

EFEITO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO PARÂMETRO K DA MECÂNICA DA FRATURA

Maria da Conceição B. Vieira Soares
Arnaldo H. Paes de Andrade
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN/CNEN-SP
caixa Postal 11049 CEP 05422-970
msoares@baitaca.ipen.br
arnie@usp.br

RESUMO

Tensões residuais compressivas em geral são benéficas e aumentam a resistência à fratura e ao crescimento de trinca. Essas tensões residuais podem ser introduzidas em componentes através de processos industriais como tratamento térmico à laser, autofretagem e jateamento por partículas. Neste trabalho as tensões residuais induzidas pelo processo de jateamento por partículas na superliga de níquel Udimet 720 e na liga de titânio IMI 834 foram medidas através de difração de neutrons no reator de alto fluxo de neutrons (ISIS, Didcot, UK). O fator de intensidade de tensões (K) destas tensões residuais foi determinado pelo método dos elementos finitos (E.F) e da função ponderação utilizando como modelo para o método de (E.F) uma placa contendo uma trinca lateral única. O efeito no fator de intensidade de tensões (K) quando da aplicação simultânea da tensão residual e da função trativa remota foi avaliado. O efeito de sobreposição da trinca foi também considerado, para determinação correta dos valores de intensidade de tensões (K).

Palavras-chaves: Tensões residuais, Fator de intensidade de tensões, Difração de neutrons.

ABSTRACT

Compressive residual stresses are beneficial and improve resistance to fracture and crack growth. Residual stresses can be introduced in fabricated components by a variety of means and a number of methods such as laser surface treatment, cold expanded hole, and shot peening. Neutrons diffraction measurements of residual stress were performed at a pulsed neutron source (ISIS, Didcot, UK), on shot peened plates of nickel base superalloy Udimet 720 and titanium alloy IMI 834. The stress intensity factor (K) of residual stress was evaluated by finite element modeling and weight function method. Finite element modeling of a 2D plate with a single edge-notch was applied and, due to symmetry only half of the plate was actually modeled. The stress intensity factor (K) was evaluated for both case of remote tension stress and residual stress. Crack surface overlapping, which is physically unacceptable, was noted for small cracks under residual and boundary loading. Overlap correction was proposed and applied in order to obtain reliable values for (K).

Key words: Residual stress, Stress intensity factor, neutron diffraction.

1. INTRODUÇÃO

As tensões residuais são aquelas que permanecem no componente após as operações normais do processo de fabricação sem que nenhuma força externa seja aplicada, consideradas também como forças internas do corpo. Essas tensões residuais podem ser de natureza trativa ou compressiva (1) As tensões residuais podem ser induzidas no componente por meio de uma grande variedade de métodos como tratamento de superfície por laser, autofretagem e jateamento por partículas. No processo de jateamento por partículas a superfície do componente é bombardeada com pequenas partículas esféricas que produzem deformação plástica na superfície do material resultando em uma distribuição benéfica de tensões residuais compressiva na superfície do material (2).

A figura 1 apresenta o perfil de tensões residuais obtido pelo processo de jateamento na liga de níquel Udimet 720 e na liga de titânio IMI 834 sob duas condições de intensidade Almen de jateamento. Nota-se, de forma padrão, que a tensão residual compressiva

apresenta-se contida em uma camada superficial estreita e a porção trativa da tensão residual, de menor valor, estende-se sobre uma região maior.

O controle do processo de jateamento depende das propriedades do jato de partículas e do material a ser jateado e portanto a magnitude e a profundidade da tensão residual compressiva são influenciadas pelos parâmetros de processo tais como: tipo e intensidade do jato (p), tamanho, forma e distribuição de partículas (d), velocidade do jato (v), dureza do jato $H(p)$, ângulo de impacto do jato, tempo de exposição da peça (t), dureza da peça $H(p)$ e encruamento do material.

