

Processamento Termomecânico de uma Superliga por Ondas de Choque

MARC ANDRÉ MEYERS (1)

R. NORMAN ORAVA (2)

O processamento termomecânico por choque provou ser um eficaz meio de aumentar a resistência mecânica de Inconel 718. A introdução de um envelhecimento anterior à deformação produziu um aumento de resistência ainda maior. Foram otimizados os envelhecimentos anterior e posterior à deformação, sendo feita também a determinação sistemática das propriedades ténses a temperaturas ambiente e elevadas para o programa otimizado.

1. INTRODUÇÃO

A resistência mecânica de superligas a temperaturas ambiente e intermediárias (até 600°C) pode ser consideravelmente aumentada pela ação cooperativa de tratamentos térmicos e mecânicos (1-4). A esta ação dá-se o nome de processamento termomecânico (PTM). Diversos estudos descrevem os efeitos do PTM nas propriedades mecânicas de Inconel 718 (*). O consenso geral é que a resistência é aumentada até 650°C, enquanto que a vida de ruptura sob tensão é afetada negativamente (2, 5, 7).

Os resultados apresentados aqui são parte de um programa mais vasto, financiado pelo Office of Naval Research, para investigar os efeitos de PTM por choque na resistência mecânica das superligas. Resultados favoráveis para Udimet 700 (*) já foram apresentados (8).

Os objetivos desta investigação:

- determinação do potencial de PTM por ondas de choque em Inconel 718;
- otimização dos parâmetros de processamento; e
- comparação sistemática das propriedades mecânicas dos três estados — não deformado, deformado por laminação a frio, deformado por choque — para as condições otimizadas.

2. MATERIAL

Inconel 718 é uma superliga à base de níquel e ferro, endurecida por precipitação. Suas caracte-

rísticas mais importantes são as boas propriedades mecânicas a temperatura criogênica, ambiente e intermediária. Suas principais aplicações são nas turbinas, partes para bombas, foguetes e cápsulas espaciais. Foi desenvolvida no final da década 1950 pela International Nickel Co., e é atualmente uma das superligas mais populares. O precipitado mais importante é Ni₃ (Nb, Al, Ti) e tem estrutura tetragonal de corpo centrado. É comumente conhecido como γ'' . Após envelhecimento excessivo ele se decompõe na fase Ni₃ Nb, que é ortorrômbica (δ). As elevadas tensões de coerência entre γ'' e a matriz austenítica são responsáveis pela elevada resistência de Inconel 718. A fase Ni₃ Nb precipita em forma de placas em um padrão de Widmannstätten e produz uma deterioração apreciável nas propriedades mecânicas de Inconel 718.

Chapas de Inconel 718 com espessura nominal de 2,36 mm foram adquiridas de Active Alloys, Inc., em uma condição solubilizada e recozida atendendo às especificações AMS 5596 C. Material de dois diferentes lotes foi usado. Para que não sejam feitas comparações impróprias eles são especificados por I e II. Há dois tratamentos térmicos padrão recomendados para Inconel 718:

1. Solubilização:
954°C, 1 h, resfriamento ao ar.
Envelhecimento: 718°C, 8 h, resfriamento em forno até 621°C, total 18 h, resfriamento ao ar.
2. Solubilização:
1.066°C, 1 h, resfriamento ao ar.
Envelhecimento: 760°C, 10 h, resfriamento em forno até 649°C, total 20 h, resfriamento ao ar.

3. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Ondas de choque são caracterizadas por uma elevação abrupta da pressão de pico. A velocidade da onda é supersônica em relação ao material virgem e subsônica em relação ao chocado. As pressões de pico são substancialmente mais eleva-

Contribuição Técnica n.º 1.278. Apresentada ao XXX Congresso Anual da ABM; Rio de Janeiro RJ; junho/julho de 1975.

