

CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIDA ÚTIL DE MOLDES PARA FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO

Vendramim, J.C. ⁽¹⁾, Enokibara, F. ⁽²⁾

(1) Mestre em Engenharia de Materiais, UNICAMP, e sócio do empreendimento ISOFLAMA, Indaiatuba –SP, vendramim@isofloma.com.br

(2) Mestre em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP, rpgitape@yahoo.com.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo preliminar para a melhoria da vida útil de moldes para fundição de alumínio sob pressão. Discute os principais fatores que podem levar ao fim da vida útil desses moldes e analisa as principais variáveis do processo de injeção com impacto na qualidade deste, sugerindo recomendações quanto à escolha do material utilizado (*aços-ferramenta da classe trabalho a quente*), tratamento térmico e superficial, projeto do molde, usinagem e condições de utilização dos moldes.

Palavras-chave: fundição sob pressão, alumínio, aços ferramenta, tratamento térmico, tratamento superficial

INTRODUÇÃO

A construção de peças automotivas com peso reduzido é um setor de alto crescimento devido às necessidades ecológicas de economizar combustível e aumentar a capacidade de carga dos veículos. Devido a esses fatores componentes estruturais anteriormente feitos em aço vêm sendo substituídos por alumínio e magnésio como bloco de motor, caixa de transmissão, *carter*, carcaça de câmbio, carcaça de direção, entre outros.

Esses componentes com alta qualidade vêm sendo produzidos em moldes metálicos permanentes através de processo à gravidade e sob pressão. Os moldes permanentes são construídos em aços da classe trabalho a quente e comparado com os moldes de areia, os moldes metálicos

permanentes permitem produções de maior volume e peças mais uniformes com tolerâncias dimensionais mais fechadas, acabamento superficial superior e melhores propriedades mecânicas a custos relativamente baixos.

O processo de fundição sob pressão vem sendo amplamente utilizado, pois é um processo que permite alta produção de peças com geometrias complexas. As taxas de produção podem chegar a 200 peças por hora em lotes que ultrapassam 200.000 peças utilizando o mesmo molde permanente e por esse motivo deve-se buscar um aperfeiçoamento do molde através de uma análise detalhada do projeto, escolha de material, tratamento térmico, tratamento superficial e condições de operação.

O desgaste e falhas desses moldes são perdas significantes para a indústria de fundição sob pressão devido aos altos valores agregados. As principais causas de falhas nos moldes são: agarramento, corrosão, erosão e fadiga térmica [1].

1. MECANISMOS DE FALHAS

1.1 Fadiga Térmica

Os moldes utilizados em fundição sob pressão estão sujeitos a tensões cíclicas induzidas por gradientes térmicos e pressão de operação que podem causar fraturas na superfície [2]. Durante o ciclo de injeção a liga de alumínio fundida faz contato com a superfície da ferramenta. A temperatura da superfície do molde aumenta e cria um alto gradiente de temperatura entre a superfície quente e o centro frio. Isso produz tensões de compressão na superfície que causam deformações elásticas e plásticas que aliadas a pressões de operação que variam de 50 a 80 MPa podem levar à formação de uma rede de trincas superficiais chamadas “trincas térmicas”. Essas trincas levam à deterioração da qualidade superficial das peças além da possibilidade de se propagarem levando à formação de trincas catastróficas [3].

A formação de trincas térmicas é retardada em aços com elevada tensão de escoamento, tenacidade e ductilidade em altas temperaturas, microestrutura homogênea obtida de um processo controlado de têmpera e revenimento e alta condutividade térmica [2,4].

A temperatura da superfície é o principal parâmetro que influencia a vida útil da matriz de aço devido ao surgimento de tensões térmicas (gradiente de temperaturas). Uma diferença de temperatura na superfície de +- 20° C pode diminuir a vida útil da matriz entre 30 e 50%. Essa temperatura condiciona o surgimento e a propagação das trincas no contorno de grão da superfície que se soma à oxidação. Por exemplo, as tabelas 1 e 2 mostram os resultados de medições de temperaturas realizadas na superfície do aço com dureza de 44 a 46 HRC para a quantidade de ciclos obtidos quando se tem início o surgimento de trincas de profundidade entre 0,15mm e 10,7 mm, respectivamente. Esses resultados confirmam que quanto maior a temperatura da superfície menor a quantidade de ciclos para uma dada profundidade de trinca.

