

Analisis struktur mikro lapisan bond coat NiAl thermal barrier coating (TBC) pada paduan logam berbasis Co

Toto Sudiro⁽¹⁾, Kusnandar⁽²⁾, Hubby 'Izzudin⁽³⁾, Kemas A. Zaini Thosin⁽⁴⁾

^{(1),(2),(3),(4)}Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Penelitian Indonesia (LIPI)

Kompleks Puspitek Serpong, Tangerang

Abstrak

Kehandalan dan umur pakai sistem Thermal Barrier Coating (TBC) ditentukan oleh kestabilan lapisan bond coat dan thermal grown oxide (TGO). Sehingga sangatlah penting untuk memahami mekanisme pembentukan dan degradasi lapisan ini. Pada makalah ini akan dibahas analisis struktur mikro lapisan bond coat NiAl yang dideposisikan pada substrat CoCrNi dengan menggunakan gabungan metoda electroplating dan pack-cementation. Pada makalah ini juga dibahas mekanisme pembentukan void disepanjang interface bond coat-substrat setelah tes oksidasi.

Kata kunci: Struktur mikro, bond coat, thermal barrier coating, oksidasi, void

Abstract

Reliability and durability Thermal Barrier Coating (TBC) system are determined by stability of bond coat and thermal grown oxide (TGO) layer. Therefore, that is very important to know the formation and degradation mechanism this layer. This paper summarized the microstructure analysis of bond coat NiAl after isothermal oxidation which deposited to substrate CoCrNi by combination of electroplating and pack-cementation methods. Phenomena related to void formation between bond coat-substrate interfaces after isothermal oxidation were also described in the paper.

Keywords: Microstructure, bond coat, thermal barrier coating, oxidation, void

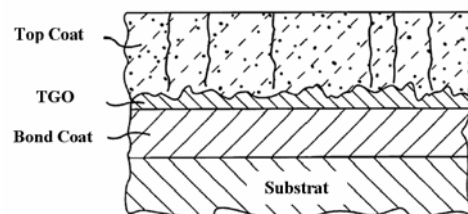
1. Pendahuluan

Sistem Thermal Barrier Coating (TBC) telah digunakan secara luas untuk melindungi komponen mesin turbin gas dan mesin pembangkit daya agar tahan terhadap panas dan lingkungan yang fluktuatif. Sistem ini berfungsi untuk mengurangi temperatur substrat dan meningkatkan daya tahannya terhadap korosi dan oksidasi [4] guna meningkatkan efisiensi turbin dan memperpanjang umur pakai komponen. Substrat yang biasanya digunakan sebagai bahan baku komponen mesin turbin gas dan mesin pembangkit daya berupa paduan logam berbasis nikel Ni dan kobalt Co [5].

Sistem TBC ini tersusun atas tiga lapisan seperti Gambar 1, terdiri dari keramik topcoat, thermal grown oxide (TGO) dan lapisan bond coat pada substrat paduan logam. Lapisan top coat berfungsi sebagai isolator panas dan TGO berfungsi sebagai lapisan tahan oksidasi dan perekat antara lapisan top coat dan bond coat. Sedangkan lapisan bond coat sendiri berfungsi sebagai pembentuk TGO dan memperkuat ikatan top coat dan substrat [2]. Dimana reliability dan durability sistem TBC bergantung pada lapisan bond coat sebagai lapisan cadangan Al untuk membentuk lapisan protektif alumina (TGO) [6]. Oleh karena itu, sangatlah penting untuk menjaga kestabilan kedua lapisan ini, baik dalam hal komposisi lapisan maupun cara mendapatkannya.

Pada makalah ini akan dibahas analisa struktur mikro lapisan bond coat NiAl thermal barrier coating yang dideposisikan pada paduan logam berbasis kobalt Co dengan menggunakan

gabungan metoda electroplating dan pack-cementation. Dimana analisis struktur mikro ditekankan pada sampel yang telah dilakukan tes oksidasi pada udara statik bertemperatur 1150°C selama 100 jam.



Gambar 1. Ilustrasiampang lintang sistem thermal barrier coating (US Patent 6,730,413 B2)

2. Dasar Teori

Seperti telah dijelaskan pada pendahuluan di atas bahwa ketahanan oksidasi lapisan bond coat dipengaruhi oleh kemampuannya untuk membentuk lapisan protektif alumina Al_2O_3 . Salah satu jenis lapisan TBC bond coat yang terus dikembangkan hingga saat ini adalah lapisan TBC NiAl, karena lapisan ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya : memiliki titik lebur yang tinggi, densitasnya yang rendah dan tahan terhadap oksidasi. Kandungan Al dalam lapisan bondcoat akan berkurang seiring dengan pembentukan kembali lapisan alumina karena terkelupas (spallation) dan juga difusi-interdifusi Al ke dalam substrat yang dapat mengakibatkan turunnya sifat mekanik alloy substrat.

