

NOVO AÇO FERRAMENTA DE ALTA RESISTÊNCIA A QUENTE

Rafael Agnelli Mesquita ¹
Celso Antonio Barbosa ²

Resumo

Os aços ferramenta para trabalho a quente são principalmente empregados em processos de conformação a quente de metais, em especial em matrizes de forjamento, extrusão e fundição sob pressão. Em tais aplicações, a resistência a quente do aço ferramenta é essencial, retardando falhas por desgaste, deformação plástica e fadiga térmica. Durante o trabalho, as superfícies das matrizes de conformação a quente são submetidas a altas temperaturas, nas quais as reações de revenido voltam a ocorrer. Portanto, para promover melhoria da resistência a quente, estes fenômenos (as reações de revenido) devem ser retardado(a)s (ou reduzidas). O novo material descrito no presente trabalho, denominado VHSUPER[®], foi desenvolvido focando a melhoria da resistência ao revenido - a partir da alteração de sua composição química. Corridas em escala piloto e corridas industriais foram produzidas e testes de campo foram realizados. O ensaio de resistência à perda de dureza mostrou que o novo aço possui resistência ao revenido significativamente superior aos aços tradicionais: AISI H11 e AISI H13. A principal causa é o aumento no teor de molibdênio, formador de carbonetos estáveis no endurecimento secundário. Apesar da melhoria da resistência ao revenido, a tenacidade não foi prejudicada, como confirmado pelos ensaios de impacto. Os testes de campo, em matrizes de forjamento a quente de aços, mostraram que o novo material gera expressiva melhoria de vida útil, indicando sua adequação aos processos de conformação a quente mais solicitados.

Palavras-chave: Aço-ferramenta; Trabalho a quente; Resistência; Revenido; Tenacidade.

NEW TOOL STEEL WITH IMPROVED HOT RESISTANCE

Abstract

Hot work tool steels are mainly employed in hot metal forming processes, especially as dies for forging, extrusion or die casting. In such applications, tool steel hot resistance is essential. During forging operations, hot work dies are exposed to high temperatures, in which tempering reactions can occur. Therefore, increased hot resistance can only be attained if such reactions are retarded. The new material described in the present paper, named VHSUPER[®], was developed focusing the increase in tempering resistance, through a different design of chemical composition. Pilot scale and industrial heats were produced and field tests were performed. The tempering resistance test showed the superior behavior of the new steel in comparison to AISI H11 and AISI H13 grades. This mainly results from its higher Mo content, which forms stable carbides during secondary hardening. In spite of the higher tempering resistance, impact tests showed that toughness was not reduced. The field testes, in hot forging dies, resulted in substantial increase in die life for the new material, indicating its potential for highly stressed hot forming tools.

Key words: Tool steels; Hot work; Tempering resistance; Toughness; Hot resistant steels.

I INTRODUÇÃO

As ferramentas de conformação a quente são empregadas em diversos ramos industriais, em três operações básicas: ferramentas de forjamento a quente ou a morno, moldes e matrizes para fundição de ligas não ferrosas e matrizes de extrusão de ligas não ferrosas.⁽¹⁾ Nas aplicações de forjamento,⁽²⁾ destacam-se o forjamento a quente de aços, especialmente de aços para construção mecânica aplicados em peças automobilísticas. Em tais operações, o tarugo a ser forjado encontra-se em temperaturas acima de 1.100°C. Durante a conformação, a temperatura da superfície da ferramenta é elevada a valores tanto maiores quanto maior o tempo de contato com o metal sendo forjado.

