



Doctoral Thesis

Material-physical description of interpenetrating graphite/ aluminium composites produced by liquid metal infiltration

Author(s):

Etter, Thomas

Publication Date:

2005

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005035783> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 16096

**Material-Physical Description of
Interpenetrating Graphite/Aluminium Composites
Produced by Liquid Metal Infiltration**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

Thomas Etter

Dipl. Werkstoff-Ing. ETH

born on 29th May 1975

citizen of Fräschels (FR), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter J. Uggowitzer, examiner

Prof. Dr. Ludwig J. Gauckler, co-examiner

Prof. Dr. Jörg F. Löffler, co-examiner

2005

SUMMARY

The aim of this study is the material-physical description and understanding of recently developed graphite/aluminium composites with an interpenetrating network structure. These composites can be defined as multiphase materials in which each phase is three-dimensionally interconnected throughout the microstructure, allowing multifunctional characteristics.

Interpenetrating graphite/aluminium (C/Al) composites were produced by pressure infiltration of aluminium-silicon alloys into isotropic microporous graphite preforms with an open porosity of about 15 vol.%. Due to their specific properties, light metal infiltrated graphites are attractive for lightweight components such as parts of internal combustion engines. Thereby, the low coefficient of thermal expansion and the temperature resistance of carbon materials, in addition to the low density, bestow significant advantages compared to conventional monolithic Al alloys. Optical and transmission electron micrographs show that the metallic phase is strongly modified by the high amount of graphite and by the pore size distribution of the preform. By selecting suitable infiltration temperatures and by ensuring a short contact time between graphite and aluminium in the indirect squeeze casting process, the formation of hygroscopic aluminium carbide (Al_4C_3) can be avoided.

The light metal infiltration significantly increases the flexural strength of the composites, compared to porous graphite preforms. As can be shown by scanning electron microscopy and theoretical considerations, the significant increase in fracture toughness due to small additions of a ductile metal phase can be attributed to crack bridging by plastic deformation of the ductile aluminium phase in the composite. The analytical consideration of a crack bridging model also reasonably explains the observation that the flexural strength and fracture toughness of these C/Al composites do not decrease at 300°C.

The light metal infiltration leads to a significant increase in electrical and thermal conductivity, respectively. In addition, the coefficient of thermal expansion (CTE) of interpenetrating C/Al composites is about two to three times lower than the CTE of monolithic Al alloys.

Due to the fact that the CTE of graphite preforms is three to six times lower than the CTE of monolithic Al alloys, thermal fatigue may have a negative effect on composite properties. The large mismatch in CTE between graphite and aluminium leads to the building-up of high stress levels in the composites during the cooling after infiltration. These stresses relax at least partial-

ly in succeeding thermal treatment. This stress relaxation is observed in the form of a hysteresis in dilatometer measurements. It is worth mentioning that stress relaxation is accompanied by dimensional instability of the composites during the first few thermal cycles (length increase). It is shown that interpenetrating C/Al composites can be susceptible to thermal fatigue, depending on the corresponding monolithic phase properties and on their specific topology. The mechanical properties can be affected by thermal loading, depending on the infiltrated aluminium alloy. On the one hand, the decrease in fracture toughness and accordingly in strength due to thermal cycling (TC) is mainly attributed to aging. Precipitation reactions and silicon phase coarsening during thermal cycling are the most obvious effects. On the other hand, local debonding along the C/Al interface and/or damage evolution within the metallic network lead to a deterioration of physical properties.

Synchrotron based X-ray microtomography has shown that the main reason for a decrease in electrical conductivity due to thermal cycling may be attributed to void formation in the highly conductive metal phase. The 3-D microstructural information obtained by X-ray tomographic microscopy is also used for the development of large-scale 3-D finite element models after segmentation of the X-ray microtomography images. It is shown that the numerical predictions very accurately reproduce the experimentally-determined electrical conductivity of interpenetrating C/Al composites.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die materialphysikalische Beschreibung eines neuartigen Graphit/Aluminium-Verbundwerkstoffes. Durch die Druckinfiltration von siliziumhaltigen Aluminium-Legierungen in isotrope mikroporöse Graphitvorformen (~ 15 Vol.% Porosität) wurden Graphit/Aluminium-Verbundwerkstoffe (C/Al-) mit einem Durchdringungsgefüge hergestellt. In diesem interpenetrierenden Mehrphasenwerkstoff bildet jede Phase ein dreidimensionales Netzwerk aus, das zur makroskopischen Werkstoffeigenschaft des Verbundwerkstoffes beiträgt. Auf Grund der geringen Dichte, des niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie weiteren interessanten physikalischen Eigenschaften, könnten leichtmetallinfiltrierte Graphite in Zukunft herkömmliche Al-Legierungen als Kolbenwerkstoffe in Verbrennungsmotoren konkurrieren.

