

平成 30 年 7 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0224

研究課題名（和文）タングステンの熱疲労劣化挙動の学理究明による傾斜機能長寿命ダイバータ開発への挑戦（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）A Challenge to Development of Functionally-graded Long-life Divertor based on Degradation Behavior Caused by Thermal Fatigue of Tungsten (Fostering Joint International Research)

研究代表者

野上 修平 (Nogami, Shuhei)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00431528

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,900,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、カールスルーエ工科大学（ドイツ）で開発されたラミネート構造化手法を、基課題で開発したカリウムドーブタングステンに適用することにより、低温でも延性を発現する積層カリウムドーブタングステンを開発することを目的とした。カリウムドーブタングステンの製造条件（圧延率など）と、積層カリウムドーブタングステンの製作条件（中間材の材料種、各層の幾何学的厚さ、固相拡散接合の温度と時間など）の適正化により、低い温度においても、塑性変形による延性や、複合材料特有の擬延性を発現するタングステン材料が実現可能であることが示された。よって、本研究課題の目標は概ね達成されたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is development of potassium (K) doped tungsten (W) laminate, which shows low temperature ductility, by applying the laminated structure technology developed by Karlsruhe Institute of Technology, Germany, to the K-doped W developed by the previous KAKENHI grant research. By optimizing the fabrication conditions of K-doped W (reduction ratio in rolling process, etc.) and K-doped W laminate (material selection of the interlayer, thickness of each layer, temperature and time of solid state diffusion bonding, etc.), it is clarified that the tungsten material showing ductility caused by plastic deformation and pseudo ductility like a composite material even at low temperature can be obtained. Therefore, the objective of this research is considered to be basically achieved.

研究分野：核融合・原子力材料

キーワード：核融合炉 ダイバータ タングステン 延性 積層材料

1. 研究開始当初の背景

タングステンダイバータの主たる損傷事象は熱疲労であるため、き裂発生や成長の抑制、寿命低下要因となる再結晶化の抑制が必要である。基課題においては、ナノ組織制御タングステンとボイド分散強化タングステンが、これらの課題解決の可能性を有することを明らかにした。

基課題で最適化したボイド分散強化材は、カリウムバブルを粒界に分散させた材料（添加されたカリウムが焼結中に揮発することによりバブルが分散され、強化されたタングステン、カリウムドーパタングステン（K-doped W; KW））であり、従来材の約5倍の延性を示し（図1参照）、試算した疲労寿命は従来材の5~10倍となり、既存材料を凌駕する可能性を示した。しかし、従来材と同様に300℃以下の低い温度では延性が失われ、脆性的に破壊するという欠点があった。

2. 研究の目的

本研究では、ドイツのカールスルーエ工科大学で開発された、低温での延性消失を克服したタングステン材（積層タングステン）の基幹技術である「ラミネート構造化手法」を基課題開発材に適用し、高延性を維持したまま低温での延性消失を克服し、ダイバータ実機に適用可能な積層カリウムドーパタングステンを開発することを目的とする。積層タングステンは、高延性のタングステン薄板を中間材とともに積層し、接合一体化することにより、ダイバータ部材などが製作可能な大きさにしたものである。

3. 研究の方法

本研究では、上記目的達成のため、1) 積層KドーパWの数値シミュレーション等に基づく材料設計、2) 課題1に基づく積層KドーパWの製作、3) 課題2で製作した積層KドーパWの疲労寿命の評価、4) 課題2で製作した積層KドーパWの衝撃試験による低温延性の実証、5) 課題2で製作した積層KドーパWの熱疲労・熱衝撃試験による実機適用性の実証の5課題を計画した。

課題1から課題4については、カールスルーエ工科大学（ドイツ）のMichael Rieth博士およびJens Reiser博士、課題5については、ユーリッヒ研究センター（ドイツ）のGerald Pintsuk博士の協力を得た。