Pada aplikasi sistem TBC, lapisan protektif alumina Al_2O_3 (TGO) akan terbentuk secara alami

disepanjang interface *bond coat-top coat* pada saat lapisan ini dioperasikan pada *service temperature* (> 900°C). Kestabilan termomekanik lapisan protektif alumina dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya : ketebalan lapisan, pertubuhan tekanan (*scale growth stress*) dan pembentukan void disepanjang interface TGO-*bond coat* [3]. Sehingga pengembangan sistem TBC modern saat ini, menitik beratkan pada bagaimana menghasilkan lapisan *bond coat* yang mampu membentuk lapisan protektif alumina α -Al₂O₃ secara alami, kontinu dan perlahan (*slow growing*) dengan ketebalan tertentu, seragam dan memiliki daya ikat yang optimal guna menghindari terjadinya kegagalan dini (*spallation*).

Pada saat ini belum ada metoda yang memungkinkan untuk mempelajari degradasi atau tingkat kerusakan dari suatu lapisan tanpa melepas komponen-komponen dari mesin, memotongnya dalam bentuk potongan kecil-kecil untuk kemudian dianalisa dengan metoda mikroskopi. Karena itu, penting sekali untuk menguasai dan meningkatkan pemahaman bagaimana mekanisme pembentukan lapisan dan mekanisme degradasi lapisan guna mendapatkan lapisan atau sistem TBC yang sesuai dengan kebutuhan.

3. Metode Penelitian

Bahan yang digunakan sebagai substrat dalam penelitian ini adalah paduan logam berbasis kobalt Co yaitu CoCrNi yang banyak digunakan untuk aplikasi bahan komponen mesin pesawat terbang dan mesin produksi energi. Komposisi kimia bahan CoCrNi tercantum pada Tabel 1. Adapun tahapan penelitiannya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada persiapan sampel, substrat dipotong berbentuk plat berukuran 15x10x6 mm³ dan untuk

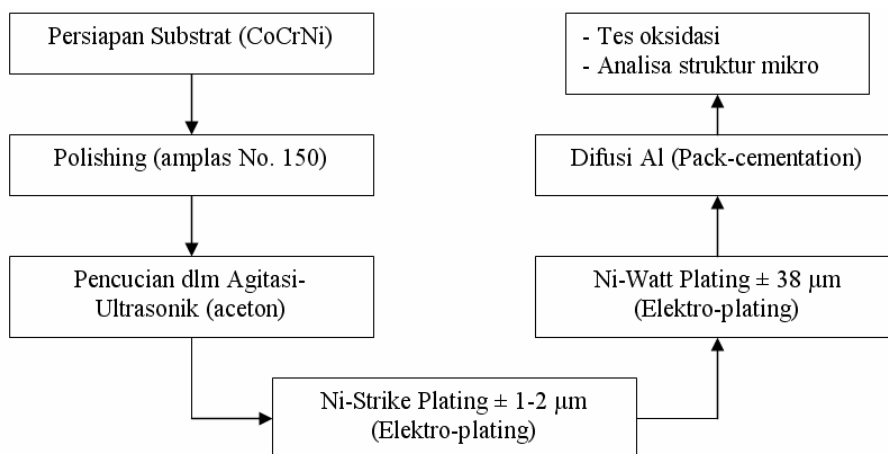
keperluan proses *electro-plating* pada sample diberi lobang berdiameter 1.5 mm untuk mengikatkan kawat platina. Sebelum dilakukan proses pelapisan, sampel digosok dengan kertas ampelas nomor 150 dan dilanjutkan dengan pencucian dengan agitasi ultrasonic dalam larutan USC acetone. Proses pembentukan lapisan alloy Ni-Al fasa β adalah sebagai berikut:

1. Ni strike plating 1-2 μ m, dimana Ni dilapiskan pada substrat dengan metoda *electro-plating* dengan menggunakan larutan NiCl₂ dan HCl pada sumber arus 500mA/cm² dan selama \pm 30 s pada temperatur ruang;
2. Dilanjutkan dengan pelapisan \pm 38 μ m Ni dengan larutan Ni-Watts;
3. Difusi Al dilakukan dengan metoda *pack-cementation* dengan media berupa serbuk aluminium Al yang dicampur dengan serbuk Al₂O₃. Serbuk-serbuk tersebut di milling hingga rata dalam waktu \pm 1 jam dan ditambah 5 %wt NH₄Cl. Sample kemudian dikubur dalam campuran serbuk tersebut dan diberi perlakuan panas pada temperatur 800 °C selama \pm 20 menit untuk membentuk lapisan NiAl yang berfungsi sebagai cadangan Al.

