

BORETAÇÃO DO AÇO AISI D2 EM MEIO LÍQUIDO

Carlos Kleber Nascimento de Oliveira

Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Regional do Cariri, Av. Leão Sampaio, s/nº, 63040-000 Juazeiro do Norte, CE. E-mail: cknoliveira@yahoo.com.br

Programa de Pós-graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, EESC/IFSC/IQSC-USP, São Carlos, SP.

Luiz Carlos Casteletti

Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 São Carlos, SP. E-mail: castelet@sc.usp.br

Lourenço Elias Piteli Filho

Curso de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. E-mail: lepiteli@yahoo.com.br

Resumo

O aço AISI D2 foi boretado em banho de sal consistindo de bórax, ferro-titânio e alumínio. Duas composições de banho foram usadas: 1. Bórax, 10%Fe-Ti e 5%Al; 2. Bórax e 15%Al. No primeiro caso a temperatura de tratamento foi de 1000°C enquanto no segundo foram realizados tratamentos a 800 e 1000°C. Os tempos dos tratamentos foram sempre de 4h. A caracterização das amostras deu-se por microscopia ótica, microdureza Vickers, análises por difração de raios X e ensaio de desgaste micro-abrasivo. Camadas de boretos de ferro foram obtidas em todos os tratamentos. As fases constituintes destas camadas foram identificadas como sendo FeB, Fe₂B, Fe₃B e Fe₂₃B₆. As camadas apresentaram espessuras variando de 30 a 125µm e durezas na faixa de 1537 a 1744 HV_{0,050}, dependendo das condições de tratamento e das composições dos banhos. A amostra do aço D2 boretada apresentou uma resistência ao desgaste micro-abrasivo consideravelmente superior a do aço sem revestimento.

Palavras-chave: *Boretação, bórax fundido, boreto de ferro, revestimentos duros*

1. INTRODUÇÃO

O uso de tratamentos superficiais amplia a possibilidade de se projetar peças de forma a se obter propriedades específicas onde são mais necessárias. Assim, uma peça poderá apresentar um núcleo com resistência mecânica e tenacidade requeridas e uma superfície com resistência ao desgaste e à corrosão elevadas. Os aços-ferramenta são largamente usados em aplicações industriais como componentes mecânicos, ferramentas de corte, moldes e matrizes, onde a resistência ao desgaste e à corrosão e o coeficiente de fricção são de primeira importância. A boretação é um tipo de tratamento superficial que pode ser utilizado para conferir estas propriedades a uma grande variedade de materiais ferrosos e não-ferrosos.^[1] A forte ligação covalente da maioria dos boretos é a responsável por seu alto ponto de fusão, módulo de elasticidade e dureza elevada.^[2] O tratamento de boretação pode ser realizado em meio sólido,^[1,2] líquido,^[1,3,4] gasoso,^[1] plasma^[5] ou leito fluidizado.^[1] As temperaturas de tratamento utilizadas neste processo geralmente estão entre 700 e

1000°C.^[1-5] As camadas obtidas apresentam profundidade que vão de 5 μ a 380 μ m, dependendo de fatores como tempo e temperatura do processo e presença de elementos de liga no substrato.^[1,3,4,6,7] Valores de dureza na faixa de 1400 a 2100 HV são encontrados.^[7] No tratamento termoquímico de boretção, átomos de boro difundem na superfície do substrato.^[1,6,7] Devido ao tamanho relativamente pequeno e à sua mobilidade elevada, os átomos de boro podem difundir em ligas ferrosas, se dissolvendo intersticialmente ou reagindo com o ferro para formar os compostos FeB e Fe₂B.^[2] Nos aços, a formação destas duas fases predomina, mas boretos de outros elementos como Cr, V, Mo e Ni podem se formar.^[1,4] As camadas de boretos podem ser constituídas de uma fase única Fe₂B ou de uma dupla fase, composta de FeB + Fe₂B.^[2,7,8] A formação da fase única Fe₂B é mais desejável, uma vez que a fase FeB, rica em boro, é mais frágil.^[1] Adicionalmente, as fases FeB e Fe₂B são formadas sob tensões residuais de tração e compressão, respectivamente, e a formação de trincas na interface FeB/Fe₂B é freqüentemente observada.^[1,7]

No presente trabalho, o aço AISI D2 foi boretado em meio líquido, utilizando-se duas composições de banho. As camadas obtidas foram caracterizadas por meio de microscopia ótica, análises por difração de raios-X, ensaios de microdureza Vickers e testes de desgaste micro-abrasivos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

O material tratado foi o aço AISI D2 (1,48%C, 11,91%Cr, 0,98%Mo, 0,76%V, 0,96%Si, 0,45%Mn, bal. Fe, % em peso). Na composição dos banhos usou-se borato de sódio P.A. (Na₂B₄O₇·10H₂O), ferro-titânio (34%, em peso) e alumínio.