4. 研究成果

(1) 図1のように、基課題では主に引張試験による伸びで材料の延性を評価した。材料の延性の評価としては、シャルピー衝撃試験における吸収エネルギーによる評価も一般的であるため、本研究では、カリウムドーパタングステンと、比較のための純タングステンについて、シャルピー衝撃試験を実施した。図2に、両材料の吸収エネルギーと試験温度の関係を示す。低い温度において延性が消失

する傾向は引張試験と変わらなかったが、開発したカリウムドーパタングステンは純タングステンに比べ、延性消失温度域が縮減されていることが明らかになった。また、吸収エネルギーは引張試験における伸びと同様に、カリウムドーパタングステンのほうが高かった。

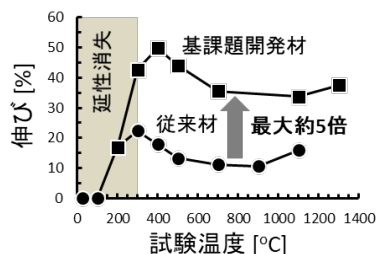


図1. 従来材（純タングステン）と基課題開発材（カリウムドーパタングステン）の引張試験下における伸びの試験温度依存性

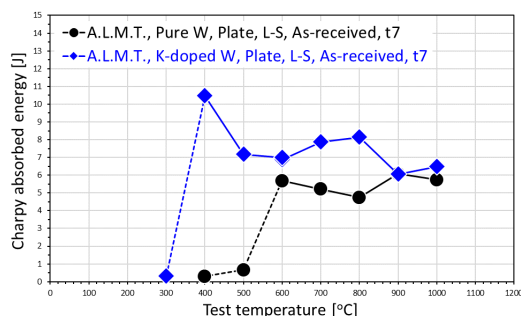


図2. 純タングステンとカリウムドーパタングステンのシャルピー衝撃試験下における吸収エネルギーと試験温度の関係

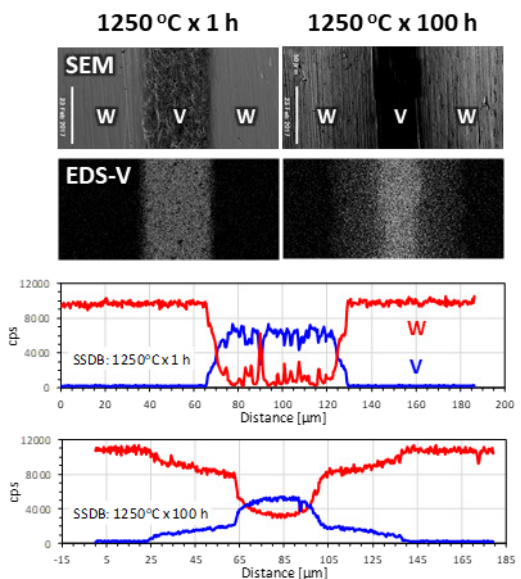


図3. カリウムドーパタングステンと純バナジウムの接合体の断面EDS測定結果

本研究では、カールスルーエ工科大学における先行研究に鑑み、固相拡散接合法により、カリウムドープタングステンと中間材である純バナジウムと純銅を接合することとした。固相拡散接合では、接合温度と接合時間が影響する。本研究では、タングステンとバナジウム、タングステと銅の固相拡散接合に関する先行研究に鑑み、接合温度は 900℃から 1250℃とした。これらの温度において、タングステンと中間材であるバナジウムおよび銅の相互拡散距離は、接合時間を 1 時間以上とすることで、最大十数 μm になることが予測された。図 3 に、カリウムドープタングステンと純バナジウムの 1250℃で製作した接合体のエネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray spectrometry; EDS) 測定結果を示す。相互拡散距離は、接合時間が 1 時間の場合が 15 μm 程度、接合時間が 100 時間の場合は 50 μm 程度であった。積層タングステンの材料設計において、中間材の延性と接合強度が重要であるが、接合時間を 100 時間とした場合、相互拡散距離が大きく、中間材の元の組成を保った領域が小さくなった。よって、本研究では、保持時間は基本 1 時間とした。

