

非モルテンプール型レーザクラディングによる 超耐熱玉軸受（ボールベアリング）の開発

北 村 裕 樹^{*}, 辰 巳 佳 宏^{*}, 金 野 泰 幸^{**},
宗 兼 圭 司^{***}, 塚 本 雅 裕^{****}, 山 口 拓 人^{*****}

^{*}大阪富士工業株式会社 技術センター（〒 660-0811 兵庫県尼崎市常光寺 1-9-1）

^{**}公立大学法人大阪大阪府立大学（〒 599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1）

^{***}旭精工株式会社（〒 593-8324 大阪府堺市西区鳳東町 6-570-1）

^{****}国立大学法人大阪大学接合科学研究所（〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1）

^{*****}地方独立行政法人大阪産業技術研究所（〒 594-1157 大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1）

Development of Super Heat-Resistant Ball Bearing by Non-Molten Pool Laser Cladding

KITAMURA Yuki, TATSUMI Yoshihiro, KANENO Yasuyuki,
MUNEKANE Keiji, TSUKAMOTO Masahiro and YAMAGUCHI Takuto

(Received November 15, 2021)

Key words : ball bearing, laser cladding, heat resistant, molten pool, rolling wear

1. はじめに

現在市販されている耐熱用玉軸受は金属製とセラミックス製に大別され、それぞれ以下のような特徴を有している。耐熱用金属製玉軸受には SUS440C 製が広く用いられている。この理由として、高温環境下での硬さ低下が他の合金に比べて小さいことや耐高温酸化性に優れる性質があげられ、その耐用限界温度は約 400℃である。一方セラミックス製玉軸受は 400℃を超える高温環境に耐えるが、金属製に比べて高価であること、低靱性で突発破損リスクを伴うため寿命信頼性に欠け低負荷域での使用に限定されること、小型に限られることなどの欠点がある。玉軸受は工業設備の基幹部品であるが、金属製とセラミックス製にはいずれも一長一短があり、現在市販されている玉軸受は必ずしも市場ニーズを満足しているとはいえない。

工業上の問題として以下のような事例があげられる。連続鋳造設備の上工程で使用するロールの軸受は、サイズと強度（負荷容量）の問題から金属製が使用されている。しかし、モールド下の引抜きスラブによる高温雰囲気下での操業負荷に起因する早期損傷や破損が発生し、その都度突発的な交換を余儀なくされ、設備停機による操業ロス要因となっている。また別の例として、金属材料の熱処理炉内コンベアロールにおいても、同様の理由で金属製玉軸受を用いるが、耐熱性の問題から軸受の炉外設置や冷却構造を設ける場合があり、設備構造の複雑化や大型化を招いている。

金属製玉軸受の耐用温度アップは、既存軸受との置き換えにより寿命信頼性の向上、回転駆動力低下による省エネルギー化、設備の簡素化、設備稼働率の向上、設備寿命の

延長など多くのメリットがある。そこで市場調査にて確認した耐熱要求温度のニーズに基づき、本研究では 600℃環境下で耐用できる玉軸受の開発を行った。

2. 600℃耐熱玉軸受の開発検討

2.1 表面改質による玉軸受寿命向上の検討

玉軸受に求められる性能は、軽く回ること、滑らかに回ること、ある程度の負荷能力を備えていること、回転精度がよいことなどがあげられ、これらが損なわれたときに軸受寿命となる。これらの性能を維持し、軸受寿命を適正に保つためには、内外輪材料への適切な硬さの付与と潤滑剤の選定が不可欠となる。通常、軸受の潤滑には油やグリースなどが用いられるが、軸受をある一定以上の温度で使用する場合、油潤滑が適用不能となり、たとえば Fig. 1 に示すような設計の様に摺動性を付与する固体潤滑剤が適用される。潤滑を担うリテーナ材料が不適切であったり、硬さ

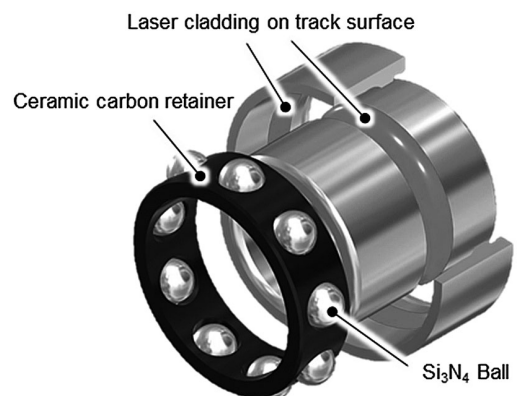


Fig. 1 Image of super heat-resistant ball bearing.