Tabela 1 – Profundidade de trinca 0,15 mm [4]

Número de ciclos	Temperatura na superfície (° C)
400	690
2.500	620
7.000	550

Tabela 2 – Profundidade de trinca 10,7 mm [4]

Número de ciclos	Temperatura na superfície (° C)
3.000	690
20.000	670
200.000	620
1.000.000	550

1.2 Desgaste

O desgaste é a perda de material de um corpo devido a movimentos relativos em sua superfície. A superfície do molde de fundição sob pressão pode apresentar desgaste associado à adesão (solda) e erosão (corrosão).

A erosão causada pelas altas velocidades com que o metal fundido colide com a superfície da ferramenta. A cavitação do alumínio no estado líquido, o choque de partículas de alumínio solidificado no início de cada ciclo

de injeção e o arraste mecânico da superfície do molde devido a uma alta velocidade de injeção que pode chegar a 60 m/s fazem com que a superfície do molde seja lavada para fora com o metal fundido [1].

Adesão e corrosão da ferramenta originam-se pela interação química decorrente da interdifusão de átomos do molde e da liga injetada, que resulta na formação de compostos intermetálicos de alumínio, ferro e elementos de liga que geram um agarramento da peça durante a extração [1].

Esses fenômenos estão associados a:

- Temperatura do alumínio muito alta
- Posicionamento (incorreto) dos canais de refrigeração
- Ciclo rápido (tempo de injeção)
- Desmoldante insuficiente
- Temperatura do pré-aquecimento do molde muito alta
- Desenho e localização do “*gate*” de entrada de maneira não favorável ao melhor escoamento do metal líquido
- Acabamento superficial do molde de baixa qualidade

O desgaste pode estar associado também ao desenvolvimento de trincas térmicas e, geralmente, tem relação com:

- Temperatura desfavorável da superfície da cavidade
- Posicionamento e dimensão incorreta do canal de refrigeração
- Tipo e temperatura do meio de resfriamento
- Temperatura da liga fundida
- Temperatura de pré-aquecimento do molde
- Velocidade da liga fundida muito elevada na cavidade
- Impacto vertical da liga fundida na cavidade, machos e cantos próximos aos canais de entrada
- Ciclo de injeção (rápido ou curto)

Todos os mecanismos citados acima podem estar presentes sendo, um ou outro, em maior evidência em função do projeto de construção do molde,

tipo de material, tratamento térmico, tratamento superficial e condições de injeção de alumínio.

2. TIPO DE MATERIAL

O desenvolvimento prematuro de trincas por fadiga térmica tem relação com a tenacidade e a ductilidade do aço do molde. Os aços desses moldes requerem não somente adequadas propriedades mecânicas como resistência e dureza, mas também elevada ductilidade. Ductilidade pode ser definida como a capacidade do aço acumular deformação plástica antes da fratura [5]. Essa propriedade pode ser observada no ensaio mecânico de um corpo de prova de aço que submetido ao esforço de tração provoca uma redução da área central deste (“*empescoçamento*”). Quanto maior a redução de área maior a ductilidade do aço. Os aços da classe trabalho a quente com adequado nível de ductilidade, dureza e tenacidade, corroboram para uma maior vida do molde devido a capacidade de deter o processo de início e crescimento de trinca por fadiga térmica [5]. A tenacidade é a capacidade de o aço absorver energia na região plástica, ou seja, mede a energia necessária para romper o material [2]

Uma propriedade importante a se considerar para o aço do molde é a “*tenacidade à fratura*” que mede a resistência a propagação de uma trinca aguda [6]. Quando o molde está em trabalho, a zona mais quente (*sub-superfície*) no fim de uma trinca já surgida resiste mais à propagação se o material apresentar alta tenacidade à fratura, podendo se propagar mais rápido somente se a temperatura e tensões aumentarem.

