



AKTUALNA TEMATYKA BADAŃ ŚWIATOWYCH W ZAKRESIE MATERIAŁÓW ENERGETYCZNYCH

RYSZARD H. KOZŁOWSKI

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków

Nowe podejście do problemu tworzenia nowoczesnych materiałów pracujących w podwyższonych temperaturach zakłada, że ich mikrostruktura staje się podmiotem, a nie jak dotychczas przedmiotem analizy. Obecnie zagadnieniami tymi zajmuje się wiele laboratoriów przemysłowych i uniwersyteckich na całym świecie, tak samodzielnie jak i we współpracy w ramach różnego typu projektów finansowanych przez organizacje międzynarodowe. W referacie dokonano przeglądu prac prowadzonych przez ostatnich 20 lat w USA, Europie i Japonii. Prace te dotyczyły stali pracujących w wysokich temperaturach jako materiałów konstrukcyjnych na rurociągi i inne elementy bloków energetycznych. Zgodnie z najnowszymi osiągnięciami w tej dziedzinie należy się spodziewać, że nową generację wysokotemperaturowych stali odpornych na pełzanie będą stanowiły stale stopowe ferrytyczne i ferrytyczno-martenzytyczne.

1. WSTĘP

Struktura i właściwości materiałów od dziesięcioleci stanowiły przedmiot zainteresowania wielu niezależnych dyscyplin nauki i techniki. Jednak w celu sterowania właściwościami wykorzystywano przede wszystkim poznane doświadczalnie pośrednie ich związki ze składem chemicznym oraz technologią przeróbki.

Nowa koncepcja mikrostruktury zakłada, że staje się ona podmiotem a nie, jak dotąd, przedmiotem analizy [1]. Zrozumiano bowiem złożone związki występujące pomiędzy technologią a mikrostrukturą z jednej strony, a mikrostrukturą i właściwościami oraz zachowaniem się materiałów z drugiej strony. Dla zmodyfikowania właściwości materiałów wystarczy dokonanie, nieraz bardzo subtelnych, zmian w mikrostrukturze. Z drugiej strony, jeżeli mikrostruktura materiału ulega zmianom pod wpływem techniki wytwarzania, przetwarzania czy warunków pracy, to tym samym prowadzi to do zmiany jego charakterystyki. Przyjmuje się dzisiaj, że mikrostruktura wyróżnia pewien szczególny fragment zespołu cech charakteryzujących stopień organizacji materii. Możemy wyróżnić siedem kolejnych szczebli tej organizacji: od najniższego, którym są cząstki elementarne, poprzez jądro, atom, molekułę, fazę, mikrostrukturę aż do konstrukcji. Rozpiętość skali wymiarów jest ogromna: od 10^{-15} m - w przypadku cząstek elementarnych, aż do 10^6 m - w przypadku muru chińskiego (największej konstrukcji wzniesionej przez człowieka). Wszystkie nasze wysiłki, wysiłki materiałoznawców, powinny zmierzać do tego, aby bloki energetyczne nie były widoczne z kosmosu (różnice wymiarowe trójnika wykonane z dwóch stali: X20 i P91 pokazuje rys.1)*.

Sięgając do metod ukształtowanych przez analizę systemów można przyjąć, że materiał stanowi pewien system, charakterystyczny dla danej budowy fazowej, składający się z mikrostruktury opisanej poprzez jej elementy oraz z dynamicznych i kinetycznych relacji występujących między tymi elementami.

*Wszystkie rysunki są w formie przezroczy

Właściwości i zachowanie materiału określone są wtedy jako reakcja tego systemu na przyłożony bodziec i opisane złożonymi procesami wzajemnego oddziaływania pomiędzy elementami mikrostruktury. Opis ten podkreśla szczególną rolę molekularnej budowy defektów struktury fazowej. Dzięki temu sterowanie właściwościami materiałów polega na wpływaniu, poprzez dobór składu chemicznego, na strukturę i udział objętościowy faz, a przez technologię przeróbki na gęstość, rozmieszczenie, właściwości i charakter elementów mikrostruktury.

Zachowanie materiałów w warunkach pracy zależy przy tym od intensywności procesów, wzajemnych oddziaływań pomiędzy elementami mikrostruktury. Badania w tej dziedzinie prowadzone są w laboratoriach przemysłowych i na uniwersytetach USA, Japonii i Europy.