Desta forma, o aquecimento das regiões de contato da matriz, requer que o aço empregado na ferramenta deve apresentar alta resistência a quente. O mecanismo de endurecimento dos aços para matrizes de conformação a quente é, principalmente, a precipitação de carbonetos finos. Destacam-se os carbonetos de molibdênio(Mo) ou tungstênio (W), do tipo M₂C, ou carbonetos de vanádio (V), tipo MC.^(3,4) Apesar da alta estabilidade, esses carbonetos tendem a coalescer após longos períodos em altas temperaturas, tipicamente acima de 550°C - condições facilmente obtidas nas regiões de trabalho da

¹ Engenheiro de Materiais, Membro da ABM, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré - SP, Brasil. (rafael.mesquita@villaresmetals.com.br)

² Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, Gerente de Tecnologia da Villares Metals S. A., Sumaré - SP, Brasil. (celso.barbosa@villaresmetals.com.br)

ferramenta.⁽¹⁻³⁾ Como consequência, a dureza local diminui, gerando desgaste ou deformação plástica e causando a falha da ferramenta.

A redução da perda da dureza do metal da ferramenta, ou seja, da resistência ao revenido, é assim desejável para o aumento do desempenho das ferramentas de forjamento. O mesmo ocorre para outras aplicações, como extrusão ou fundição de ligas não ferrosas. Na extrusão de alumínio,^(1,4) por exemplo, a temperatura do tarugo é da ordem de 600°C, gerando perda de dureza no aço e desgaste da ferramenta. Em matrizes de fundição sob pressão,^(1,5-6) o metal líquido é injetado em alta pressão e temperatura (em torno de 700°C), também promovendo o aquecimento da superfície da matriz. Neste caso, a falha ocorre devido a trincas de fadiga térmica, e a resistência ao revenido é importante para retardar a iniciação das trincas.⁽⁷⁾

O aumento da resistência a quente dos aços ferramenta é normalmente obtido pelo aumento do teor de elementos formadores de carbonetos secundários e pela modificação de sua estabilidade.^(1,3,8) Apesar de efetivos no aumento da resistência a quente, o excesso de tais elementos implica na redução da tenacidade ou em expressivo aumento no custo do material.^(1,3,8)

O presente trabalho, portanto, descreve o projeto de liga de um novo aço ferramenta com melhoria da resistência a quente, mas com alta tenacidade e sem excesso de elementos de liga. Os resultados são descritos em termos das propriedades de resistência ao revenido e tenacidade em impacto, também abordando resultados de testes de campo em ferramentas de forjamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição proposta para o novo material foi produzida em escala piloto e comparada a outros aços típicos desta linha ou outros

aços modificados. Na Tabela I são apresentadas as composições químicas. O aço VHSUPER[®] possui maior teor de molibdênio e menor teor de cromo, numa combinação que otimiza suas propriedades de resistência a quente. O aço TENAX 300[®] visa a melhoria da tenacidade; detalhes de seu desenvolvimento são encontrados em Mesquita, França e Barbosa.⁽⁹⁾ O aço H11 mod. é uma modificação do aço H11 no teor de molibdênio, porém sem a redução do teor de cromo aplicada no VHSUPER[®].

Os lingotes, com aproximadamente 50 kg e 140 x 140 mm² de secção média, foram forjados até bitolas de seção 70 x 70 mm². Previamente ao forjamento, os lingotes passaram por tratamentos de homogeneização em alta temperatura e por um recozimento especial, depois de forjados. Esses tratamentos foram empregados para propiciar uma adequada microestrutura, reduzindo a microsegregação e os carbonetos primários agrupados. A rota aplicada é característica do processo ISO[®], descrito em detalhe em Mesquita e Barbosa.⁽¹⁰⁾

Para avaliação da resposta ao tratamento térmico, amostras foram austenitizadas a 1.020°C por 30 min e submetidas a revenimento duplo de 2 h em temperaturas entre 450°C e 650°C. Para avaliar a resistência ao revenimento, foram feitos tratamentos a 600°C, em intervalos de tempo de 3 horas, 10 horas, 30 horas e 100 horas, sendo medida a dureza inicial e após o tratamento. A tenacidade foi avaliada pelo ensaio de impacto, em corpos de prova com entalhe em “V” (Charpy V), conforme norma ASTM E 21, e em corpos de prova sem entalhe, com seção de 5 x 7 mm², conforme norma NADCA.⁽¹¹⁾ Os resultados de temperabilidade foram retirados das curvas TRC de cada material, obtidas por dilatometria. Para a análise da condutividade térmica, empregou-se o método flash de laser.⁽¹²⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resposta ao Tratamento Térmico

As curvas de revenimento dos materiais estudados são apresentadas na Figura 1. Como já identificado em trabalho anterior,⁽⁹⁾ os aços com baixo teor de silício possuem dureza cerca de 4 HRC menor em baixa temperatura.