の不足する材料を内外輪に用いた場合には、軸受寿命の著しい低下が懸念されるため、耐熱玉軸受の開発にあたっては軌道部材料の摩耗を十分に抑止することが必要となる。これらの課題を解決することが耐熱寿命延長や、耐熱温度向上につながることから、本研究では内外輪軌道面の表面改質とリテーナ材質変更によって、軸受の耐熱性能向上を試みた。

2.2 表面改質法の選定

2.2.1 レーザクラッディングの検討

表面改質には肉盛溶接、溶射、硬質めっき、窒化、蒸着などさまざまな手法がある。その選定にあたり、被膜密着力が高いこと、被膜が厚いこと、適用材料の選択肢の広さなどの特徴から肉盛溶接が適していると考えられる。一般的な肉盛溶接法としてアーク溶接法があげられるが、玉軸受の内外輪はアーク溶接対象として扱うには小型で薄肉のものが多く、肉盛施工中に生じる溶接入熱起因の母材膨張や、肉盛層の凝固収縮に伴う引張応力等で内外輪の変形(溶接歪)を生じる懸念がある。また、溶接溶け込みに伴う母材成分希釈により、肉盛層の性質低下や品質不均一が懸念される。そこで、本研究開発では、低入熱の肉盛溶接法であるレーザークラッディング(以下、LMD: Laser metal deposition)法を選択し、外径 $\phi 34$ mm $\times$ 内径 $\phi 25$ mmの内輪と、外径 $\phi 52$ mm $\times$ 内径 $\phi 44$ mmの外輪に試験施工した。装置は最大出力5 kWのディスクレーザ(TRUMPF, TruDisk5006)を使用し、レーザスポットは $\phi 5.0$ mm、ノズルは3beam型を用いた。予備試験の結果は、内輪(Fig. 2)、外輪(Fig. 3)ともに溶着量過剰、溶け込み過剰となり、外輪にはアンダカット(溶接止端部の母材溝)や溶接残留応力に伴う変形が生じ、LMD法であっても溶接入熱に起因

する問題を生じることが確認された。

2.2.2 非モルテンプール型 LMD の選定

LMD法であっても通常の方法では母材入熱を大幅に低減する必要があることから、非モルテンプール型 LMD 法を適用した。従来型 LMD は、レーザ入熱により形成された溶融池内で溶接材料粉末を溶融させることでクラッディングが進行する。これに対して非モルテンプール型 LMD は、溶接材料粉末を母材到達前にレーザ入熱により溶融させてクラッディングする手法である(Figs. 4, 5)。すなわち、レーザ入熱は母材側よりも粉末側に占める割合が大きく、母材入熱に起因する問題の抑制が図れる。Fig. 6 にアーク溶接、従来型 LMD、非モルテンプール型 LMD の肉盛部断面例を示すが、非モルテンプール型 LMD は溶け込みと HAZ (Heat-affected zone) が極僅かであり、他の工法と比較し母材に対し低入熱であることがわかる。

2.3 溶接材料設計

2.3.1 溶接材料設計の概要

現行の耐熱玉軸受材料として一般的に用いられる SUS440C はマルテンサイト系ステンレス鋼に属し、その中でも特に耐熱性と高硬度を示す特性から広く用いられている。しかし 600℃ 環境下では焼き戻しによる軟化が起こるため、その性能は損なわれ摩耗減肉を生じる。したがって、表面改質材料(溶接材料)には、600℃ 超の温度環境下でも高硬度を維持する性質が要求される。大阪府立大学で開発された Ni₃(Si,Ti) 合金(以下、NST 合金)は、Fig. 7 に示されるように温度上昇に伴う硬さの低下が極めて小さい材料であり、500℃ を超える温度域では SUS440C の硬さを上回る。常温硬さは SUS440C に劣るが、硬質粒子を複合添加し補うことで、常温から高温域にわたって現行を上