Muitos fatores afetam a vida em fadiga da superfície do molde de aço no processo de fundição de alumínio sob pressão e os principais seriam:

- Temperatura do molde,
- Propriedades mecânicas do aço,
- Temperatura de fusão do alumínio;

Os fabricantes de aços investem permanentemente em tecnologias de fundição para se obter aços de elevada pureza – reduzidas microinclusões e impurezas de enxofre e fósforo, por exemplo – homogêneo (*microestrutura*) e

isotropia para algumas propriedades mecânicas na aplicação de injeção de alumínio sob pressão visando o melhor desempenho da vida útil do molde. O tratamento térmico é uma operação industrial fundamental nessa cadeia produtiva, pois a correta execução deste potencializa as propriedades mecânicas do aço.

Este texto não esgotaria o assunto de materiais e propriedades para o molde de aço utilizado no processo industrial de injeção de alumínio, mas contribuiria com algumas considerações técnicas para a melhor compreensão destes.

A Tabela 3 apresenta as principais marcas de aços da classe trabalho a quente disponível no mercado que poderiam ser utilizados nos moldes para fundição de alumínio. O fabricante de aço pode informar as condições de fabricação – ESR, VAR, Forjamento, etc...-, tipos e nível de impurezas.

Tabela 3 – Marcas de aços da classe trabalho a quente utilizados para fundição de alumínio sob pressão

AÇO		Composição Química				
		C	Cr	Mo	V	Outros
	H13 (ASTM A681)	0,32-0,45	4,75-5,50	1,10-1,75	0,80-1,20	Si(0,80-1,25)
1	VH13 ISO	0,40	5,20	1,50	0,90	Si=1,00
2	VH13 IM	0,40	5,20	1,50	0,90	Si=1,00
3	TENAX 300 IM	0,36	5,00	1,40	0,40	
4	W302 ISO DSC/BLOC	0,39	5,20	1,40	0,95	
5	W400 VMR	0,36	5,00	1,40	0,45	
6	W403 VMR	0,38	5,00	2,00	0,65	
7	THYROTERM 2344	0,40	5,30	1,40	1,00	
8	THYROTERM E38K	0,35	5,00	1,35	0,45	
9	DIEVAR					
10	ORVAR SUP	0,39	5,20	1,40	0,90	Si=1,00
11	SMV3W	0,40	5,00	1,30	0,40	
12	SMV4S	0,40	5,00	1,30	1,00	
13	ADC3	0,35	5,00	1,30	0,40	
14	ESKYLOS 2343	0,34-0,42	4,8-5,2	1,2-1,5	0,45	Mn=0,2-0,5

Fabricantes:

1 a 3 – Villares Metals

4 a 6 – Boehler

7 e 8 – Schmolz-Bickenbach
9 e 10 – Uddeholm
11 a 13 – Aubert & Duval
14 – Lucchini

2.1 Resistência ao amolecimento pelo calor

O aço do molde precisa apresentar resistência ao início da trinca térmica por deformação plástica em alta temperatura (*resistência ao amolecimento*, ou ao *re-revenimento*). Em outras palavras, é a capacidade do aço em sustentar a dureza original em um tempo longo a elevadas temperaturas [7].

A resistência à propagação da trinca a quente está associada ao limite de escoamento e a tenacidade. Em altas temperaturas é fundamental que o aço mantenha a resistência mecânica e não sofra queda na dureza. Os aços da classe trabalho a quente apresentam, em função da composição química, diferentes comportamentos para a dureza em altas temperatura, sendo interessante o aço do molde, dependendo da especial situação de injeção, como no caso de peças com paredes grossas que estará em contato com o alumínio líquido por muito tempo, aquele que mostrar maior resistência a esta propriedade. É importante uma consulta aos catálogos dos fabricantes de aços, ou literaturas técnicas específicas e identificar os valores dessa propriedade para os vários tipos de aços da aplicação a quente.