(2) 接合温度は 900℃または 1250℃、接合時間は 1 時間、中間材は純バナジウムまたは純銅として、積層カリウムドープタングステンを製作した。図 4 に、製作した 5 種類の積層カリウムドープタングステンの製作条件と断面光学顕微鏡断面写真を示す。積層カリウムドープタングステン#2 は、比較のため、接合時間を 100 時間とした。元素材のカリウムドープタングステンは、#1 と#2 は基課題開発材そのままの状態の材料であり、#3、#4 および#5 は延性向上のためさらに圧延加工を施した材料である。

保持時間を 100 時間とした場合、前述の EDS 測定結果で示唆されたように、元の組成を維持した中間材領域はほとんどなくなり、タングステンとコントラストがほぼ同等に観察された。製作した 5 種類のいずれの試験体についても、積層材料の性能劣化を誘発するような接合面における剥離や欠陥などは見られず、良好な接合状態を示した。

(3) 製作した積層カリウムドープタングステンの分量が限られていたため、課題 3 および課題 4 について、同材料の機械特性評価としては、試験片製作に多くの素材を要する高温低サイクル疲労試験は断念し、シャルピー衝撃試験、静的引張試験および静的曲げ試験を実施した。

図 5 に、純バナジウムを中間材とし、接合温度 1250℃、接合時間 1 時間および 100 時間として製作した厚さ 0.5 mm のカリウムドープタングステンを用いた積層カリウムドープタングステン#1 および#2 の 200℃におけるシャルピー衝撃試験による破断試験片の走

査電子顕微鏡写真を示す。図 2 に示したとおり、元素材のカリウムドープタングステンは、200℃においてシャルピー衝撃試験による延性を示さなかったが、積層カリウムドープタングステン#1 および#2 も同様に延性を示さず、概して破面は脆性的な様相を示した。

図 6 に、純バナジウムおよび純銅を中間材とし、接合温度 900℃または 1250℃、接合時間 1 時間として製作した厚さ 0.2 mm のカリウムドープタングステンを用いた積層カリウムドープタングステン#3、#4 および#5 の室温における曲げ試験による破断試験片の外観写真と荷重-変位曲線を示す。積層カリウムドープタングステン#1 および#2 とは異なり、#3、#4 および#5 は、荷重-変位曲線に示されるように弾性領域では破断しなかった。特に、#3 および#5 については、十分な延性を示し、破断試験片においても十分な塑性変形が観察された。特に#5 については、き裂が発生せず、塑性変形のみを呈した。一方、#4 については、破断試験片において観察される塑性変形は比較的小さく、き裂の進展経路

	KW	Interlayer		SSDB	
#1	0.5 mm	Pure V	0.05 mm	1250℃	1 h
#2	0.5 mm	Pure V	0.05 mm	1250℃	100 h
#3	0.2 mm	Pure V	0.05 mm	1250℃	1 h
#4	0.2 mm	Pure V	0.05 mm	900℃	1 h
#5	0.2 mm	Pure Cu	0.05 mm	900℃	1 h