An Hand von licht- und elektronenoptischen Untersuchungen wird gezeigt, dass die Metallphase durch den hohen Graphitanteil und die Porengrößenverteilung der Vorform stark modifiziert wird. Durch die Wahl geeigneter Infiltrationstemperaturen und durch eine kurze Kontaktzeit zwischen Graphit und Metall im Indirekten Squeeze Casting Prozess, kann die Bildung von hygroskopischem Aluminiumkarbid (Al_4C_3) verhindert werden.

Im Vergleich zu porösen Graphitvorformen kann durch die Leichtmetallinfiltration die Biegebruchfestigkeit deutlich erhöht werden. Durch eine analytische Modellbetrachtung wird aufgezeigt, dass die Festigkeitserhöhung hauptsächlich auf eine Erhöhung der Bruchzähigkeit durch plastische Verformung des duktilen Aluminiums zurückzuführen ist. Mit diesem Ansatz kann auch erklärt werden, wieso diese C/Al-Verbundwerkstoffe bei 300°C keinen Festigkeitsabfall gegenüber Raumtemperatur zeigen.

Im Weiteren führt die Leichtmetallinfiltration zu einer deutlichen Erhöhung der elektrischen wie auch der thermischen Leitfähigkeit. Der thermische Ausdehnungskoeffizient dieser C/Al-Verbundwerkstoffe liegt etwa zwei- bis dreimal tiefer als der Ausdehnungskoeffizient der monolithischen Aluminiumlegierungen.

Auf Grund der Tatsache, dass die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Graphitvorformen um drei- bis sechsmal kleiner sind als die der monolithischen Al-Legierungen, kann thermische Ermüdung zu einer Beeinträchtigung der Verbundwerkstoffeigenschaften führen. Als Folge der stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten werden beim raschen

Abkühlen nach der Infiltration in den Verbundwerkstoffen hohe Spannungen aufgebaut. Diese Spannungen können durch eine nachfolgende thermische Behandlung zumindest teilweise relaxieren. Diese Spannungsrelaxation äussert sich in einer Art “Hystereseverhalten” in Dilatometermessungen. Im Hinblick auf mögliche Anwendungen im Motorenbereich gilt es zu beachten, dass die Spannungsrelaxation mit einer geometrischen Instabilität (Probenverlängerung) gekoppelt ist.

Die Arbeit zeigt auf, dass die monolithischen Werkstoffeigenschaften sowie deren Topologie die Anfälligkeit von interpenetrierenden C/Al-Verbundwerkstoffen auf thermische Wechselasten bestimmen. Zum einen können je nach Legierungszusammensetzung Ausscheidungsvorgänge in der Metallphase zu einer leicht verringerten Bruchzähigkeit bzw. Festigkeit nach dem thermischen Zyklieren führen. Zum anderen kann eine Grenzflächentrennung zwischen Graphit und Aluminium und/oder eine Schädigung des metallischen Netzwerkes eine Verschlechterung der physikalischen Eigenschaften zur Folge haben.

Mikrotomographische Messungen an der Synchrotronlichtquelle am Paul Scherrer Institut (PSI) haben dabei gezeigt, dass eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit auf Grund thermischer Wechsellasten im Wesentlichen auf eine Schädigung durch Porenbildung in der Metallphase zurückzuführen ist. Der komplette 3-D Datensatz aus der Mikrotomographie wird weiter dazu verwendet, um nach geeigneter Segmentierung der 2-D Tomogramme, realitätsnahe 3-D Finite-Element-Modelle aufzubauen. Die 3-D Modellierung zeigt auf, dass die numerische Vorhersage der elektrischen Leitfähigkeit interpenetrierender C/Al-Verbundwerkstoffe sehr genau mit der experimentell bestimmten Leitfähigkeit übereinstimmt.