(1) Membro da ABM. Professor Adjunto; Seção de Ciência dos Materiais e Centro de Pesquisa de Materiais — IME; Rio de Janeiro RJ.

(2) Professor; Dept. Met. Eng.; South Dakota School of Mines and Technology — Rapid City; South Dakota, E.U.A.

(*) Inconel 718 e Udimet 700 são marcas pertencentes à International Nickel Co., Inc. e Special Alloys, Inc., respectivamente.

das que o limite elástico dinâmico de metais. Pressões de 500 Kbar — correspondendo a 50.000 MN/m² — não são incomuns em processamento por choque. O aumento de resistência de metais pela passagem de ondas de choque é conhecido e tem sido ativamente estudado nos últimos 20 anos. Algumas aplicações comerciais resultaram, como o endurecimento de componentes ferroviários de aço Hadfield por choque. Há três meios básicos de se introduzir ondas de choque em um sólido: detonação de uma carga explosiva em contato com o sólido; impacto de um projétil contra o sólido; e descarga de um banco de capacitores de alta energia em um meio de transferência conveniente na proximidade do sólido.

Neste estudo as ondas de choque foram introduzidas por meio de um gerador de onda plana do tipo "ratoeira". Esta montagem experimental é a mais comum em trabalhos de investigação (Fig. 1). A espoleta elétrica aciona o gerador linear de onda, de forma triangular. Este, por sua vez, produz a detonação do gerador de onda plana, disposto a um ângulo de 11° em relação à carga principal. A superfície superior da carga principal recebe uma chuva de estilhaços de vidro de tal maneira que a detonação ocorre simultaneamente sobre toda esta superfície. A carga principal, por sua vez, impulsiona a placa voadora de cobre, que vai impactar

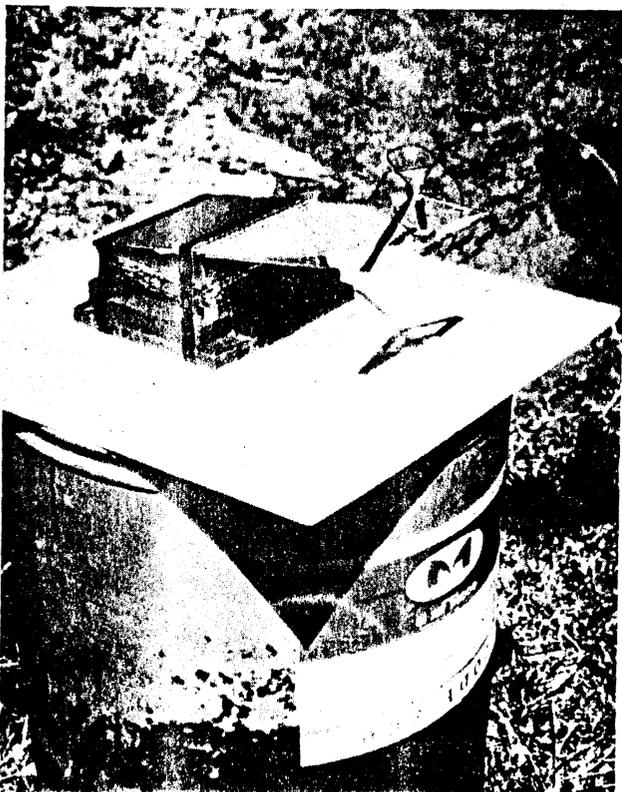


Fig. 1 — Sistema experimental em posição para detonação.

violentamente as amostras. Estas se encontram devidamente protegidas por chapa de cobertura, barras laterais, placa de estilhaçamento e placa de proteção. O sistema, após ser atravessado pela onda de choque, é impulsionado para um tanque repleto com água, o que produz um resfriamento rápido. Usou-se inicialmente Detasheet como explosivo; por razões de economia, usou-se posteriormente Composition B. A placa voadora tinha 3 mm de espessura, produzindo um pulso com duração de aproximadamente 1 μ /s. A espessura da carga principal foi ajustada para produzir uma pressão de 51.000 MN/m² (510 Kbar).

