

Phasenspezifische Analyse und Simulation der Mikroverformung und Schädigung in Metall-Matrix Verbundwerkstoffen

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Yanling Schneider

Zusammenfassung

Die Lebensdauer von partikelverstärkten Metallmatrixverbundwerkstoffen wird durch vor dem Bruch ablaufende (Mikro-)Schädigungsprozesse, wie der Ablösung der Partikel von der Matrix und der Rissbildung und dem Risswachstum in den Verbundpartnern, bestimmt.

Das Verständnis der Abhängigkeit dieser Prozesse von den Eigenschaften der Partikel, der Matrix und der Grenzschicht sowie vom Gefügebau ermöglicht es, durch geeignete Wahl der Ausgangsstoffe und der Herstellungsbedingungen ein im Hinblick auf das Einsatzverhalten und die Lebensdauer optimales Verbundverhalten einzustellen. Zur Bereitstellung derartiger Informationen ist im Rahmen dieses Antrags eine 3-dimensionale Analyse der Verformungs- und Schädigungsprozesse in partikelverstärkten Verbundwerkstoffen vorgesehen. Sie soll am Beispiel des technisch bedeutsamen Systems Kobalt/Diamant und in enger Verbindung von Experiment und Simulation durchgeführt werden.

Für die experimentellen Analysen werden mittels hochenergetischer Synchrotronstrahlung hoch aufgelöste 3D-Tomogramme von Proben vor und nach einer Zugbelastung erzeugt, die das Gefüge im Ausgangszustand und den Schädigungsverlauf während der Belastung abbilden.

Für die 3-dimensionale Simulation der Verformungs- und Schädigungsprozesse werden die experimentell analysierten Gefügausschnitte realitätsnah in ein FE-Modell abgebildet. Aus den experimentellen Daten werden die für die Simulationsrechnung erforderlichen Randbedingungen gewonnen. Hierdurch wird die Möglichkeit eröffnet, die FE-Simulationsergebnisse mit den experimentellen Befunden zu vergleichen und die Sicherheit geschaffen, im Rahmen von FEM-Parameterstudien experimentell nicht realisierte Gefügekombinationen zu analysieren.

Abstract

The service life of particle-reinforced metal matrix composites is determined by (micro-) damage processes, such as the detachment of the particles from the matrix and the formation of cracks and crack growth in the composite partners before fracture.

The knowledge of these processes in dependence on the properties of the particles, the matrix, the boundary layer, and the microstructure enables to achieve a composite behavior that is optimal in terms of service behavior and service life by appropriate selection of the alloying materials and the manufacturing conditions. To achieve the above-mentioned knowledge, it is aimed to apply 3-

dimensional analyses of the deformation and damage processes in particle-reinforced composites. Taking the industrially meaningful cobalt/diamond composite as sample materials, coupled investigations of experiments and simulations will be performed.

For the experimental investigations, high-energy synchrotron radiation will be used to generate high-resolution 3D tomograms of samples before and after tensile loading, which will deliver the microstructure in the initial state and the damage evolution during loading.

For the 3-dimensional simulation of the deformation and damage processes, the experimentally analyzed representative microstructural cut-outs will be applied in FE models. Experimental data will provide the boundary conditions necessary for the numerical simulation. It establishes the possibility of comparing the FE simulation results with the experimental findings and achieving high safety through FEM parameter studies, which are not realizable from experimental microstructural constructions.

Publications:

- [1] Y. Schneider, U. Weber, Ch. Xu, R. Zielke, S. Schmauder, W. Tillmann, “Experimental and Numerical Investigations of Micro-meso damage Evolution for a WC/Co-Type Tool Material”, *Materialia*, **2022**, in printing
- [2] Yanling Schneider, Reiner Zielke, Chensheng Xu, Muhammad Tayyab, Ulrich Weber, Siegfried Schmauder, and Wolfgang Tillmann, “Experimental Investigations of Micro-Meso Damage Evolution for a Co/WC-Type Tool Material with Application of Digital Image Correlation and Machine Learning”, *Materials* Vol. 14 (13), Nr. 3562. **2021**, DOI: 10.3390/ma14133562
- [3] Yanling Schneider, Werner Wasserbäch, Siegfried Schmauder, Zhangjian Zhou, Reiner Zielke, Wolfgang Tillmann, “A numerical method to improve the representativeness of real microstructure cut-outs applied in finite element simulations”, *Crystals*, Vol. 11, Nr. 382, **2021**. DOI: 10.3390/cryst11040382
- [4] Reiner Zielke, Wolfgang Tillmann, Maximilian Ambaum, Siegfried Schmauder, Yanling Schneider, “Entwicklung einer Prüfmaschine zu In-Situ Untersuchungen mit Hilfe der Computertomografie”, Sonderband “ZfP heute – Wissenschaftliche Beiträge zur zerstörungsfreien Prüfung 2020”; ISBN 978-3-947971-10-7; Seite 82-84; DGZfP **2020**
- [5] Y. Schneider, U. Weber, W. Wasserbäch, R. Zielke, S. Schmauder, W. Tillmann, “A numerical method for the generation of hierarchical Poisson Voronoi microstructure applied in micromechanical finite element simulation — part I: method”, *Comp. Mech.*, vol. 66, p.p. 651–667, **2020**. DOI: 10.1007/s00466-020-01869-3

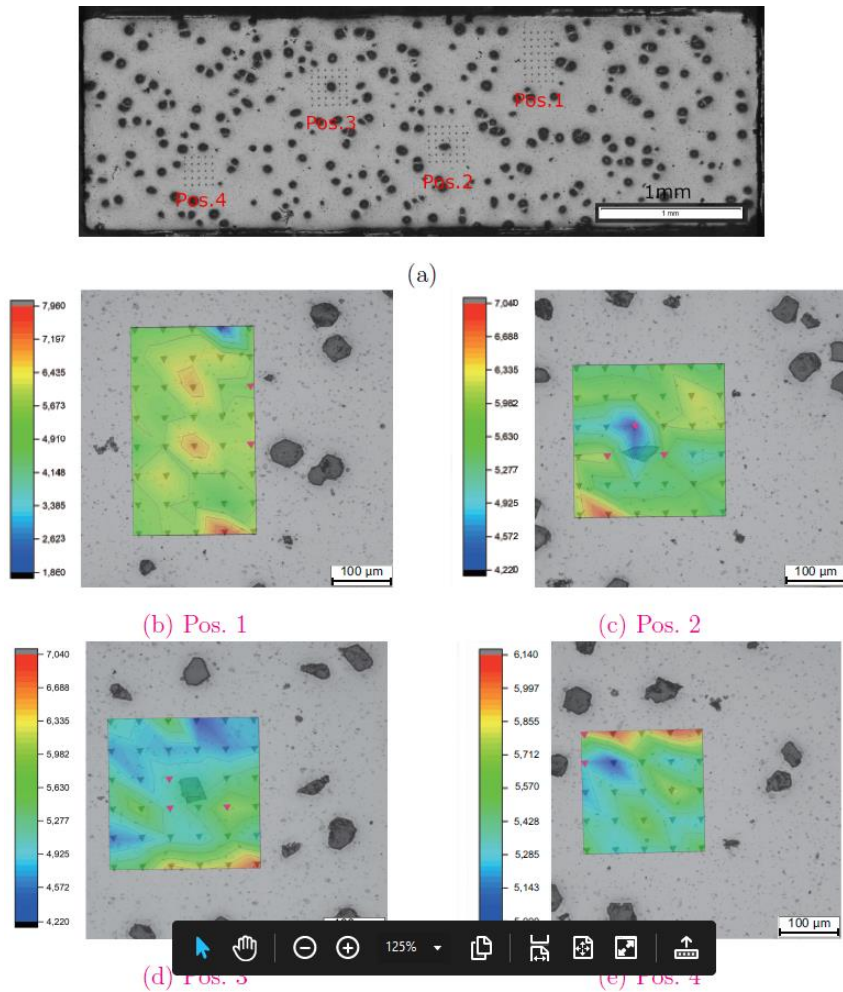


Fig. 1: Hardness distribution from HV0.3 nanoindentation tests after graphitization of diamonds (type-II quasi-brittle behavior, [2]): (a) the four measured positions (Pos.1 to Pos.4) on the surface; (b) - (e) the hardness distributions correspond to Pos.1 - Pos.4.