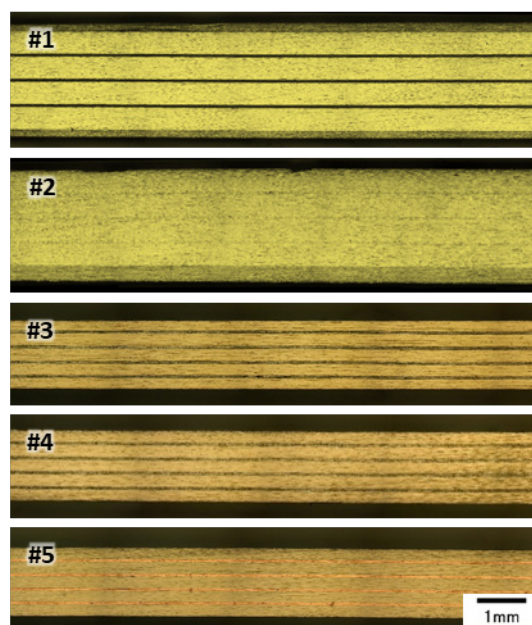
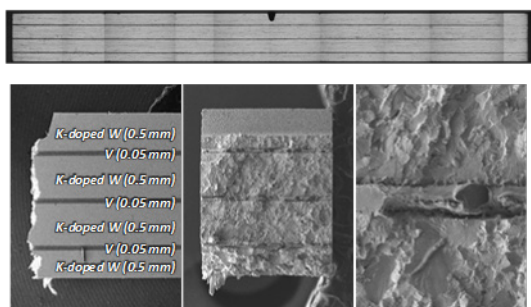


図 4. 純バナジウムおよび純銅を中間材とした各種積層カリウムドープタングステンの製作条件 (上表) と断面光学顕微鏡断面写真 (カリウムドープタングステン: K-doped W (KW)、中間材: Interlayer、固相拡散接合: Solid State Diffusion Bonding (SSDB))

#1; SSDB: 1250°C x 1 h, Impact test: 200°C



#2; SSDB: 1250°C x 100 h, Impact test: 200°C

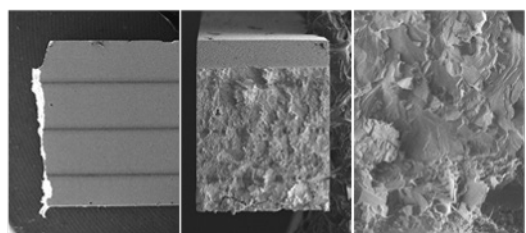


図 5. 純バナジウムを中間材とした積層カリウムドーパングステン (#1 および#2) の 200°Cにおけるシャルピー衝撃試験による破断試験片の走査電子顕微鏡写真

や荷重-変位曲線の弾性域外の挙動から、複合材料特有の擬延性を発現したと考えられる。#4 は、同じ純バナジウム中間材を用いている#3 に比べ接合温度を低くしたため、相互拡散距離が小さくなり、接合強度が低下したため、界面の剥離がき裂の偏向を誘引し、このような擬延性を発現したと考えられる。

(4) 課題 5 について、当初使用する予定であったユーリッヒ研究センターの電子ビーム照射熱負荷装置 JUDITH-2 に不具合が生じ使用できなかったため、前身機である JUDITH-1 を用いて、基課題開発材であるカリウムドーパングステンの熱衝撃試験のみを実施した。カリウムドーパングステンの熱衝撃耐性は、従来の純タングステンと遜色なかった。JUDITH-1 は放射性物質を扱うホットセルに設置されており、試験後に素材を取り出せなくなる可能性があることから、積層カリウムドーパングステンの熱衝撃試験の本研究期間中における実施は断念し、今後 JUDITH-2 を用いて別途実施することとした。

(5) 本研究の結論として、元素材のカリウムドーパングステンの製造条件と、積層カリウムドーパングステンの素材の構成 (中間材の材料種と各層の幾何学的厚さなど) や製作条件 (接合温度と接合時間) の適正化により、低い温度においても通常の塑性変形によ