2.2. Metodologia

Amostras do aço D2, medindo 22mm x 20mm x 5mm, foram obtidas mediante corte e lixamento até a lixa nº 600, para imersão no banho. O bórax foi fundido em um cadinho de aço inoxidável em um forno tipo “poço” com aquecimento por resistência elétrica. Foram utilizados dois tipos de banho, cujas composições foram: 1. bórax/10%Fe-Ti/5%Al e 2. bórax/15%Al. No primeiro a temperatura de tratamento foi de 1000°C enquanto no segundo as amostras foram tratadas a 800 e 1000°C, com duração de 4h em todos os tratamentos. As amostras foram resfriadas em óleo, diretamente do banho. Na preparação para a observação microscópica usou-se ataque com reagente de Vilella. As medições das microdurezas Vickers (HV) foram realizadas nas seções transversais das camadas, à 30 μ m da superfície, aplicando-se uma carga de 50gf, utilizando-se um microdurômetro digital. Os valores médios das durezas foram determinados a partir de seis medições. Para se obter os perfis de HV apresentados nas Figuras 5 e 6, a carga utilizada foi de 100gf. Cada ponto dos gráficos corresponde às leituras de HV realizadas nas indentações mostradas nas micrografias. As análises de R-X foram realizadas num difratômetro Siemens D5000, com o feixe incidindo sobre a superfície das amostras. Utilizou-se radiação de cobre, com θ variando de 30 a 100°. O comportamento ao desgaste das amostras foi avaliado mediante ensaios de desgaste micro-abrasivos.^[9-13] Um esquema do equipamento utilizado é mostrado na Figura 1. Nos ensaios, uma esfera do aço AISI 52100, com diâmetro de 25,4mm e dureza de 850 HV, deslizou sobre a superfície plana da amostra, produzindo uma calota de desgaste. Os diâmetros das calotas (d) foram medidos em um microscópio ótico e os seus volumes (V) foram calculados segundo a Equação (1), onde R é o raio da esfera. Os testes foram realizados a seco, a uma velocidade de deslizamento da esfera de 19,7cm s⁻¹ (148rpm) e força de contato esfera/amostra de 18,7N. Uma série de cinco experimentos foi realizada para cada amostra, com durações de 5, 10, 15, 20 e 25min, correspondendo a distâncias de deslizamento de 59m (740 revoluções), 118m (1480 rev.), 177m (2220 rev.), 236m (2960 rev.) e 295m (3700 rev.), respectivamente.

$$V = \frac{\pi d^4}{64R}, \quad \text{para } d \ll R \quad (1)$$

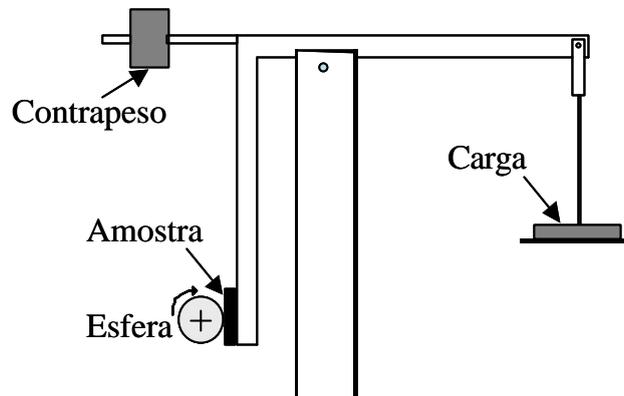
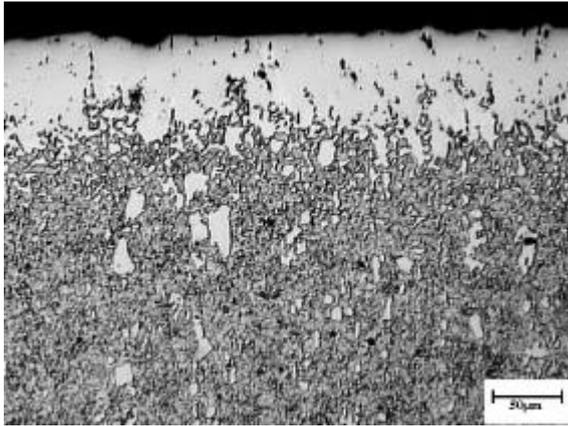


Figura 1: Esquema do equipamento usado no ensaio de desgaste micro-abrasivo.