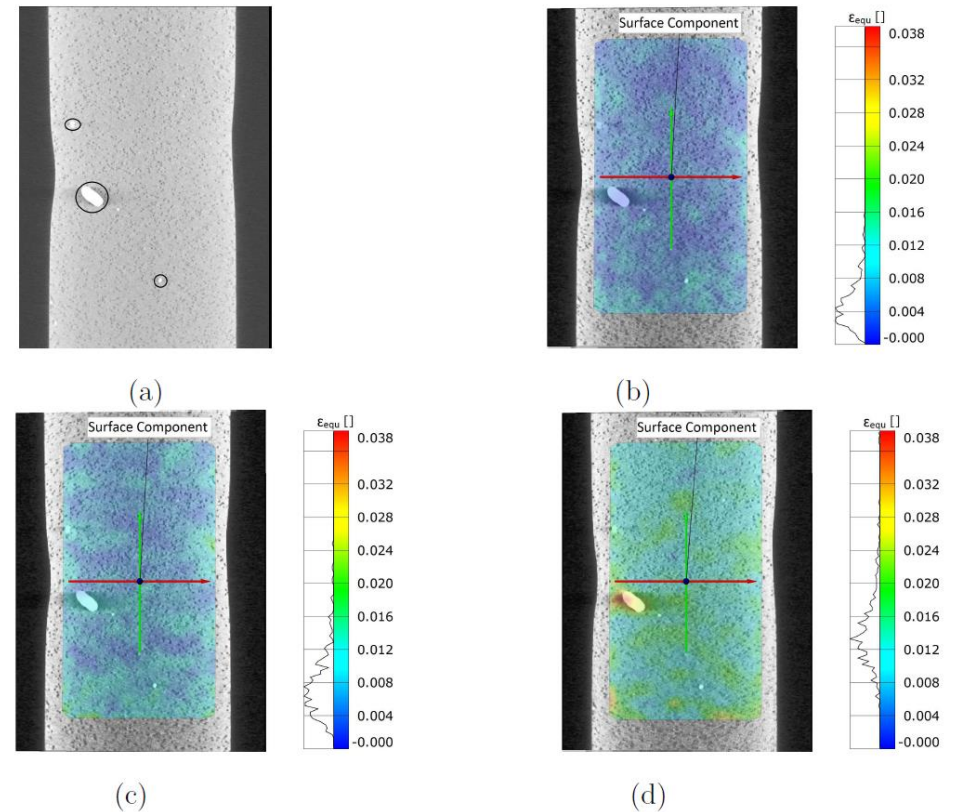


Fig. 2: Stress controlled tensile loading (type-II, brittle behavior): [2]: (a) in-situ X-ray μ CT images at the load of 0N; (b)-(d) strain maps (von Mises) calculated by digital image correlations (GOM [*]) at loading 2000 N, 3800 N and 4600 N, respectively.

[*] G. GmbH, Gom correlate, <https://www.gom.com/de/3d-software/gomcorrelate.html>.

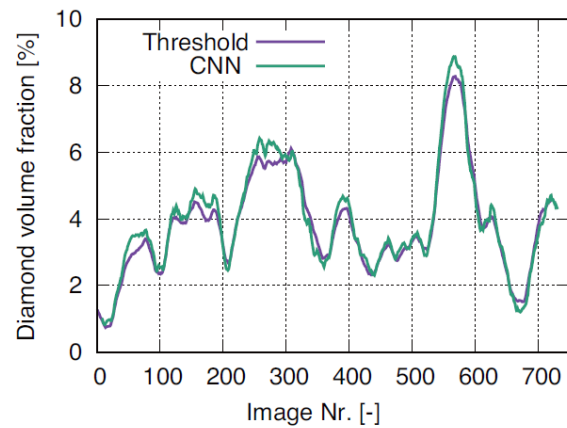


Fig. 3: Comparison of diamond area fraction in each μ CT image after the segmentation: threshold method [**] v.s. U-Net/machine learning [**] (type-II, brittle behavior, [2]).

[**] Open source computer vision, <https://docs.opencv.org/master/>. (accessed on 5 May 2021).

[***] O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox, U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, in: Medical Image Computing and Computer-695 Assisted Intervention, MICCAI 2015, pp. 234–241.