W ostatniej dekadzie ważnym problemem, nie tylko krajów uprzemysłowionych, stała się ochrona środowiska naturalnego przed zanieczyszczeniem przez opalane węglem elektrownie. Oczyszczanie gazów spalinowych, ich odsiarczanie i denitracja pozwoliło zmniejszyć emisję kwasów do poziomu możliwego do przyjęcia. Istnieje jednakże dotąd tylko jedno rozwiązanie problemu redukcji emisji CO₂. Jest nim podwyższenie wydajności cieplnej bloków energetycznych przez wzrost temperatury i ciśnienia pary.

Główną przeszkodą w podwyższaniu parametrów pary jest brak odpowiednich stali wysokotemperaturowych o wystarczającej odporności na pęcznienie do budowy kotłów, rurociągów parowych i turbin.

Wagę tego problemu docenia się w Unii Europejskiej, czego dowodem jest utworzenie międzynarodowego zespołu naukowo-technicznego dla realizacji projektu nowoczesnego, parowo-gazowego bloku energetycznego. Realizacja tego eksperymentalnego projektu może trwać do roku 2005, natomiast jego koszty będą sięgać kwoty 60 milionów EURO.

Ważną rolę w tym przedsięwzięciu odgrywają studia materiałowe. Tworzy się obecnie 3 grupy przemysłowe, które zajmują się stalą ferrytyczną oraz stalami o osnowie niklowej. Całość projektu została również podzielona na trzy kierunki: 1) termodynamika i procesy technologiczne, 2) kotły i 3) turbiny parowe i gazowe (dwa ostatnie kierunki w aspekcie materiałoznawstwa i diagnostyki). Udział w tym zamierzeniu bierze 45 europejskich instytucji działających w dziedzinie produkcji materiałów, sprzętu i urządzeń energetycznych.

Propozycję udziału w powyższym projekcie otrzymała Politechnika Krakowska, która wspólnie z Pronovum - Katowice utworzyła grupę roboczą dla rozwiązania problemów materiałowych i diagnostycznych. Zespół ten uzupełniony o specjalistów z Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach, Politechniki Śląskiej, AGH i RaFaKo jest w stanie sprostać wymaganiom projektu Unii Europejskiej: COST 522 o roboczym tytule "Power generation in the 21st century: ultra efficient, low emission plant".

Poniżej dokonano przeglądu prac prowadzonych przez ostatnich 20 lat nad rozwojem martenzytyczno-ferrytycznych stali o zaw. 9-12% Cr pracujących przy wysokich temperaturach jako materiały konstrukcyjne rurociągów i innych elementów bloków energetycznych.

2. HISTORIA PROBLEMU

W USA, Japonii i większości krajów europejskich w kotłach energetycznych stosuje się parę o temp. 540°C, a materiałami konstrukcyjnymi rur i rurociągów są niskostopowe stale 1Cr0.5Mo i 2.25Cr1Mo. W UK stosuje się parę o temperaturze 565°C i stale 0.5CrMoV i 2.25Cr1Mo. We Francji, Niemczech i Danii temperatura pary waha się w zakresie 540 - 570°C i stosuje się wszystkie stale, włączając w to stale 12% CrMoV. W latach 1950 i 1960 w Niemczech, UK i USA oddano do użytku szereg elektrowni pracujących z parą o temperaturze 650°C. Materiałami konstrukcyjnymi na części przegrzewaczy i wszystkie pracujące w wysokiej temperaturze części o grubych przekrojach były stale austenityczne.

Wiarygodne dane doświadczalne zebrano przy eksploatacji instalacji niemieckich [1, 2], były to jednak jednostki małe, dostarczające elektryczność i parę dla przemysłu chemicznego, pracujące w warunkach stacjonarnych o niewielkiej liczbie odstawień.

Doświadczenia eksploatacyjne z UK i USA były mniej zachęcające. Instalacje te były elektrowniami większymi od niemieckich, a mniejsza ciągłość ich pracy, oraz austenityczne elementy o grubych przekrojach, powodowały wiele problemów związanych głównie z uszkodzeniami typu zmęczeniowego [3]. Typowym przykładem jest elektrownia w Eddystone, w której rurociągi parowe ulegały awarii na skutek kruchości i zmęczenia materiału [4].

Niezadowolające wyniki eksploatacyjne zebrano też w większych instalacjach w UK i USA, głównie ze względu na charakterystyczną dla stali austenitycznych niską odporność na zmęczenie. Wykazały one jasno, że należy zastosować nową generację wysokotemperaturowych stali ferrytycznych odpornych na pełzanie.