Contudo, esta diferença dificilmente afeta o desempenho do aço ferramenta. Primeiro, porque as matrizes dificilmente

Tabela I. Composição química dos aços estudados e suas identificações. Porcentagem em massa e balanço em Fe.

	H11	H13	H11 MOD.	TENAX 300 [®]	DIN 1.2365	VHSUPER [®]
C	0,36	0,40	0,35	0,35	0,31	0,35
Si	1,02	0,96	0,13	0,30	0,30	0,31
Mn	0,48	0,34	0,49	0,27	0,30	0,30
P	0,025	0,023	0,009	0,007	0,023	0,010
S	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005	0,006
Co	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
Cr	5,03	5,23	4,99	4,96	2,85	3,78
Mo	1,40	1,31	2,28	1,39	2,80	2,49
Ni	0,23	0,25	0,10	0,17	0,07	0,07
V	0,34	0,85	0,57	0,42	0,50	0,52
W	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Cu	0,11	0,20	0,03	0,10	0,02	0,06
Ti	<0,005	0,018	<0,005	<0,005	0,015	<0,005
Nb	<0,010	0,020	0,010	<0,010	0,020	<0,01
Al	<0,005	0,014	0,009	<0,005	0,019	<0,005

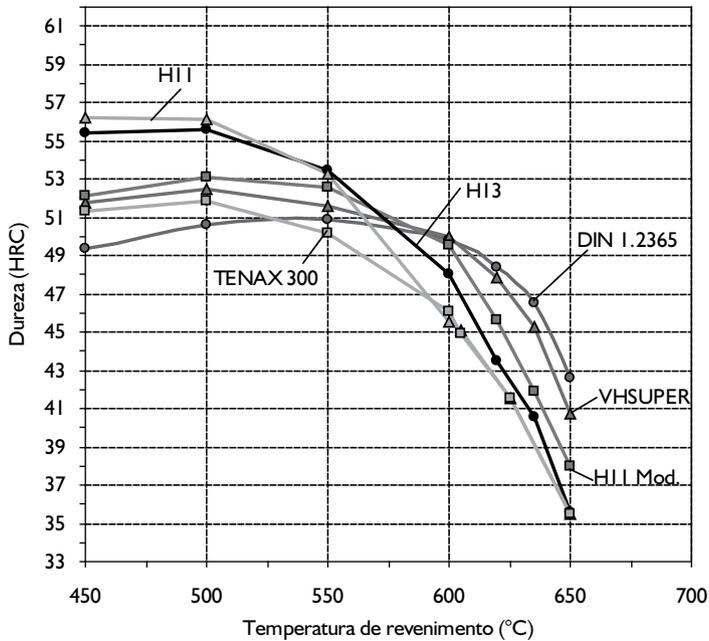


Figura 1. Curva de revenimento dos aços estudados, cuja composição química é apresentada na Tabela 1. Amostras de 15 mm de seção, temperadas em óleo com austenitização a 1020°C por 30 min em temperatura. O revenimento foi duplo de 2 horas para todas as temperaturas.

possuem dureza superior a 51 HRC. Segundo, e mais importante, porque nas aplicações de trabalho a quente o fator relevante não é a dureza inicial, mas a capacidade do material reter dureza em altas temperaturas. Na curva de revenimento, isto pode ser observado pela queda da curva com o aumento da temperatura.

