

PENELITIAN PERILAKU FATIG SIKLUS RENDAH BAJA 8Cr-2WVTa PADA SUHU SEDANG

Heryudo Kusumo, Yudi Pramono
Biro Pengawasan Tenaga Atom - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PENELITIAN PERILAKU FATIG SIKLUS RENDAH BAJA 8Cr-2WVTa PADA SUHU SEDANG. Telah dilakukan penelitian perilaku fatig siklus rendah baja 8Cr-2WVTa, yang dinormalisasi dan ditemper, pada suhu sedang. Penelitian dilakukan melalui pengujian fatig siklus rendah dengan regangan terkendali pada suhu 400, 450, 500, 550 °C, dan rentang regangan aksial total sebesar 0,5; 1,0; 1,5 dan 2,0%. Pelunakan siklis diamati selama pengujian fatig. Pelunakan terbesar terjadi pada suhu 550°C. Kemungkinan mekanisme yang berperan terhadap fenomena ini dibahas.

ABSTRACT

STUDY OF LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF Ni8Cr-2WVTa STEEL AT LOW TEMPERATURE. The low cycle fatigue behavior of normalized and tempered (NT) 8Cr-2WVTa steel at elevated temperature has been studied. Strain controlled low cycle fatigue tests were carried out at 400, 450, 500, 550 °C with the total axial strain ranges of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 %. Cyclic softening was observed during the tests. The softening was most pronounced at 550°C. The possible mechanisms contributing to this phenomenon are suggested.

PENDAHULUAN

Baja feritik 8Cr-2WVTa adalah baja jenis baru yang dirancang sebagai bahan reaktor fusi. Namun demikian, baja ini dapat digunakan pula sebagai pengganti bahan struktur dan komponen reaktor nuklir yang biasa digunakan dewasa ini, karena mempunyai beberapa keunggulan. Salah satu keunggulannya adalah, unsur-unsur pepadu dalam baja 8Cr-2WVTa mempunyai sifat aktivasi rendah, sehingga mempermudah perawatannya pada saat reaktor beroperasi dan penanganannya sebagai limbah radioaktif pada saat dekomisioning reaktor [1].

Penelitian pendahuluan yang dilakukan Tamura et al [2] menunjukkan bahwa baja 8Cr-2WVTa mempunyai FATT (fracture appearance transition temperature) yang rendah, kekuatan-mulur (creep) yang tinggi, dan kemampuan-las yang memadai. Studi terinci yang dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanis baja tersebut juga menunjukkan hasil yang memuaskan [3,4].

Alasan utama dipilihnya baja feritik sebagai bahan reaktor nuklir adalah agar diperoleh kelonggaran yang memadai terhadap degradasi bahan, misalnya kerapuhan, selama operasi pada suhu tinggi. Oleh karena kombinasi antara

suhu tinggi dan transien termal juga dapat menghasilkan degradasi bahan, misalnya melalui proses fatig, maka perilaku fatig baja tersebut perlu diteliti pula.

Walaupun berbagai studi tentang perilaku fatig siklus rendah baja feritik telah banyak dilakukan, namun sangat sedikit (mungkin belum ada) pustaka yang membahas tentang perilaku fatig baja 8Cr-2WVTa.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi tentang perilaku fatig baja 8Cr-2WVTa yang dinormalisasi dan ditemper melalui pengujian fatig pada suhu sedang dalam kondisi vakum. Pengujian dalam kondisi vakum dilakukan untuk meniadakan pengaruh lingkungan seperti korosi, sehingga mekanisme yang terjadi di dalam baja benar-benar hanya disebabkan oleh bahan tersebut. Pengujian fatig dilaksanakan di Laboratorium Pengembangan Bahan Energi, Department of High Temperature Engineering, JAERI Tokai-mura, Jepang. Dari penelitian ini diharapkan dapat diperoleh gambaran tentang perilaku pelunakan atau pengerasan siklis, untuk mengetahui apakah baja 8Cr-2WVTa memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan reaktor nuklir.

PROSEDUR PENGUJIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja 8Cr-2WVTa yang dinormalisasi dan ditemper. Komposisi kimia dan kondisi perlakuan panas diberikan dalam Tabel 1. Struktur mikro baja adalah martensit temper [3].