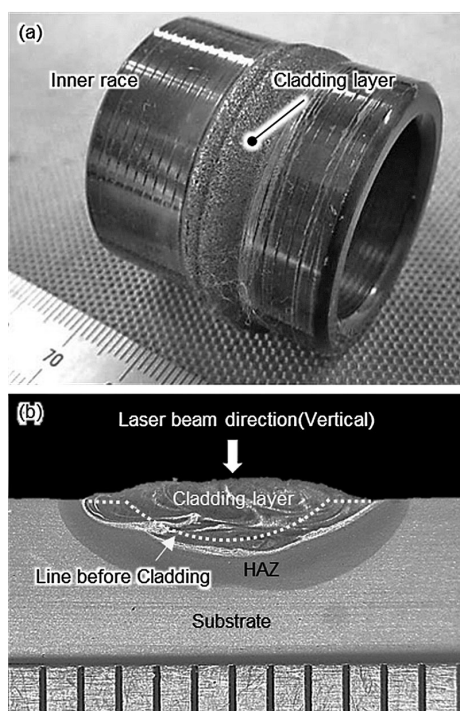


Fig. 2 (a) Appearance and (b) cross section of inner race after LMD test.

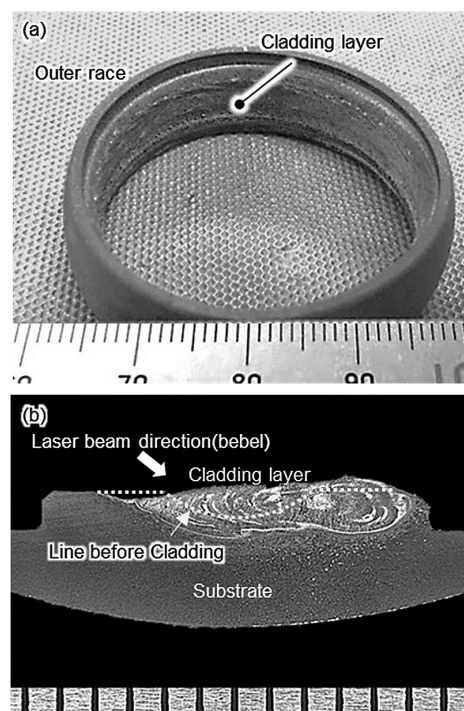


Fig. 3 (a) Appearance and (b) cross section of outer race after LMD test.

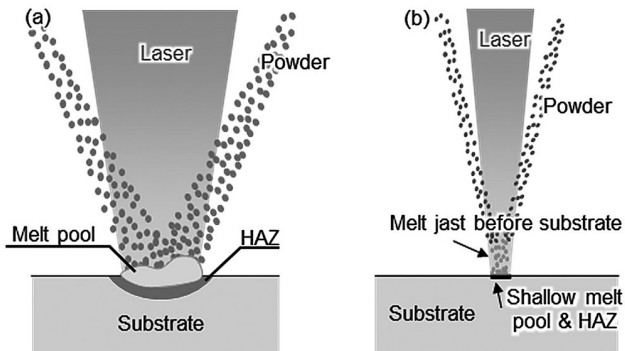


Fig. 4 Cladding images of (a) conventional LMD and (b) non-molten pool LMD.

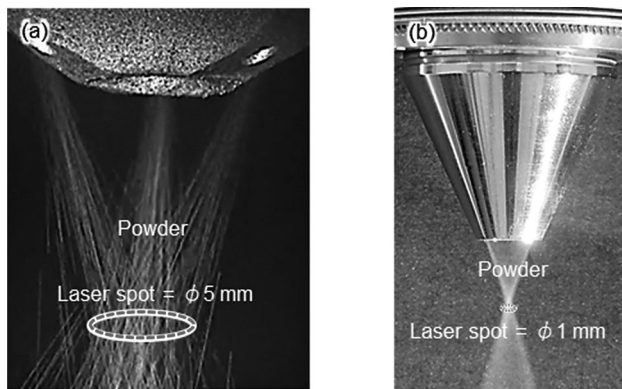


Fig. 5 Powder feed state of nozzle used in (a) conventional LMD and (b) non-molten pool LMD.