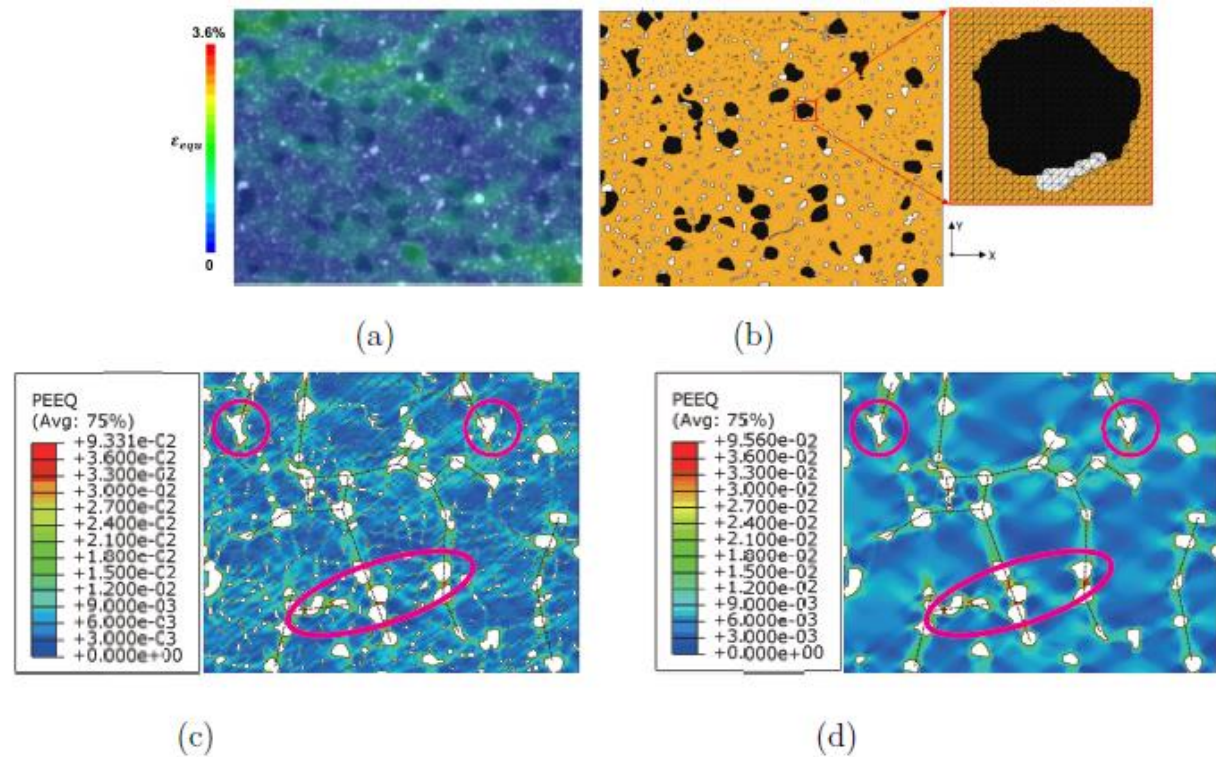


Fig. 4: Co/WC/diamond composite (type-I, ductile behavior, [1]): (a) the measured local equivalent plastic strain ϵ_{equ} for a real microstructure cut-out [****]; (b) the corresponding structure after the pixel handling and an example of the improved meshing at a sharp corner of a diamond particle; (c) the ϵ_{equ} distribution predicted by an FE simulation with three phases; (d) the same as (c) but with two phases.

[****] H. Crostack, J. Nellesen, G. Fischer, U. Weber, S. Schmauder, F. Beckmann, 3D Analysis of MMC microstructure and deformation by μ CT and FE simulations, in: Developments in X-ray tomography VI, Vol. 7078, Proc. of PSIE, 2008, p. 70781I. doi:10.1117/12.795206.