Analisando a região da curva acima de 550°C, é observada uma diferença significativa entre os materiais. Os aços VHSUPER® e DIN I.2365 apresentam dureza mais elevada para toda faixa acima de 600°C, enquanto que os aços H11, H13 e mesmo o H11 modificado, este com maior teor de Mo, apresentam queda mais brusca nos valores de dureza. Apesar de pequena em termos relativos, a diferença de comportamento na curva da Figura 1 indica um reflexo significativo quando a dureza em função do tempo é considerada. Desta forma, antecipam um aumento na resistência ao revenido. Isto porque a redução na dureza depende exponencialmente da temperatura e linearmente do tempo. Assim, o efeito de um pequeno deslocamento da curva da dureza em função da temperatura torna-se muito significativo quando considerado em função do tempo, como mostrado no item a seguir.

3.2 Resistência ao Revenido

A curva da Figura 2 apresenta a diminuição da dureza em função do tempo a 600°C para as composições estudadas (observar que o eixo da abscissa está em escala logarítmica). Nota-se a queda muito mais lenta na dureza dos aços VHSUPER® e DIN I.2365, indicando a alta resistência ao revenido. Por exemplo, para redução da dureza em 7 pontos, o tempo requerido a 600°C para o aço H13 é de 18 horas, enquanto que para o aço VHSUPER® é de 40 horas. É, também, interessante notar que o aço TENAX 300®, apesar de mesmo teor de Mo dos aços H11 e H13 e teor de V metade deste, apresenta resistência ao revenido superior. Este

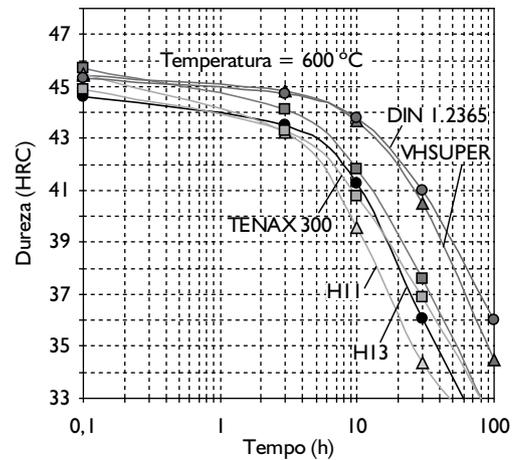


Figura 2. Dureza dos materiais, medida na temperatura ambiente, em função do tempo a 600°C.

efeito está relacionado ao menor teor de silício do material.⁽⁹⁾

Outra observação importante é a resistência ao revenido do aço VHSUPER® ser substancialmente superior a do H11 Mod., apesar do teor de molibdênio e de vanádio destes aços serem similares. O molibdênio e o vanádio formam os carbonetos secundários mais desejáveis para a resistência ao revenido, tipo M₂C e MC respectivamente; por isso, não seria esperada variação sensível de resistência a quente entre os dois aços. Tal efeito deve estar relacionado à diminuição no teor de cromo. O objetivo principal desta modificação foi o aumento na condutividade térmica, como observado na Figura 3. Porém, também parece ter resultado em ganho de resistência ao revenido. Em aços ferramenta, o Cr promove a formação de carbonetos secundários tipo M₇C₃, que possuem Mo em solução sólida, em temperaturas inferiores à de precipitação dos carbonetos ricos em Mo (tipo M₂C).⁽³⁾ Assim, é possível que o alto teor de Cr cause a redução do teor efetivo de

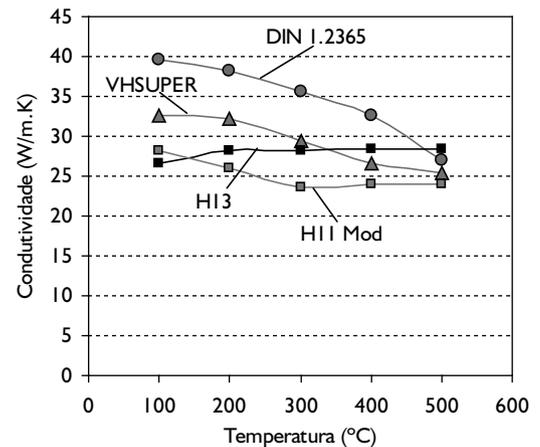


Figura 3. Condutividade térmica dos aços H13, H11 mod., VHSUPER e DIN I.2365.