回る耐摩耗性が得られるものと考えた。

2.3.2 溶接材料設計の詳細

NST 合金は、 Ni_3Si の Si の一部を Ti で置換することにより粒界割れを抑制させた $\text{Ni}_3(\text{Si,Ti})$ 金属間化合物合金をベースにした合金であり¹⁾、本合金は金属間化合物としては異例ともいえる常温延性を有しており、冷間圧延による薄板や箔も作製可能である²⁾。本研究ではこれに Nb 添加により固溶強化させた NST-Nb 合金 (Table 1) をマトリックス材として選定した。複合添加する硬質粒子の選定にあたり、各種炭化物粉末の耐酸化性試験を行った。供試材料は VC, WC, Cr_3C_2 , TiC とし、粒子サイズは $-53/+20\ \mu\text{m}$ のものを用いた。試験方法はアルミナトレー上に載せた各炭化物粉末 (各 5 g) を、大気雰囲気内の電気炉内で 500, 600, 625℃ の各温度で 1 時間保持し、その外観状態の変化を観察した (Fig. 8)。試験の結果、VC は 625℃ で粉末状態から一体の塊状へと変化した。WC は 600℃ で酸化変色と著しい膨張が認められた。 Cr_3C_2 と TiC は変色が見られるものの VC や WC のような顕著な外観変化は見られず、粉末状態を維持していた。この結果から、VC と WC は除外し、 Cr_3C_2 と TiC を NST 合金に添加する硬質粒子として、肉盛層の耐摩耗性を検証した。

耐摩耗性の検証は、ボールとの摩擦による軌道面損傷を想定し、ボールオンディスク法摩耗試験 (Fig. 9) を行った。ボール材質は玉軸受で用いられる Si_3N_4 、ディスク材

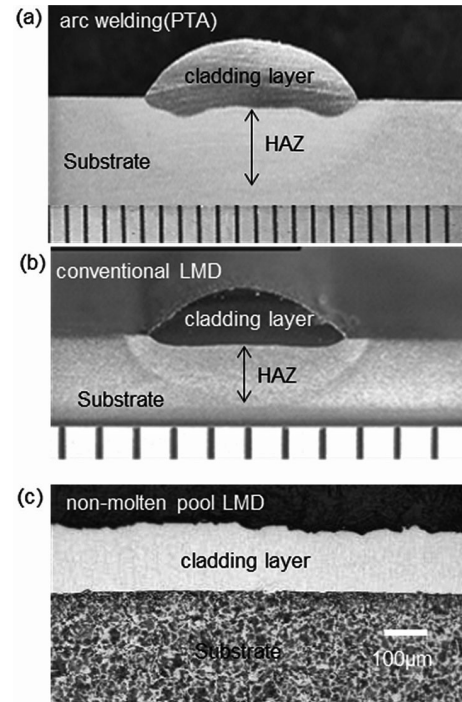


Fig. 6 Comparison of cross-sections of cladding layers by (a) arc welding, (b) conventional LMD and (c) non-molten pool LMD.

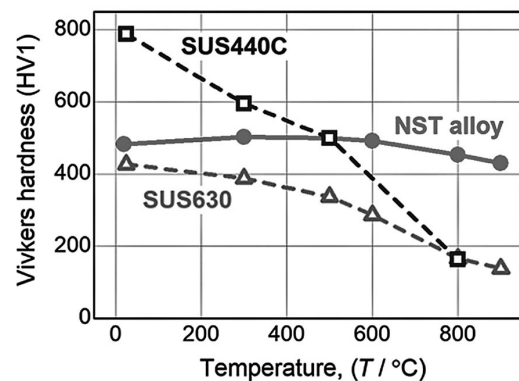


Fig. 7 Temperature dependence of Vickers hardness of NST alloy.

Table 1 Chemical composition of the NST alloy.

