eigene Innovation zur bestmöglichen Kreislauffähigkeit technischer Werkstoffoberflächen sind biomimetisch funktionalisierte Oberflächen de facto „ohne Chemie“ als mikrotopographische „Meta-Oberflächen“. Diese werden berührungslos mit hoher Effizienz realisiert durch das Direct Laser Interference Patterning (DLIP) mit gepulsten ns-, ps- und fs-Lasern. Dabei gelingen durch jeweils exakt auf die Werkstoffinteraktion optimierte mikroskopisch periodische Muster z.B. die Reduzierung der mechanischen Reibung, des elektrischen Kontaktwiderstandes, die Benetzungssteuerung oder das Design antimikrobieller Oberflächen, um nur einige Beispiele zu nennen. Matthias Maurer, der ESA-Astronaut, hat sein Studium der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik „zufällig“ am Institut des Referenten absolviert und konnte während seiner sechs Monate auf der ISS zahlreiche unserer Experimente mit unterschiedlichen DLIP-Oberflächen auch unter vielfältiger Variation der Klimabedingungen sowie der Gravitation für den Schutz gegen kritische Biofilmbildung in technischen Systemen und auch für die Gesundheit der Astronauten auf der ISS, auf dem Mond und auf dem Mars vorantreiben. Unser StartUp Surfuction baut all diese Funktionalitäten seitdem sehr erfolgreich immer weiter aus.

D.W. Mueller et al. (2024): **Frontiers in Materials** - doi.org/10.3389/fmats.2024.1397937

A.S. Ahmed et al. (2024): **Appl. Surface Sci.** - doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160338

S.M. Loesslein et al. (2024): **J. Colloid & Interface Sci.** – doi.org/10.1016/j.jcis.2024.04.212

S.M. Loesslein et al. (2023): **Langmuir** – doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01060

A.S. Ahmed et al. (2023): **ACS Appl. Mater. Interfaces** – doi.org/10.1021/acsami.3c04801

D.W. Mueller et al. (2021): **Adv. Mater. Interfaces** – doi.org/ 10.1002/admi.202001656

D.W. Mueller et al. (2020): **Scientific Reports** – doi.org/10.1038/s41598-020-60592-4

Mikromechanische Modellierung der Materialermüdung vielkristalliner Metalle

A. Hartmaier

ICAMS, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, Deutschland

Die mikromechanische Modellierung ermöglicht die Untersuchung von Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen vielkristalliner Werkstoffe im Rahmen numerischer Simulationen. Dazu wird ein möglichst realistisches Computermodell der Mikrostruktur als repräsentatives Volumenelement (RVE) generiert. Dieses RVE kann dann mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode oder anderer numerischer Verfahren verschiedenen thermo-mechanischen Belastungsszenarien ausgesetzt und das Verhalten des Werkstoffs unter diesen Bedingungen studiert werden. Dies erlaubt die Untersuchung des Wechselspiels verschiedener Verformungs- und Versagensmechanismen auf der Basis fundamentaler Modellierungsmethoden. Der Vergleich der Ergebnisse von mikromechanischer Modellierung und experimenteller Untersuchung gestattet es schließlich, allgemeine Zusammenhänge und Wirkmechanismen im Werkstoffverhalten zu identifizieren. In diesem Vortrag wird die Anwendung dieser mikromechanischen Methode auf das Ermüdungsverhalten metallischer Legierungen exemplarisch vorgestellt. Dabei werden Ergebnisse für die isotherme Ermüdung bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen sowie für thermomechanische Ermüdung präsentiert.

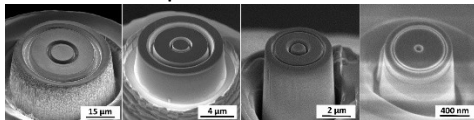
Nanoprägen von metallischen Oberflächen: Längenskalen, Fließprozesse und funktionale Oberflächeneigenschaften

L. Frohnapfel, P. Braun, K. Durst

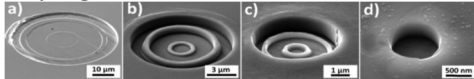
Physikalische Metallkunde, TU Darmstadt, 64287 Darmstadt

Nanoprägen ist ein neuer Ansatz, um robuste Oberflächenstrukturen auf Metallen auf verschiedenen Längenskalen zu erzeugen [1,3]. Die Form und Größe der gebildeten Strukturen hängt dabei von den Abmessungen der Prägestrukturen, sowie vom mechanischen Verhalten des geprägten Materials und dessen Mikrostruktur ab. Zur Charakterisierung der Fließvorgänge wurde ein Multi-Längenskalen-Ansatz mit unterschiedlichen Werkzeuggeometrien und Korngrößen (nanokristallin bis grobkörnig) verwendet [2,3]. Dazu wurden Diamantprägewerkzeuge mit Durchmessern zwischen 1 und 50 μm und Kavitäten mit Breiten zwischen 20 nm und 3 μm in einem Nanoindenter verwendet, um das lokalisierte plastische Fließen zu untersuchen. Dabei konnte gezeigt werden, dass nanokristalline und kaltverformte Materialien ein besonders gutes Abformverhalten aufweisen [3].

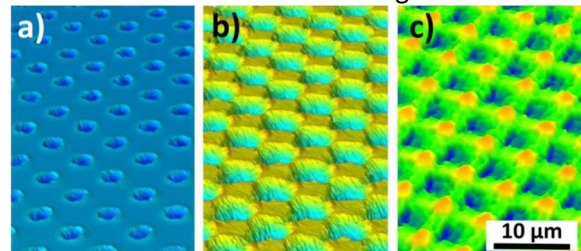
Diamantstempel



Geprägte Strukturen



Oberflächenstrukturen nach Prägen mit WC-Co



Zum Hochskalieren der geprägten Oberflächen wurde WC-Co Hartmetallstempel mittels Direct Laser Interference Patterning (DLIP) strukturiert und als Prägewerkzeug für unterschiedliche Metallsubstrate verwendet [4]. Dabei zeigt sich, dass plastische Fließprozesse beim Prägen von nanokristallinen Legierungen die Replikation des DLIP-Werkzeugmusters bis hin zu nanoskaligen Strukturen ermöglicht. Die geprägten Strukturen sind robust und weisen nach Alterung hydrophobes Benetzungsverhalten auf. In weiteren Arbeiten sollen weitere Werkstoffe strukturiert und neben dem Benetzungsverhalten auch die tribologischen Eigenschaften untersucht werden.

References:

[4] Braun, Paul; Grützmaker, Philipp; Frohnapfel, Leonie; Mücklich, Frank; Durst, Karsten; ,Nanoscale patterning of metallic surfaces with laser patterned tools using a nanoimprinting approach, Applied Surface Science,613,,155786,2023

[3] Braun, Paul; Durst, Karsten; ,A multiple length-scales Nanoimprinting approach on Nanocrystalline and strongly deformed CuZn30 alloys,Scientific Reports,10,1,1-11,2020

[2] Bruder, Enrico; Braun, Paul; ur Rehman, Hamad; Marceau, Ross KW; Taylor, Adam S; Pippin, Reinhard; Durst, Karsten; ,Influence of solute effects on the saturation grain size and rate sensitivity in Cu-X alloys,Scripta Materialia,144,,5-8,2018,

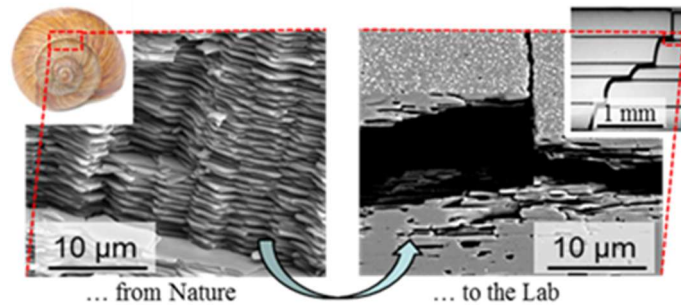
[1] Ast, J; Durst, K; ,Nanoforming behaviour and microstructural evolution during nanoimprinting of ultrafine-grained and nanocrystalline metals,Materials Science and Engineering: A,568,,68-75,2013

Einstellung des Gefüges zur Optimierung der Bruchzähigkeit von Hochleistungskeramiken

R. Bermejo

Department Werkstoffwissenschaft, Montanuniversität Leoben, Österreich

Ein kritisches Problem, das die Funktionalität und Zuverlässigkeit keramischer Systeme beeinträchtigt, ist die Entstehung und unkontrollierte Ausbreitung von Rissen. Bio-inspirierte Designkonzepte in der aktuellen Keramikforschung haben sich als erfolgreich erwiesen, um hochzuverlässige keramische Materialien mit verbesserter Bruchzähigkeit zu entwickeln. Die Nutzung maßgeschneiderter Eigenspannungen in eingebetteten Schichten kann als effektive Barriere gegen die Ausbreitung von Rissen von Oberflächenfehlern dienen und so eine „Schadenstoleranz“ bieten. Darüber hinaus kann durch die Ausrichtung (Texturierung) des Gefüges – ähnlich der organisierten Mikrostruktur in natürlichen Systemen wie Perlmutter – die Rissausbreitung innerhalb der texturierten keramischen Schichten kontrolliert werden [1].



In diesem Beitrag wird das Potenzial eines 3D-Druck Prozesses (s.g. Lithography-based Ceramic Manufacturing, LCM) vorgestellt, um mehrphasige Schichtarchitekturen zu gestalten, die zur Herstellung zukünftiger 3D-Keramikkomponenten mit verbesserter Schadensresistenz beitragen können. Es werden mehrere Beispiele präsentiert: (i) Ein Multi-Material-Ansatz, in welchem Alumina-Zirkonia-Schichten zwischen reinen Alumina-Schichten eingebettet sind, was zu einer charakteristischen Festigkeit von über 1 GPa im Multi-Material-System führt, (ii) 3D-gedrucktes, hochtexturiertes Alumina, hergestellt durch die Kombination der LCM-Technologie mit Templated Grain Growth (TGG) während des Sinterns, um eine höhere Zähigkeit bei gleichzeitiger Erhaltung der Festigkeit zu erreichen [2], und (iii) 3D-gedruckte Komponenten mit außergewöhnlicher Thermoschockbeständigkeit, die durch eingebettete Druckschichten erzielt wird [3].