Tabel 1. Komposisi kimia (% berat) dan kondisi perlakuan panas 8Cr-2WVTa [2]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,039	0,09	0,49	0,005	0,001	7,65	0,00
W	V	Ta	Ti	B	Al	N
1,98	0,18	0,038	0,005	0,01	0,0035	0,0018

Keterangan:

Normalisasi = 1313 K, 0,5 jam; Temper = 1013 K, 2 jam; Mikrostruktur: Martensit dan temper

Pengujian fatig siklus rendah dilakukan pada suhu 400, 450, 500, dan 550°C dalam keadaan vakum sebesar 10^{-5} Pa ($= 7,5 \times 10^{-7}$ Torr) dengan menggunakan mesin uji fatig serohidrolik pada kondisi regangan terkendali. Rentang regangan aksial total terkendali ($\Delta \epsilon_t$) besarnya adalah 0,5; 1,0; 1,5 dan 2,0 %, dan laju regangan aksial sebesar 0,1 %/detik. Simpal histerisis mekanis (tegangan versus regangan) dicatat dengan menggunakan X-Y recorder pada interval tertentu, sedangkan perubahan tegangan dan regangan dicatat dengan menggunakan X-T (time) recorder. Suhu pengujian dijaga agar tetap konstan dengan ketelitian $\pm 5^\circ\text{C}$ dengan menggunakan pemanas induksi frekuensi tinggi.

HASIL PENGUJIAN

Hasil pengujian diberikan dalam Tabel 2, dimana faktor pelunakan siklus α_N didefinisikan berdasarkan model pelunakan pulih siklus [5] sebagai berikut :

$$\alpha_N = \frac{[\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_N] / \hat{\sigma}_1}{\ln [1 + N/N_0]} = \frac{\Delta \hat{\sigma}_N / \hat{\sigma}_1}{\ln [1 + N/N_0]} \quad (1)$$

di mana $\hat{\sigma}_1$ = tegangan puncak pada siklus pertama, $\hat{\sigma}_N$ = tegangan puncak pada siklus ke N, N_0 = faktor normalisasi.

Persamaan (1) digunakan oleh karena proses pulih (recovery process) diduga memberikan sumbangan terhadap perilaku bahan pada suhu sedang. Dalam Tabel 2, N_2 adalah siklus pada awal daerah stabil atau keadaan mantap, sedangkan N_3 adalah siklus pada daerah paling stabil. α_N dihitung dengan menganggap $N_0=1$.

Gambar 1, 2, 3 dan 4 menunjukkan kurva respons tegangan siklis pada berbagai rentang regangan dan suhu yang berbeda selama pengujian fatig. Dalam gambar tersebut, tegangan puncak $\hat{\sigma}_{N3}$ diplot versus N/N_3 untuk menggambarkan bentuk kurva respons tegangan

siklis.

Perbedaan dalam tingkat pelunakan siklis sebagai fungsi dari rentang regangan total dapat dilihat pada Gambar 5. Dalam gambar ini, faktor pelunakan siklis α_{N3} diplot versus rentang regangan total untuk suhu 400, 450, 500 dan 550°C.

PEMBAHASAN

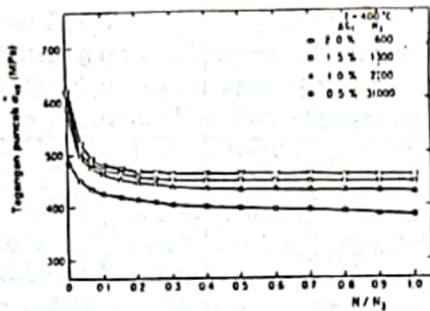
Dari Gambar 1, 2, 3 dan 4 terlihat bahwa baja feritik 8Cr-2WVTa yang dinormalisasi dan ditemper mengalami pelunakan siklis selama pengujian fatig; di mana tegangan puncak nampak menurun dengan agak cepat pada tahap awal sampai siklus tertentu, dan selanjutnya stabil. Bentuk kurva respons tegangan siklis adalah serupa untuk semua rentang regangan total dan suhu pengujian. Pelunakan semakin meningkat pada suhu yang lebih tinggi.

Bila kita tinjau perbedaan dalam tingkat pelunakan siklis, Gambar 5 menunjukkan bahwa pada suhu 400, 450, dan 500 °C faktor pelunakan siklis α_N bertambah secara berarti untuk regangan total 0,5 sampai 1,0 %, tetapi hanya sedikit bertambah untuk rentang regangan total 1,0 sampai 2,0 %. Pelunakan paling besar terjadi pada suhu 550 °C.