2.2 Ductilidade

Essa propriedade é fundamental para o bom desempenho do aço do molde. Ductilidade pode ser definida como *a capacidade do aço acumular deformação plástica antes da fratura* [5]. Um maior nível de ductilidade do aço corrobora para estender a vida útil devido deter o início e crescimento da trinca por fadiga térmica. A homogeneidade de microestrutura, “*isotropia*” (igual propriedade nas três direções) e a pureza do aço corroboram para a máxima ductilidade. Os processos controlados de fabricação do aço e tecnologias como ESR (“*refusão por eletroslag*”), VAR (*refusão a vácuo*), refusão “*eletroslag com argônio*”, e, na seqüência, tratamento térmico de homogeneização do lingote e adequado forjamento deste contribuem para a obtenção da melhor ductilidade. Os fornecedores do aço para o molde podem fornecer esse histórico de fabricação.

2.3 Tenacidade

A tenacidade para o aço-ferramenta que é submetido a tensões dinâmicas é a capacidade de aliviar os “*picos de tensões*” por deformações plásticas localizadas, prevenindo à formação de trincas. Tenacidade é um termo genérico para a resistência do aço-ferramenta a uma falha, ou nucleação de fratura. É a propriedade de o aço absorver energia até a fratura. Essa energia pode ser medida, sendo a área sob a curva “*tensão-deformação*” de um corpo de prova de aço no ensaio de tração.

A propriedade tenacidade é incrementada com a microestrutura uniforme, carbonetos finos esferoidizados, redução de segregações e a menor presença de inclusões de óxidos, sulfetos, fósforos e carbonetos. Para o aço-ferramenta do molde de injeção este deve apresentar a melhor combinação de resistência mecânica e tenacidade.

2.4 Resistência à erosão por ataque da liga de alumínio

O alumínio fundido contribui para uma elevada erosão da superfície do molde de aço e, em função disto, este deve apresentar boa resistência a este tipo de desgaste. Além da reação química do alumínio e a superfície do molde, outros fatores contribuem para esse tipo de desgaste, tais como a temperatura do alumínio fundido, pressão de injeção, lubrificante / desmoldante insuficiente, tempo de injeção, posicionamento dos canais de refrigeração (mal projetados), dureza do aço inadequada, localização do “*gate*”, velocidade de injeção e, finalmente, aumento da temperatura devido alta fricção.

3. TRATAMENTO TÉRMICO

O processo de tratamento térmico é ao menos tão importante quanto a escolha do aço. As trincas por fadiga térmica são reduzidas consideravelmente utilizando temperaturas de astenitização que permitam a máxima quantidade de carbonetos em solução sólida na austenita. Quando combinada com uma rápida taxa de resfriamento na têmpera a tenacidade do material não é afetada.

Especificações da NADCA (*North American Die Casting Association*) [8] exigem que o resfriamento em moldes para fundição sob pressão de alumínio

atingam uma taxa mínima de 10°C/minuto e para alcançar essas altas taxas de resfriamento grande parte dos tratadores utilizam a tecnologia a vácuo. Entre as vantagens da têmpera a vácuo estão: menores distorções dimensionais, necessidade de menos sobremetal, homogeneidade de aquecimento/esfriamento, melhor reprodutibilidade de processo com monitoramento passo a passo que maximiza a transformação microestrutural e conseqüentemente as propriedades mecânicas, ausência de manuseio durante o tratamento e ausência de danos na superfície como oxidação e decarbonetação, além da possibilidade de altas taxas de resfriamento com a aplicação de nitrogênio em pressões que podem chegar a 12 bar.

Para evitar trincas no tratamento térmico de moldes grandes é comum realizar uma parada no resfriamento com a finalidade de diminuir a diferença de temperaturas entre o centro e a superfície do molde ("*Isothermal Quenching*").