[1] R. Bermejo: "Toward seashells under stress": Bioinspired concepts to design tough layered ceramic composites", *Journal of the European Ceramic Society*, 37, p. 3823-3839 (2017). DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.041>

[2] A.-K. Hofer, A. Kocjan, R. Bermejo: "High-strength lithography-based additive manufacturing of ceramic components with rapid sintering", *Additive Manufacturing* 59, p. 103141 (2022). DOI <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103141>

[3] Josef Schlacher, Sebastian Geier, Martin Schwentenwein, Raul Bermejo: "Towards 3D-printed alumina-based multi-material components with enhanced thermal shock resistance", *Journal of the European Ceramic Society*, 44, p. 2294-2303 (2024). DOI <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.11.009>

Mechanische und funktionale Eigenschaften heterogener metallischer Nanolaminare

M. Göken, M. Ghanem, M. Kuglstatter, P. Pohl, H.W. Höppel

Department Werkstoffwissenschaften, Lehrstuhl I
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

Nanoskalige lamellare metallische Verbundwerkstoffe können sehr effektiv mit dem akkumulativen Walzprozess (ARB) hergestellt werden. Es lassen sich dabei minimale Lagendicken von nur wenigen Nanometern erreichen und solche lamellaren heterogenen Werkstoffen erzielen bemerkenswerte mechanische und funktionale (Leitfähigkeit) Eigenschaften. Bei der Kombination von unmischbaren Elementen wie Cu/Fe oder Cu/Nb im ARB-Prozess weisen diese heterogenen Schichtsysteme eine für Nanowerkstoffe sehr ungewöhnlich hohe thermische Stabilität auf. Im Vortrag wird das dehnratenabhängige Verformungsverhalten dieser nanolamellaren Verbundwerkstoffe diskutiert und insbesondere auf das Erreichen einer optimalen Lagendicke bzgl. Festigkeit und Leitfähigkeit eingegangen. Oftmals zeigen die lamellaren Metallverbunde eine Festigkeit die deutlich höher ist als einer einfachen Mischungsregel entsprechend, was nur mit einem zusätzlichen Härtungsbeitrag der Grenzflächen verstanden werden kann. Mit zyklischen mikroplastischen Verformungsversuchen kann der Beitrag der vielen Grenzflächen zur Festigkeit dieser Metallverbunde bestimmt werden und diese Versuche bieten somit wertvolle Einblicke in die Verformungsmechanismen, die hinter der hohen Kombination aus Festigkeit und Duktilität stehen.



Abbildung: Cu-Nb Laminat nach 10 Walzpässen

Referenzen

- [1] Hierarchical and heterogeneous multiphase metallic nanomaterials and laminates, A Misra, M Göken, NA Mara, JJ Beyerlein, MRS Bulletin 46 (3), 2021, 236-243
- [2] Adapting Conductivity and Mechanical Properties through Layer Thickness Variation in Copper Niobium Laminated Metallic Composites; M Kuglstatter, M Nitschky, A Hartmann, F Kümmel, J Fecher, P Felfer, H.W. Höppel, M. Göken, Advanced Engineering Materials 26 (2024) 2400266
- [3] Quantifying Co-Deformation Effects in Metallic Laminates by Loading–Unloading–Reloading Tensile Tests, PM Pohl, M Kuglstatter, M Göken, HW Höppel, Metals 13 (2023) 1049

Fraktographischer Nachweis der wasserstoffinduzierten Rissbildung

M. Pohl, J. Jürgensen

Ruhr-Universität Bochum, Werkstoffprüfung

In einer Übersicht werden die in der Technik am häufigsten auftretenden Mechanismen der Wasserstoffaufnahme metallischer Komponenten dargestellt, die zur „verzögerten Rissbildung“ führen können /1/. Diese Wasserstoffeffekte können die Verformungs-fähigkeit reduzieren und bei der „Wasserstoffversprödung“ zum völligen Verlust der Duktilität führen. Die dabei anzuwendende Wasserstoffanalytik, insbesondere für den „diffusiblen Wasserstoff“ und die speziellen Verfahren der mechanischen Werkstoff-prüfung werden erörtert.

Der Hauptteil des Beitrags befasst sich mit dem fraktographischen Nachweis der Wirkung des Wasserstoffs bei der Bruchbildung und den typischen Erscheinungs-formen /2/. Die behandelten Werkstoffgruppen sind Kohlenstoffstähle, Gusseisen, Sinterwerkstoffe, Austenitische Stähle, Duplex-Stähle und Nichteisenmetalle.

/1/ M. Pohl
Hydrogen-Induced Delayed Cracking
Prak. Met. 56 (2019), S. 556 – 566

/2/ M. Pohl
Failure Analysis to Clarify Unambiguous Hydrogen Fracturing in Steels
Metallography, Microstructure and Analysis, Vol. 6, No 4 (2017), p. 282 – 288

Über die Entstehung und das Wachstum von Poren in Dualphasenstählen: Einblicke durch mikromechanische Experimente

**A. Medina¹, K. Prikoszovich¹, P. A. Gruber¹, S. Lee¹,
R. Pippan² Ch. Kirchlechner¹**

¹ Institut für Angewandte Materialien, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe,
Deutschland

² Erich-Schmid-Institut der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Leoben,
Österreich

Dualphasenstähle (DP) bestehen aus einer weichen Ferritmatrix und harten Martensitinseln. Sie werden aufgrund ihrer vorteilhaften Kombination aus hoher Festigkeit und guter Duktilität häufig in der Automobilindustrie eingesetzt. Während der Umformung kann es in DP-Stählen zur Umformschädigung – d. h. zur Bildung und Wachstum von Poren, die typischerweise durch Grenzflächendekohäsion und Martensitbruch entstehen – kommen. Derzeit kann die Schädigung eines verformten Bauteils nicht quantitativ vorhergesagt werden, weshalb in der Praxis Sicherheitsfaktoren verwendet werden, um die erforderlichen mechanischen Eigenschaften und die Lebensdauer des Bauteils zu gewährleisten. Der von der DFG geförderte Sonderforschungsbereich TRR188 zielt daher auf eine quantitative Charakterisierung, Vorhersage und Kontrolle der duktilen Schädigung während der Umformung ab.

Während die Porennukleation durch die harten Martensitinseln in der weichen Ferritmatrix dominiert wird, wird das Schädigungswachstum in der Regel durch die lokale Verfestigung des Ferrits unterdrückt. Um die Mechanismen der Porennukleation und des Porenwachstums quantitativ zu verstehen und zu unterscheiden, verwenden wir korrelative FIB-basierte Mikromechanik und Electron Channeling Contrast Imaging (ECCI). Diese Experimente werden auf statistisch fundierte Weise durchgeführt und ermöglichen ein Verständnis des kollektiven Verhaltens auf der mikrostrukturellen Längenskala, auch bei erheblicher Verfestigung. Auf diese Art gelingt – in Kombination mit kristallplastischer Modellierung – die Vorhersage des mechanischen Verhaltens und des Schädigungsverhaltens unter unterschiedlichen Lastpfaden.

Weiterentwicklungen in mikromechanischen Prüfmethoden: Ermüdungsrisswachstum und Wasserstoffeinfluss

C. Motz, J. Luksch, M. Jordt, P. Grünewald, F. Schäfer

FR Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, Universität des Saarlandes, Campus D2 2,
D-66123 Saarbrücken

Mikromechanische Prüfmethoden haben in den letzten zwei Jahrzehnten einen wertvollen Beitrag zum tieferen Verständnis der mechanischen Eigenschaften und der Verformungsmechanismen von verschiedensten Werkstoffen geliefert. In diesem Vortrag werden aktuelle Weiterentwicklungen dieser Prüfmethoden erläutert, wobei der Fokus auf dem Wachstum von Ermüdungsrissen und der Interaktion mit der Mikrostruktur sowie dem Einfluss von Wasserstoff auf das Verformungsverhalten von Metallen liegt.

Das Ermüdungsrisswachstum und die Interaktion mit der Mikrostruktur spielt für die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Bauteilen eine große Rolle. So können Defekte in Materialien, wie z.B. Korn- und Phasengrenzen, aber auch lokale Änderungen der mechanischen Eigenschaften durch Variation der Zusammensetzung oder der Korngröße das Wachstum verzögern oder beschleunigen. Mikromechanische Versuche bieten hier den Vorteil gezielt die Interaktion mit einzelnen „Defekten“ zu quantifizieren. Als Beispiel werden in-situ Versuche mittels Mikrobiegebalken an Multilagen-Schichten und nanostrukturierten Metallen gezeigt und die Interaktion der Ermüdungsrisspitze mit der Mikrostruktur dargelegt und quantifiziert.

Die wachsende Nachfrage nach Leichtbausystemen erfordert oft den Einsatz von hochfesten metallischen Werkstoffen. Allerdings kann die immer weitere Steigerung der Festigkeit auch die Empfindlichkeit gegenüber Wasserstoffversprödung erhöhen. Auch hier können mikromechanische Versuche dazu dienen, die grundlegenden physikalischen Prozesse der Wasserstoffversprödung besser zu verstehen. Als Beispiele werden die neuen Möglichkeiten mechanische Versuche bei in-situ H-Beladung mittels Plasmas und elektrochemischer Zellen gezeigt.

Lokales Fließverhalten und Wasserstoffwechselwirkungen - die unglaublichen Möglichkeiten der modernen Nanoindentation

V. Maier-Kiener, G. Schaffar, S. Zeiler, A. Jelinek

Department Werkstoffwissenschaft, Montanuniversität Leoben

Ein besonders reizvolles Ziel für Materialwissenschaftler ist die präzise Charakterisierung des Fließverhaltens von Materialien bei minimalem experimentellen Aufwand und zugleich höchster Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Die tiefenregistrierende Härteprüfung, auch Nanoindentation, erweist sich hierbei als eine vielversprechende Methode. Während sie sich bereits als Standardtechnik zur Bestimmung von Härte und Elastizitätsmodul etabliert hat, wird ihr Potenzial zur Ermittlung lokalisierter Fließkurven bislang nicht vollständig ausgeschöpft. Diese Lücke ist vor allem auf die Herausforderung zurückzuführen, die mechanischen Eigenschaften aus sphärischen Eindrücken mit den Ergebnissen aus einachsigen Experimenten zu korrelieren.