Ni (mass%)	Si (mass%)	Ti (mass%)	Nb (mass%)	B (wt.ppm)
84.5	5.6	6.5	3.4	50

質は NST-Nb 合金に Cr_3C_2 または TiC を 40 vol% 添加した材料をレーザクラッドした肉盛層を使用した。なお、炭化物の添加量は、溶接欠陥を生じない (経験的な) 限界量として設定した。その他試験条件の詳細を Table 2, 3 に示す。耐摩耗性はレーザ顕微鏡により測定したディスク摩耗損失部の断面積により評価した。試験の結果、炭化物添加による耐摩耗性の向上が確認され、硬質粒子を含まない NST-Nb に比べて、 Cr_3C_2 および TiC 複合材は摩耗損失部の断面積が半分程度にまで減少していた。また、 Cr_3C_2 と TiC を比較すると、TiC 複合材が Cr_3C_2 複合材よりも摩耗量が少

なく, TiC 複合材では NST-Nb 合金単体に比べ摩耗量が約 45% にまで減少した (Figs. 10, 11). この結果から, 超耐熱玉軸受用の溶接材料は NST-Nb+40 vol% TiC に決定した.

3. 非モルテンプール型 LMD による玉軸受加工

玉軸受用の溶接材料として選定した NST-Nb+40 vol% TiC を, 粒子サイズ $-53/+20\ \mu\text{m}$ の粉末材料を用い, 非モルテンプール型 LMD 法にて玉軸受内外輪の軌道面に施工した. 肉盛品質の目標は, 被膜厚さ 0.5 mm 以上, 溶接入熱による悪影響 (溶接歪, 希釈による品質不均一), および溶接欠陥 (割れ, ブローホール, 融合不良) の無きこととした. なお, 通常のレーザ加工では母材に対して鉛直方向にレーザを照射するが, 軸受外輪への施工時はノズルと母材の干渉により鉛直方向照射ができない. そのため, 外輪は Figs. 12, 13 に示すようにノズル接触を避ける最小限のレーザ入射角での施工とした. 装置は, 最大出力 6 kW の半導体レーザ (Laserline, LDF6000-40) を使用し, レーザスポットは母材上で $\phi 1.0\ \text{mm}$, ノズルは ILT 社製 High speed cladding nozzle を使用した.

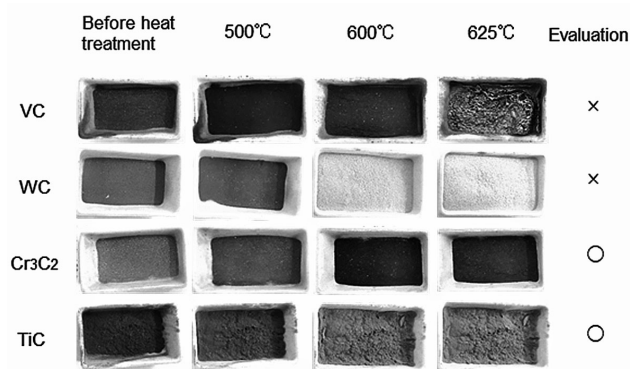


Fig. 8 Heating test of carbide particles.

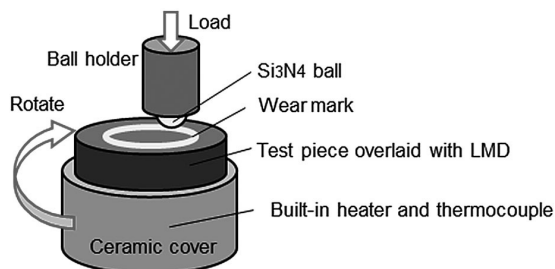


Fig. 9 Image of ball-on-disk wear test.

Table 2 Test piece dimensions.

Test piece overlaid by LMD	Si ₃ N ₄ ball
$\phi 30\ \text{mm} \times \phi 10\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$	$\phi 5.95\ \text{mm}$

Table 3 Ball-on-disk test parameters.