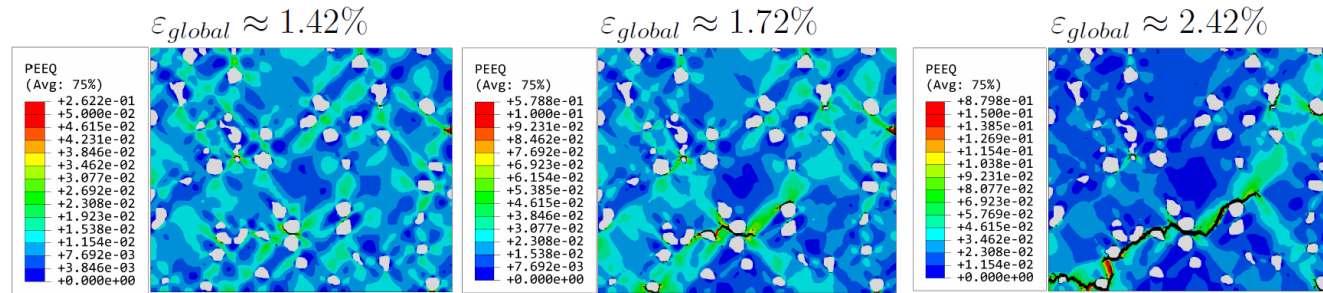


Fig. 5: FE predicted damages and the local equivalent plastic strain ε_{equ} distribution for the real microstructure in **Fig. 6(b)** (type-II, quasi-brittle behavior, [1]): (left) at the damage initiation stage, voids distributed in the whole structure; (middle) some cracks formed through void growth; (right) through crack connections, a major crack forms and propagates through the diamond clusters.

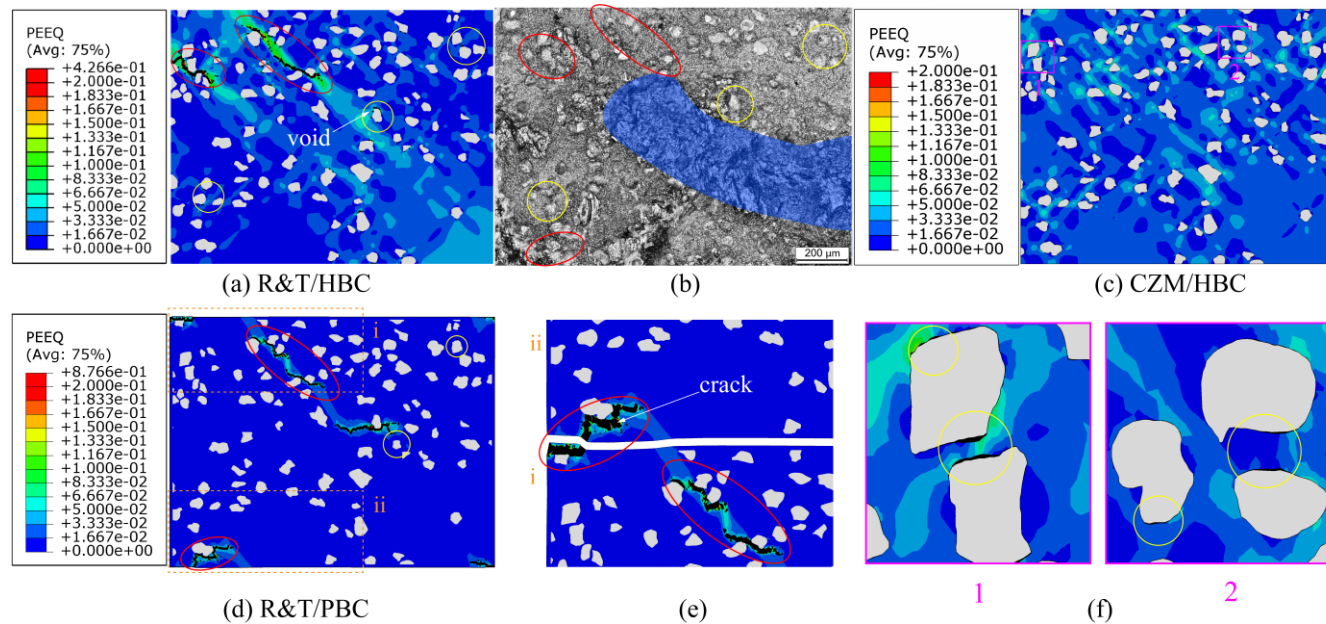


Fig. 6: Local damage distribution including voids and cracks (type-II, quasi-brittle behavior, [1]): (a) predicted by Rice&Tracey (R&T) model with HBCs; (b) experiment; (c) predicted by CZM model with HBC; (d) predicted by R&T model with PBCs; (e) zoom-in views of the two marked rectangles in (d);(f) zoom-in views of the two marked squares in (c).