Zur Überwindung dieses Problems und zur Minimierung von Spitzenfehlern wurde ein Kalibrierungsverfahren entwickelt, das auf grundlegenden geometrischen Prinzipien basiert. Dieses Verfahren bildet die Basis für dehnungsgeschwindigkeitsgesteuerte Experimente und ermöglicht die experimentelle Bestimmung des Zwangsfaktors unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften und der induzierten Dehnungen. Dadurch wird die zuverlässige Gewinnung präziser Fließkurven erheblich erleichtert.

Die entwickelten Protokolle sind sowohl unter Umgebungsbedingungen als auch unter anspruchsvollen Nicht-Umgebungsbedingungen, wie etwa elektrochemischen Szenarien, anwendbar. Hierbei kommt ein innovativer elektrochemischer In-situ-Ladeansatz, die sogenannte Seitenladezelle, zum Einsatz. Untersuchungen zeigen, dass die elektrochemische Aufladung nicht nur zu einer Erhöhung von Härte und Fließspannung führt, sondern auch den Zwangsfaktor verringert. Diese Reduktion bietet tiefere Einblicke in das Verformungsverhalten unter elektrochemischen Bedingungen und weist auf einen signifikanten Einfluss dieser Umgebungen auf die Materialverformung hin.

1. D. Kiener, M. Wurmhuber, M. Alfreider, G.J.K. Schaffar, V. Maier-Kiener: Recent advances in nanomechanical and in situ testing techniques: Towards extreme conditions *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 27 (2023) 101108. DOI: 10.1016/j.cossms.2023.101108
2. S. Zeiler, A.S. Jelinek, V. Terziyska, R. Schwaiger, C. Mitterer, S. Brinckmann, V. Maier-Kiener: A new approach for in situ electrochemical nanoindentation: Side charging as a promising alternative *Acta Materialia* 276 (2024),120113. DOI: 10.1016/j.actamat.2024.120113

Einblicke aus ab-initio Elektronenstruktur-Rechnungen in das Zusammenspiel von atomarer Korngrenzenstruktur, lokaler Spannung und Wasserstoffpartialdruck bei der Wasserstoff-verstärkten Dekohäsion von Grenzflächen in Metallen

R. Janisch

ICAMS, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum

Die Wechselwirkung von Wasserstoff mit Korngrenzen und anderen Defekten, und damit die Verteilung von Wasserstoff an diesen Elementen der Mikrostruktur, hängt nicht nur von der Struktur der Defekte ab, sondern auch vom chemischen Potential des Wasserstoffs und der lokalen Spannung in der Mikrostruktur. Elektronenstruktur-Rechnungen der Dichtefunktionaltheorie (DFT), sogenannte ab-initio oder „First Principles“ Rechnungen, eignen sich besonders gut dazu, solche Zusammenhänge quantitativ zu erfassen und gleichzeitig die zugrundeliegenden Mechanismen auf atomarer und elektronischer Ebene zu durchleuchten. Gleichzeitig sind diese Rechnungen aber auch Einschränkungen in Bezug auf die Systemgröße unterworfen, so dass man stets vor der Herausforderung steht, von wenigen Spezialfällen auf das allgemeine Verhalten von Wasserstoff in einer Mikrostruktur zu schließen. Beide Aspekte werden im Vortrag am Beispiel der Wasserstoffsegregation an Korngrenzen und der Wasserstoff-verstärkten Dekohäsion dieser Grenzflächen in ferritischen Stählen demonstriert und diskutiert.

Die DFT Ergebnisse für zwei repräsentative Korngrenzen zeigen, dass bei niedrigen Konzentrationen die bevorzugten Spaltebenen im Einkristall zunächst deutlich empfindlicher auf eine Änderung der Wasserstoffkonzentration reagieren als die Grenzflächen [1]. Ab einer kritischen Konzentration beobachtet man jedoch eine signifikante Reduktion der Korngrenzenkohäsion, welche wiederum für unterschiedliche Strukturen unterschiedlich stark ausgeprägt ist – die betrachtete $\Sigma 5$ Korngrenze mit einer vergleichsweise offenen Struktur bindet H deutlich stärker und wird gleichzeitig stärker geschwächt als eine dichtgepackte $\Sigma 3$ Korngrenze [2]. Interessant ist dabei vor allem die Tatsache, dass sich durch mechanische Belastung die relative Bindungsenergie von Wasserstoff an den Grenzflächen umkehrt, dass also bestimmte Spannungszuständen eine Umverteilung von Wasserstoff an die resistenteren $\Sigma 3$ Korngrenze führen können. Die beobachteten Trends können weiterhin durch die Zugabe von Legierungselementen (V, Cr, Mn) beeinflusst werden [2][3].

Literatur:

- [1] Hydrogen Embrittlement at Cleavage Planes and Grain Boundaries in Bcc Iron—Revisiting the First-Principles Cohesive Zone Model; Abril Azócar Guzmán, Jeongwook Jeon, Alexander Hartmaier and Rebecca Janisch. *Materials* **13**, 5785 (2020); doi:10.3390/ma13245785 .
- [2] Effects of mechanical stress, chemical potential, and coverage on hydrogen solubility during hydrogen-enhanced decohesion of ferritic steel grain boundaries: A first-principles study; Abril Azócar Guzmán and Rebecca Janisch. *Phys. Rev. Materials* **8**, 073601 (2024); doi:10.1103/PhysRevMaterials.8.073601 .
- [3] Ab Initio Study of the Combined Effects of Alloying Elements and H on Grain Boundary Cohesion in Ferritic Steels; Aparna P. A. Subramanyam, Abril Azócar Guzmán, Smobin Vincent, Alexander Hartmaier and Rebecca Janisch. *Metals* **9**, 291 (2019); doi:10.3390/met9030291 .

Damping of vibrations of a rod by dissipation due to diffusion

J. Svoboda ¹, K. Hackl ², F.D. Fischer ³

¹ Institute of Physics of Materials, Academy of Sciences of the Czech Republic,
CZ-61600 Brno, Czech Republic

² Institute of Mechanics of Materials, Ruhr-Universität Bochum, D-44780
Bochum, Germany

³ Chair of Mechanics, Department Physics, Mechanics and Electrical
Engineering, Montanuniversität Leoben, A-8700 Leoben, Austria

The Thermodynamic Extremal Principle (TEP) [1] represents an excellent tool for thermodynamic modeling of microstructure evolution controlled by diffusion and/or by interface mobility. In a standard way, such models are based on solution of partial differential equations with respective starting, boundary and contact conditions. Then the evolution of the system microstructure can be described by kinetics of characteristic parameters extracted from the solution of the differential equations. This way is, however, often rather complicated and can be significantly simplified by using the TEP. In that case, we can select the most appropriate characteristic parameters for the microstructure evolution and use the TEP to derive the evolution equations for them without the need to solve the partial differential equations. The method of TEP is demonstrated on the following example.

Understanding the interaction of vibrations with diffusion, e.g. of carbon in fcc lattice, is still of practical relevance. An analytical framework is offered based on the mechanics and thermodynamics, where the evaluated total dissipation by diffusion allows calculation of damping of a vibrating rod from the Gibbs energy balance. Finally, a simple relation is found relating the diffusion coefficient, geometry and elastic properties of the rod with its damping coefficient. This method could be utilized for measurement of the diffusion coefficient. More details can be found in [2].

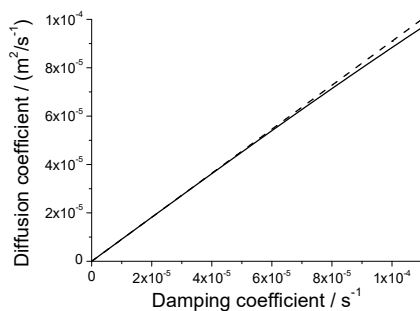


Fig. 1. Diffusion coefficient D calculated versus to the damping coefficient q according to Eq. (18) (solid) and to Eq. (19) (dashed).

References

- [1] Fischer F.D., Svoboda J., Petryk H.: Thermodynamic extremal principles for irreversible processes in materials science. *Acta Mater.* 67 (2014) 1-20.
- [2] Svoboda J., Hackl K., Fischer F.D.: Damping of vibrations of a rod by dissipation due to diffusion. *Scripta Materialia* 257 (2025) 116461.

Wissenszuwachs aus 20 Jahren Forschung über Hochentropielegierungen (HEA)

U. Glatzel

Metallische Werkstoffe, Universität Bayreuth, 95445 Bayreuth, Deutschland
uwe.glatzel@uni-bayreuth.de

The denomination high entropy alloys (HEA) was published first in 2004 by Prof. J.-W. Yeh and in parallel by Prof. B. Cantor. Research picked up exponentially since then, leading to more than 2,200 (!) papers listed in Web of Science containing "high entropy alloy" within the title in the year 2023.

Due to this number, it is impossible to discuss all research results in detail. The focus of this presentation is on mechanical strength. Four core effects, resulting from an increased configurational entropy, have been proposed: decrease in Gibb's free energy at higher temperatures, lattice distortion, sluggish (slower) diffusion and cocktail effect.

Within this presentation, there will be a clear distinction between single-phase HEA (at the designated application temperature) and two- or more-phase alloys. Due to this distinction, it will be possible to clearly separate into well-known strengthening effects. The probability of staying single-phase is decreasing with the number of elements since intermetallic phases can form, decreasing the Gibb's free energy more than the configurational entropy does. Therefore, only a handful of single-phase, equi-atomic, 5-component HEA are known by now. They can be distinguished by crystallographic structure and located in groups within the periodic table. To name some of them: fcc or Cantor alloy, fcc of precious metals, bcc or Senkov alloy, hcp or Feuerbach alloy. With respect to mechanical strengthening the only classical strengthening mechanism is solid solution strengthening.

