

氏名	RAFIQUZZAMAN MD.
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 671 号
学位授与年月日	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Fracture mechanism of an aluminium cast alloy locally reinforced by SiC particles and Al ₂ O ₃ whiskers under monotonic and cyclic load: boundary and whisker orientation effect (一部分が SiC 粒子と Al ₂ O ₃ ウィスカーで強化された Al 鋳造合金の単調および繰返し荷重下における破壊機構の評価：境界およびウィスカー方位の効果)
論文審査委員	委員長 教授 荒居 善雄 委員 教授 加藤 寛 委員 准教授 蔭山 健介 委員 教授 堀尾健一郎

論文の内容の要旨

Metal matrix composites (MMCs) have been widely considered as possible substitute of traditional materials (such as metals, plastics, ceramics etc.) for structural applications because of their high strength and stiffness, low density, high temperature properties and excellent wear resistance. Despite their great advantages, lower ductility and higher cost is the major limitation of this composite. Therefore, there is a critical need to develop and design a new idea and concept in this material for structural applications. The application of MMCs to the most important functional area of the mechanical component especially which are the frictional surfaces may reduce the cost and improve the mechanical performances. For example, in the brake disc application, ductile aluminium alloy which has high fracture toughness supports the whole disc and the reinforced part by ceramic particles/whiskers is used in the area required (e.g. frictional area).

The aim of the present research is to clarify the effects of the boundary between the reinforced part and the unreinforced part on the fracture mechanism, under monotonic and cyclic load, of aluminium cast alloy locally reinforced by SiC particles and Al₂O₃ whiskers. Also the effect of the whisker orientation on the monotonic strength and fatigue strength and its effect on fracture mechanism of aluminium cast alloy reinforced by SiC particles and Al₂O₃ whiskers under monotonic and cyclic load are investigated. A three-dimensional single whisker unit cell model of cylindrical shape whisker in the periodic boundary condition is conducted using finite element method (FEM) to describe the overall behavior of the composite.

In chapter 1, an introduction of this research are discussed, which describes the back ground, the motivation, proposed concepts, the objectives and the scopes of this research. In this chapter also reviews the past research on the MMC.

In chapter 2, Materials fabrication and its microstructure, the experimental set up and the experimental procedures are discussed. Hybrid metal matrix composites were fabricated with 21 volume% SiC particles

and 9 volume% Al_2O_3 whiskers as reinforcements and an aluminium alloy of JIS-AC4CH as matrix. The locally reinforced part was fabricated with the squeeze casting method, with a 100 MPa maximum pressure, using a hybrid preform which is made of SiC particles and Al_2O_3 whiskers. Symmetric four-point bending tests were performed using special bending fixtures. The fracture surface observations of the composites were made by the SEM. The failure mechanisms of the composites were investigated by the composition analysis of EDX. To investigate the boundary effect, whisker orientation effect and the fracture mechanism, two types of specimens were prepared for the bending test. One is locally reinforced material ($\alpha = 90^\circ$, where α is the angle between load and whisker orientation). The latter is homogeneous MMC ($\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$).

In chapter 3 the experimental results of boundary effect on fracture mechanism and whisker orientation effect on strength are presented. The fracture occurs in the reinforced part under both monotonic and cyclic loads. Under cyclic load, the fracture is dominated by interfacial debonding of particle-matrix and whisker-matrix interfaces, whereas, under monotonic load, the fracture is dominated by both particle fracture and particle/whisker-matrix interfacial debonding. Under cyclic loading when the maximum stress is low and the matrix alloy is deformed elastically in the reinforced part, the minimum distance of fracture location is far from the boundary between the reinforced and unreinforced parts. In the monotonic bending test, the specimens are broken very close to the boundary (i.e., at the first or second particle closest to the unreinforced part). In the fatigue test, when the maximum stress is high, the specimens are also broken very close to the macroscopic boundary and in the reinforced part. This occurs when the matrix alloy in the reinforced part is deformed plastically within the elastically deformed reinforcement. The difference in the deformation state is the cause of different fracture locations between the monotonic and cyclic loading. The fracture surface of locally reinforced material ($\alpha = 90^\circ$) is dominated by interfacial debonding of Al_2O_3 whisker/matrix according to the area fraction results. The transversely debonded whisker gives the lower strength and shorter fatigue life of locally reinforced material ($\alpha = 90^\circ$) which is corresponding to the interface debonding between whisker-matrix interfaces. Whisker fractures dominate the fracture mechanism of homogeneous MMC ($\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$) and gives higher strength and longer fatigue life of homogeneous MMC ($\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$). This is one of the reasons why the monotonic strength and fatigue strength of homogeneous MMC is higher than that of locally reinforced material.