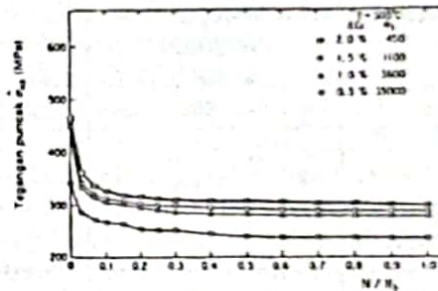
Bertambahnya secara berarti faktor pelunakan siklis untuk regangan total 0,5 sampai 1,0 % diduga disebabkan oleh perubahan perilaku selama pengujian fatig, yakni dari perilaku yang dikontrol oleh deformasi elastis ke perilaku yang dikontrol oleh deformasi plastis. Hal ini ditunjukkan dalam Tabel 3, di mana untuk rentang regangan total 0,5 % rentang regangan elastis lebih besar daripada rentang regangan

Tabel 2. Ringkasan hasil pengujian fatig siklus rendah baja 8Cr-2WVTA

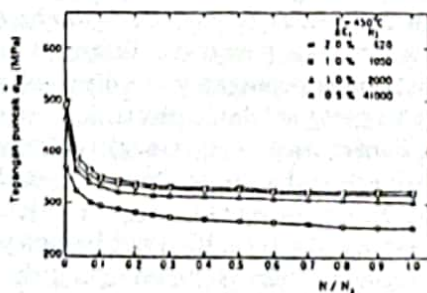
T (°C)	Spec No.	$\Delta \epsilon_1$ (%)	$\hat{\sigma}_1$ (MPa)	$\hat{\sigma}_{N2}$ (MPa)	$\hat{\sigma}_{N3}$ (MPa)	N_2	N_3	aN_2	aN_3
400	F822	0,5	385,2	302,6	282,9	≈ 9000	≈ 31000	0,02355	0,02569
	F806	1,0	479,6	343,8	322,8	≈ 500	≈ 2200	0,04574	0,04247
	F809	1,5	507,0	356,5	341,1	≈ 300	≈ 1300	0,05201	0,04561
	F810	2,0	515,7	373,6	356,7	≈ 100	≈ 600	0,05971	0,04820
450	F813	0,5	367,1	276,6	254,8	≈ 10000	≈ 41000	0,02676	0,02880
	F807	1,0	464,5	314,6	301,6	≈ 500	≈ 2000	0,05202	0,04613
	F812	1,5	486,6	333,0	318,2	≈ 200	≈ 1050	0,05952	0,04975
	F825	2,0	487,5	337,9	321,3	≈ 150	≈ 620	0,06117	0,05300
500	F814	0,5	339,7	249,7	234,0	≈ 10000	≈ 35000	0,02876	0,02974
	00-F802	1,0	450,3	290,2	274,7	≈ 500	≈ 2100	0,05718	0,05098
	F802	1,5	460,2	298,3	286,0	≈ 300	≈ 1100	0,06162	0,05718
	F804	2,0	464,7	319,4	297,6	≈ 100	≈ 450	0,07005	0,05882
550	F815	0,5	323,3	209,1	199,7	≈ 10000	≈ 20500	0,03834	0,03851
	F811	1,0	403,8	248,4	227,5	≈ 500	≈ 2100	0,06189	0,05552
	F826A	1,5	412,1	260,2	245,2	≈ 150	≈ 360	0,07350	0,06879
	F808	2,0	402,3	266,0	242,1	≈ 80	≈ 300	0,07707	0,06976



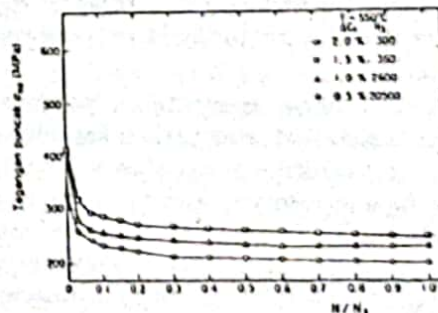
Gambar 1. Kurva respons tegangan siklus untuk berbagai regangan pada suhu 400°C



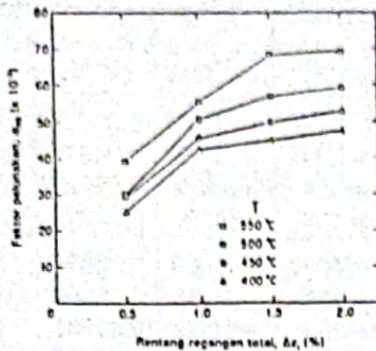
Gambar 3. Kurva respons tegangan siklus untuk berbagai regangan pada suhu 500°C