On the other hand, the number of two- or more-phase compositionally complex alloys (CCA) is countless, and all options of precipitate hardening are available (e.g., internal stresses, Orowan bowing, locally strong increase of dislocation density, cutting of precipitates) additionally to solid solution strengthening.

Selected examples from literature and our own research will be presented and discussed.

Charakterisierung der Schadenstoleranz von HEA-basierten Schichtsystemen

**M. Kuczyk^{1,2} T. Krülle¹, M. Zawischa², O. Zimmer², J. Kaspar², C. Leyens^{1,2},
M. Zimmermann^{1,2*}**

¹ Technische Universität Dresden, Dresden, Sachsen, Deutschland

² Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden, Sachsen, Deutschland

Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit sind zwei herausragende Eigenschaften für die Beschichtungen in der Regel ausgelegt werden. Dies geschieht häufig auf Kosten der Schadenstoleranz der verwendeten Materialien. Das Konzept der Hochentropie-Legierungen zeichnet sich dadurch aus, dass es neue Eigenschaftskombinationen erwarten lässt, die durch klassische Werkstoffklassen nicht erreichbar erscheinen. Dieses Potential wird in dem vorliegenden Beitrag aufgegriffen und anhand von Beschichtungen aus HEA-Nitriden, die einerseits durch die Verwendung von Refraktärelementen und andererseits von Elementen wie Al oder Si erzeugt werden, vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt auf einem Vergleich verschiedener experimenteller Strategien zur Bewertung der Schadenstoleranz dieser Beschichtungen. Die Ergebnisse zeigen, dass Beschichtungen aus HEA-Nitriden eine hohe Härte bei gleichzeitig guten Zähigkeiten aufweisen. Eine einheitliche Tendenz der Eigenschaftskombinationen über alle angewandten Mess-Verfahren hinweg konnte hingegen nicht festgestellt werden.

Werkstoffe für umweltfreundliche und wettbewerbsfähige Flugtriebwerke

J. Eßlinger

MTU Aero Engines AG, Dachauerstraße 665, 80995 München

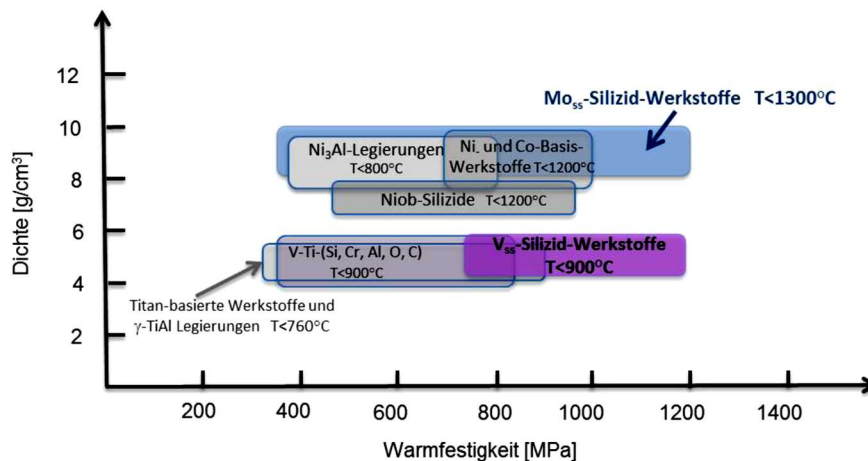
Der Vortrag schildert im Überblick, welche Bedarfe sich in der Flugtriebwerksindustrie an die Werkstofftechnik durch die heutige Flotte und die Triebwerke der Zukunft ergeben. Treiber sind dabei v.a. die wirtschaftlich-technische Absicherung des erheblichen Wachstums in Produktion und Betrieb, das umweltfreundliche Fliegen sowie militärische Hochleistungsmotoren. Dafür geht einerseits die Suche nach möglichst leichten Werkstoffen mit noch höherer Belastbarkeit sowie nach wirtschaftlichen Herstellverfahren unvermindert weiter. Andererseits konzentrieren sich die Entwicklungen immer stärker auf eine noch präzisere Vorhersagefähigkeit des Werkstoffverhaltens sowie die Tatsache, dass bezüglich Emissionen revolutionäre Antriebskonzepte für die Werkstoffe häufig neuartige Belastungsbedingungen oder auch Funktionalitäten bedeuten. Die zur Entwicklung dieser Fähigkeiten notwendigen, hohen Aufwände und eine weitere Optimierung oder Neuentwicklung von Materialien erfordern sowohl die verstärkte Nutzung digitaler Methoden als auch enge Partnerschaften von Forschung und Industrie. Im Vortrag werden zu den genannten Aspekten Lösungsansätze und konkrete Bedarfe an die Gemeinschaft der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik vorgestellt.

Legierungsstrategien zur Beeinflussung der Raum- und Hochtemperatureigenschaften von Mo-Silizidwerkstoffen

M. Krüger, J. Becker, R. Touzani, G. Hasemann

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Während des Betriebes von Hochtemperaturwerkstoffen treten zeit-, temperatur- und beanspruchungsabhängige Gefügeveränderungen auf. Dabei spielen Vorgänge, wie z.B. Korn- und Teilchenvergrößerung sowie Kriechphänomene und damit verbundene Schädigung eine Rolle. Zusätzlich wirkt sich die umgebende Atmosphäre durch Oxidations- und Korrosionsprozesse auf die Lebensdauer von metallischen Hochtemperaturwerkstoffen aus. Mehrphasige Molybdänlegierungen, meist mit Silizium zur Bildung von Silizidphasen legiert, sind interessante Kandidaten für Hochtemperaturanwendungen.



In der Abbildung wird ersichtlich, dass Molybdän-Silizidwerkstoffe eine extrem hohe Warmfestigkeit, aber gleichzeitig eine hohe Dichte aufweisen. Letztere kann für rotierende Bauteile nachteilig sein. Im Hinblick auf die strukturelle Anwendung solcher Werkstoffe in einem breiten Temperaturbereich sind sowohl die ausreichende Zähigkeit bei Raumtemperatur als auch eine hervorragende Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit bei Temperaturen jenseits von 1000°C gefordert. Diese Eigenschaften lassen sich zum Einen durch den Anteil und die Verteilung der Silizidphasen steuern, zum Anderen werden weitere Legierungselemente hinzugefügt, um die Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen gezielt zu beeinflussen. Darüber hinaus existieren verschiedene Legierungskonzepte zur Steigerung der Oxidationsbeständigkeit bei Temperaturen oberhalb von 700°C .

Im Vortrag werden verschiedene Legierungsansätze vorgestellt, z.B. unter Nutzung der Elemente Ti, Zr und V. Diese Strategien wirken sich sowohl auf die Zähigkeit bzw. Duktilität als auch auf die Hochtemperaturfestigkeit und -oxidationsbeständigkeit und die Dichte der Legierungen aus.

Rissinitiierung und -wachstum in polykristallinen Ni-Basis Gusslegierungen bei Ermüdungs- und Kriech-Ermüdungsbelastung

T. Beck (V)¹, O. Jordan¹, T. D. Nguyen², P. Lion³, H. Gottschalk⁴, L. Maede², D. Kulawinski²

¹ RPTU Kaiserslautern-Landau, WKK, Gottlieb-Daimler-Str. 44, 67663 Kaiserslautern

² Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, Berlin

³ Hydac International GmbH, Sulzbach

⁴ TU Berlin, Institut für Mathematik

Konventionell erstarrte (CC) Ni-Basis-Gusslegierungen weisen -bedingt durch ihre grobkristalline Erstarrung, verbunden mit einer ausgeprägten elastischen Anisotropie- eine ausgeprägte Streuung der Ermüdungslebensdauer auf. Da diese Werkstoffklasse überwiegend in den hinteren Stufen von Gasturbinen eingesetzt wird, sind durch Start-Stopp- und Laständerungsvorgängen sowie fluidmechanische Effekte verursachten zyklischen Lasten ausgeprägte Kriechbeanspruchungen infolge von Fliehkräften überlagert.

Der erste Teil des Beitrags analysiert experimentell und simulativ den Einfluss der Kornanisotropie auf die Spannungs- und Dehnungsverteilung in der Ni-Basislegierung Alloy 247 CC samt deren Konsequenzen für die Bildung und das Wachstum von Ermüdungsrissen. Die numerischen Simulationen erfolgten mittels FEM an digitalen Zwillingen der in den Versuchsprüben mittels EBSD ermittelten Korngrenzenstruktur und individuellen Kornorientierungen [1]. Der zweite Teil geht auf Ermüdungsversuche an vorab kriechgeschädigten Proben und Ermüdungsversuche mit hohen Mittellasten ein [2]. Hierbei wurde die Kriechporenbildung anhand metallographischer Aufnahmen und mittels Röntgen-Mikrotomographie unter Zuhilfenahme KI-gestützter Bildanalysen ausgewertet. Die Ergebnisse mündeten in ein diffusionsbasiertes Modell zur Simulation der Kriechporenevolution [3], auf dessen Grundlage der Ansatz zur Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit nach Kitagawa-Takahashi um den Einfluss kriechinduzierter Schädigungen erweitert wurde. Die Ergebnisse wurden in mehreren durch das BMWi / BMWK über die AG-Turbo geförderten Verbundvorhaben erzielt, an denen, neben der RPTU, Siemens Energy die BU Wuppertal beteiligt waren.