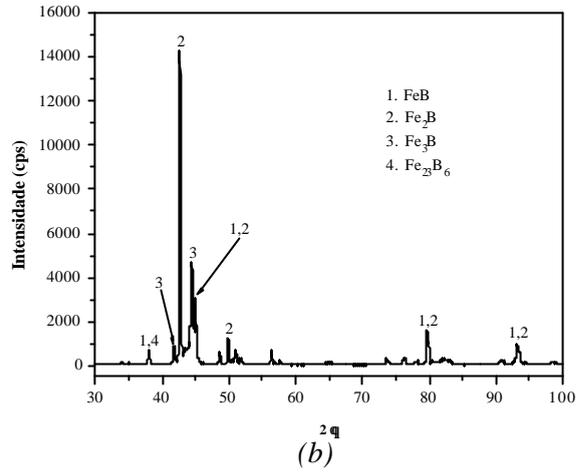
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Micrografias óticas do aço AISI D2 tratado em banho de bórax são mostradas nas figuras 2a, 3a e 4a. Na figura 2a tem-se a micrografia da camada obtida no banho contendo 10%Fe-Ti/5%Al, à 1000°C/4h. A camada apresentou uma morfologia com uma interface camada/substrato irregular. Sua espessura média foi de 60µm, chegando a atingir uma profundidade de até 100µm. O difratograma de R-X (fig. 2b) mostra que esta camada é constituída predominantemente de Fe₂B, sendo observados também, picos relativos às fases FeB, Fe₃B e Fe₂₃B₆. A presença de mais de um tipo de boreto em camadas boretadas foi reportada por Sen et al. (2001). Embora seja um elemento formador de carboneto, o titânio apresenta uma energia livre de formação de óxido inferior ao boro.^[14] Desta forma, é provável que tanto o alumínio quanto o titânio tenham contribuído para a redução do bórax, com a conseqüente liberação de átomos de boro para migrarem até a superfície da peça, formando boretos com o ferro presente na mesma. A dureza da camada foi de 1537±27 HV_{0,050} e está de acordo com o esperado para a fase Fe₂B.^[15] A dureza do aço D2 não boretado é de 260±21 HV_{0,050} no estado recozido e 670±24 HV_{0,050} após têmpera e revenido. A Figura 5 mostra o perfil de microdureza Vickers ao longo da camada, a partir da superfície em direção ao substrato.

Quando o aço D2 foi tratado em banho composto por bórax/15%Al, à 1000°C/4h (Fig. 3a), a camada obtida apresentou uma espessura de 125µm. O teor de alumínio maior provavelmente promoveu uma redução química mais intensa do bórax, aumentando o potencial de boretação e contribuindo para a formação de uma camada mais espessa. Observa-se também que a fase predominante na camada passa a ser o FeB (Fig. 3b). Este resultado refletiu na dureza da camada que neste caso foi de 1744±28 HV_{0,050}. O perfil de microdureza para esta camada é mostrado na Figura 6. No tratamento realizado à 800°C/4h, nesta mesma composição de banho (Fig. 4a), a espessura da camada foi menor, medindo 30µm, o que já se esperava considerando que a boretação é um processo de difusão térmica.^[1] A sua dureza foi de 1616±41 HV_{0,050}. Os picos no difratograma de R-X (Fig. 4b) são praticamente os mesmos da amostra tratada à 1000°C, indicando que as camadas são constituídas pelas mesmas fases.