Test temperature	Load	Radius of rotation	Sliding speed	Times of test
600°C	10 N	9 mm ($\phi 18\ \text{mm}$)	100 mm/s (106 rpm)	20000 laps

LMD 施工後の外観状況を Fig. 14 に, 断面状況を Fig. 15 に示す. 内外輪ともに目標を満たす品質が得られ, 肉盛層は NST-Nb 合金マトリックス中に TiC 粒子が均一に分散した組織を呈しており, 非モルテンプール型 LMD により玉

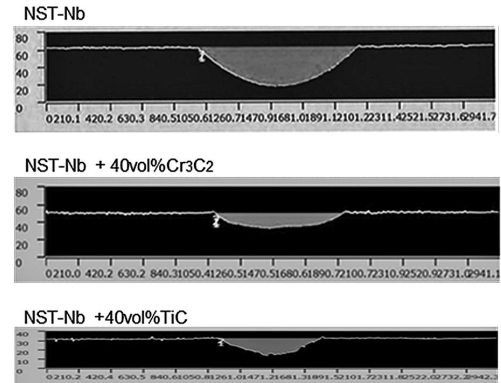


Fig. 10 Cross-sectional shape and wear area after ball-on-disk test.

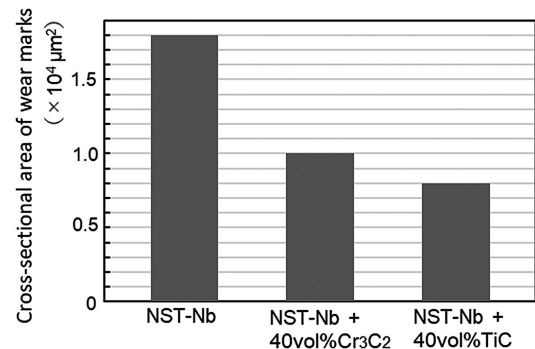


Fig. 11 Cross-sectional area of wear marks.

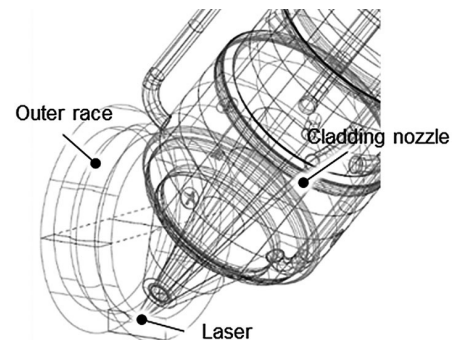


Fig. 12 Cladding image for outer race.

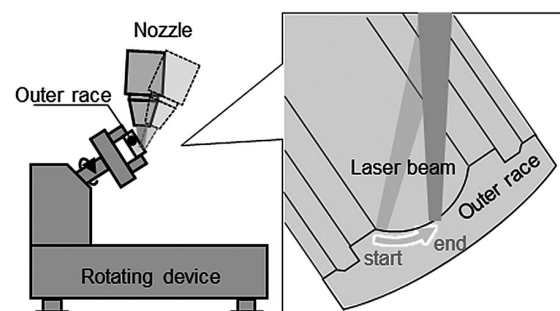


Fig. 13 Laser cladding procedure for outer race.



Fig. 14 Appearance of inner and outer race cladding by non-molten pool LMD.

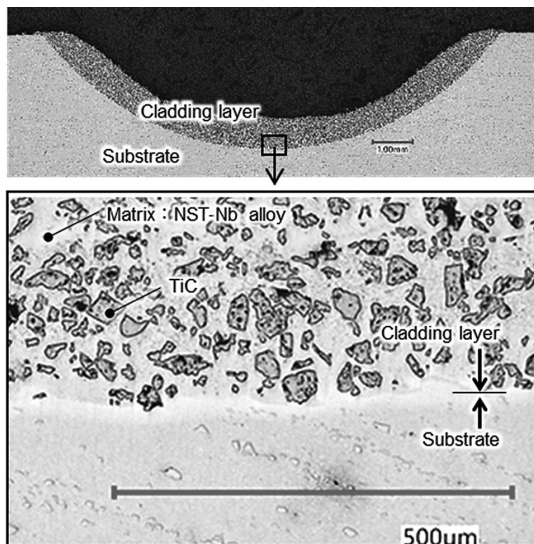


Fig. 15 Cross section of outer race cladding by non-molten pool LMD.