Gambar 2. Kurva respons tegangan siklus untuk berbagai regangan pada suhu 450°C



Gambar 4. Kurva respons tegangan siklus untuk berbagai regangan pada suhu 550°C



Gambar 5. Faktor pelunakan siklis sebagai fungsi dari rentang regangan total

Tabel 3. Data rentang tegangan total ($\Delta \epsilon_t$), plastis ($\Delta \epsilon_p$), dan elastis ($\Delta \epsilon_e$)

T (°C)	N3	$\Delta \epsilon_t$ (%)	$\Delta \epsilon_p$ (%)	$\Delta \epsilon_e$ (%)
400	~ 31000	0,5	0,150	0,350
	~ 2200	1,0	0,649	0,351
	~ 1300	1,5	1,144	0,356
	~ 600	2,0	1,650	0,350
450	~ 41000	0,5	0,203	0,297
	~ 2000	1,0	0,684	0,316
	~ 1050	1,5	1,172	0,328
	~ 620	2,0	1,650	0,350
500	~ 35000	0,5	0,216	0,284
	~ 2100	1,0	0,692	0,308
	~ 1100	1,5	1,195	0,305
	~ 450	2,0	1,679	0,321
550	~ 20500	0,5	0,250	0,250
	~ 2100	1,0	0,731	0,269
	~ 360	1,5	1,245	0,255
	~ 300	2,0	1,679	0,321

plastis; sedangkan untuk rentang regangan total lebih besar dari 1,0 % rentang regangan plastis lebih besar daripada rentang regangan elastis.

Untuk dapat mengetahui penyebab dari pelunakan siklis di atas perlu diketahui terlebih dahulu mekanisme penguatan yang terjadi di dalam baja tersebut. Kusumo [6] menyimpulkan bahwa mekanisme penguatan dominan yang mungkin berperan dalam menentukan kekuatan baja feritik 8Cr-2WVTa yang dinormalisasi dan ditemper adalah : penguatan dislokasi yang berasal dari transformasi dislokasi, penguatan presipitat dari karbida $M_{23}C_6$ yang terbentuk selama perlakuan panas temper, dan penguatan larutan padat ISSH (interaction solid solution

hardening) dari atom-atom pemadu di dalam baja.

Dengan telah diketahuinya mekanisme penguatan di atas, maka penyebab terjadinya pelunakan siklis selama pengujian fatig dapat diperkirakan. Dalam hal ini menurunnya efektivitas mekanisme penguatan dominan tersebut diduga merupakan penyebab terjadinya pelunakan siklis itu.

Penyebab pertama diperkirakan berupa penyederhanaan struktur mikro dengan rapat dislokasi yang lebih rendah; atau terjadi penurunan rapat dislokasi di dalam struktur mikro baja selama pengujian fatig. Penurunan rapat dislokasi ini disebabkan oleh kombinasi antara efek suhu pengujian dengan beban siklis. Pada

suhu sedang (antara 400-550 °C) terjadi proses pulih (recovery process), di mana dislokasi-dislokasi dengan tanda yang berlawanan akan saling meniadakan dan cacat titik lenyap. Dilain pihak, selama peregangannya dislokasi akan tergeser ke batas sel dan cacat titik diproduksi dengan konsentrasi yang tinggi. Pelenyapan cacat titik secara kontinyu akan menyumbang terhadap penyederhanaan struktur dislokasi melalui proses panjatan. Hasilnya berupa penurunan tegangan interna seperti yang diamati selama pengujian fatig.

Penyebab kedua pelunakan siklis diduga berupa penurunan efektivitas penguatan presipitat di dalam baja 8Cr-WVTa selama pengujian fatig. Seperti diketahui, penguatan presipitat

disebabkan oleh adanya interaksi antara dislokasi dengan presipitat yang dapat koheren, koheren sebagian atau tidak koheren dengan matriks. Telah lama diketahui bahwa regangan plastis merupakan parameter pengontrol terhadap perilaku dan sifat fatig suatu bahan [7]. Selama deformasi plastis, presipitat dapat digeser, dikelilingi atau dilewati oleh dislokasi, tergantung dari ukuran, jarak dan derajat koherensi presipitat dengan matriks. Bila presipitat yang koheren dengan matriks dapat digeser oleh dislokasi, maka kekuatan logam menurun [8]. Hal ini disebabkan karena terjadi penurunan ketahanan terhadap gerakan dislokasi berikutnya, konsentrasi slip, dan destruksi agen penguat. Oleh karena peristiwa ini terjadi secara terus menerus selama peregangan siklis, maka kekuatan logam akan menurun secara kontinyu.