Setelah lapisan *bond coat* NiAl terbentuk, dilanjutkan dengan tes oksidasi pada udara statik 1150°C selama 100 jam. Selama tes oksidasi dilakukan pengamatan elemen oksida secara periodik dengan *X-ray Diffraction* (XRD) dan struktur mikro lapisan sebelum dan sesudah proses oksidasi diamati dengan *Electron Probe Microanalyzer* (EPMA) untuk mendapatkan profil konsentrasi masing masing elemen.

Tabel 1. Komposisi kimia bahan CoCrNi

	Co	Cr	Ni	W	Si	Mn	Fe
wt %	54.39	29.80	10.52	2.70	1.20	0.61	0.60



Gambar 2. Diagram alir tahapan penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

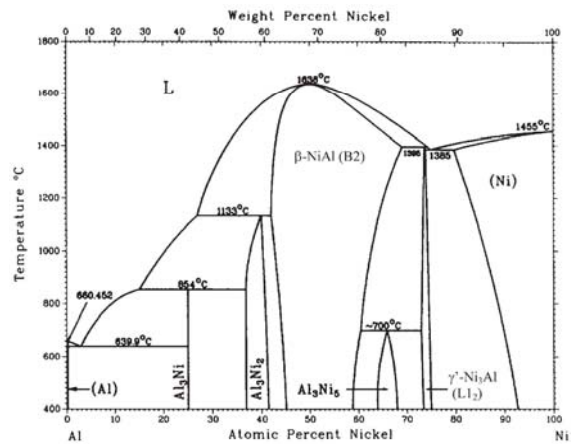
4.1. Pembentukan lapisan *bond coat* NiAl

Proses pembentukan lapisan *bond coat* NiAl pada substrat didasarkan atas campuran antarlogam β -NiAl seperti ditunjukkan pada Binary Diagram Phase Ni-Al (Gambar 3). Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa β -NiAl dapat stabil pada rentang temperatur dari 400°C hingga 1638°C dengan komposisi 45-59% at Ni dan komposisi Ni akan mencapai maksimum 68% at pada temperatur 1400°C. Dimana struktur β -NiAl yang diharapkan adalah berstruktur tetragonal yang dapat diperoleh dari *bond coat* NiAl dengan komposisi 61-68 % at Ni dan diberi perlakuan panas di atas 1000 °C.

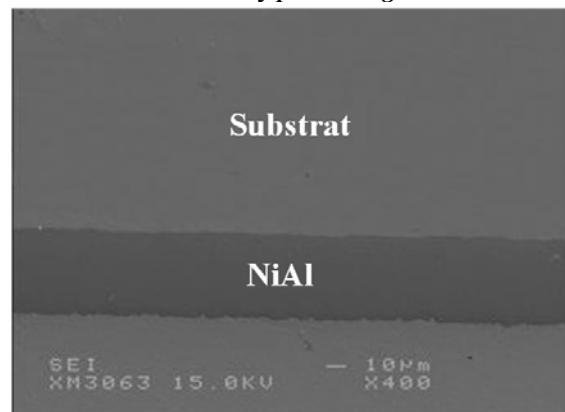
Gambar 4 menunjukkan penampang lintang dari lapisan *bond coat* NiAl yang dideposisikan pada substrat berbasis kobalt Co dengan menggunakan gabungan metoda *electroplating* dan *pack-cementation*. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa lapisan *bond coat* NiAl yang terbentuk memiliki ketebalan yang hampir seragam $\pm 40 \mu\text{m}$. Pada sampel ini kemudian dikenakan tes oksidasi pada udara statik bertemperatur 1150°C selama 100 jam.