4. TRATAMENTO SUPERFICIAL

A aplicação de revestimentos duros ou tratamentos superficiais podem ser utilizados para aumentar a vida útil das ferramentas prevenindo o desgaste da superfície do molde. A elevada dureza das camadas associada à excelente aderência da superfície protege a superfície do molde contra a erosão e a alta estabilidade química e térmica aliada à baixa porosidade bloqueiam a difusão de átomos do molde para a liga de alumínio e vice-versa, impedindo a formação de compostos intermetálicos e como conseqüência minimizam o agarramento [9].

Quanto à fadiga térmica, a ação de tratamento superficial ou aplicação de revestimentos atuam induzindo tensões de compressão na superfície do molde. A abertura da trinca é menor na região tratada e esse efeito pode retardar a penetração da liga de alumínio na trinca, mas apenas nos primeiros estágios de fadiga térmica, pois com o uso do molde o tamanho das trincas tende a aumentar e sua propagação deixa de ser um fenômeno superficial. É necessário assim a escolha adequada do aço e do tratamento térmico [9].

O tratamento superficial recomendado para essa aplicação é a nitretação a plasma, que possui um excelente controle dos parâmetros possibilitando que a camada de difusão não ultrapasse 80 microns de

profundidade com camada branca de 0 a 2 microns, evitando assim a fragilização devido à nitretação. Segundo alguns estudos [10,11] esse tipo de processo reduz a tendência ao surgimento de trincas térmicas.

A aplicação de revestimentos duros por PVD, geralmente TiN, TiCN, AlTiN e AlTiCrN vem sendo muito utilizada, pois todos esses revestimentos provaram aumentar o rendimento de moldes para fundição sob pressão de alumínio devido às características mecânicas desses revestimentos, boa adesão ao substrato e baixa diferença de coeficiente de expansão térmica com o substrato, minimizando a possibilidade de trincas térmicas na interface substrato-revestimento [1].

Pesquisas recentes apontam ainda para um aperfeiçoamento em engenharia de superfície unindo esses dois processos, no chamado Processo Dúplex, que consiste em um processo de nitretação, geralmente a plasma, antes da aplicação do revestimento pó PVD, induzindo uma camada com aderência mais eficiente ao substrato. [12,13].

5. PROJETO DO MOLDE

Alguns aspectos da construção do molde para uma maior vida útil incluem:

- Evitar grandes variações de massa e cantos vivos
- Canal de refrigeração de forma a garantir máxima uniformidade de temperatura do molde
- Atender às recomendações dos manuais para as distâncias dos canais, cavidade e gates
- Menor rugosidade
- Dimensionamento da matriz e a relação com a força de fechamento da injetora

6. USINAGEM FINA / ELETROEROSÃO

A realização de usinagem fina depois do tratamento térmico (acabamento para as dimensões finais) por high speed ou eletroerosão pode

causar a formação de áreas com camada branca ou de elevada tensão residual e, em função disto, é recomendável ou mesmo mandatório a realização de um tratamento térmico de alívio de tensões. A não realização do alívio de tensões pode comprometer seriamente a vida útil do molde.

7. CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO MOLDE

A vida útil do molde e por conseqüência o bom desempenho está condicionado à sua correta utilização, conforme a seguir:

- Indispensável pré-aquecimento antes do início das operações (em torno de 300°)
- Recomendável alívio de tensões depois de concluída a injeção de aproximadamente 5% da quantidade total prevista de peças
- Utilização de lubrificante / desmoldante conforme recomendação de fabricante (contatar fabricante para utilização correta)
- Alívio de tensões intermediário (quando possível é saudável)
- Manter molde aquecido (150° C em estufa) se a parada de produção é prolongada
- Manutenção com solda (a quente, mas ver recomendação de fornecedor de eletrodo de solda)

Deve-se ter cautela também quanto à temperatura da liga de alumínio fundida, pois se esta for muito elevada leva a um re-revenimento da superfície do aço do molde, diminuindo a dureza e incrementando o desgaste por erosão e adesão além de nuclear precocemente trincas térmicas.