[1] Engel B., Mäde L., Lion P., Moch N., Gottschalk H., Beck T.: Probabilistic modeling of slip system-based shear stresses and fatigue behavior of coarse-grained Ni-base superalloy considering local grain anisotropy and grain orientation (2019), *Metals*, 9 (8), 813, <https://doi.org/10.3390/met9080813>

[2] Jordan O., Nguyen T.D., Lion P., Beck T.: Interaction and superposition of creep damage and high-cycle fatigue of coarse-grained nickel-base alloy 247 (2024) *Materials at High Temperatures*, 41 (1), pp. 195 – 205, <https://doi.org/10.1080/09603409.2024.2310914>

[3] Nguyen T.D., Jordan O., Mäde L., Beck T., Kulawinski D.: Characterisation of the creep cavitation process on grain boundaries in a polycrystalline nickel-base alloy 247 (2024), *Materials at High Temperatures*, 41 (2), pp. 322 – 333, <https://doi.org/10.1080/09603409.2024.2344901>

Dehnungsakkumulation und Versagen von austenitischem Stahl unter torsionaler Ermüdung mit überlagerter Druckbeanspruchung

S. Hanke, T. Ngeru

Universität Duisburg-Essen, Werkstofftechnik, Lotharstr. 1, 47057 Duisburg, Deutschland

Multiaxiale Belastungen erzeugen komplexe Werkstoffreaktionen und sind daher schwierig zu prognostizieren. Für diese Studie wurden zylindrische Proben aus duktilem austenitischem Stahl unter zyklischer Torsion mit gleichzeitig aufgebrachter konstanter Druckspannung getestet. Aus der Literatur ist bekannt, dass eine überlagerte Druckspannung der Rissbildung entgegenwirken kann. Tests wurden bei Torsionswinkeln von 5° bis 20° sowie axialer Druckspannung von 250 MPa oder 350 MPa (55% bzw. 75% $R_{p0,2}$) durchgeführt.

Die mechanische Werkstoffreaktion, die Rissbildung und die Verteilung der akkumulierten Dehnung in der Mikrostruktur hingen stark von den Belastungsbedingungen ab. Hohe torsionale Dehnung verursachte eine axiale Stauchung der Proben und Verfestigung in der zweiten Hälfte der Versuchsdauer. Risse bildeten sich parallel zur Druckachse und verzweigten sich innerhalb der Probe. Die Dehnung verteilte sich inhomogen in Körnern mit unterschiedlicher Orientierung. Die überlagerte Druckspannung reduzierte die Zyklenzahl bis zur Rissbildung deutlich. Niedrige torsionale Dehnungen führten zu Entfestigung und Rissen in 45° -Winkel, wobei die Druckspannung die Lebensdauer der Proben verdreifachen konnte. In der Mikrostruktur dominiert der Aufstau von Versetzungen an Korngrenzen. Eine vorangegangene Kaltverfestigung des Werkstoffs war bei niedriger torsionaler Dehnung vorteilhaft für die Lebensdauer, hatte jedoch bei höheren Dehnungen nur geringe Wirkung.

Diese Unterschiede in der Werkstoffreaktion auf die variierten Belastungsbedingungen illustrieren eindrücklich Ursachen für die Herausforderungen, die bei der Beschreibung und Vorhersage des Werkstoffverhaltens unter multiaxialer Belastung bestehen.

Einfluss der Mikrostruktur und Oberfläche auf das Ermüdungsverhalten additiv gefertigter Metalle

S. Stammkötter, M. Teschke, A. Koch, F. Walther

Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT), Technische Universität Dortmund

Neben der Mikrostruktur bestimmen Defekte und die Oberfläche von additiv gefertigten Metallen das Ermüdungsverhalten von technischen Anwendungen, wie Flugzeugturbinen und Implantaten. Geeignete Mess- und Prüfstrategien ermöglichen die genaue Überwachung der prozessbedingten Einflussgrößen auf das Ermüdungsverhalten. Mit intermittierender Ermüdungsprüfung kann die Wechselwirkung zwischen lokaler Mikro- und Defektstruktur sowie Rissinitiierung und -evolution bis zu sehr hohen Lastspielzahlen (VHCF) untersucht werden. Der Stahl 316L und die Aluminium-, Titan- und Nickellegierungen AlSi10Mg, Ti6Al4V, TiAl (TiAl) und IN718 wurden hinsichtlich der Auswirkung von Mikro-/Defektstruktur, Baurichtung und Spannungsverhältnis auf die Ermüdungsfestigkeit bewertet und unter Verwendung der Konzepte von Murakami und Shiozawa weitergehend analysiert. Die Untersuchungen belegen das Potenzial zur Verbesserung der Ermüdungslebensdauer und Schadenstoleranz auf der Basis grundlegender Prozess-Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge, die in einheitliche Ansätze zur Schadenstoleranz integriert werden. Um die Spannungsabschirmung (Stress Shielding) bei Implantaten zu minimieren, kann die Steifigkeit durch Verwendung von Gitterstrukturen (TPMS, Gyroid) an den Knochen angepasst werden. Mithilfe gekoppelter Mess- und Prüfstrategien bestehend aus μ -Computertomographie, digitaler Bildkorrelation (DIC) und Potentialmessung (DCPD) kann die Ermüdungsschädigung lokalisiert und ein Verständnis für die komplexe Schädigungsentwicklung von Gitterstrukturen mechanismenbasiert geschaffen werden. Diesem Themenkomplex widmet sich die DFG-Forschungsgruppe 5250 „Permanente und bioresorbierbare Implantate mit maßgeschneiderter Funktionalität“.

Auswirkung von vermehrtem Schrotteinsatz in der Stahlherstellung auf das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften

R. Schnitzer¹, L. Hatzenbichler¹, N. Kostwein¹, O. Glushko¹, P. Haslberger², M. Sonnleitner³

¹Christian Doppler Laboratory for Knowledge-based Design of Advanced Steels, Department of Materials Science, Montanuniversität Leoben, 8700 Leoben, Austria

²voestalpine Forschungsservicegesellschaft Donawitz GmbH, 8700 Leoben, Austria

³voestalpine Stahl GmbH, Voestalpine-Strasse 3, 4020 Linz, Austria

Um die Menge an CO₂-Emissionen zu reduzieren, strebt die Stahlindustrie an, den Anteil von Schrott in ihrem Produktionsprozess zu erhöhen. Dadurch wird zwangsläufig die Menge an unerwünschten Verunreinigungen und Spurenelementen zunehmen. Kenntnis über die genaue Menge und Art der Elemente, die sich an beispielsweise Korngrenzen anreichern ist entscheidend, um deren Einflusses auf die Nano- und Mikrostruktur, sowie die mechanischen Eigenschaften zu bestimmen.

Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten wurden Phasenumwandlungen und skalenübergreifende Gefügecharakterisierung inklusive hochauflösender Methoden wie Atomsondentomographie und in situ hochenergetischer Röntgenbeugung an Legierungen mit unterschiedlichen Gehalten an Spuren- und Begleitelementen durchgeführt. Darüber hinaus kamen atomistische Simulationen mittels Dichtefunktionaltheorie [1] und Methoden des maschinellen Lernens zur Gefügeauswertung [2] unterstützend zum Einsatz.

Die Ergebnisse zeigen, dass Verunreinigungselemente nicht nur die Phasenfelder zu längeren Zeiten verschieben, sondern auch die Phasenumwandlungstemperaturen senken.

Darüber hinaus wurde beobachtet, dass Verunreinigungselemente das Wachstum der ehemaligen Austenitkörner hemmen, indem sie sich bei hohen Temperaturen an den Korngrenzen anreichern (Solute-Drag-Effekt). Es zeigte sich auch eine Abnahme der Kerbschlagzähigkeit mit zunehmenden Mengen an Sn, Sb und Cu. Mittels Atomsondentomographie konnten nm-große Cu-Cluster entlang der Korngrenzen sowie eine signifikante Anreicherung von Sn und Sb an Korngrenzen nachgewiesen werden (siehe Abbildung).

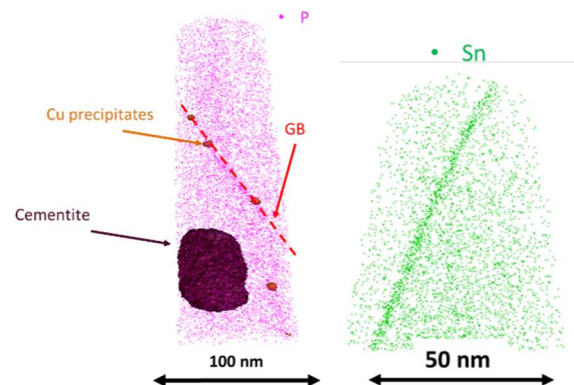


Abbildung: links: Cu-Ausscheidungen an einer ehemaligen Austenitkorngrenze; rechts: Sn-Anreicherung an einer Korngrenze;

[1] A. Sakic, R. Schnitzer, D. Holec, Acta Materialia 275 (2024) 120044

[2] L. Hatzenbichler, C. Vincely,..., R. Schnitzer, Praktische Metallographie, eingereicht

HNS weitergedacht - neue Wege zum Stickstoff

S. Weber

Ruhr-Universität Bochum

Stickstoff als Legierungselement hat vor allem im Bereich der korrosionsbeständigen Stähle eine besondere Bedeutung, sowohl aus technologischer Sicht als auch im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung. Eine grundsätzliche Herausforderung stellt aufgrund der Möglichkeit der Rekombination atomaren, gelösten Stickstoffs zum molekularen, gasförmigen Zustand die gezielte Einbringung hoher N-Gehalte in *High Nitrogen Steels* (HNS) dar, vor allem dann, wenn vollständige Prozessketten berücksichtigt werden. Die Pulvermetallurgie auf der Basis vorlegierter Systeme eröffnet in diesem Zusammenhang und auch unter Berücksichtigung additiver Fertigungsverfahren neue und interessante Lösungsansätze. Ein solcher Ansatz, basierend auf der Zugabe von pulverförmigem Siliziumnitrid zu einem N-freien Stahlpulver, wird in diesem Beitrag vorgestellt und ausgehend von den pulverförmigen Ausgangsstoffen bis zum finalen, wärmebehandelten Halbzeug diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere, neuartige Ansätze zur gezielten Einbringung von Stickstoff in Fe-Basiswerkstoffe gegeben.