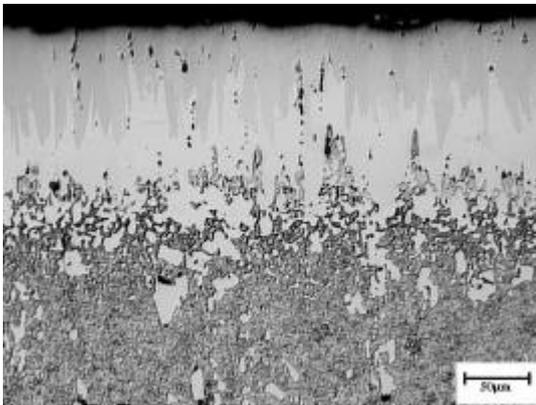


(a)

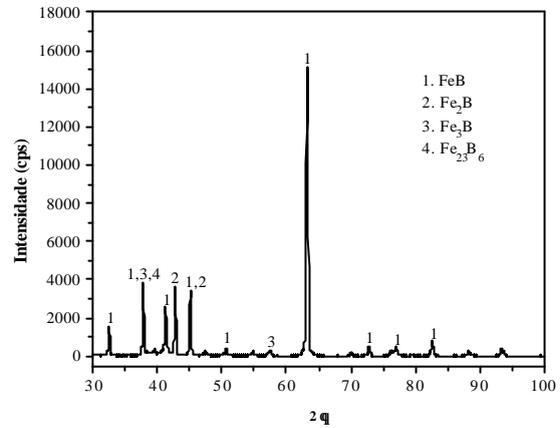


(b)

Figura 2: Aço AISI D2 tratado em banho de bórax com Fe-Ti, 1000°C/4h: (a) Micrografia ótica da seção transversal; (b) Difratograma de raios X da superfície.

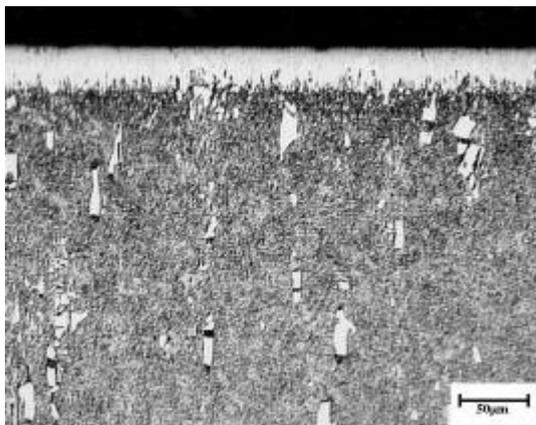


(a)

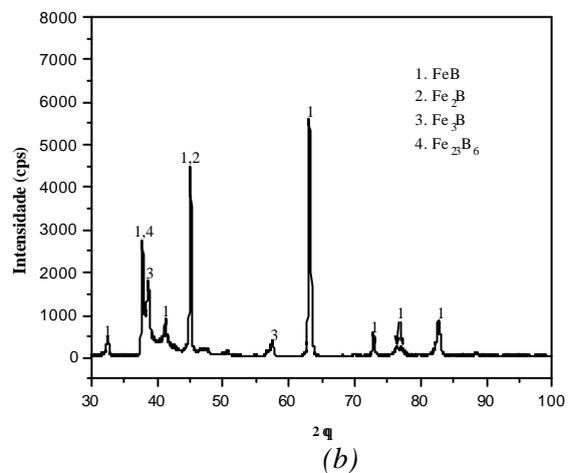


(b)

Figura 3: Aço AISI D2 tratado em banho de bórax com 15%Al, 1000°C/4h: (a) Micrografia ótica da seção transversal; (b) Difratograma de raios X da superfície.



(a)



(b)

Figura 4: Difratograma de raios-X do aço D2 tratado em banho de bórax com 15%Al, 800°C/4h: (a) Micrografia ótica da seção transversal; (b) Difratograma de raios X da superfície.