Mo para formação dos carbonetos M_2C e, como conseqüência, a redução da resistência ao revenido observada na Por outro lado, teores muito reduzidos de cromo, como do aço DIN 1.2365, não são interessantes, pela excessiva perda em temperabilidade, conforme mostrado na Tabela 2. Por isso, são geralmente empregados em ferramentas de pequeno porte, como matrizes para prensas de forjamento progressivo, conhecidas como pela marca comercial Hatebur . Portanto, o teor de cromo do aço VHSUPER® possui uma combinação adequada em termos de resistência a quente e temperabilidade (Tabela 2). Apesar do teor de cromo ser menor que o dos aços H11 e H13, mas não tão baixo quanto do aço DIN 1.2365, o aço VHSUPER® possui um maior teor de Mo, compensando o efeito da redução do teor de Cr e garantindo adequada profundidade de têmpera.

3.3 Tenacidade

A tenacidade dos aços ferramenta é essencial para aplicações de forjamento, extrusão e, principalmente, fundição sob pressão. Nestas aplicações, falhas como trincas grosseiras, trincas frágeis ou trincas por fadiga térmica podem acelerar o desgaste da ferramenta, chegando a inviabilizar seu uso. Assim, no desenvolvimento do novo material a tenacidade foi cuidadosamente considerada no projeto de liga.

A Figura 4 apresenta os resultados de impacto, Charpy “V” e impacto sem entalhe segundo NADCA.⁽¹¹⁾ Observa-se que os aços TENAX 300®, H11 mod. e VHSUPER® possuem tenacidade muito superior. Isto está principalmente relacionado ao efeito da redução dos teores de Si e P desses materiais. É conhecida a intensa redução da tenacidade dos aços ferramenta para trabalho a quente da série AISI H , quando o revenimento em temperaturas próximas a 550°C é aplicado.⁽¹³⁻¹⁶⁾ Alguns autores apontam que este fenômeno está associado à segregação de elementos residuais na interface martensita/carboneto, especialmente P, juntamente com o Si.⁽¹⁵⁻¹⁶⁾ Assim, aponta que a redução do teor de Si inibe tal segregação,⁽¹⁵⁾ eliminando a fragilidade a 550°C. Como a temperatura de revenimento aplicada para a dureza usual (em torno de 45 HRC) está próxima a 600°C, os efeitos dessa fragilidade ainda são importantes nos

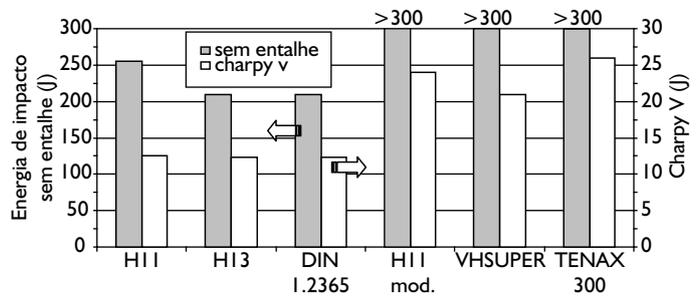


Figura 4. Resultados de impacto sem entalhe e com entalhe em V, para os aços analisados. Todos com dureza de $45 \pm 0,5$ HRC, usinados conforme NADCA.⁽¹¹⁾

aços com teores normais de Si e P. E, para os aços com baixo Si e P, este efeito diminui e a tenacidade torna-se superior. Contudo, mais estudos são necessários para comprovar este efeito, comparando aços com alto e baixo teor de Si.

3.4 Testes de Campo

A seguir são apresentados dois casos, em que o novo aço, VHSUPER®, foi comparado ao aço H13, em ferramentas de forjamento. Os resultados foram analisados baseando-se nos modos de falha e nas propriedades dos materiais. Maiores detalhes podem ser obtidos em Mesquita, França e Barbosa.⁽¹⁷⁾

3.4.1 Punção para forjamento a morno

O processo em questão trata de um forjamento a morno de alta velocidade de aços. Apesar dos tarugos forjados terem menor temperatura que a usual de forjamento a quente, a alta velocidade do processo torna elevado o contato entre o tarugo aquecido e a matriz, aquecendo sua superfície. O processo também emprega elevada refrigeração, promovendo assim choque térmico na região superficial.