4.2. Analisis struktur mikro substrat-*bond coat*-TGO

Gambar 5 dan 6 menunjukkan penampang lintang dan profil konsentrasi elemen kimia dari sampel dengan lapisan NiAl setelah dilakukan tes oksidasi pada temperatur 1150°C selama 100 jam. Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa sampel dibagi menjadi 4 daerah analisis, yaitu masing-masing poin 1, 2, 3 dan 4. Dimana poin 4 menunjukkan substrat CoCrNi. Dari gambar tersebut, juga dapat dilihat bahwa pada daerah *interdiffusion zone* tepatnya di sepanjang *interface* lapisan *bond coat*-substrat terdapat bintik-bintik alumina yang sering dikenal sebagai *alumina inclusions* dan juga timbul void-void disepanjang *interface* ini. Timbulnya void-void pada *interface* ini sangatlah tidak diinginkan, karena void-void tersebut dapat menjadi sumber kegagalan sistem TBC (*spallation*).

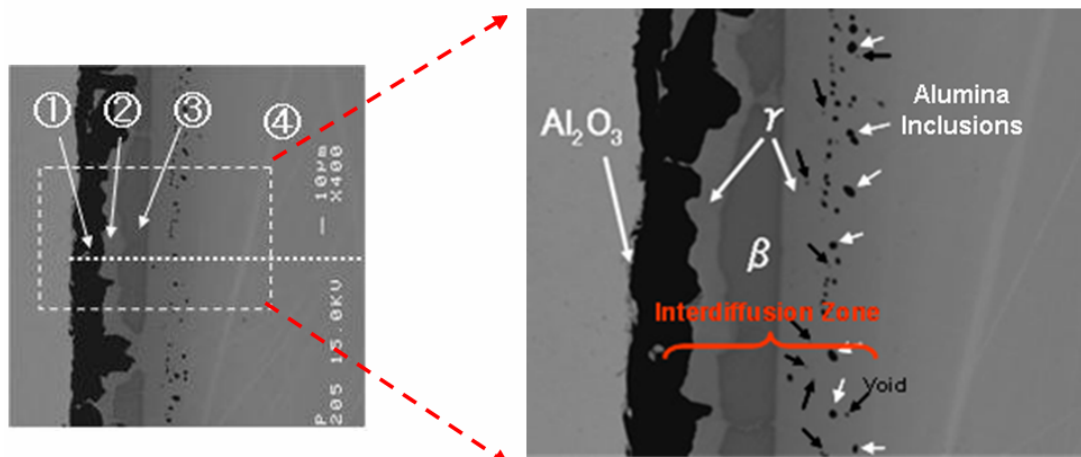


Gambar 3. Binary phase diagram Ni-Al

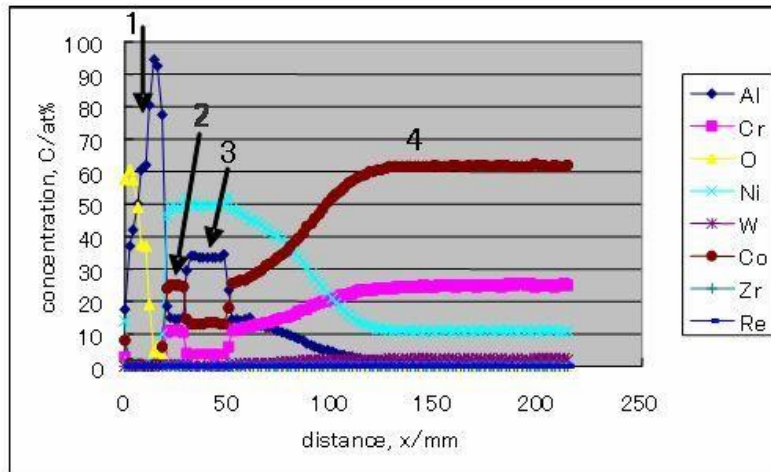


Gambar 4. Hasil Pelapisan NiAl Pada Paduan Logam Berbasis Co

Penelitian tentang mekanisme terbentuknya void-void baik disepanjang *interface bond coat*-substrat, substrat-TGO maupun TGO-*top coat* terus dilakukan, diantaranya dilakukan oleh Yanar N. M. (2002), yang menyatakan bahwa mekanisme terbentuknya void merupakan suatu proses yang kompleks dan hal ini harus dicegah sedini guna menghindari kerusakan secara katastrofik. Sedangkan untuk mekanisme terbentuknya void pada kasus ini dapat dijelaskan berdasarkan atas informasi yang didapat dari Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Penampang Lintang Sample dengan Lapisan NiAl Sesudah 100 Jam Tes Oksidasi pada 1150°C



Gambar 6. Profil Konsentrasi Elemen Kimia Sample dengan Lapisan NiAl Sesudah 100 Jam Tes Oksidasi pada 1150 °C