A laminação a frio foi conduzida por uma sucessão de passes, cada um reduzindo a espessura de aproximadamente 0,5%. A comparação das propriedades do material transformado por PTM convencional e por choque foi feita a deformações efetivas equivalentes. Uma pressão de choque de 51.000 MN/m² produz uma deformação real transiente de 0,24. Uma redução por laminação de 19,1% produz uma deformação equivalente a 0,24. Assim, a pressão de 51.000 MN/m² e a redução de 19,1% foram os parâmetros de deformação usados nesta investigação. Deve-se porém ressaltar que a redução residual de espessura devido a choque é de apenas 2%.

Os ensaios de tração a todas as temperaturas foram conduzidos ao ar em uma máquina Instron com capacidade de 10.000 libras a uma taxa de deformação de 3×10^{-4} s⁻¹. A vida e ductilidade de ruptura sob tensão (fluência acelerada) foram avaliadas a carga constante por meio de uma máquina de fluência Satec. Os resultados de tração e ruptura sob tensão apresentados neste trabalho são a média de dois ensaios. É possível medir aproximadamente a tenacidade de um material sem recorrer aos elaborados ensaios para determinar a tenacidade à fratura, K_{Ic} . Uma medida da tenacidade é obtida tomando-se a área sob a curva tensão-deformação; este parâmetro é denominado *índice de tenacidade*. Os ensaios de fadiga a baixa ciclagem foram executados em uma máquina Instron com ciclos tensão-tensão a uma frequência de 2 ciclos/min (0,03 Hz). Os corpos-de-prova eram planos, com entalhes semicirculares dos dois lados, resultando em um fator de concentração de tensões, $K_t = 2$.

4. ENSAIOS PRELIMINARES

O potencial do PTM de Inconel 718 por choque foi aquilatado executando-se a deformação no estado solubilizado e aplicando-se os dois tratamentos de envelhecimento padrões. Estes programas foram cognominados 1 e 2 nesta investigação. Os resultados estão indicados na tabela I. O limite de escoamento foi aumentado de mais de 10% por choque, enquanto que tal não é sempre o caso com

laminação a frio. Os limites de resistência são similarmemente afetados. As reduções de área à fratura não são diminuídas para choque, enquanto que a laminação a frio produz um decréscimo apreciável. Conseqüentemente, as condições chocadas exibem tensões de ruptura dúctil mais elevadas. Da mesma forma, os índices de tenacidade das condições chocadas tendem a ser mais elevados que das laminadas.

TABELA I — Propriedades tensesis de Inconel 718 processado térmica e termomecanicamente nos programas 1 e 2 (lote I).

Programa de PTM	Limite de escoamento (MN/m ²)	Limite de resistência (MN/m ²)	Elongação (%)	Redução de área (%)	Limite de ruptura dúctil (MN/m ²)	Índice de tenacidade (m-RN/m ^{3/2})
(a) Temperatura Ambiente						
1-Não de formado	1274	1440	20,0	37,9	2053	793
1-Laminado	1407	1468	9,0	33,1	1977	680
1-Chocado	1441	1472	5,7	39,9	2178	896
2-Não de formado	1119	1311	19,5	34,2	1896	632
2-Laminado	1141	1335	13,2	34,6	1984	663
2-Chocado	1260	1377	6,7	34,3	2008	691
(b) 649°C (1200°F)						
1-Não de formado	1042	1114	3,5	17,3	1322	225
1-Laminado	1134	1186	4,3	8,5	1238	107
1-Chocado	1156	1203	1,8	16,8	1438	240
2-Não de formado	919	1023	4,8	15,4	1190	177
2-Laminado	991	1073	20,3	20,3	1190	248
2-Chocado	1040	1122	18,3	18,3	1222	228

Os ensaios de ruptura sob tensão foram executados a 649°C e os resultados estão mostrados na tabela II. Confirmando resultados anteriores descritos na literatura (12), a deformação teve um efeito negativo para o programa I. A deformação aumentou porém a vida de ruptura sob tensão para o programa II. A laminação a frio aumentou de aproximadamente 50%, enquanto choque produziu um acréscimo de mais de 150%. A redução de área, diminuída de 30% para a condição laminada sofreu um decréscimo de apenas 10% para a condição chocada.