Penyebab ketiga pelunakan siklis diduga disebabkan oleh turunnya efektivitas penguatan larutan padat ISSH dari atom-atom pepadu di dalam baja 8Cr-2WVTa selama pengujian fatig. Seperti dijelaskan Kusumo [6], proses penguatan ISSH ini terjadi di dalam baja paduan feritik yang mengandung unsur-unsur interstisi C dan substitusi M dalam larutan padatnya, di mana unsur-unsur ini mempunyai afinitas satu sama lain. Sebagai hasil dari daya tarik yang kuat ini, terbentuk pasangan atau gugus atom M-C yang segera berinteraksi dengan dislokasi dan membentuk atmosfer dislokasi. Atmosfer dislokasi ini, yang tidak dapat digerakkan oleh dislokasi walaupun pada suhu yang cukup tinggi, merupakan dasar bagi penguatan larutan padat ISSH. Dalam baja 8Cr-2WVTa terbentuk pasangan Cr-C, W-C, V-C dan Ta-C, di mana pasangan W-C, V-C dan Ta-C merupakan penguat yang lebih efektif dibandingkan dengan Cr-C.

Selama pengujian fatig pada suhu sedang, cacat titik dihasilkan dengan konsentrasi yang tinggi. Kekosongan lebih akan hilang secara kontinyu sehingga menambah mobilitas atom-atom M. Gerakan bolak-balik dislokasi selama pengujian fatig akan menyebabkan terbentuknya M-C-M dan selanjutnya berubah menjadi M_2C , yang berasal dari pasangan atom M-C. Dengan hilangnya pasangan M-C dari larutan padat secara akumulatif, maka kekuatan baja menurun.

Dari pembahasan di atas jelaslah bahwa pelunakan siklis yang terjadi pada baja 8Cr-2WVTa yang dinormalisasi dan ditemper sela-

ma pengujian fatig pada suhu sedang kemungkinan diakibatkan oleh salah satu atau kombinasi dari ketiga penyebab di atas. Namun demikian, pengamatan yang dilakukan selama pengujian fatig menunjukkan bahwa pada siklus tertentu tercapai keadaan mantap atau stabil, di mana beban maksimum tetap atau tidak berubah. Hal ini menimbulkan pemikiran bahwa setidaknya-tidaknya ada satu mekanisme penguatan yang tetap efektif atau hanya sedikit berkurang keefektifannya.

Jones et al [9] dan Challenger et al [10], yang melakukan pengujian fatig terhadap baja 2.25Cr-1Mo pada suhu sedang, menyimpulkan bahwa pelunakan siklis yang terjadi selama pengujian fatig disebabkan oleh hilangnya pasangan atom Mo-C yang bertindak sebagai penguat dari larutan padat. Kesimpulan ini ditunjang oleh pengamatan TEM (Transmission Electron Microscope) yang mereka lakukan terhadap struktur mikro baja 2.25Cr-1Mo sebelum dan setelah dilakukan pengujian fatig. Setelah pengujian ditemukan presipitat karbida, yang setelah diselidiki melalui ekstraksi residu ternyata merupakan karbida Mo_2C . Presipitat itu terbanyak ditemukan pada batas sel, dan sisanya tersebar dimatriks ferit.

Polak et al [11] dan Chi et al [12], yang melakukan pengujian fatig pada baja yang sama, berdasarkan pengamatan TEM yang mereka lakukan menyimpulkan bahwa penyederhanaan struktur dislokasi merupakan penyebab dari pelunakan siklis. Pengamatan TEM tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi penyederhanaan struktur dislokasi, yakni struktur dengan rapat dislokasi yang lebih tinggi (sebelum pengujian fatig) berubah menjadi struktur dengan rapat dislokasi yang lebih rendah (setelah pengujian fatig). Disamping itu Polak et al juga menemukan presipitat karbida berupa Mo_2C pada struktur mikro baja 2.25Cr-1Mo yang telah mengalami pengujian fatig, sehingga disimpulkan bahwa hilangnya pasangan Mo-C dari larutan padat juga turut berperan dalam terjadinya pelunakan siklis.