Dados do processo:

- produto: ponta de eixo;
- ferramenta: punção de forjamento a morno de precisão;
- material forjado: aço SAE 1045 e 1050 modificados;
- temperatura inicial do tarugo: aproximadamente 900°C;
- refrigeração: elevada, com água;
- velocidade de aplicação dos golpes: elevada;
- aço ferramenta utilizado anteriormente: AISI H13;
- aço testado: VHSUPER®, e
- ganho de vida útil obtido com a substituição: 56%.

A Figura 5 mostra o punção analisado após fim de vida. Como este tipo de forjamento produz peças com alta precisão dimensional, desvios de décimos de milímetros comprometem a peça produzida. O fim da vida útil da ferramenta é atribuído ao desgaste nas regiões salientes arredondadas e pelo surgimento de trincas térmicas (Figura 5b).

Tabela 2. Resultados da curva TRC dos aços estudados, utilizados para avaliação da temperabilidade. Quanto menor a taxa crítica e maior a dureza obtida após resfriamento a 0,1°C, maior a temperabilidade. Medidas feitas em vickers 1kg e, também, convertidas para HRC.

	H11	H13	TENAX 300®	H11 mod.	VHSUPER®	DIN 1.2365
Taxa crítica para início da formação de bainita (°C/s)	0,2	0,2	0,5	0,3	0,5	8,0
Dureza obtida após resfriamento a 0,1 °C/s (HV)	637	538	512	534	486	389
Idem acima HRC	57	53,3	51,6	53,1	48,2	41,7

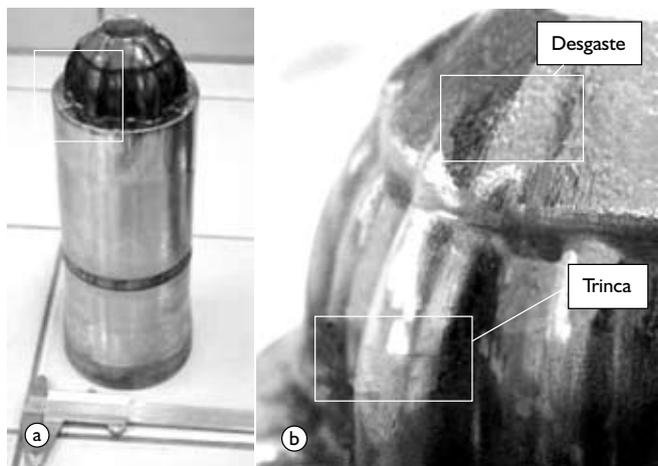


Figura 5. a) Aspecto visual do punção analisado e, b) em detalhe, as regiões com desgaste a quente e trincas.

Após o término de sua vida útil, a matriz foi analisada destrutivamente. A Figura 6 mostra a variação da dureza em função da distância da superfície de contato, observa-se a diminuição da dureza nas regiões próximas à superfície. O desgaste está efetivamente relacionado a esta perda de dureza durante a utilização da ferramenta, sendo pouco afetado pela dureza do núcleo. O surgimento das trincas térmicas também tem relação com a perda em dureza, pois regiões de menor dureza tornam-se mais sensíveis à iniciação de trincas térmicas.^(6,7) O aumento da resistência ao revenimento do material torna-se, portanto, essencial para promover aumento na vida útil desta ferramenta.

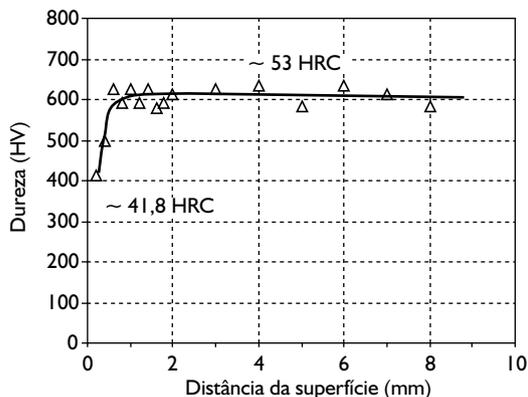


Figura 6. Medidas de microdureza do punção da Figura 5, desde a superfície de trabalho até as regiões do núcleo.