3. ROZWÓJ WYSOKOTEMPERATUROWYCH FERRYTYCZNO-MARTENZYTYCZNYCH STALI 9-12%CR

3.1. X20CrMoV121 i EM12

Problematyka zmęczenia materiałowego, jak również stabilność strukturalna stali i stopów żarowytrzymałych stosowanych w energetyce, przewinęła się na czterech kolejnych konferencjach: "Engineering Against Fatigue" oraz "Microstructural Stability of Creep Resistant Alloys for High Temperature Plant Applications", w marcu 1997 r. w Sheffield, jak również w kwietniu 1998 r. w Saclay/Paris: "Creep and Fatigue Crack Growth in High Temperature Plant" i w San Sebastian (Hiszpania): "Advanced Heat Resistant Steels for Power Generation", ściągając specjalistów z całego świata [17,18,19,20].

Główne prace nad zwiększeniem wysokotemperaturowej odporności na pełzanie stali ferrytycznych na kotły firm Mannesmann i Vallourec w późnych latach 1950, kiedy to wprowadzili do użytkowania ferrytyczno-martenzytyczne stale X20CrMoV121 [5] i EM12 [6]. Stal o symbolu X20CrMoV121 stosowano na rury przegrzewaczy, jak również do budowy elementów grubościennych, podczas gdy stal EM12 stosowano tylko na rury przegrzewaczy.

EM12 jest dwufazową martenzytyczno-ferrytyczną stalą o składzie chemicznym 9%Cr2%MoVNb. Stal ta nie nastęcza dużych trudności przy spawaniu, jej twardość w warunkach spawania wynosi około 350 HV, co prowadzi do małej podatności na pękanie na zimno. Stal ta stanowiła znaczny postęp w stosunku do stali stosowanych na rury

przegrzewaczy. Jej wytrzymałość na zerwanie przy pełzaniu wynosi 78 MPa w 600°C, 10⁵h w porównaniu do 39 MPa dla stali 2.25Cr1Mo przy tych samych parametrach.

Wysokotemperaturową odporność na pełzanie stali X20CrMoV121 otrzymano przez wprowadzenie 1% Mo i 0,3% V do martenzytycznej osnowy zawierającej 12% Cr. Pierwiastki te polepszają odporność stali na pełzanie, głównie poprzez stabilizację struktury martenzytycznej [8].

Chociaż produkcja, spawanie i obróbka cieplna stali X20CrMoV121 wymagają przestrzegania specjalnych reżimów technologicznych, była ona szeroko stosowana w Europie i na świecie jako materiał konstrukcyjny wielu dużych kotłów energetycznych. Wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne wykazały przydatność tego materiału w blokach energetycznych. Ze swą wytrzymałością na zerwanie przy pełzaniu rzędu 128 MPa w 550°C i 59 MPa w temperaturze 600°C przy 100 000 h zgodnie z normą DIN 17.175, stal X20CrMoV121 stanowiła znaczne osiągnięcie w stosunku do stali 2.25Cr1Mo. Materiał ten pozwalał na konstrukcję opalanych węglem elektrowni o nadkrytycznych parametrach pary (w elektrowni Vestkraft 3 uruchomionej w 1992 r. o mocy 385 MW, pracującej przy parametrach: 250 bar, 560°C, sprawność wynosiła 45%) [8]. Dalszy wzrost parametrów wymaga stali ferrytarno-martenzytycznej o jeszcze lepszych własnościach wytrzymałościowych i technologicznych.

3.2 P/T91 i HCM9M

W latach 1970 w Japonii i USA opracowano szereg nowych stali ferrytarno-martenzytycznych. Materiałem wyjściowym była dobrze znana stal T9, 9%Cr1%Mo, stosowana głównie w instalacjach chemicznych i rafineriach jako stal odporna na działanie wodoru. Jej odporność na pełzanie jest podobna jak stali 2.25Cr1Mo. Podwyższenie jej wysokotemperaturowej odporności na pełzanie osiągnięto przez dodanie V, Nb i N oraz podwojenie zawartości Mo. W wyniku prac otrzymano takie stale jak Sumitomo HCM 9M oraz opracowaną przez Oak Ridge Laboratories we współpracy z Combustion Engineering (9%Cr1%MoVNbN) stal P/T91. O ile wytrzymałość na pełzanie stali HCM 9M była podobna do X20CrMoV121, to w przypadku stali P91 wytrzymałość ta przy 600°C była ok. 50% wyższa niż stali X20CrMoV121.