Mekanisme yang agak berbeda diusulkan oleh Jones [13] dan Ebi et al [14] setelah melakukan pengujian fatig terhadap baja feritik 9Cr-1Mo yang dimodifikasi pada suhu sedang. Perlakuan panas normalisasi dan temper yang diberikan terhadap baja ini menghasilkan struktur martensit temper, di mana terdapat dua jenis karbida yang berbeda, yakni $M_{23}C_6$ dan MC. Kombinasi antara pengaruh suhu dan pere-

gangan siklis selama pengujian fatig mempercepat terbentuknya subbutir yang melebar dengan rapat dislokasi rendah dan karbida M_2C dan $M_{23}C_6$ yang lebih kasar. Evolusi dalam substruktur ini mengubah mekanisme penguatan dominan dari substruktur dislokasi dan penguatan presipitat menjadi penguatan larutan padat ISSH dari molybdenum dan vanadium. Yang terakhir merupakan mekanisme penguatan yang kurang efektif dibanding dengan kedua mekanisme penguatan terdahulu sehingga pelunakan siklis akan berlangsung selama pengujian fatig.

Berdasarkan pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa ada dua kemungkinan mekanisme yang merupakan penyebab dari pelunakan siklis baja 8Cr-2WVTa yang dinormalisasi dan ditemper selama pengujian fatig pada suhu sedang, yakni :

- 1) Penyederhanaan struktur dislokasi, dari struktur dengan rapat dislokasi yang lebih tinggi ke struktur dengan rapat dislokasi yang lebih rendah, dan penyingkiran pasangan M-C yang bertindak sebagai penguat dari larutan padat. Mekanisme ini diikuti dengan pembentukan karbida (M_2C atau MC) yang mengandung atom-atom Cr, W, V dan Ta. Dalam hal ini penguatan dislokasi dan penguatan larutan padat ISSH berkurang efektivitasnya, sedangkan penguatan presipitat tetap efektif atau hanya sedikit berkurang keefektifannya.
- 2) Pembentukan subbutir yang melebar dengan rapat dislokasi rendah dan karbida $M_{23}C_6$ yang lebih kasar. Evolusi dalam substruktur ini mengubah mekanisme penguatan dominan dari struktur dislokasi dan penguatan presipitat menjadi penguatan larutan padat ISSH dari W, V dan Ta. Dalam hal ini penguatan dislokasi dan penguatan presipitat berkurang efektivitasnya, sedangkan penguatan larutan padat ISSH tetap efektif atau hanya berkurang sedikit efektivitasnya.

KESIMPULAN

Dari penelitian perilaku fatig siklus rendah baja 8Cr-2WVTa pada suhu sedang dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Pengujian fatig pada suhu sedang yang dilakukan terhadap baja 8Cr-2WVTa yang dinormalisasi dan ditemper menunjukkan terjadinya pelunakan siklis. Bentuk kurva respons tegangan siklis adalah serupa untuk semua rentang regangan total dan

suhu pengujian. Pelunakan semakin meningkat pada suhu yang lebih tinggi. Pada siklus tertentu tercapai keadaan mantap atau stabil, di mana beban maksimum tetap atau tidak berubah.

- 2) Pelunakan siklis tersebut diperkirakan sebagai akibat dari menurunnya efektivitas mekanisme penguatan dominan yang terjadi di dalam baja 8Cr-2WVTa selama perlakuan panas normalisasi dan temper, yakni penguatan dislokasi, penguatan presipitat, dan penguatan larutan padat ISSH (interaction solid solution hardening). Oleh karena pada siklus tertentu tercapai keadaan mantap atau stabil, maka diduga sekurangnya ada satu mekanisme penguatan yang tetap efektif selama pengujian fatig, atau hanya sedikit berkurang efektivitasnya. Dalam hal ini penguatan presipitat atau penguatan larutan padat ISSH merupakan mekanisme penguatan yang tetap efektif atau hanya sedikit berkurang efektivitasnya.
- 3) Dari segi struktur mikro, ada dua kemungkinan mekanisme yang merupakan penyebab terjadinya pelunakan siklis baja 8Cr-2W V Ta tersebut, yakni :
 - a). Penyederhanaan struktur dislokasi, dari struktur dengan rapat dislokasi yang lebih tinggi ke struktur dengan rapat dislokasi yang lebih rendah, dan penyingkiran pasangan M-C yang bertindak sebagai penguat dari larutan padat. Mekanisme ini diikuti dengan pembentukan karbida (M_2C atau MC) yang mengandung atom-atom Cr, W, V, Ta;
 - b). Pembentukan subbutir yang melebar dengan rapat dislokasi rendah dan karbida $M_{23}C_6$ yang lebih kasar. Evolusi dalam substruktur ini mengubah penguatan dominan dari substruktur dislokasi dan penguatan presipitat menjadi penguatan larutan padat ISSH dari W, V dan Ta.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Dr. N. Wakayama, Direktur Department of High Temperature Engineering, dan Dr. Motokuni Eto, Kepala Energy Materials Development Laboratory - JAERI, atas fasilitas dan bantuan yang diberikan. Terima kasih pula kepada Dr. Masahide Suzuki, Sdr. Tshimitsu Ishii, Sdr. Nakamura dan para staf EMDL lainnya atas bantuan yang