Schlagworte: High Nitrogen Steels, Pulvermetallurgie, Additive Fertigung, Calphad, Diffusionslegieren

White Etching Areas und White Etching Cracks - Schädigungsmechanismen beim Stahl 100Cr6 im geschmierten Wälzkontakt

C. Broeckmann¹ (V), J.Mayer², A. Mikitisin², A. Peela¹, J. Spille², F. Steinweg¹

- 1) Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau (IWM), RWTH Aachen University, Augustinerbach 4, 52076 Aachen
- 2) Gemeinschaftslabor für Elektronenmikroskopie (GFE), RWTH Aachen University, Ahornstraße 55, 52074 Aachen

Hochbeanspruchte Wälzlager werden häufig aus dem martensitisch oder bainitisch gehärteten Stahl 100Cr6 hergestellt. Das Phänomen der „White etching areas“ (WEA) und „White etching cracks“ (WEC) beschreibt Vorstufen zu einem Schaden, unter Wälzermüdungsbeanspruchung der in der Wöhlerkurve zu Ausfällen weit unterhalb der klassischen Langzeitfestigkeit führt. WEA sind Bereiche unterhalb der Oberfläche, die während der Beanspruchung durch eine Gefügeumwandlung in einen nanokristallinen Ferrit entstehen. Die Auflösung von Zementit-Karbiden in der WEA bewirkt eine Übersättigung des Ferrits mit Kohlenstoff bis zu deutlich mehr als 1,3 %. Einseitig beobachtet man an der Grenze der WEA zum unbeeinflussten Gefüge häufig die Bildung von Rissen (WEC). Zur Entstehung von WEA/WEC wurden zwei, teilweise widersprüchliche Hypothesen entwickelt, die sich vor allem in der Reihenfolge des Auftretens von WEA und WEC unterscheiden. Beide Hypothesen gehen von der Notwendigkeit zusätzlicher Beanspruchungsfaktoren aus, um das Phänomen zu erklären.

An der RWTH Aachen konnten von den Autoren mit einem Vierscheibenprüfstand WEA/WEC reproduzierbar erzeugt und die Einflussfaktoren für ihre Bildung studiert werden. Insbesondere die Wirkung eines überlagerten Schlupfes, des Wasserstoffeintrags, eines elektrischen Stroms und des spezifischen Schmierstoffs wurden durch die systematische Parametervariation quantitativ erfasst. Gefügeveränderung und Schädigungsevolution wurde durch hochauflösende Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie an geschädigten Proben und an vorzeitig dem Versuchsstand entnommene Proben dokumentiert. So konnten erste Wirkungen im Gefüge in der Frühphase der Schädigungsevolution identifiziert werden. Ein mehrskaliges FEM-Modell wurde genutzt, um Effekte der lokalen adiabaten Verformung, der Gefügeumwandlung und des Scherens von Karbiden numerisch zu simulieren.

Die in der Studie gefundenen Erkenntnisse stützen die Hypothese, dass lokale Deformationsprozesse mit hoher plastischer Verformung und einer massiven Steigerung der Versetzungsdichte durch Polygonisation und Rekristallisation die nanokristallinen Körner der WEA bilden. Die neu gebildeten Körner werden durch Korngrenzensegregation des durch Auflösung der Karbide freigesetzten Kohlenstoffs stabilisiert. Die lokal hohe Versetzungsdichte und –mobilität erklärt sich durch diffusiblen Wasserstoff dessen Freisetzung im geschmierten Wälzkontakt durch den elektrischen Strom unterstützt wird. In Folge der Steifigkeits- und Härteunterschiede entstehen in der Folge Risse an der „Phasengrenze“ zwischen WEA und unbeeinflusstem Stahlgefüge.

Optimierung des Bauteilverhaltens durch Oberflächenkonditionierung in unterschiedlichen Fertigungsprozessen und Prozessketten

V. Schulze

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Produktionstechnik und Institut für Angewandte Materialien, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe

Fertigungsprozesse beeinflussen den Randschichtzustand von Bauteilen und damit die Bauteileigenschaften bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten. Die Oberflächenkonditionierung zur gezielten Einstellung von Randschichtzuständen über den Einsatz von in-process-Messtechnik und Softsensoren dient also zur robusten Einstellung von Funktionseigenschaften. Im Beitrag wird mit Fokus auf der Zerspanung vorgestellt, welche Ansätze in diesem Kontext verfügbar sind. Zudem werden prozesseitig das Umformen, die Wärmebehandlung und die Mechanische Oberflächenbehandlung angesprochen und Korrelationen zwischen den Prozessen, fertigungsbedingten Randschichten und den Bauteileigenschaften vorgestellt.

Rissausbreitung in nanobainitischen Stählen

Eberhard Kerscher

Arbeitsgruppe Werkstoffprüfung
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Der Vortrag beschäftigt sich mit dem Versagen von nanobainitischen Stählen bei hochzyklischer Ermüdungsbeanspruchung. Nanobainitische Stähle sind eine neue Stahlklasse, die eine exzellente Kombination aus hoher Festigkeit und großer Bruchdehnung aufweisen. Die Ursache hierfür ist in der hierarchischen Gefügestruktur aus ehemaligen Austenitkorngrenzen, Restaustenitblöcken, Paketen und alternierenden Lamellen zu finden. Letztere bestehen als kleinste Gefügeelemente aus abwechselnde angeordneten ferritische und austenitische Elementen, die eine Lamellendicke von einigen 10 nm besitzen. Dies führt zu der sehr hohen statischen Festigkeit. Gleichzeitig erreichen diese Stähle beachtliche Bruchdehnungen durch ein mechanisch induzierte Phasenumwandlung der austenitischen Lamellen. Die Kombination aus hoher statische Festigkeit und großer Verformbarkeit lässt prinzipiell auf eine hohe Langzeitfestigkeit schließen. Ermüdungsversuche zeigen jedoch, dass die bisher gemessenen Langzeitfestigkeiten hinter dieser Erwartung zurückbleiben. Dabei spielt die Rissinitiierung an nichtmetallischen Einschlüssen und das Rissausbreitungsverhalten in der hierarchischen Gefügestruktur eine große Rolle, wie es im Rahmen des Vortrags anhand detaillierter Bruchflächen- und Rissausbreitungsanalysen gezeigt wird.

Einstellung und Auswirkungen von Restaustenit in niedrig legierten Stählen

R. Fechte-Heinen^{1,2}, H. Surm², M. Steinbacher^{1,2}

¹ MAPEX Center for Materials and Processes, Universität Bremen, Bibliothekstraße 1,
28359 Bremen, Germany

² Leibniz Institut für Werkstofforientierte Technologien - IWT, Badgasteiner Str. 3,
28359 Bremen, Germany

Der Vortrag fasst eine Reihe von Erkenntnissen aus Forschungsprojekten zusammen, die den Effekt des Restaustenits auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften von niedrig legierten Stählen untersucht haben. Die wesentliche Motivation der zusammenfassend dargestellten Projekte lag in der Erhöhung der Lebensdauer und Defekttoleranz von Maschinenelementen durch eine gezielt gesteuerte Restaustenitmorphologie und einen gesteigerten Restaustenitanteil. Die entsprechenden Einflüsse werden anhand von Prüfungen an Standardproben sowie an Bauteilen bewertet.

Nach einer Einführung in die grundlegenden Aspekte in Bezug auf die Bildung und Umwandlung von Austenit in niedrig legierten Stählen sowie den resultierenden mechanischen Eigenschaften wird insbesondere auf den Einfluss der Wärmebehandlung nach dem „Quenching and Partitioning“ (Q&P) Konzept auf die Mikrostruktur inklusive des Restaustenits eingegangen. Hierbei wird ein Stahl mit geeigneter Zusammensetzung nach dem Austenitisieren auf eine Temperatur abgeschreckt, bei der nur eine unvollständige Martensitbildung erreicht wird. Anschließend wird durch Halten oder Wiedererwärmen eine Umverteilung des Kohlenstoffs (Partitionierung) vom Martensit in den Restaustenit bewirkt. Die Kinetik der Kohlenstoffpartitionierung kann durch in-situ-Röntgenographie verfolgt werden. Der grundlegende Einfluss des Kohlenstoffgehalts wird durch Dilatometrie an unterschiedlich stark aufgekohlten Proben ermittelt. Neben dem für Q&P-Stähle üblichen zweiphasigen Gefüge aus - zumindest teilweise angelassenem - Martensit und Restaustenit werden auch resultierende Gefüge mit bainitischen Anteilen untersucht.

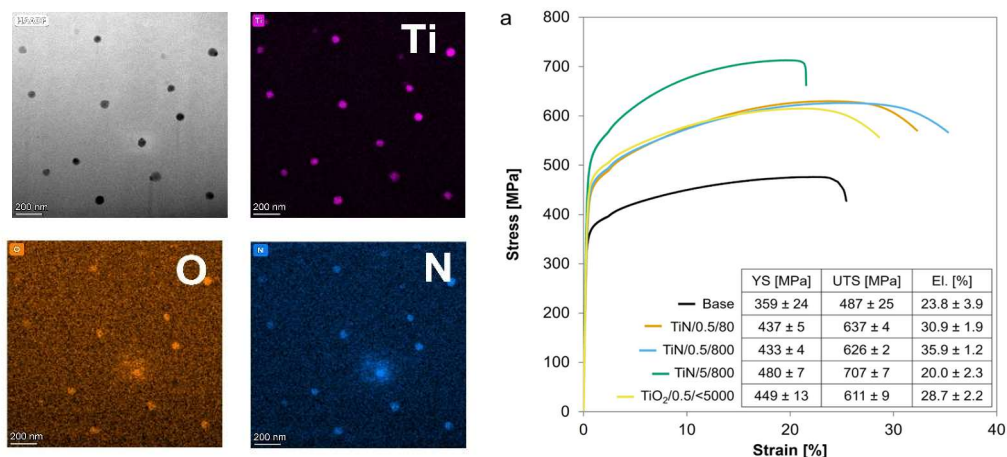
Additive Fertigung als Syntheseroute für partikelverstärkte Legierungen

F. Schulz¹, R. Freundl¹, C. Felber¹, V. Devulapalli², G. Dehm², E. A. Jäggle¹

¹Institut für Werkstoffkunde, Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg, Deutschland

²Abteilung Struktur und Nano-/ Mikromechanik von Materialien, Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien, Max-Planck-Str. 1, 40237 Düsseldorf, Deutschland