P91 była pierwotnie przeznaczona na konstrukcje rurociągów parowych dla szybkich reaktorów powielających w USA, ale po wstrzymaniu programu ich budowy zaczęto rozważać jej zastosowanie w konwencjonalnych siłowniach. W latach 1983 i 1985 ASTM/ASM zaaprobował stal 91 jako materiał konstrukcyjny na rury przegrzewaczy kotłów (T91), rury (P91) i odkuwki (F91). Stało się wówczas możliwe przełamanie górnej granicy podwyższania parametrów pary.

W 1989 i 1990 r. Japończycy wdrożyli w elektrowni Kawagoe dwie 700 MW instalacje opalane LnG o parametrach pary 310 bar i 566°C, przez co po raz pierwszy zademonstrowano zastosowanie P91 w siłowniach pracujących z parą o podwyższonych parametrach [9].

Od późnych lat 1980 stal P91 znalazła dodatkowe zastosowanie przy wymianie komór przegrzewaczy i parociągów w siłowniach w Brazylii, Niemczech, UK i USA oraz jako materiał konstrukcyjny podkrytycznych siłowni w Korei [2].

W ramach europejskiego programu COST 501 "Advanced Materials for Power Engineering Components" były przeprowadzone prace badawcze mające na celu dopasowanie P91 do wymogów europejskiej praktyki konstrukcyjnej [10].

Stal P91 zastosowano po raz pierwszy jako materiał na konstrukcje wysokotemperaturowe w budowanych przez Elsam dwóch 400 MW elektrowniach opalanych węglem, przez co wykazano, że przy zastosowaniu przegrzewania międzystopniowego, osiągnie się sprawność 47%. Konstrukcje te mogą być również uważane za górną granicę stosowalności stali P91 jako materiału na wysokotemperaturowe części grubościennych kotłów i rurociągi parowe w elektrowniach opalanych węglem.

4. NOWE STALE Z DODATKIEM W

Po wdrożeniu do praktyki przemysłowej stali P91 opublikowano doniesienia o nowych opracowaniach japońskich. Prof. Fujita z Uniwersytetu w Tokio otrzymał dwie nowe ferrytyczno-martenzytyczne stale rurowe wysokotemperaturowe TB9 i TB12. Stopy te były rezultatem około 35 lat pracy nad stalami ferrytycznymi [11,12,13,19,20]. W Sumitomo opracowano stal rurową HCM12 [14].

TB9 (później nazwana NF616) jest stalą o składzie chemicznym 9%Cr0.5%Mo2%WVNbN. Oczekuje się, że mimo zmniejszenia zawartości Mo, dodanie W, dwukrotnie zwiększy odporność stali na pełzanie w porównaniu ze stalą X20CrMoV121 i podwyższy ją o około 40% w porównaniu do P91.

TB12 jest zmodyfikowaną wersją TB9, opartą na osnowie zawierającej 12% Cr.

HCM12 jest stalą rurową 12%Cr1%MoWVNbN zawierającą około 30% ferrytu. Jej opracowanie jest oparte na zasadach podobnych do stosowanych przy TB9 i TB12. Trwające do 80 000 h próby na zerwanie przy pełzaniu wykazały, że jej odporność na pełzanie jest nieco lepsza niż stali T91 [15].

Od 1989 r. trwają prace nad modyfikacją trzech stali 9-12%Cr nazwanych NF116 (TB9), TB12M (TB12) i HCM12A (HCM12), celem ich zastosowania w projekcie EPRI RP1403-50 jako materiału na elementy grubościenne. W projekcie tym partycypują producenci stali, kotłów i wyposażenia z Japonii, Europy i USA. Wyprodukowano rury grubościenne ze wszystkich trzech gatunków stali, a obecnie realizowany jest duży program badawczy. Kontynuowane są w tym roku badania nowej wersji stali na rury z dodatkiem W, nazwanej E911. Stal ta jest rurową wersją stali na wirniki opracowanej w trakcie drugiej rundy COST 501 [16]. Europejscy wytwórcy stali przeprowadzili próbne wytopy E911, z której wyprodukowano rury.