A etapa de try-out também deve ter uma atenção especial, pois não dispensa os cuidados de pré-aquecimento do molde e é recomendável realizar um alívio de tensões depois dessa operação que pode estar combinado com algum tratamento superficial, mas não sem antes a realização de um adequado e cuidadoso polimento da superfície.

CONCLUSÃO

Os moldes para fundição de alumínio sob pressão são ferramentas de alto valor agregado e por isso o desgaste e falhas prematuras representam perdas consideráveis para a indústria de fundição. E não se poderiam medir esforços para alcançar o objetivo de maximizar resultados. Neste trabalho, depreende-se que a ação sinérgica de fatores como a utilização de adequado aço para determinado projeto de peça e processo de injeção; o melhor projeto – configuração (canais e outros elementos constitutivos) / geometria; rota de usinagem na construção –; as variáveis de injeção sob controle e permanentemente monitoradas; tecnologia de injeção (equipamento); controle da liga (composição química); o tratamento térmico do aço do molde (microestrutura adequada – tenacidade e ductilidade) e termoquímico (nitretação – morfologia e profundidade); enfim, importantes aspectos que podem contribuir para sustentar o melhor desempenho do molde.

BIBLIOGRAFIA

- [1] MITTERER,C., “Application of hard coatings in aluminium die casting – soldering, erosion and thermal fatigue behaviour”, Surface and Coatings Technology 125, p.233-239, 2000.
- [2] ESSADIQI, E. and TOTTEN,G., “Tool steels”, CANMET – MTL, Materials Technology Laboratory In: TOTTEN,G., “Steel Heat Treatment Handbook” Second Edition, CRC Press, 2006.
- [3] SRIVASTAVA,A., JOSHI,V., SHIVPURI,R., “Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling”, Wear 256, p. 38-43, 2004.
- [4] LINDOW,H., “Informe técnico Uddeholm – Ações para prevenção de falhas prematuras em fundição sob pressão”.
- [5] CORNACCHIA,G. et. al., “Influence of aging on microstructure and toughness of die casting die steels”, University of Brescia, Italy.
- [6] FERREIRA,I., “ Propriedades mecânicas dos metais”, UNICAMP, 2001.
- [7] HALL,L., VLACK,V., “Princípios de Ciências dos Materiais”, Editora Edgard Blucher, 2000.

- [8] NADCA, “ Five steps to improving die performance” em www.diecasting.org .
- [9] MITTERER, C., et. al., “Industrial applications of PACVD hard coatings”, *Surface and Coatings Technology* 163-164 p. 716-722, 2003.
- [10] WALKOWICZ, J., et. al., “Duplex surface treatment of moulds for pressure casting of aluminium”, *Surface and Coating Technology* 97, p. 453-464, 1997.
- [11] STARLING, C.M.D., BRANCO,J.R.T., “Thermal fatigue of hot work tool steel with hard coatings”, *Thin Solid Films* 308, p. 436-442, 1997.
- [12] HEIM, D., HOLLER,F., MITTERER,C., “Hard coatings produced by PACVD applied to aluminum die casting”. *Surface and Coatings Technology* 116-119, p.530-536, 1999.
- [13] KULKARNI, K. et. al., “Thermal cracking behavior of multi-layer LAFAD coating on nitrided die steels in liquid aluminum processing”, *Surface and Coatings Technology* 149 p. 171-178, 2002.
- [14] DIETER, G.E., “*Metalurgia Mecânica*”, McGraw Hill, 1988.
- [15]PELLIZARI,M.,MOLINARI,A.,STRAFFELINI,G., “Thermal fatigue resistance of plasma duplex – treated tool steel”, *Surface and Coating Technology* 142-14, p. 1109-1115, 2001.
- [16] KLIMEK,K.S., et. al. “Duplex-PACVD coatings of surfaces for die casting tools”, *Surface and Coatings Technology* 201, p. 5628-5632 2007.