A profundidade e magnitude da tensão residual aumenta com o aumento de v , d , t , p e $H(p)$. Com o aumento da dureza da peça $H(p)$ a magnitude da tensão residual aumenta, porém a profundidade da camada compressiva da tensão residual diminui.

Os métodos de determinação de tensões residuais podem ser destrutivos e não destrutivos. Em geral esses métodos medem as deformações induzidas para então calcular as tensões no material. As técnicas destrutivas mais comuns são o método da complância

do corpo de prova, o método de Sachs, da técnica do furo central e do seccionamento completo.

Os métodos não destrutivos mais importantes são os métodos acústico, magnético, a difração de raios x e difração de neutrons. Estes dois últimos métodos são semelhantes entre si, porém a diferença principal recai no fato de o que poder de penetração da radiação neutrônica é muito maior que o dos raios x sendo por isso a radiação de neutrons a única capaz de medir a parte trativa do perfil de tensões residuais⁽³⁾.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho as tensões residuais induzidas pelo processo de jateamento por partículas na superliga de níquel Udimet 720 e na liga de titânio IMI 834, apresentadas na figura 1, foram medidas através de difração de neutrons no reator de alto fluxo de neutrons (ISIS, Didcot, Uk).

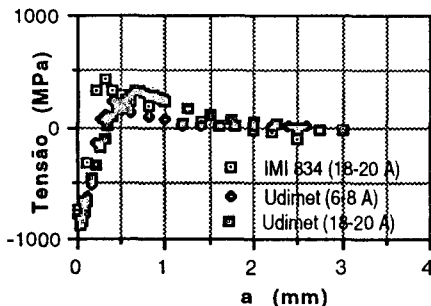


Figura 1: Perfil de tensão residual das ligas Udimet 720 e IMI 834.

Os neutrons moderados são utilizados para a medida dos parâmetro de rede cristalina por terem energia térmica inferior a 0.1 eV e comprimento de onda da ordem de 1 a 5 Å, comparável ao espaçamento interatômico dos cristais. A base para tais medidas fundamenta-se no espalhamento do feixe de neutrons após impacto nos diversos núcleos do material. As interferências construtivas desse espalhamento dão origem ao espalhamento coerente e o aparecimento dos chamados picos de Bragg que obedecem a equação(1) denominada de lei de Bragg:

$$2d(hkl) \sin \theta(hkl) = \lambda n \quad (1)$$

2θ- direção do ângulo do feixe incidente em que ocorre difração.

d(hkl) - espaçamento entre planos sucessivos (hkl).

n- número inteiro.

Na técnica denominada de Método de Varredura 2θ, o comprimento de onda dos neutrons λ pode ser considerado constante e o ângulo de difração 2θ é medido. A equação que relaciona a deformação ε a mudança do ângulo de difração Δθ é dada pela diferenciação da equação (1), para comprimento de onda λ constante.

$$\epsilon = \Delta d / d = -\Delta\theta \cot \theta \quad (2)$$

$$\Delta\theta = (\theta_1 - \theta_0) \quad (3)$$

θ₀- ângulo de difração para o material não deformado

θ₁- ângulo de difração para o material deformado

A deformação na rede é determinada pelas mudanças no ângulo de Bragg e no espaçamento da rede em relação ao material não deformado. Portanto para determinar o valor absoluto da deformação, os parâmetros (θ₀ e d₀) do material, não deformado, devem ser conhecidos. O método envolve a obtenção da intensidade de neutrons espalhados como função do ângulo de espalhamento 2θ, obtendo-se a deformação da rede utilizando a equação (2). Para o cálculo das tensões são necessários seis medidas diretas de deformação assumindo-se comportamento linear elástico do material. Caso as direções principais sejam conhecidas e o material possa ser considerado isotrópico apenas três deformações ortogonais precisam ser medidas e utilizadas para determinar as tensões principais⁽³⁾.

$$\sigma_x = \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \left[(1-\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z) \right] \quad (4)$$

o mesmo para σ_y e σ_z

E- módulo de elasticidade

ν- coeficiente de poisson

Os métodos para avaliação do fator de intensidade de tensões K podem ser divididos grosseiramente em quatro grupos i) método analítico ii) elementos finitos iii) método da superposição iv) método da função ponderação. Neste trabalho os resultados do fator de intensidade de tensões K obtidos pelos métodos dos elementos finitos e da função ponderação são analisados e discutidos.