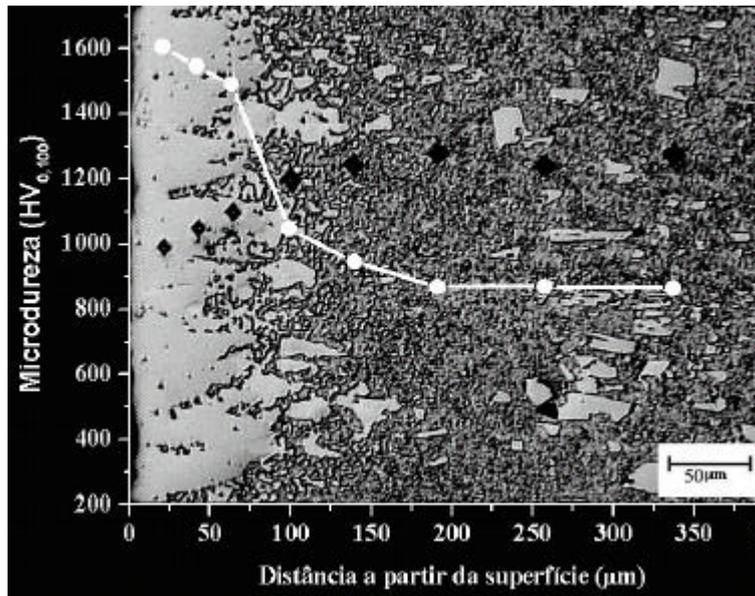


Figura 5: Perfil de microdureza Vickers para o aço AISI D2 boretado à 1000°C/4h, em banho contendo 10%Fe-Ti/5%Al.

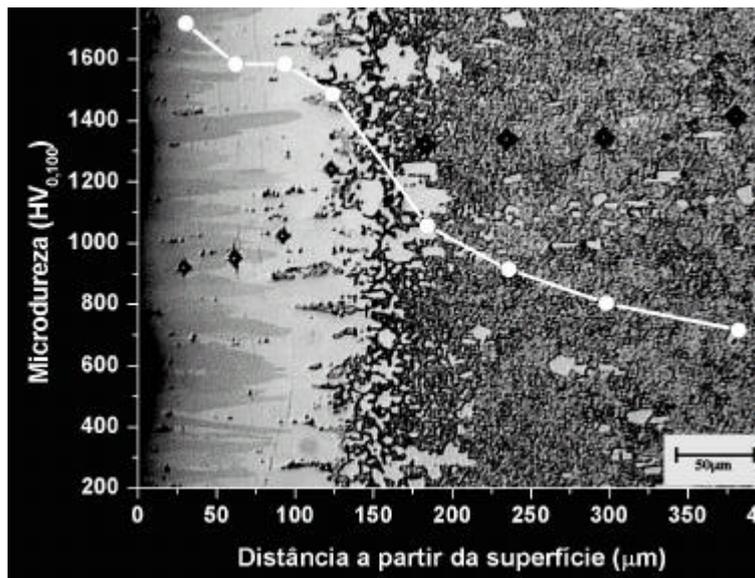


Figura 6: Perfil de microdureza Vickers para o aço AISI D2 boretado à 1000°C/4h, em banho contendo 15%Al.

As curvas de desgaste micro-abrasivos para amostras do aço AISI D2 temperado/revenido (TR), e boretado no banho 10%Fe-Ti/5%Al, são mostradas na Figura 7. Como se pode observar, a perda de volume da amostra boretada foi consideravelmente menor do que a do aço sem revestimento, mostrando que o processo empregado é efetivo para a obtenção de camadas com resistências ao desgaste elevadas. Esta elevada resistência ao desgaste da camada de boretos era esperada.^[8]

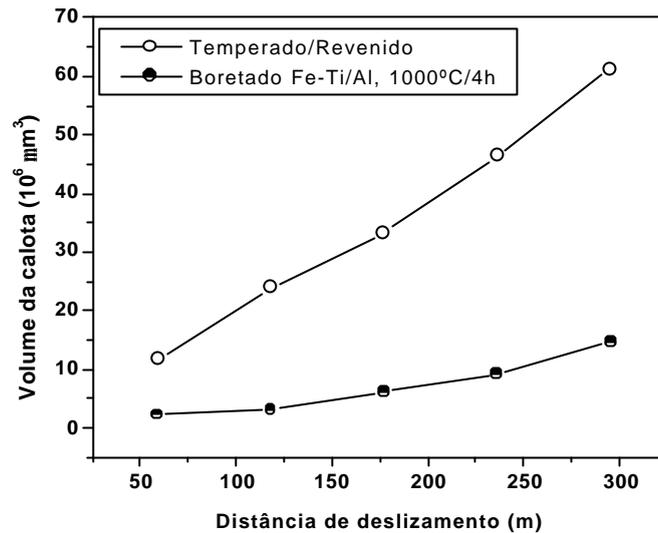


Figura 7: Volumes das calotas de desgaste para o aço AISI D2 boretado em 10%Fe-Ti/5%Al, 1000°C/4h.