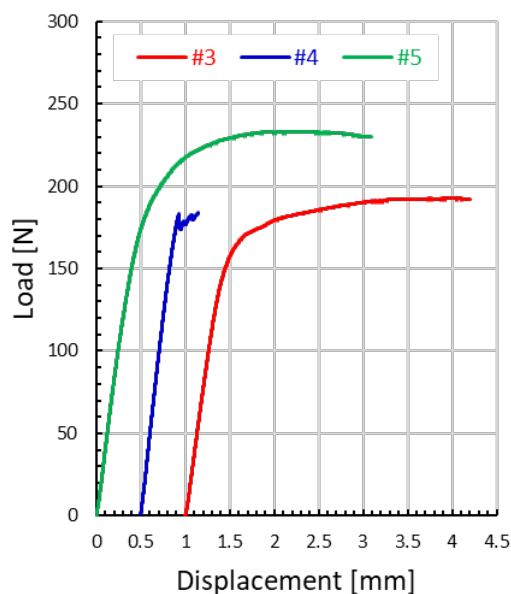
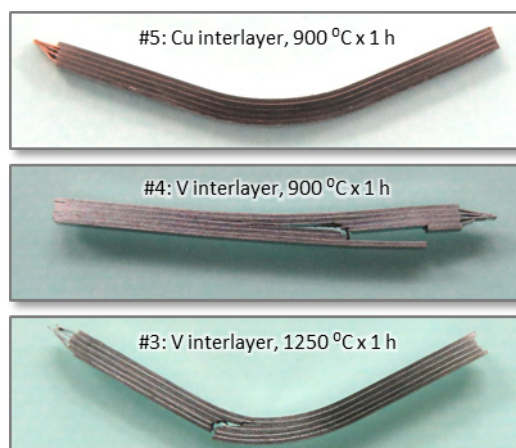


図 6. 純バナジウムおよび純銅を中間材とした積層カリウムドーパングステン (#3、#4 および#5) の室温における曲げ試験による破断試験片の外観写真と荷重-変位曲線

る延性や、複合材料特有の擬延性を発現することにより、延性消失が抑制されたタングステン材料が実現可能であることが示された。本研究で考慮した元素材の製造条件や、積層材の製作条件は限定的であるため、今後の研究で用途に応じてさらに最適化することが必要であるが、本研究課題の目標は概ね達成されたと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 野上修平、渡邊捷太郎、服部剛弥、Jens Reiser、Michael Reith、土田航平、宮澤健、長谷川晃、核融合炉用タングステン合金の熱機械特性 (1) 純タングステ

- ンの熱機械特性と合金開発の概要、日本原子力学会 2018 年春の年会、2018
- ② 服部剛弥、野上修平、渡邊捷太郎、Jens Reiser、Michael Reith、土田航平、宮澤健、長谷川晃、核融合炉用タングステン合金の熱機械特性 (2) タングステンの熱機械特性に及ぼすカリウムドーブの影響、日本原子力学会 2018 年春の年会、2018
 - ③ 渡邊捷太郎、野上修平、服部剛弥、Jens Reiser、Michael Reith、土田航平、宮澤健、長谷川晃、核融合炉用タングステン合金の熱機械特性 (3) タングステンの熱機械特性に及ぼすレニウム添加の影響、日本原子力学会 2018 年春の年会、2018
 - ④ 野上修平、渡邊捷太郎、服部剛弥、Jens Reiser、Michael Reith、長谷川晃、宮澤健、タングステンの衝撃特性に及ぼすカリウムドーブおよびレニウム添加の影響に関する研究、日本原子力学会東北支部第 41 回研究交流会、2017
 - ⑤ 野上修平、服部剛弥、能登裕之、Jens Reiser、長谷川晃、Michael Reith、固相拡散接合によるタングステン積層材の開発、Plasma Conference 2017、2017
 - ⑥ S. Nogami, H. Noto, J. Reiser, M. Rieth, T. Hattori, M. Toyota, T. Miyazawa, A. Hasegawa, Development of Doped-Tungsten Laminate by Solid State Diffusion Bonding, 18th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野上 修平 (NOGAMI Shuhei)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00431528

(2) 研究協力者

Michael Rieth
カールスルーエ工科大学・応用材料研究所・高温材料部門・部門長

Jens Reiser
カールスルーエ工科大学・応用材料研究所・高温材料部門・研究員

Gerald Pintsuk
ユーリッヒ研究センター・エネルギー・気候研究部門・研究員