Para determinação do fator de intensidade de tensões K pelo método dos elementos finitos, o modelamento de uma placa jateada com uma trinca lateral foi realizada, utilizando o software de elementos finitos ABAQUS versão 5.3, em condições de carregamento trativo uniforme e sob a ação de diferentes perfis de tensão residual. Valores de a/w = 0,023 a 0,157 ou tamanho de trinca de 0.3 mm a 2.0 mm foram estudados. Neste modelo de duas dimensões constituída de uma malha de 512 elementos e 20 elementos na linha da trinca, apenas metade da placa de 12,75 mm e 38 mm é efetivamente modelada devido a simetria conforme apresentado na figura 2.

O perfil de tensão residual é aplicado ao modelo utilizando uma subrotina em FORTRAN. Nesta subrotina a tensão residual é representada como uma função polinomial de grau seis. Os 512 elementos da malha e as condições de contorno apresentadas na figura 2 foram utilizadas para análise de todos os tamanhos de trincas.

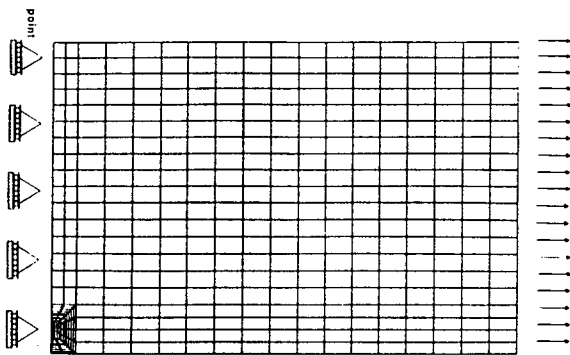


Figura 2: Malha de elementos finitos e condições de contorno para o caso de trinca superficial.

A solução do fator de intensidade de tensões pelo método da função ponderação utiliza a equação de Bueckner (4), que para o caso de trinca única lateral é dada por:

$$h(a,x) = 2(a-x) \cdot 1/2 [1 + m_1 (a-x)/a + m_2 ((a-x)/a)^2] \quad (5)$$

onde m_1 e m_2 são constantes relacionadas com a razão (a/w)

w - largura da placa

a - tamanho da trinca.

O fator de intensidade de tensões para a mesma geometria sujeita ao carregamento de tensão residual $p(x)$ aplicada nos elementos da trinca, representada por uma função polinomial, pode ser obtida a partir da integral:

$$K = \int p(x) h(a,x) \quad (6)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tensão residual induzida pelo jateamento de partículas em diferentes materiais (tabela I) sob diferentes condições de intensidade foram medidas por difração de neutrons em reator de alto fluxo de neutrons (ISIS, Didcot, UK). Os resultados e as condições de intensidade Almen são apresentadas na figura 1.

Tabela I- Propriedade do materiais e cristalografia

material	base	E (GPa)	σ_y (MPa)	rede	plano
Udimet 720	Ni	211	1200	CFC	(311)
IMI 834	Ti	120	920	HC	(1122)

Os diversos perfis de tensões residuais apresentados seguem a mesma tendência para todos os materiais. Nota-se que para o mesmo material ou para

materiais de propriedades semelhantes quanto mais intenso o jateamento, maior o tamanho da camada compressiva conforme apresentado na figura 1 para a superliga de níquel Udimet 720.