Oczekuje się, że wytrzymałość na zerwanie przy pełzaniu nowych stali z dodatkiem W, przekroczy 120 MPa przy 600°C, 10⁵ h. Wstępne badania przeprowadzone przez Elsam wykazują, że umożliwi to konstrukcję elementów grubościennych w 400 MW instalacjach pracujących z parą o parametrach 350 bar i 600°C, przy sprawności 48,5%. Składy chemiczne omawianych stali zestawiono wg [2] w tabeli 1.

Rys.2 (w formie przeźrocza) [2] przedstawia tendencje wzrostu odporności na pełzanie ferrytyczno-martenzytycznych stali 9-12%Cr. Krzywe dla stali 2.25CR1Mo, X20CrMoV121 i P91 wykreślono w oparciu o duże zbiory danych długotrwałych testów, podczas, gdy przybliżony zakres dla nowych stali z W oparty jest na wciąż ograniczonej bazie danych.

Tabela 1. Składy chemiczne omawianych stali żarowytrzymałych [wg 2]

	EM12	X20	T9	HCM 9M	P91	HCM12	Nf616	HCM12A	TB12 M	E911
C	max. 0,15	0,17 - 0,23	max. 0,15	max. 0,08	0,08 - 0,12	max. 0,014	0,10	0,12	0,10	0,10
Si	0,20 - 0,65	max. 0,50	0,25 - 1,00	max. 0,05	0,20 - 0,50	max. 0,50	0,10	0,08	0,04	0,20
Mn	0,80 - 1,30	max. 1,00	0,30 - 0,60	0,30 - 0,70	0,30 - 0,60	0,30 - 0,70	0,50	0,60	0,50	0,50
P	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,020	max. 0,030	0,01	0,015	0,02	0,02
S	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,030	max. 0,010	max. 0,030	0,005	0,001	0,001	0,01
Ni	max. 0,30	0,30 - 0,80	-	-	max. 0,40	-	-	0,3	1,0	0,3
Cu	-	-	-	-	-	-	-	1,0	0,10	-
Cr	8,50-10,50	10,00-12,50	8,00-10,00	8,00-10,00	8,00 - 9,50	11,00-13,00	9,0	11,0	11,0	9,0
Mo	1,70-2,30	-	0,90 - 1,10	1,80-2,20	0,85 - 1,05	0,80-1,20	0,50	0,40	0,50	1,0
W	-	0,25 - 0,35	-	-	-	0,80-1,20	1,8	1,9	2,0	1,0
V	0,20 - 0,40	-	-	-	0,18 - 0,25	0,20-0,30	0,2	0,2	0,2	0,2
Nb	0,30 - 0,55	-	-	-	0,06 - 0,10	max. 0,20	0,06	0,05	0,09	0,08
Al	-	-	-	-	max. 0,040	-	-	-	-	-
N	-	-	-	-	0,030 - 0,070	-	0,04	0,06	0,09	0,07
B	-	-	-	-	-	-	0,002	0,002	-	-

5. PODSUMOWANIE

Dotychczasowe doświadczenia związane z eksploatacją stali typu HM i HMF wskazują, że w urządzeniach energetycznych eksploatowanych w krajowej energetyce spełniają swoje zadanie i nie zachodzi potrzeba prowadzenia badań nad ich zamiennikami.

Zupełnie oddzielnym problemem są zagadnienia materiałowe w urządzeniach energetycznych pracujących na parametrach nadkrytycznych i turbinach gazowych. W projektach modernizacji i budowy nowych bloków w krajowej energetyce brane są pod uwagę urządzenia, do których wytwarzania nie przygotowano jest zarówno polskie hutnictwo jak również brakuje wiedzy na ten temat wśród kadry inżynierskiej. Można podejrzewać, że także krajowe placówki naukowo-badawcze nie wyszły poza prace studialne w tym zakresie.

Rozwój energetyki krajowej na pewno będzie związany z budową nowych urządzeń, pracujących na podwyższonych parametrach, wymagających stosowania gatunków stali nowych generacji. Pierwsze urządzenia mogą być wykonane z materiałów zagranicznych. Eksploatacja tych urządzeń wymaga stosowania części zamiennych, które powinny być wykonywane w kraju z materiałów produkcji rodzimej. Wzorem lat ubiegłych (stal 15HM, 10H2M, 13HMF) należy opanować produkcję nowych stosowanych obecnie w energetyce gatunków stali, do czego powinny być już zaangażowane odpowiednie placówki badawczo-naukowe.