Dari Gambar 6 diketahui bahwa selama tes oksidasi berlangsung terjadi mekanisme interdifusi (*Kirkendall Effect*) disepanjang interface *bond coat*-substrat, terutama antara Co yang berasal dari substrat dan Al yang berasal dari lapisan *bond coat*. Dimana laju difusi Co ke arah *bond coat* lebih cepat dibandingkan laju difusi Al ke arah substrat. Di samping itu, seperti telah dijelaskan pada dasar teori di atas bahwa Al yang berasal dari lapisan *bond coat* tidak hanya berdifusi ke arah substrat namun demikian juga berdifusi ke arah permukaan membentuk lapisan protektif alumina Al_2O_3 (TGO). Dengan demikian jumlah Al pada lapisan *bond coat* akan berkurang seiring dengan proses difusi-interdifusi ini. Lapisan protektif alumina yang terbentuk dapat ditunjukkan pada Poin 1 (Gambar 5.). Dari gambar tersebut terlihat bahwa lapisan terbentuk setelah tes oksidasi memiliki ketebalan yang tidak seragam, antara 1-20 μm .

Akibat adanya proses difusi-interdifusi komponen-komponen disepanjang interface *bond coat*-substrat dan selama pembentukan lapisan protektif alumina Al_2O_3 , menyebabkan terbentuknya fase baru γ -NiAl (Poin 2) diantara interface lapisan *bond coat*-substrat dan interface *bond coat*-TGO yang pada awalnya semuanya berphase β -NiAl (Poin 3). Adanya perubahan phase dalam sistem TBC akibat proses difusi-interdifusi, mengakibatkan adanya perbedaan densitas dan koefisien thermal ekspansi pada setiap lapisan serta menyebabkan timbulnya *stress concentration* disepanjang interface *bond coat*-substrat yang berlanjut pada timbulnya void-void di sepanjang interface tersebut.

5. Penutup

5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis mikrostruktur setelah dilakukan tes oksidasi pada temperatur 1150°C selama 100 jam pada lapisan *bond coat* NiAl *Thermal Barrier Coating* yang dideposisikan pada paduan logam berbasis kobalt Co (CoCrNi) dengan

menggunakan gabungan metoda *electroplating* dan *pack-cementation* diketahui bahwa :

1. Timbulnya void-void dan *alumina inclusions* disepanjang interface *bond coat*-substrat;
2. Adanya perubahan phase dari β -NiAl menjadi γ -NiAl disepanjang interface *bond coat*-TGO dan *bond coat*-substrat;
3. Lapisan protektif alumina Al_2O_3 yang terbentuk memiliki ketebalan yang tidak seragam.

5.2. Saran

Untuk penelitian kedepan, diharapkan dapat meminimalkan atau menghilangkan void-void disepanjang interface *bond coat*-substrat dengan cara memberikan peperintang difusi yang dapat mengendalikan proses difusi-interdifusi komponen-komponen di dalam sistem TBC.

Daftar Pustaka

- [1] Brian S. Tryon, 2005, *Multi-Layer Ruthenium-Containing Bond Coats for Thermal Barrier Coatings*, Doctoral Thesis, Material Science and Engineering, The University of Michigan.
- [2] Chen M. W., dkk., 2003, *Characterization and Modeling of a Martensitic Transformation in a Platinum Modified Diffusion Aluminide Bond Coat for Thermal Barrier Coatings*, Acta Materialia 51 (2003) 4279-4294, available at www.actamat-journals.com
- [3] Haynes J. A., dkk., 1998, *Effect of Platinum Additions and Sulfur Impurities on the Microstructure and Scale Adhesion Behavior of Single-Phase CVD Aluminide Bond Coatings*, In Press, Elevated Temperature Coatings: Science and Technology III, Ed. J. M. Hampikian (TMS, Warrendale, PA, 1998).

- [4] Hengbei Zhao, dkk., 2006, *Morphology and Thermal Conductivity of Ytria-Stabilized Zirconia Coatings*, Acta Materialia 54 (2006) 5195-5207, available at www.actamat-journals.com

- [5] Hutchinson R. G., dkk., 2006, *A Sintering Model for Thermal Barrier Coatings*, Acta Materialia 54 (2006) 1297-1306, available at www.actamat-journals.com

- [6] Levi C. G., dkk., 2002, *Alumina Grown During Deposition of Thermal Barrier Coatings on NiCrAlY*, Manuscript Submitted to the Journal of the American Society.