TABELA II — Ruptura sob tensão e taxa mínima de fluência para Inconel 718 processado térmica e termomecanicamente nos programas 1 e 2.

Programa de PTM	Lote	$\dot{\epsilon}_{min}$ (%/hora)	Elong. (%)	R.A. (%)	Vida (horas)
(a) 649°C / 758 MN/m ²					
1-Não Deformado	I	0,037	0,9	11,1	15,7
1-Laminado	I	0,046	1,4	5,7	16,0
1-Chocado	I	0,036	0,9	5,7	9,8
(b) 649°C / 724 MN/m ²					
2-Não Deformado	II	0,0075	2,8	15,1	147,3
2-Laminado	II	0,0038	2,9	10,4	224,5
2-Chocado	II	0,0040	3,7	13,6	380,2

5. OTIMIZAÇÃO DOS PROGRAMAS

Os resultados obtidos na investigação exploratória eram encorajantes. Porém, nenhum dos dois programas apresentara características inteiramente satisfatórias. A vida de ruptura por tensão a 649°C do programa I fora reduzida e os níveis de resistência alcançados no programa II estavam ainda abaixo da condição não deformada do programa I. Era razoável pensar-se que ajustamentos no processamento poderiam melhorar o comportamento do PTM. Tendo isto em vista, procurou-se otimizar os tratamentos térmicos a serem usados em conjugação com a deformação. Os trabalhos de Uy et al. (7) e Conserva et al. (13) sugeriram que a introdução de um envelhecimento anterior à deformação poderia trazer benefícios ao comportamento mecânico. Escolheu-se a seguinte seqüência de tratamentos:

Solução + pré-envelhecimento + deformação + pós-deformação.

Fez-se variar as temperaturas de pré-envelhecimento de 537 a 760°C em incrementos de 56°C, para tempos de 4 e 8 h. As temperaturas e incrementos para os envelhecimentos posteriores à deformação foram os mesmos, com tempos de 4, 8 e 12 h. A otimização foi conduzida por meio de ensaios de dureza, tração e ruptura sob tensão. Entre todas as combinações de pré e pós-envelhecimento, a que apresentou o melhor grupo de propriedades mecânicas foi a seguinte:

- Solução: 954°C, 1 h, resfriamento ao ar.
- Pré-envelhecimento: 704°C, 4 h, resfriamento ao ar.
- Deformação: laminação ou choque.
- Pós-envelhecimento: 677°C, 8 h, resfriamento no forno a 621°C, total de 18 h, resfriamento ao ar. Este programa recebeu o número 3.

6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PROGRAMA OTIMIZADO

Antes de serem apresentadas as propriedades tensesis do programa 3, é bom comparar os méritos deste programa com os outros dois. Como 1 e 2 pertencem ao lote I, e programa 3 ao lote II, as mudanças porcentuais são dadas. Elas são apresentadas na tabela III. As mudanças porcentuais são: 1-laminado e 1-chocado em relação a 1-não-deformado; 2-laminado e 2-chocado em relação a 1-não-deformado; 3-laminado e 3-chocado em relação a 1-não-deformado. O programa PTM 3 é bem superior a 1 e 2.

TABELA III — Mudanças percentuais nas propriedades tênsis de Inconel 718 devido a PTM em relação às condições padrão.