Literatura

- [1] Grabski M.W. - referat w Tow. Nauk., Warszawa, 1986 r, s.1-6 oraz wykłady Inżynierii Materiałowej.
- [2] Blum R., Hald J., Bendick W., Rosselet A., Vaillant J.C. - Newly Developed High Temperature Ferritic-Martensitic Steels from USA, Japan and Europe. Fossil-fired Power Plants with Advanced Design Parameters. Kolding, Dania, 1993-06-16/18, International VGB Conference, s.1-30.
- [3] Takeda Y., Masuyama F. - Heat-Resisting Steels for Ultra Super Critical Fossil Power Plant, Heat-Resistant Materials, ASM Int. 1991, First International Conference, September, Fontana, Wisconsin, s.23-26.
- [4] Delong J.F., Siddall W.F., Haneda H., Daikoku T., Ellis F.V., Tsuchiya T., Masuyama F. - Operation Experiences and Reliability Evaluation on Main Steam Line Pressure Parts of Philadelphia Electric Co., Eddystone. Thermal AND Nuclear Power 35 (11) 1984.
- [5] Bettzieche P. - Hochwarmfeste ferritische Stähle. Mitteilung der VGB, Z.57, Dec. 1958, s.393-397.
- [6] Caubo M., Mathonet J. - Caracteristiques et Applications Industriels d'une Nuance D'acier a 9%Cr, 2% Mo, V, Nb pour Tubes de Surchauffeurs. Revue de Metallurgie, Maj 1969.
- [7] Eggeler G., Nilsvang N., Ilchner B. - Microstructural Changes in a 12% Cr Steel during Creep. Steel Research, T.58, 1087, s.97-103.
- [8] Lind-Hansen A., Lindhart S. - Der Block Esbjerg 3 - Erfahrungen aus Inbetriebnahme und erster Betriebszeit. VGB - Konferenz "Fossilbefeuerte Dampfkraftwerke mit fortgeschrittenen Auslegungsparametern, 16-18 Juni 1993, Kolding, Dania.
- [9] Kawamura T., Toyoda T., Kurihara I., Haneda H. - Planung und Betrieb überkritischer Dampferzeuger mit 311 bar im Kraftwerk Kawagoe. VGB - Kraftwerkstechnik 71, 1991, Z.7, s.637-643.

- [10] Marriot J.B. - COST 501 Round II, Advanced Materials for Power Engineering Components, Annual Report 1991, Joint Research Centr Petten (za [3]).
- [11] Fujita T. - Advanced High - Chromium Ferritic Steels for High Temperatures. Metal Progress, August, 1986.
- [12] Fujita T. - Current Progress in Advanced Figh Cr Steels for High - temperature Applications. ISIJ International, T.32, 1992, nr2, s.175-181.
- [13] Fujita T. - Heat Resistant Steels for Advanced. Advanced Materials Processes Nr4, 1992, s.42-47.
- [14] Masuyama F., Daikoku T., Haneda H., Yoshikawa K., Iseda A., Yuzawa H. - The super 12% Cr Boiler Tubing. COST-EPRI Woekshop, Creep-Resistant 9-12% Cr Steels, Schaffhausen, Switzerland, 1986-10-13/14.
- [15] Iseda A., Sawaragi Y., Kubota M., Hayase Y. - Development of New 12% Cr Steel Tubing (HCM12) for Boiler Application. The Sumitomo Research Nr 40, November 1989, s.41-56.
- [16] Berger C., Mayer K.H., Scarlin R.B., Thornton D. - Improved Ferritic Forged and Cast Steels for Advanced Steam Power Plants - A Callaborate European Effort in COST 501. EPRI International Symposium on Improved Technology for Fossil Power Plants - New and Retrofit Applications, March 1-3, 1993, Washington D.C.
- [17] "Engineering Against Fatigue", University od Sheffield, U.K. 1997-03-17/21.
- [18] "Microstructural Stability of Creep Resistant Alloys for High Temperature Plant Applications, U.K. Sheffield Hallam University, 1997-03-24/26.
- [19] "Creep and Fatigue Crack Growth in High Temperature Plant". International Hidaonfernce Saclay/Paris, France, 1998-04-15/17.
- [20] "Advanced Heat Resistant Steels for Power Generation". Miramar Palace, San Sebastiaan, Spain, 1998-04-27/29.