A figura 1 evidencia também o aspecto relevante das propriedades mecânicas. Embora a intensidade de jateamento da liga de titânio IMI 834 (18-20 A) seja tão intensa como a obtida na liga Udimet 720 (18-20 A), a camada compressiva apresenta-se menor do que aquela para Udimet 720 (6-8 A). Este efeito pode ser atribuído ao menor número de sistemas de deslizamento da estrutura hexagonal compacta (HC) em relação ao sistema cúbica de face centrada (CFC), o que torna difícil a deformação plástica e o aumento do tamanho da camada compressiva durante o processo de jateamento por partículas para a liga de titânio.

A figura 3 apresenta o fator de intensidade de tensões K , com sobreposição de trinca, obtido quando cada um dos perfis de tensão residual da figura 1 é aplicado nos 20 elementos ao longo da trinca. A Figura 3 apresenta também o fator de intensidade de tensões K negativo obtido quando o perfil de tensão residual da liga Udimet 720 (18-20 A) é aplicado nos elementos da linha da trinca para tamanhos de trinca de até 0.8 mm. Para trincas maiores que 0.8 mm o fator de intensidade de tensões é positivo auxiliando o crescimento de trinca.

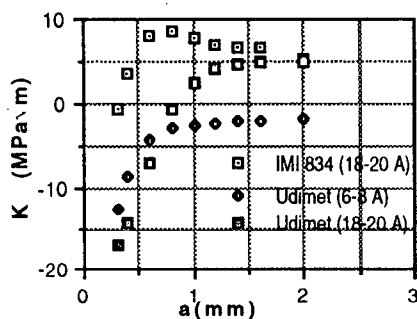


Figura 3: Fator de intensidade de tensões K para a tensão residual das ligas Udimet 720 e IMI 834.

O perfil de tensão residual da liga de níquel Udimet 720 (6-8 A) resulta em um fator de intensidade de tensões K negativo para todos os tamanhos de trinca. No entanto, para o perfil de tensões residual da liga IMI 834 (18-20 A) o fator de intensidade de tensões é positivo para todos os tamanhos de trinca exceto para a menor trinca de 0.3 mm.

As figuras 4-6 apresentam o fator total de intensidade de tensões K quando a tensão trativa remota de 400 MPa é aplicada ao modelo junto com a tensão residual. Neste caso, a aplicação simultânea da tensão remota de 400 MPa e do perfil de tensão residual resulta em três condições diferente para a face da trinca de acordo com o tamanho da trinca. a) trinca totalmente aberta $K > 0$ b) trinca totalmente fechada $K < 0$ c) trinca parcialmente fechada $K > 0$. Nos dois últimos casos ocorre uma impossibilidade física ou seja a sobreposição da trinca, esta sobreposição deve ser corrigida no modelo de (E.F) mantendo-se as duas faces da trinca em contato. Caso contrário o fator de de intensidade de tensões obtido é inferior ao resultado correto.

A redução do fator de intensidade de tensões K para a tensão residual é apresentada na figura 4. Este efeito ocorre para a liga Udimet 720 (18-20 A) para trincas de até 0.8 mm de comprimento. Para trincas maiores a tensão residual têm um efeito reverso e aumenta o fator de intensidade de tensão auxiliando a propagação de trinca.

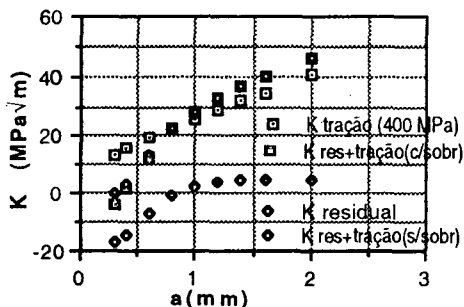


Figura 4: Resultado do fator de intensidade de tensões K pelo método de elementos finitos para Udimet 720 (18-20 A).