Programa de PTM	Límite de escoamento (0,2%)	Límite de resistência	Elong.	R.A.	Índice de Tenacidade
(a) Temperatura Ambiente					
1-Laminado	+10,5	+2,0	-54,8	-12,8	-14,4
1-Chocado	+13,1	+2,2	-71,8	+2,5	+12,8
2-Laminado	+1,9	+1,8	-32,2	-1,3	+5,0
2-Chocado	+12,6	+5,0	-65,5	+0,2	+9,5
3-Laminado	+31,2	+14,7	-71,6	-24,2	-21,6
3-Chocado	+23,4	+7,4	-72,5	-7,4	-0,7
(b) 649 °C					
1-Laminado	+8,8	+6,5	+8,0	-50,7	-52,4
1-Chocado	+10,9	+8,0	-53,8	-2,5	+6,9
2-Laminado	+7,8	+4,8	+137,9	+31,7	+40,3
2-Chocado	+13,2	+9,7	+87,9	+18,6	+29,4
3-Laminado	+29,2	+22,0	+26,4	+155,5	+307,3
3-Chocado	+21,2	+17,1	-36,9	+94,7	+187,3

As figuras 2 e 3 mostram o efeito da temperatura nas propriedades tênsis das condições deformadas e não-deformadas. A 760°C os efeitos do PTM desaparecem; isto não é, porém, problemático, pois esta temperatura é superior ao limite operacional de Inconel 718. A ductilidade e tena-

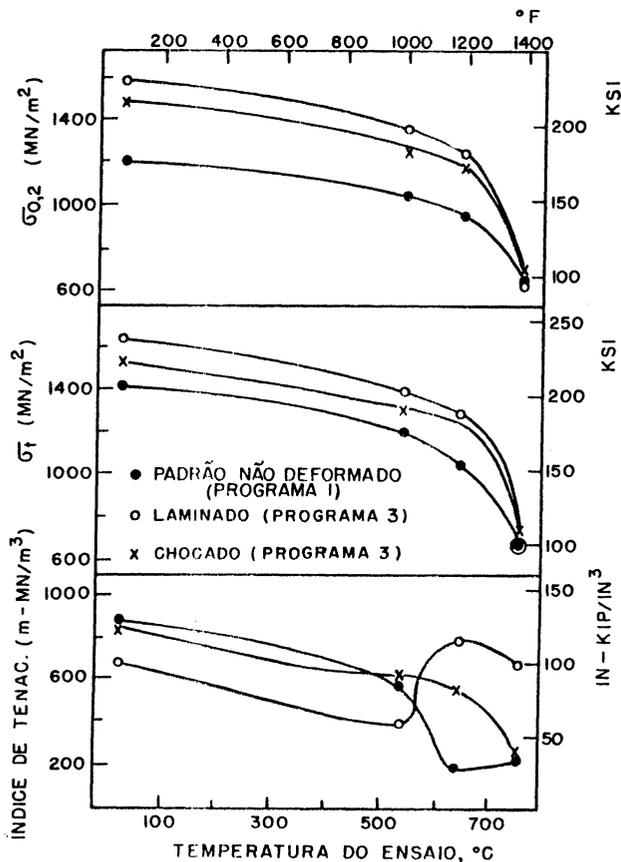


Fig. 2 — Efeito do programa otimizado 3 na resistência e tenacidade de Inconel 718.

cidade estão mescladas; a escolha de um método de PTM sobre o outro depende da temperatura de serviço. A 649°C 3-laminado possui a melhor combinação de propriedades tênsis; abaixo desta temperatura, 3-chocado é superior.

Ensaio de ruptura à tensão sob carga constante foram conduzidos a 538 e 649°C às tensões de 1.172 MN/m² e 758 MN/m², respectivamente. Os resultados estão mostrados nas figuras 4 e 5. O programa otimizado 3 produziu um aumento enorme na vida de Inconel 718 a 538°C. A condição 3-laminado tem vida 20 vezes superior à condição 1-não-deformado. O aumento para 3-chocado, apesar de ser algo inferior, é ainda muito significativo. Estes aumentos foram introduzidos sem decréscimo significativo das elongações e reduções de área. A 649°C as condições otimizadas são ainda bem superiores às condições 1-não-deformado. A condição 3-chocado produziu um aumento de 30% na vida. As ductilidades e elongações não são substancialmente reduzidas.