4. CONCLUSÕES

O aço AISI D2 foi boretado em banho de bórax, adicionado de ferro-titânio e alumínio, em temperaturas de 800 e 1000°C.

- As camadas apresentaram uma interface irregular com o substrato. Suas espessuras variaram de 30 a 125 μm dependendo das condições de tratamento e composição dos banhos. O banho contendo 15%Al produziu uma camada mais espessa do que o banho adicionado de 10%Fe-Ti/5%Al.
- As durezas das camadas foram elevadas (1537 a 1744HV_{0,050}) para todos os tratamentos.
- As fases constituintes das camadas foram identificadas como sendo FeB, Fe₂B, Fe₃B e Fe₂₃B₆. Fe₂B foi predominante no banho contendo ferro-titânio/alumínio enquanto a fase FeB predominou no banho contendo 15%Al.
- A resistência ao desgaste micro-abrasivo da camada de boreto foi muito superior à do aço D2 sem revestimento.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do CNPq (141.395/2001-0).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Sinha, A. K., Boriding (Boronizing), **ASM Handbook**, ASM International, v. 4, p. 437, USA, 1991.
- [2] Sen, S. et al., Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel, **Surface and Coatings Technology**, v. 135, p. 173, 2001.
- [3] Özbek, I., et al., Characterization of borided AISI 316L stainless steel implant, **Vacuum**, v. 65, p. 521, 2002.
- [4] Sen, U. and Sen, S., The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steels, **Materials Characterization**, v. 50, p. 261, 2003.

- [5] Cabeo, E. C., et al., Plasma-assisted boriding of industrial components in a pulse d.c. glow discharge, **Surface and Coatings Technology**, v. 116-119, p. 229, 1999.
- [6] Genel, K., Ozbek, I. and Bindal, C., Kinetics of boriding of AISI W1 steel, **Materials Science and Engineering**, v. A347, p. 311, 2003.
- [7] Ozbek, I. and Bindal, C., Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, **Surface and Coatings Technology**, v. 154, p. 14, 2002.
- [8] Martini, C., et al., Sliding and abrasive wear behavior of boride coatings, **Wear**, v. 256, p. 608, 2004.
- [9] Rutherford, K.L. and Hutchings, I.M., A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems, **Surface and Coatings Technology**, v. 79, p. 231, 1996.
- [10] M. G. Gee, A. Gant, I. Hutchings, R. Bethke, K. Schiffman, K. Van Acker, S. Poulat, Y. Gachon, J. Von Stebut, Progress towards standardization of ball cratering, **Wear**, v. 255, p. 1, 2003.
- [11] K. Adachi, I. M. Hutchings, Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test, **Wear**, v. 255, p. 23, 2003.
- [12] K. Bose, R. J. K. Wood, Optimum tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings, **Wear**, v. 258, p. 322, 2005.
- [13] J. C. A. Batista, A. Matthews, C. Godoy, Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings, **Surface and Coatings Technology**, v. 142/144, p. 1137, 2001.
- [14] Arai et al., Diffusion carbide coatings formed in molten borax systems, **J. Materials Engineering**, v. 9, p. 183, 1987.
- [15] Kulka, M., Pertek, A., The importance of carbon content beneath iron borides after boriding of chromium and nickel-based low-carbon steel, **Applied Surface Science**, v. 214, p. 161, 2003.

BORONIZING OF THE AISI D2 STEEL IN LIQUID MEDIUM

Abstract

The AISI D2 steel was borided in salt bath consisting of borax, ferro-titanium and aluminum. Two bath compositions were used: 1. Borax, 10%Fe-Ti e 5%Al; 2. Borax e 15%Al, (in wt. %). In the first case the treatment temperature was of 1000°C while in the second case the treatments were carried out at 800 and 1000°C. All treatments lasted 4h. Samples were characterized by optical microscopy, Vickers microhardness, X-ray diffraction (XRD) analysis and micro-abrasive wear test. Iron boride layers were obtained in all treatments. According to XDR patterns these layers are constituted of FeB, Fe₂B, Fe₃B and Fe₂₃B₆. Layers with thickness varying from 30 to 125µm were obtained, depending on the treatment conditions and bath compositions. Their hardnesses ranged from 1537 to 1744HV_{0,050}. Boride layer was considerably more wear resistant than unborided D2 sample.

Keywords: Boriding, molten borax, iron boride, hard coatings