In chapter 4, a numerical analysis of stress distributions around the boundary between reinforced part and unreinforced part are conducted based on an inclusion array model considering the microscopic inhomogeneous effects. Also a three-dimensional single whisker unit cell model of cylindrical shape whisker in the periodic boundary condition is conducted using FEM to describe the overall behavior of the composite. The numerical results based on inclusion array model, which shows the peak stress develops in the first inclusion from the macroscopic boundary between the reinforced part and the unreinforced part under high nominal bending stress, is consistent with the fracture location that was experimentally observed. On the other hand, under low nominal bending stress, the peak stress develops at the interface between inclusion and matrix rather than in the inclusion that also agrees with the fractographic results of fatigue fracture, thereby, providing further verification of interfacial debonding between the reinforcing materials and the matrix alloy. The predicted strain amplitude is much higher in the reinforced side compared to the unreinforced side, supports the experimental observation that the fatigue fracture occurred in the reinforced part. The prediction results based on the 3-D single whisker unit cell model is found to be in reasonable agreement with experimental observations which shows with respect to the loading direction all perpendicular oriented whiskers are debonded and parallel orientated whisker are broken.

In chapter 5, the general conclusions and directions for future investigation are given.

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は2008年2月7日に論文発表会を開催した。その発表も含めて学位論文の審査を行った。研究の概要は以下のとおりである。

低密度の金属をマトリックスに用い セラミックスの繊維、ウイスカあるいは粒子を強化材とした金属基複合材料 (MMC) は比剛性、比強度が高く、耐摩耗性に加えて耐熱性も優れている。セラミック強化アルミニウム基複合材料の単調荷重下および繰返し荷重下における破壊機構について多くの研究が行われており、特にセラミック粒子と母材の塑性拘束が破壊機構に及ぼす影響が研究されている。一方、MMC の短所として破壊靱性が低いことが挙げられ、摩擦を受ける部位のみをセラミックで強化した部材が利用されている。SiC 粒子と Al_2O_3 ウイスカをプリフォームに成形し、高圧金型鑄造法で製造する部分的に強化されたアルミニウム鑄造合金は、耐摩耗性に優れると同時に、部材全体としての延性が高く、強度上の信頼性を高くできる。部材の強度を保証するためには、MMC 部とアルミ合金部の巨視的境界部における破壊発生位置および破壊機構を明らかにするとともに、破壊発生位置および破壊機構に及ぼすウイスカ方位の影響を明らかにし、十分な強度を有していることを立証する必要がある。一方、均質な材料同士の接合材の接合界面端部には、弾性係数の不連続に起因した応力特異場が生じることが知られている。一部分が SiC 粒子と Al_2O_3 ウイスカで強化されたアルミニウム鑄造合金は、セラミック粒子で強化された部分の母材がそのまま非強化部分を構成するので、その境界部の応力分布特性は未解明な問題である。また、部分的に強化された材料 (以下、MMC/Al 接合材と略す) の破壊機構を調べ、接合部近傍の応力分布と破壊挙動の関連を明らかにする研究はまだ行われていない。そこで、本研究では、ウイスカ方位の異なる MMC (SiC 粒子と Al_2O_3 ウイスカ強化) /Al (アルミニウム鑄造合金) 接合材の静的破壊試験および疲労試験を行うとともに、破断面の解析と成分分析を行い、その破壊機構を明らかにした。さらに、MMC 部とアルミ合金部の境界部近傍の破壊挙動に及ぼすウイスカ方位の影響を解明する目的で、強化材の存在を考慮した三次元介在物配列モデルについて弾塑性応力解析を行い、その最大応力発生位置および歪振幅を明らかにした。