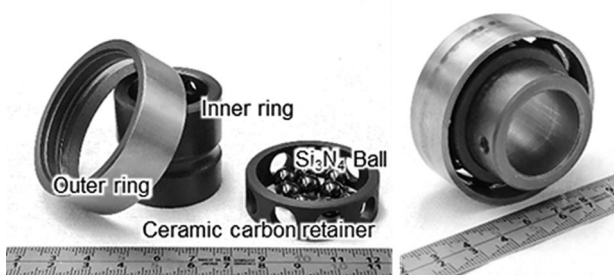


Fig. 16 Prototype super heat-resistant Ball Bearing (Left: Before assembly, Right: After assembly).

軸受への良質なレーザクラディングが可能であることが確認された。

4. 600℃炉内運転試験

NST-Nb 合金+40 vol% TiC 材を非モルテンプール型 LMD 施工した内外輪を所定の寸法に仕上げ加工し、 Si_3N_4

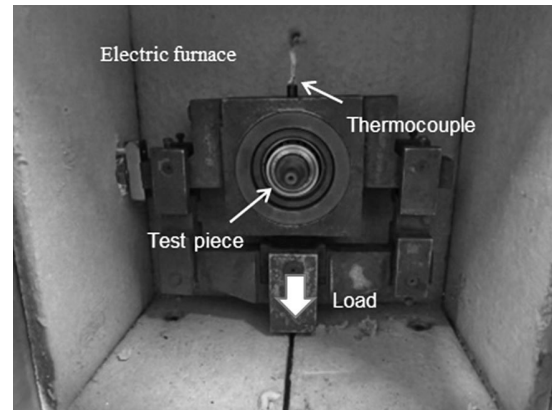


Fig. 17 Bearing life test machine under high temperature.

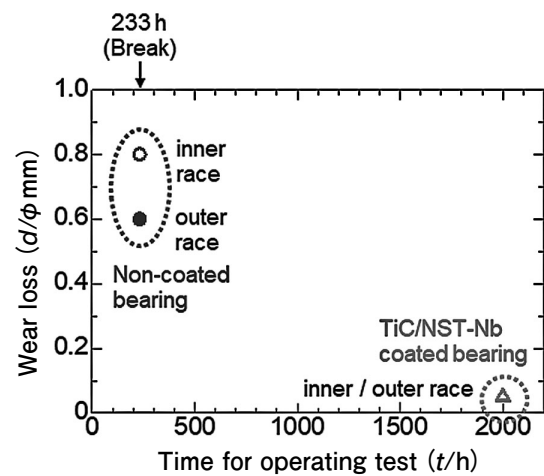


Fig. 18 Results of operation test at 600℃.

ボールとカーボンセラミックス製リテーナの組み合わせで玉軸受を試作した (Fig. 16)。これを 600℃ 炉内運転装置 (Fig. 17) にて寿命試験を行った。試験条件は、600℃ 炉内 (大気) 雰囲気下、負荷 98 N、回転数 50 rpm での連続運転とし、目標性能は摩耗量 $\phi 1.0$ mm 以下、摩擦係数 0.05 以下を保持しながら、2000 h (約 80 日) 以上の運転が可能であることとした。現行仕様である SUS440C 製内外輪で製作された玉軸受は、233 h で回転ロックし、その摩耗量 (軌道面の摩耗損失厚さ) は外輪が平均 $\phi 0.6$ mm、内輪が平均 $\phi 0.8$ mm であった。これに対し、開発仕様の玉軸受は 2000 h 耐久し、その摩耗量は外輪が $\phi 0.05$ mm、内輪が $\phi 0.05$ mm、摩擦係数は試験開始から 2000 h を経過しても 0.05 を維持した (Fig. 18)。今後は実機試用にて課題の確認と改良を重ね、実用化を目指す予定である。本研究開発はユーザーの要望を満足させるだけでなく、省エネルギー、省資源化など環境面での社会的意義もあると考える。