diberikan selama penulis melakukan penelitian dan pengujian fatig.

Penelitian ini dapat terlaksana melalui STA Scientist Exchange Program between

Japan and Asian Countries. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada STA dan JAERI atas bantuannya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kusumo, H. dan Wibowo, Y.W., Pengembangan bahan struktur dan komponen reaktor dengan aktivitas rendah, Buletin BATAN Vol. XV NO. 4 (Oktober 1994).
2. Tamura, M. et al, Development of potential low activation ferritic and austenitic steels, J. Nucl. Mater. 141-143 (1986), 1067-1073.
3. Tamura, M. et al, Phase stability of reduced activation ferritic steel : 8%Cr - 2%W - 0,2%V - 0,04% Ta - Fe, J. Nucl. Mater. 155-157 (1988) 620-625.
4. Suzuki, M. et al, Small specimen test techniques for the evaluation of toughness degradation, J. Nucl. Mater. (1992) in Press.
5. Rahka, K.A. and Laird, C., Cyclic Stress and Diametral strain response during high strain amplitudo fatigue of a 1Cr-1.3Mo-0,3V bainitic rotor steel at elevated-temperature-Part II, J. Testing and Eval., JTEVA, Vol.7, No. 4 (1986) 277-291.
6. Kusumo, H., Mekanisme penguatan baja 8Cr-2WVTA yang dinormalisasi dan ditemper, belum diterbitkan.
7. Starke, E.A. and Lutjering, G., Cyclic plastic deformation and microstructure, in fatigue and microstructure, ASM (1979) 205-243.
8. Lutjering, G. and Weissmann, S., Acta Metallurgy, 18 (1970) 785.
9. Jones, W.B. and Van Den Avyle, J.A., Substructure and strengthening mechanism in 2.25Cr-1Mo steel at elevated temperatures, Met. Trans. 11A (1980) 1275-1286.
10. Challenger, K.D. et al, An explanation for the effects of hold periods on the elevated temperature fatigue behavior of 2.25Cr-1Mo Steel, J. Eng. Mater. Technol. 103, Trans. of the ASME (1981) 7-14.
11. Polak, J. et al, Cyclic stress-strain response of 2.25Cr-1Mo steel at elevated temperatures, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., Vol.9 No. 3 (1986) 185-194.
12. Chi, S. et al, The effect of hold time on low cycle fatigue behavior of 2.25Cr-1Mo Steel, ISIJ International, Vol.32, No.4 (1992) 545-552.
13. Jones, W.B., Effects of mechanical cycling on the substructure of modified 9Cr-1Mo ferritic steel, in Ferritic steels for High App., ASM (1983) 221-235.
14. Ebi, G. and Mc.Evely, A.J., Effect of processing on the high temperature low cycle fatigue properties of modified 9Cr-1Mo ferritic steel, Fatigue Eng. Mater. Struct., Vol.7, No. 4 (1984) 299-314.

DISKUSI

Ridwan:

Kesimpulan yang ditampilkan pada akhir makalah ini terutama berkaitan dengan sifat-sifat mekanik kalau hasil pengujian sangat dipengaruhi oleh *history* bahan tersebut. Apakah *history* bahan uji tersebut telah diperhatikan dalam penelitian ini?, sehingga secara mendasar hasil yang diperoleh benar-benar merupakan karakteristik bahan tersebut.

Heryudo:

Betul tanggapan Saudara, bahwa sifat mekanis bahan sangat tergantung dari *history* bahan tersebut. Bahan 8Cr-2WVTA yang kami pakai dibuat dengan melebur bahan baja dalam tungku pemanas induksi tinggi. Selanjutnya dilakukan canai dingin sampai diperoleh pelat baja dengan

ketebalan kurang lebih 10 cm, dan akhirnya dilakukan normalisasi pada suhu 131 K selama 1/2 jam dan perlakuan panas temper pada suhu 1013 K selama 2 jam.