本論文は5章からなっており、第1章「緒言」では、本研究の背景と目的および学位論文の構成について述べられている。

第2章「実験方法」では、本研究で用いた複合材料、実験装置と試験方法について、特に局所的に強化された境界部の微視組織およびウイスカ方位に注目して、述べられている。SiC/ Al_2O_3 プリフォームを部分的に配置した高圧金型鑄造 (圧力 100MPa) で円板を製造した後、熱処理として T7 処理を行った。この円板の円形面内にウイスカはランダムな方位を有する。短冊形状の試験片は、ウイスカ方位に対して垂直およびランダム面内に切り出した。MMC 部の母材はアルミ合金部の材料そのものであり、微視的には MMC 部とアルミ合金部の境界面は存在しない。単調曲げ試験は四点曲げで、荷重点の変位速度 0.0025 mm/s 一定で破断まで負荷した。最大荷重から公称曲げ応力を算出し、曲げ強度とした。疲労試験は荷重制御で行い、応力比は 0.1、周波数は 1 および 10Hz である。試験片表面を光学顕微鏡で、破面を走査型電子顕微鏡で観察するとともに、X 線による成分分析 (EDX) を行った。特に、マッチング破面の様相と成分を調べ、破壊機構を考察した。破面を構成するアルミ合金のディンプル、SiC 粒子割れ、SiC 粒子 / 母材界面はく離、 Al_2O_3 ウイスカ割れ、 Al_2O_3 ウイスカ / 母材界面はく離の破面率を、引張側表面から深さ 50 μm の範囲を試験片全幅に渡って調べ、その平均値を算出した。

第3章「実験結果」では、単調曲げ荷重下および繰返し曲げ荷重下の両方において、破壊はMMC内で生じること、疲労試験の破面においては、強化粒子と母材の界面はく離が支配的であり、単調曲げ試験では、強化粒子と母材の界面はく離のみならず、SiC粒子割れも生じること、疲労破壊は、最大の公称曲げ応力が低く、母材が弾性変形する状態においては、MMCとAlの境界部からはるか遠いMMC内で生じ、単調曲げ破壊は、MMCとAlの境界部の一番目又は二番目のSiC粒子の位置で生じること、単調曲げ荷重下および繰返し曲げ荷重下の両方において、ウイスカ方位が荷重方向と垂直な場合の破壊強度は、ウイスカ方位がランダムな面内に荷重をうける場合に比べて低いこと、ウイスカ方位が荷重方向と垂直な場合は、ウイスカと母材の界面で剥離が生じ、ウイスカ方位がランダムな面内に荷重をうける場合、ほぼ全てのウイスカが破断したことが述べられている。

第4章「破壊機構、境界およびウイスカ方位の効果影響の解析」では、強化材の存在を考慮した介在物配列モデルは、最大応力は公称曲げ応力が低い場合には介在物と母材の界面、公称曲げ応力が高い場合には介在物内に発生すること、単調負荷における公称曲げ応力が高い場合には、最大応力はMMC部とアルミ合金部の境界の一つ目の介在物内に発生し、繰返し負荷における歪振幅は、MMC部の方がアルミ合金部よりも大きいこと、ウイスカ方位が荷重方向と垂直な場合はウイスカと母材の界面に高い応力を生じ、ウイスカ方位がランダムな面内に荷重をうける場合はウイスカ内に最大応力を生じることを予測できることを述べている。

第5章「結言」では、本研究で得られた結果をまとめている。

本論文の主な成果は査読付の学術雑誌に3編の論文として発表されている。以上のように、本論文は工学的・工業的に極めて有用であり博士（学術）の称号にふさわしいと判断される。