O comportamento à fadiga de baixa ciclagem foi observado à temperatura ambiente e 649°C. Os resultados estão mostrados na tabela IV. As condições chocada e laminada se comportam de maneira similar, no programa 3. À temperatura ambiente observa-se um aumento de aproximadamente 20% em relação à condição padrão 1-não-deformada; a 649°C este aumento é de 50%.

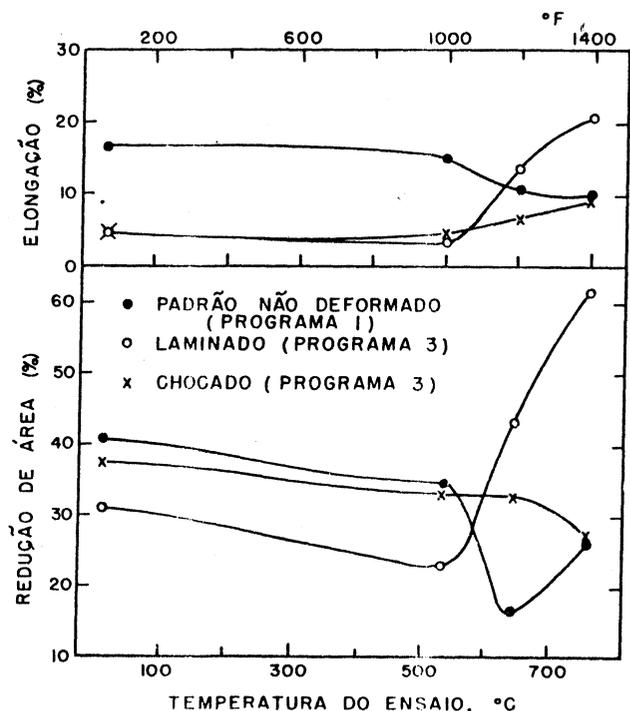


Fig. 3 — Influência do programa otimizado na ductilidade de Inconel 718.

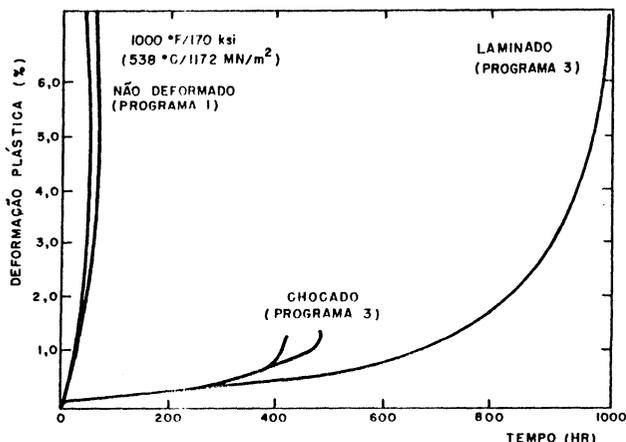


Fig. 4 — Curvas de fluência a carga constante a 538°C para Inconel 718 (programa 3).

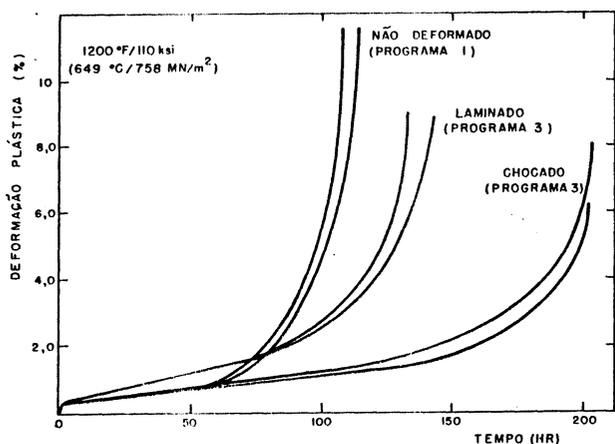


Fig. 5 — Curvas de fluência a carga constante a 649°C para Inconel 718 (programa 3).