Die Kombination aus einer metallischen Matrix mit verstärkenden, keramischen Partikeln ist schon seit Langem als vielversprechend bekannt. Allerdings führen konventionelle Fertigungsmethoden wie Guss, Pulvermetallurgie und mechanisches Legieren entweder zu suboptimalen Gefügen oder sind sehr aufwändig und teuer. Die additiven Fertigungsverfahren, insbesondere das laserbasierte Pulverbettsschmelzen (PBF-LB/M), bieten eine alternative Route zur Herstellung von komplexen Bauteilen aus Kompositwerkstoffen mit homogenem, feinem Gefüge. In dieser Präsentation werden einige Beispiele für solche Werkstoff/Fertigungskombinationen vorgestellt. Anhand der Kombination aus einer Aluminium-Gusslegierung und beigemischten Titancarbid-Partikeln verschiedener Größe (Mikro- und Nanobereich) werden die Schwierigkeiten der Prozessroute und die Grenzen der erreichbaren Partikelgehalte diskutiert. Trotz erheblichem Unterschied in der Schmelztemperatur zwischen Metall und Keramik sind deutliche Anzeichen für ein teilweises Aufschmelzen der Partikel sichtbar. Eine alternative Prozessroute zur in-situ Bildung von Oxid- und Nitrid-Partikeln wird am Beispiel einer Eisen-Titanlegierung vorgestellt. Dabei werden reaktive Prozessgase wie CO₂ eingesetzt. Schließlich werden die erreichbaren statischen und dynamischen mechanischen Eigenschaften solcher Werkstoffe anhand einer Titanitrid-verstärkten Mittelentropie-Legierung vorgestellt. Durch das extrem feine Gefüge kann eine deutliche Erhöhung der Festigkeit sowie der Lastspiele bis zum Ermüdungsbruch sowohl bei Raumtemperatur als auch bei tiefen Temperaturen erzielt werden.



V. Devulapalli, F. Schulz, E.S. Barreto, N. Ellendt, E.A. Jäggle, G. Dehm, *Add. Manuf.* 91 (2024) 104338. DOI:10.1016/j.addma.2024.104338

R. Freundl, E.A. Jäggle, *Mater. Des.* 248 (2024) 113490. DOI:10.1016/j.matdes.2024.113490

Gefüge und Bruchzähigkeit von Hartstoffschichten

Paul H. Mayrhofer

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, TU Wien, 1060 Wien

Übergangsmetallnitride sind bevorzugte Materialien für struktur- und funktionsorientierte Hartstoffbeschichtungen, insbesondere bei mechanisch dominierten Lastprofilen. Wie solche Nitride entwickelt werden können, die gleichzeitig hohe mechanische Festigkeit und Bruchzähigkeit sowie außergewöhnliche thermische Stabilität bieten, ist Gegenstand dieses Beitrags.

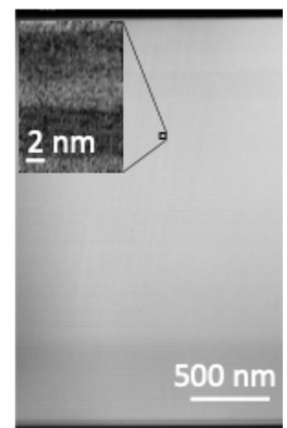
Basierend auf experimentellen und theoretischen Untersuchungen werden zentrale Materialentwicklungskonzepte vorgestellt, die auf die Verbesserung mechanischer und thermischer Eigenschaften abzielen. Dabei spielt die Kontrolle des Gefüges eine Schlüsselrolle, da es entscheidend für die Bruchzähigkeit ist. Nanolamellare Mikrostrukturen, wie sie in Übergitter- und Nanolagenbeschichtungen vorkommen, erhöhen durch gezieltes Gefügedesign sowohl die Widerstandsfähigkeit gegen Rissausbreitung als auch die mechanische Stabilität bei hohen Temperaturen.

Darüber hinaus ermöglichen legierungstechnische Konzepte nicht nur eine signifikante Steigerung der thermomechanischen Eigenschaften, sondern auch eine deutliche Erhöhung der Beschichtungsrate und eine Reduktion der notwendigen Beschichtungstemperaturen (bei gleichbleibender Zerstäubungsleistung). Diese Ansätze tragen zu einem effizienteren Herstellungsprozess bei, ohne die Materialeigenschaften zu kompromittieren, und bieten zudem auch den Vorteil, dass sie unempfindlicher gegenüber Beschichtungsparametervariationen sind, was ihre industrielle Umsetzung erheblich erleichtert.

Abschließend wird die Bedeutung der Gefügemodifikation in elektrochemischen Anwendungen hervorgehoben. Offenporige Mikrostrukturen, hergestellt durch innovative Abscheidetechniken, kombinieren herausragende elektrochemische Energiespeicherfähigkeiten mit außergewöhnlicher mechanischer Flexibilität. Solche gezielten Gefügedesigns verdeutlichen, wie vielseitig und anpassungsfähig Übergangsmetallnitride für anspruchsvolle Anwendungen sind.

Die vorgestellten Konzepte zeigen, wie durch gezielte Gefügemodifikationen und Materialentwicklungsstrategien Beschichtungen mit außergewöhnlichen und maßgeschneiderten Eigenschaften gestaltet werden können, um den stetig steigenden Anforderungen gerecht zu werden.

[1] Z. Gao, J. Buchinger, R. Hahn, Z. Chen, Z.L. Zhang, N. Koutná, P.H. Mayrhofer, Acta Mat. 279 (2024) 120313 1–10



TEM-Bild einer Übergitterschicht mit $\Lambda = 7,5 \text{ nm}$ [1].

Increasing the Ductility of Freestanding Metallic Thin Films – Insights from in situ TEM and in situ AFM Nanomechanical Testing

B. Merle

Institute of Materials Engineering, University of Kassel
Materials Science & Engineering I, Interdisciplinary Center for Nanostructured Films, Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nürnberg (FAU)

Freestanding metallic thin films are generally thought to be very brittle and little is known about their ability to accommodate large strains under certain circumstances. New insights are provided by investigations on 30-200 nm thick PVD gold and silver films by means of in-situ tensile tests in a TEM and in-situ bulge tests in an AFM.

The bulge tests reveal that the low toughness of the films derives from the limited expansion of the fracture process zone, which limits the plastic energy dissipation. In-situ tensile testing in the TEM suggests that grain boundary mediated deformation mechanisms can significantly increase the tolerance of the samples to small cracks and lead to a ductility well above 10% plastic strain. These high ductility values measured on TEM samples are in sharp opposition to the behavior of larger samples, which typically fail around 1% strain. This is likely a statistical size effect, associated with the much larger surface of the bulge samples and the higher probability that they contain critical defects. As avoiding these defects is hardly achievable in practice, a promising strategy consists in improving the resistance of the films to crack nucleation and propagation. Using the bulge test technique, it was found that introducing grain boundaries and maximizing the material strength is key to optimizing the fracture toughness of freestanding metallic films.

References:

1. J.P.Liebig, M. Mackovic, E. Spiecker, M. Göken, B. Merle. Grain boundary mediated plasticity: a blessing for the ductility of metallic thin films? (2021) *Acta Materialia*, 215, pp. 117079.
2. E.I. Preiß, H. Lyu, E. Bitzek, J.P. Liebig, G. Richter, F. Gannott, P.A. Gruber, M. Göken, B. Merle. Microstructural dependence of the fracture toughness of metallic thin films: A bulge test study on single crystalline and polycrystalline silver films (2019) *Journal of Materials Research*, 34(20), pp. 3483-3494.
3. E.I. Preiß, F. Gannott, M. Göken, B. Merle. Scaling of the fracture toughness of freestanding metallic thin films with the yield strength (2018) *Materials Research Letters*, 6(10), pp. 607-612.
4. E. I. Preiß, B. Merle, M. Göken. Understanding the extremely low fracture toughness of freestanding gold thin films by in-situ bulge testing in an AFM (2017) *Materials Science and Engineering A*, 691, pp. 218-225.
5. J. P. Liebig, M. Göken, G. Richter, M. Mačković, T. Przybilla, E. Spiecker, O. N. Pierron, B. Merle. A flexible method for the preparation of thin film samples for in situ TEM characterization combining shadow-FIB milling and electron-beam-assisted etching (2016) *Ultramicroscopy*, 171, pp. 82-88.
6. B. Merle. Creep behavior of gold thin films investigated by bulge testing at room and elevated temperature (2019) *Journal of Materials Research*, 34(1), pp. 69-77.

Versagen in der Nanowelt - ist wirklich alles besser?

R. Spolenak

Laboratorium für Nanometallurgie, Departement Materialwissenschaft, ETH Zürich, Schweiz

Das Konzept „Kleiner ist Fester“ ist seit vielen Jahren in der Materialwissenschaft akzeptiert. Bei ganz kleinen Dimensionen stößt dieses Konzept natürlich an seine physikalische Grenzen und damit an die theoretische Festigkeit. Dieser Vortrag wird sich an den Limits des Versagens sowohl durch plastische Verformung als auch durch Bruch bewegen. Die Konzepte werden an Fallbeispielen illustriert. Diese beginnen mit dem Versagen von dünnen Schichten auf Polymer- und Halbleitersubstraten und kulminieren am Beispiel des multimaterial 3D Drucks mit Voxelgrößen unter 100 nm. Im letzteren Fall wird analysiert wie sowohl das Gefüge als auch das Material von Voxel zu Voxel verändert werden kann und wie sich das auf die Versagensmechanismen auswirkt. Materialbeispiele werden in Kupfer, Silber, nanoporösem Silber und Magnesiumoxid gezeigt. Zusammenfassend, werden die Längenskalen von Schichtdicke, Porengröße, Rissgröße und plastischer Zone diskutiert.

Risse beim Wachsen beobachten – Welchen Einfluss hat die Grenzflächenstruktur?