M. Husna Alhasa:

Kesimpulan Saudara mengatakan bahwa makin tinggi suhu, bahan semakin lunak. Pendapat saya, pernyataan Saudara tidak benar karena bahan tersebut mengandung C, V, W, di mana dengan komposisi tersebut di atas pada suhu lebih tinggi akan terbentuk vanadium karbida dan lain-lain. Hal ini menyebabkan peningkatan kekuatan atau kekerasan bahan. Untuk itu mohon penjelasan Saudara berdasarkan data pengamatan apa, sehingga Saudara berani menyimpulkan bahwa makin tinggi suhu semakin lunak untuk bahan baja tersebut.

Heryudo:

Pendapat Saudara betul (untuk pengujian), siklus tinggi ($> 10^6$), di mana pengujian dilakukan pada daerah regangan elastis. Untuk pengujian siklus rendah ($< 10^5$) di mana pengujian dilakukan pada daerah regangan plastis. Penelitian juga menunjukkan terjadinya pelunakan siklis dan bukannya pengerasan siklis. Hasil penelitian saya tersebut didukung oleh berpuluh-puluh pustaka yang telah saya pelajari, di mana hasil-hasil penelitian menunjukkan hasil yang sama dengan penelitian saya. Hasil silakan Saudara pelajari/lihat makalah saya, di mana pada Daftar Pustaka saya cantumkan acuan-acuan yang saya pakai.

Didin SW:

1. Dari hasil penelitian Bapak diperoleh presipitat karbida MC, M₂C, dan M₂₃C₆. Pengukuran/ penentuan struktur mikro digunakan dengan peralatan apa?. Bagaimana cara membedakan untuk mengidentifikasi bahwa karbida tersebut adalah MC, M₂C, dan M₂₃C₆?
2. Apa yang dimaksud dengan siklus rendah?
3. Bagaimana hasil yang diharapkan dari penelitian fatig dengan variasi suhu?. Suhu rendah diharapkan atau suhu fungsi?.

Heryudo:

1. Sebelum dilakukan uji fatig, presipitat karbida yang ada hanya M₂₃C₆; setelah pengujian fatig diduga timbul karbida lain yakni MC, DAN M₂C. Kami sendiri belum melakukan penelitian untuk mengetahui struktur mikro ini, karena waktu penelitian di Jepang sangat terbatas. Rencananya akan dilakukan penelitian dengan menggunakan TEM untuk mengetahui struktur mikronya, dan ekstraksi residu untuk mengetahui jenis karbida yang ada.
2. Siklus rendah artinya siklus di bawah 10^5 siklus di mana spesimen uji mengalami kegagalan (patah). Penelitian pada siklus rendah dilakukan pada daerah regangan plastis, sedangkan siklus tinggi (di atas 10^6) dilakukan pada daerah elastis.
3. Suhu yang diharapkan adalah suhu pada kondisi operasi reaktor jusi, yakni antara 400-550°C, agar bisa mewakili keadaan yang sebenarnya. Dari hasil penelitian ternyata semakin tinggi suhu, pelunakan siklis baja 8Cr-2WVTa semakin meningkat, sehingga kemungkinan kerusakan baja semakin besar. Dengan sendirinya diharapkan kondisi operasi reaktor jusi bisa dilakukan pada suhu rendah.

Nusin Samosir:

1. Apakah tidak ada struktur mikro cuplikan yang diamati?. Jika ada kita dapat melihat, apakah terjadi karbida, atau martensit yang terjadi.
2. Biasanya baja paduan dengan vanadium dan wolfram, pada pemakaian suhu 550°C terjadi penguatan kedua, sehingga tidak terjadi linier mempunyai kekuatan dengan naiknya suhu. Mohon penjelasan.

Heryudo:

1. Struktur mikro cuplikan belum saya amati karena keterbatasan waktu penelitian di Jepang. Kemungkinan terjadinya perubahan struktur mikro saya simpulkan dari studi pustaka yang saya lakukan.
2. Memang terjadi *secondary hardening*, tetapi sangat kecil; tetapi dari penelitian saya *secondary hardening* tidak kelihatan karena pengujian fatig dilakukan pada daerah plastis. Yang dominan adalah pelunakan.