O aço VHSUPER® foi, então, testado e aprovado para a aplicação, promovendo aumento de 56% da vida útil das ferramentas. A análise comparativa das curvas de revenimento e da queda em dureza em função do tempo para os aços H13 e VHSUPER®, Figuras 1 e 2, permite entender o fenômeno. Em ambos existe perda em dureza quando o aço é submetido a altas temperaturas, tanto maior quanto maior o tempo e a temperatura empregada. Contudo, verifica-se uma maior estabilidade a alta temperatura do aço VHSUPER®, como já discutido no item 3.2. Assim, durante o processo de forjamento, a falha ocorrerá após um maior número de golpes, produzindo o ganho de rendimento aqui relatado.

3.4.2 Matrizes para forjamento a quente de bielas

A maior resistência a quente do aço VHSUPER® foi também caracterizada (ou verificada) em matriz de forjamento a quente para bielas, exemplificada na Figura 7. Neste tipo de forjamento, as exigências dimensionais são menores que no forjamento descrito no item 3.1. Contudo, o tempo de contato e a temperatura do tarugo forjado são sensivelmente maiores. Agrava-se, assim, a profundidade da região superficial da matriz afetada pelo calor do processo. Alguns dados indicaram que a região afetada é de cerca de 5 mm.



Figura 7. Matriz para forjamento a quente de biela, analisada no caso 2, em que o aço VHSUPER foi testado.

Dados do processo:

- produto: biela forjada;
- ferramenta: matrizes de pré-forma, para forjamento a quente;
- material forjado: aço médio teor de carbono (~0,40%C);
- temperatura: aproximadamente 1.250°C;
- velocidade de aplicação dos golpes: lenta, típica de forjamento em prensa hidráulica;
- aço ferramenta utilizado anteriormente: AISI H12 e H13;
- aço testado: VHSUPER®; e
- ganho de vida útil obtido com a substituição: aproximadamente 50%.

O fim de vida útil das ferramentas é provocado pelo desgaste a quente, associado à formação de trincas térmicas. Estas trincas possuem profundidades maiores que às observadas no punção de forjamento a morno (Figura 5), dado o maior aquecimento e a maior temperatura dos tarugos forjados, que promovem maior choque térmico. A substituição dos aços AISI H12 e H13 pelo aço VHSUPER® pode ser descrita pela análise comparativa da resistência ao revenido (Figuras 1 e 2) e tenacidade (Figura 4). A melhoria de ambas as propriedades no VHSUPER® promove assim a redução do desgaste a quente, pois maiores valores de dureza persistem após longos tempos de utilização. Além disso, diminui a formação de trincas térmicas, devido à maior dureza a quente

e da tenacidade. Também, deve ser considerada a importância da condutividade térmica, propriedade em que o aço VHSUPER® é superior aos aços de alto molibdênio, como o H11 mod ou o H13.

4 CONCLUSÕES

- O aço VHSUPER® possui resistência a quente superior à dos aços H11 e H13, devido a maior capacidade de retenção de dureza em alta temperatura (resistência ao revenido);
- A maior resistência ao revenido deve-se ao balanço da composição química do

aço VHSUPER®, especialmente em termos dos teores de Mo e Cr, que privilegia a formação dos carbonetos secundários estáveis tipo M_2C ;

- A redução dos elementos de Si e P aumenta a tenacidade dos aços ferramenta para trabalho a quente. No caso do novo aço, ela é importante para que alta tenacidade seja obtida mesmo com o aumento do teor de Mo, que poderia gerar redução desta propriedade; e
- O arranjo de propriedades como resistência a quente, tenacidade, temperabilidade e condutividade térmica do novo material proporcionou sensível melhoria nos testes de campo analisados. Em matrizes de forjamento a morno e de forjamento a quente, foram obtidos aumentos de vida útil de 50% a 60%.