D. Kiener, K. Schmuck, J.F. Keckes, M. Burtscher, M. Alfreider

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Materialphysik, Jahnstraße 12, 8700 Leoben,
Österreich

Wenn im Service Risse durch Werkstoffe laufen, stellt dies in der Regel das Ende der Komponente und im besten Fall die Einleitung von Reparatur oder Recycling dar. Im schlimmsten Fall besteht allerdings Gefahr für Leib und Leben. Um moderne höchstfeste Werkstoffe resistenter gegenüber Versagen zu machen, ist es nötig, die Rissausbreitung bestmöglich zu kontrollieren. Derartige Bestrebungen in der Forschung erfordern zum einen die Möglichkeit der Rissbeobachtung und zum anderen innovative Ansätze, um das lokale Materialversagen zu unterbinden oder zumindest zu erschweren. Den ersten Aspekt adressieren wir durch quantitative miniaturisierte Bruchversuche in Elektronenmikroskopen, während innovative Ansätze des Grenzflächendesigns basierend auf thermodynamischen Segregationsansätzen die Eigenschaften der nanostrukturierten Materialien verbessern sollen. Konkret erlaubt die *in situ* Elektronenmikroskopie die hochaufgelöste Untersuchung der Rissausbreitung im Gefüge. Darauf aufbauend nutzen wir moderne Methoden der maschinengestützten Bildauswertung, wodurch sich große Datenmengen, wie beispielsweise komplette *in situ* Videos, effizient in statistisch signifikante Bruchcharakteristika transformieren lassen. Mit Hilfe dieser Mess- und Analysemethoden zeigen wir anhand von ausgewählten Fallbeispielen, wie sich durch gezielte Grenzflächenmodifikation in nanostrukturierten Dünnschichten und Massivwerkstoffen das Risswachstum behindern und dadurch neben der Festigkeit auch die Bruchzähigkeit steigern lässt.

Untersuchung des spröd-duktil Übergangs von Al_2Ca mit Hilfe mikromechanischen Methoden

G. Dehm, J.P. Best, A. Kanjilal

Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien GmbH, Düsseldorf

Die Laves Phase CaAl_2 ist ein wichtiger Bestandteil zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Mg-Legierungen. Allerdings ist wenig über die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur bekannt. In dieser Studie wird die Hochtemperaturverformung der intermetallischen C-15 Phase CaAl_2 mit einem Fokus auf den Spröd-Duktil Übergang untersucht. Als Messmethoden wurden nano- und mikromechanische *in situ*-Experimente wie Nanoindentation, Mikro-Ritzprüfung und Mikrodruckversuche eingesetzt. Jede dieser Methoden untersucht eine andere Materialreaktion und hat ihre Vor- und Nachteile, die in dieser Studie diskutiert werden. Die Korrelation der Beobachtungen aus den verschiedenen Methoden ergab, dass CaAl_2 bei $\sim 0,55$ der homologen Schmelztemperatur einen Spröd-Duktil Übergang durchläuft. Dieser äußert sich zuerst durch lokale Mikroplastizität. Während bei niedrigen Temperaturen Risse in der Nanoindentation entstehen, bleiben diese oberhalb von 300 °C aus. Ähnlich verhält es sich auch bei der Mikrosäulenspaltung (pillar splitting). Bis 300 °C verhalten sich die Mikrosäulen aus CaAl_2 spröde. Die scheinbaren Bruchzähigkeitswerte steigen von $(0,9 \pm 0,1)$ MPa $\sqrt{\text{m}}$ bei 25 °C auf $(2,8 \pm 0,3)$ MPa $\sqrt{\text{m}}$ bei 300°C an. Ab 400 °C bleiben die Mikrosäulen Riss frei. Die Hochtemperatur-Nanoindentation zeigt einen signifikanten Abfall der Nanoindentationshärte bei (475 ± 25) °C. Ursache hierfür ist die zunehmende Versetzungsplastizität, die mittels Transmissions-elektronenmikroskopie bestätigt wurde [1,2].

[1] A. Kanjilal, et al. *Materials & Design*, 2024, 113206.

[2] Die Arbeiten entstanden im Rahmen des SFB 1394 (Teilprojekt B06; 409476157).

Herausforderungen bei der Messung der Festigkeit und Bruchzähigkeit von Keramiken

T. Lube

Montanuniversität Leoben, Department Werkstoffwissenschaft, Franz Josef-Straße 18,
A-8700 Leoben, Österreich, tanja.lube@unileoben.ac.at

Bauteile aus Keramik sind Produkte einer Abfolge von verschiedenen Formgebungs- und Verarbeitungsschritten, die für die Eigenschaften wie zum Beispiel die Festigkeit oder Bruchzähigkeit verantwortlich sind. Separat hergestellte Probekörper aus demselben Material können andere Eigenschaften aufweisen. Um eine Vergleichbarkeit zwischen Werkstoffen herzustellen, Werkstoffe für bestimmte Aufgaben auszuwählen oder Ziele für die Werkstoffentwicklung zu definieren ist es sinnvoll, die Festigkeit mit solchen genormten Proben zu prüfen. Um Aussagen über das tatsächliche Bauteilverhalten treffen zu können, ist es notwendig, Bauteile direkt zu prüfen. Dies ist besonders wichtig für additiv gefertigte (AM-) Keramiken. Um hier sinnvollen Prüfverfahren zu entwickeln, muss berücksichtigt werden, welche Merkmale typisch sind und wie geeignete Probekörper unter Ausnutzung der Möglichkeiten des Fertigungsverfahrens geschickt gestaltet und hergestellt werden können.

Anhand von Beispielen zur Festigkeits- und Bruchzähigkeitsmessung wird gezeigt, wie man diesen Anforderungen gerecht werden kann. Für stereolithographisch hergestellte AM-Keramiken wurde ein Prüfkörper gestaltet und untersucht, auf dem ausreichend viele Proben für statistisch belastbare Ergebnisse in einem Druckvorgang hergestellt werden können. Die Orientierung dieses Probekörpers in Relation zum Schichtaufbau kann variiert werden. Die Probenabmessungen, die man für die Berechnung der Festigkeit benötigt, werden durch eine automatisierte Auswertung von 3D-Scans ermittelt. Damit wurde nicht nur ein Festigkeitsprüfverfahren eingeführt, sondern auch die Möglichkeit geschaffen, eine Fülle von ergänzenden Daten zur Prozessbeschreibung zu erfassen.

Viele technische keramische Bauteile haben die Form von dünnen Scheiben oder Platten und können gut mit zwei-achsigen Biegeprüfverfahren untersucht werden, wobei etablierte Versuche nur im Bereich kleiner elastischer Verformungen ausreichend genau ausgewertet werden können. Für den Ball-on-Three-Balls Versuch wurde die Anwendbarkeit auch für besonders dünne Bauteile mit hoher Festigkeit unter Berücksichtigung geometrisch nicht-linearer Effekte etabliert.

Um die Bruchzähigkeit von kleinen Bauteilen zu untersuchen, war man bisher darauf angewiesen, ungenaue, empirische Schätzmethode zu verwenden, die mit wenig Material auskommen. Es konnte gezeigt werden, dass das zuverlässige Prüfkonzzept einer genormten Versuchsmethode auch auf Bauteile übertragen werden kann. Mithilfe von numerischen Methoden wurden die Berechnungsgrundlagen ermittelt, die es nun erlauben, genaue Werte für die Bruchzähigkeit auch an kleinen Kugeln mit wenigen Millimeter Durchmesser oder kleinen, dünnen Scheiben zu messen.

Auswirkungen des Zusatzes von Post Consumer Rezyklaten (PCR) auf die Morphologie und das Bruchverhalten von Polypropylen für Langzeitanwendungen

F. Arbeiter^{1,2}, J. Hinzica³, M. Messiha³, C. Maurer^{1,2}, G. Pinter¹

¹ Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, Otto-Glöckel-Str.2, 8700 Leoben, Österreich

² Christian Doppler Labor für Einfluss von Recyclingmaterialien auf die mechanische Lebensdauer von Kunststoffen, Montanuniversität Leoben, Otto-Glöckel-Str.2, 8700 Leoben, Österreich

³ Polymer Competence Center Leoben GmbH, Sauraugasse 1, 8700 Leoben, Österreich

Themen wie Nachhaltigkeit, Recycling und zirkuläre Kunststoffe haben in den letzten Jahren enorme Aufmerksamkeit erlangt. Im Jahr 2021 wurden weltweit fast 391 Millionen Tonnen Polymere produziert. Zum ersten Mal wurden Post-Consumer-Recyclingpolymere, die einen Anteil von 8,3 % ausmachen, ebenfalls in die Produktionsstatistik aufgenommen. Mit 19,3 % hat Polypropylen (PP) den größten Anteil am Produktionsvolumen. Hauptsächlich wird dieses Polymer für kurzlebige Verpackungen, aber auch für langlebige Produkte in der Bauindustrie verwendet. In Europa steigt die Menge der für neue Produkte verwendeten Rezyklate kontinuierlich an. In etwa 43 % der Produkte aus Rezyklaten entfallen auf den Bausektor. Die Nutzungsdauer der Produkte in diesem Bereich beträgt jedoch bis zu 100 Jahre, was große Ansprüche an die Zuverlässigkeit der verwendeten Materialien stellt. Daher ist es wichtig, den Einfluss der verwendeten Rezyklate auf die Morphologie und das Bruchverhalten genau zu kennen.

In der gegenwärtigen Studie wurden mehrere neuwertige („virgin“) und rezyklierte („PCR“) Polypropylen Mischungen hinsichtlich dieser Aspekte untersucht. Dazu wurden primär thermisch-analytische, als auch mikroskopische Verfahren zur Morphologie Analyse verwendet. Die mechanischen Langzeiteigenschaften wurden mittels des zyklischen „Cracked Round Bar“ (CRB) Versuchs, einem zyklischen bruchmechanischen Versuch zur beschleunigten Charakterisierung des Langzeitverhaltens von Polyolefinen, untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zumischung von PCR Material die Langzeiteigenschaften von Polypropylen signifikant beeinträchtigt. Während auf der mechanischen Ebene Fremdpartikel und Fremdpolymere als direkte Spannungskonzentrationen wirken, so erfolgt durch den Einsatz von PCR Material zusätzlich eine Beeinflussung der Kristallmorphologie des teilkristallinen Kunststoffes. Durch die Mischung verschiedener Polypropylen Grundtypen, als auch die Einbringung von Fremdstoffen kommt es zu nukleierenden Effekten im Matrixmaterial, die sich ebenfalls direkt auf die mechanischen Eigenschaften auswirken.