A correção da sobreposição de trinca é essencial ⁽⁵⁾ para as menores trincas, que apresentam-se totalmente fechadas e caem inteiramente na região compressiva do perfil de tensões residuais em ambos os materiais. O valor do fator de intensidade de tensões K quando a sobreposição não é permitida é zero.

O valor de K para a tensão remota e tensão residual quando aplicadas simultaneamente, para a liga de níquel Udimet 720 (18-20 A), no caso em que a sobreposição não é permitida é cerca de 95% maior que o valor de K quando a sobreposição de trinca ocorre.

A figura 5 apresenta a redução do fator de intensidade de tensão K promovida pela tensão residual para Udimet 720 (6-8 A). Esta redução ocorre para trincas de até 0.6 mm. Na figura 5, para trincas parcialmente fechadas de 0.3 mm, 0.4 mm e 0.6 mm da liga Udimet 720 (6-8 A), há um aumento no valor do fator de intensidade de tensões K de 112%, 25% e 3% em relação aos valores de K em que a sobreposição é permitida.

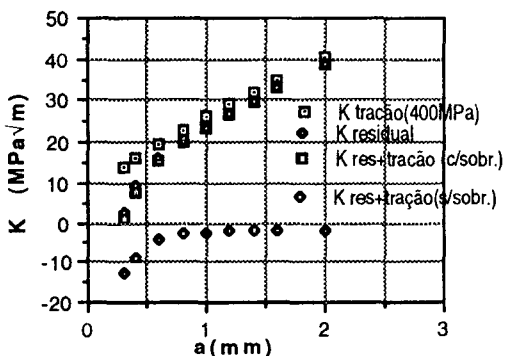


Figura 5: Resultado do fator de intensidade de tensões K pelo método de elementos finitos para Udimet 720 (6-8 A).

A figura 6 apresenta os resultados de elementos finitos para a liga IMI 834, na qual todas as trincas apresentam-se totalmente abertas e o perfil de tensão residual auxilia a propagação de trinca.

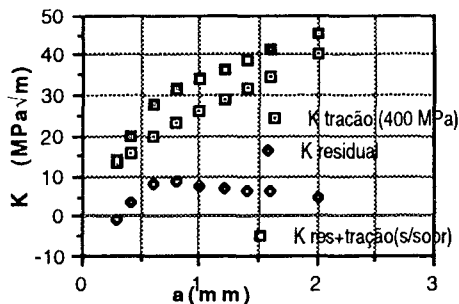


Figura 6: Resultado do fator de intensidade de tensões K pelo método de elementos finitos para IMI 834(18-20 A).

A comparação dos resultados de elementos finitos com a soluções obtidas pelo método da função ponderação, levam a desvios menores que 1.7% para todos os perfis de tensão residual.

4. CONCLUSÕES

Os parâmetros do processo de jateamento por partículas e as propriedades do material são aspectos importantes para se obter perfis de tensão residual benéficos que aumentem a resistência a fratura e a propagação de trinca.

Os resultados de elementos finitos para o fator de intensidade de tensões K apresentam boa concordância com os valores obtidos pela função ponderação.

A correção da sobreposição de trinca torna-se imprescindível para se obter valores confiáveis para o fator de intensidade de tensões K .

5. REFERÊNCIAS

- (1) Shot Peening Applications Catalogue, Metal Improvement company Inc., seventh edition.
- (2) Almen, J.O.; Black, P.H., Residual stress and fatigue in metals, N.Y.: Graw Hill, 1963.
- (3) Smith, D.J.; Leggat, R.H.; Webster, P.J.; Neutron diffraction measurements of residual stress and plastic deformation in aluminium alloy weld. J. of Strain analysis., V.23, n.4, 1988.
- (4) Bueckner, H.F.; A novel principal for the computation of stress intensity factor, ZAMM 50, V.9, p. 529-546, 1970.
- (5) Parker, A.P., The mechanics of fracture and fatigue, E&F.N. Spon Ltd., 1981.