5. ま と め

金属製玉軸受の耐用温度向上を目的に、玉軸受内外輪軌道面上へのレーザクラディング仕様検討と、その性能評価を行った。得られた成果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 非モルテンプール型レーザーラッディング法により, 溶接入熱に起因する弊害(溶接変形, 溶け込みに伴う品質不均一)を生じることなく施工が可能であった.
- (2) 600℃ ボールオンディスク試験の結果, NST-Nb 合金に 40 vol% TiC を添加した材料は, NST-Nb 合金単体に比べ摩耗量が約 45 % まで減少し, 耐摩耗性の向上が図れた.
- (3) NST-Nb 合金+40 vol%TiC をレーザーラッディングした内外輪を用いて玉軸受を試作し, 600℃ 運転試験に供した. その結果, 2000 h 耐久した.

謝 辞

本研究は戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン事業)により実施しました. ここに深く感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) Takasugi, T., Nagashima, M. and Izumi, O.: Strengthening and ductilization of Ni₃Si by the addition of Ti elements, *Acta Metall. Mater.*, **38-5** (1990), 747.
- 2) Kaneno, Y., Myoki, T. and Takasugi, T.: Tensile properties of L1₂ intermetallic foils fabricated by cold rolling, *Int. J. Mater. Res.*, **99-11** (2008), 1229.

著 者 紹 介

北村裕樹

KITAMURA Yuki

1979 年生まれ. 2004 年関西大学工学部材料工学科卒業. 同年大阪富士工業(株)入社. 肉盛溶接材料開発と肉盛溶接施工技術開発に従事.

E-mail: yuuki-kitamura@ofic.co.jp

TEL: (06) 6498-0130 FAX: (06) 6498-0149

辰巳佳宏

TATSUMI Yoshihiro

1980 年大阪富士工業(株)入社. アーク溶接, PTA, LMD の研究開発に従事. 現在, レーザープラズマ接合研究所 執行役員 所長.

E-mail: yoshihiro-tatsumi@ofic.co.jp

TEL: (06) 6498-0130 FAX: (06) 6498-0149

金野泰幸

KANENO Yasuyuki

1961 年生まれ. 1989 年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程中退. 同年大阪府立大学工学部助手. 現在大阪府立大学大学院工学研究科教授, 東北大学金属材料研究所客員教授, 大阪府立

大学金属系新素材研究センター長, 大阪府立大学ものづくりイノベーション研究所長, 博士(工学). 専門: 金属材料工学, 特に, 金属間化合物を用いた耐熱合金の開発. 2011 年日本金属学会論文賞, 日本金属学会, 日本鉄鋼協会正会員ほか.

E-mail: kaneno@mtr.osakafu-u.ac.jp

TEL & FAX: (072) 254-6173

宗兼圭司

MUNEKANE Keiji

1980 年生まれ. 2002 年大阪府立大学工学部材料工学科卒業, 2005 年旭精工(株)入社, 軸受設計・開発に従事.

E-mail: k-munekane@asahiseiko.co.jp

TEL: (072) 271-2743 FAX: (072) 272-6905

塚本雅裕

TSUKAMOTO Masahiro

1994 年 3 月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 博士(工学). 同年 11 月, 大阪大学接合科学研究所助手に着任. 講師, 准教授を経て 2017 年 4 月教授に就任. 2014 年度 - 2018 年度, 内閣府 SIP 革新的設計生産技術「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」のプロジェクトリーダーを務めた. 2016 年度 - 2020 年度, NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」にて純銅の溶接・3D 造形等次世代レーザー加工のための高輝度青色半導体レーザー光源技術開発を推進. 2020 年 12 月に青色半導体レーザーの社会実装を目的とする「青色半導体レーザー接合加工研究会」を設立した.

E-mail: tukamoto@jwri.osaka-u.ac.jp

山口拓人

YAMAGUCHI Takuto

1981 年生まれ. 2006 年京都大学大学院工学研究科材料工学専攻修士課程修了. 2008 年より大阪府立産業技術総合研究所研究員. 2015 年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学). 現在(地独)大阪産業技術研究所主任研究員. 同所にてレーザ加工に関する分野を担当. レーザ加工学会, 日本金属学会会員.

E-mail: t_yamaguchi@tri-osaka.jp

TEL: (0725) 51-2525 FAX: (0725) 51-2599