REFERÊNCIAS

- 1 ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. Tool steels. 5. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998. p. 1-123, p. 219-50.
- 2 BYRER, T. G.; SEMIATIN, A. L.; VOLLMER, D. C. **Forging handbook**. Metals Park, Ohio: ASM, 1985. p. 195-217.
- 3 OKUNO, T. Effect of microstructure on the toughness of hot work tool steels: AISI H13, H10 and H19. *ISIJ International*, v. 27, n. 1, p. 51-9, Jan. 1987.
- 4 RAYSON, H.W. Tool steels. In: PICKERING, F.B. **Constitution and properties of steels**. New York, NY. VCH Publishing, 1992. p. 581-640.
- 5 KALPAKJIAN, S. **Tool and die failures source book**. Metals Park, Ohio: ASM International, 1982. 428 p.
- 6 BENEDYK, T. C.; MORACZ, D. J.; WALLACE, J. F. Thermal fatigue behaviour of die materials for aluminum die casting. In: SDCE INTERNATIONAL DIE CASTING CONGRESS, 6., 1970, Cleveland, Ohio. **Proceedings...** Cleveland: The Society of Die Casting Engineers, Inc., 1970. Paper 111, p. 1-20.
- 7 SJÖSTRÖM, J.; BERGSTRÖM, J. Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments. **Materials Processing Technology**, v. 153-154, p. 1089-96, Nov. 2004.
- 8 SCHRUFF, I. Comparison of properties and characteristics of hot-work tool steels X 38 CrMoV 5 1 (Thyrotherm 2343), X 40 CrMoV 5 1 (Thyrotherm 2344), X 32 CrMoV 3 3 (Thyrotherm 2365) and X 38 CrMoV 5 3 (Thyrotherm 2367). **Thyssen Edelmetall Technik Bericht**. Special Issue, p. 32-44, May 1990.
- 9 MESQUITA, R. A.; FRANÇA, L. C.; BARBOSA, C. A. Desenvolvimento de um novo aço ferramenta para trabalho a quente com tenacidade otimizada. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 57., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002. p. 444-53. 1 CD ROM.
- 10 MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Aços ferramenta de alto desempenho para matrizes de fundição sob pressão. **Metalurgia & Materiais**, v. 59, n. 539, p. 17-22, nov. 2003.
- 11 NADCA #207-2006: Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies. Wheeling, Illinois, USA: North American Die Casting Association, 2006.
- 12 GROSSI, P. A.; FERREIRA, R. A. N.; ANDRADE, R. M.; ZIVIANI, M. Determinação experimental de propriedades térmicas de materiais metálicos pelo método flash de laser. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 56., 2001, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. p. 462-71. 1 CD ROM.
- 13 OLEFJORD, I. Temper embrittlement. **International Metals Reviews**, v. 23, n. 4, p. 149-63, April 1978.
- 14 BERNS, H. Strength and toughness of hot working tool steels. In: KRAUSS, G.; NORDBERG, H. **Tool materials for molds and dies: application and performance**. Illinois, EUA: The Colorado School of Mines Press, 1987. p. 45-65.
- 15 GARRISON JR, W. M. Influence of silicon on strength and toughness of 5wt-%Cr secondary hardening steel. *Materials Science and Technology*, v. 3, n. 4, p. 256-9, Apr. 1987.
- 16 ULE, B.; VODOPIVEC, F.; PRISTAVEC, M.; GRESOVNIK, F. Temper embrittlement of hot work die steel. **Materials Science and Technology**, v. 6, n. 12, p. 1181-5, Dec. 1990.
- 17 MESQUITA, R. A.; FRANÇA, L. C.; BARBOSA, C. A. Análise de casos e aplicações dos aços tenax 300 e vhsuper. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 2, n.1, p. 70-5, jul.-set. 2005.

Recebido em: 13/02/06

Aceito em: 31/05/07

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2005, Belo Horizonte. São Paulo: ABM, 2005.