TABELA IV — Vida e fadiga a baixa ciclagem para o programa otimizado 3 em Inconel 718 (lote II; valores médios sublinhados).

Temper de tes (°C)	Tensão Cíclica (MN/m²)	No. de ciclos para ruptura		
		1-Não deformado	3-Laminado	3-Chocado
20	724,5+586,0	3071	3123	3832
		3351	4544	3734
		<u>3211</u>	<u>3834</u>	<u>3783</u>
649	551,6+413,7	408	979	1071
		895	1385	1060
		843	<u>1182</u>	<u>1066</u>
		<u>715</u>		

7. CONCLUSÕES

Os principais resultados desta investigação e as conclusões são:

1. Outras investigações mostraram que PTM utilizando deformação por choque é um método promissor de aumentar a resistência de ligas de ferro⁽¹⁴⁾, alumínio⁽¹⁵⁾ e titânio⁽¹⁶⁾. Este estudo demonstra que a superliga Inconel 718 pode ser incluída neste grupo.

2. Inconel 718 foi submetido com sucesso a uma pressão de 510 Kbar utilizando a técnica da placa voadora.

3. O PTM de Inconel 718 foi conduzido inicialmente com a deformação sendo executada na condição solubilizada. Esta investigação preliminar mostrou alguns resultados positivos; nenhuma das melhoras de propriedade era contudo suficiente para justificar o PTM de Inconel 718 sob estas condições.

4. O comportamento de Inconel 718 é melhorado substancialmente quando a deformação é introduzida após um pré-envelhecimento.

5. Com base na otimização dos pré e pós-envelhecimento, foi escolhido o seguinte programa:

- Solubilização: 954°C, 1 h, resfriamento ao ar.
- Pré-envelhecimento: 704°C, 4 h, R.A.
- Deformação: laminação a frio ou choque.
- Pós-envelhecimento: 677°C, 8 h, resfriamento no forno até 621°C, total 18 h, R.A.

6. PTM convencional, utilizando laminação a frio com redução de 19,1%, para o programa otimizado 3, resultou nos seguintes aumentos de propriedades:

- 30% acréscimo no limite de escoamento à temperatura ambiente, para 1.600 MN/m²;
- 30% acréscimo no limite de escoamento a 649°C, para 1.255 MN/m²;
- 25% acréscimo na elongação a 649°C, para 14%;
- 15% acréscimo na redução de área a 649°C, para 43%;
- 2.000% acréscimo na vida de ruptura sob tensão a 538°C/1172 MN/m², para 1.000 h;
- 30% acréscimo na vida de ruptura sob tensão a 649°C/758 MN/m², para 147 h;
- 20% acréscimo na resistência à fadiga de baixa ciclagem à temperatura ambiente; e
- 65% acréscimo na resistência à fadiga de baixa ciclagem a 649°C.

7. PTM por ondas de choque, usando a mesma seqüência otimizada de tratamentos (programa 3), produziu os seguintes aumentos:

- 25% acréscimo no limite de escoamento à temperatura ambiente, para 1.538 MN/m²;
- 25% acréscimo no limite de escoamento a 649°C, para 1.200 MN/m²;
- 100% acréscimo na redução de área a 538°C, para 33%;
- 900% acréscimo na vida de ruptura sob tensão a 538°C/1172 MN/m², para 450 h;

- 80% acréscimo na vida de ruptura sob tensão a 649°C/758 MN/m², para 202 h;
- 18% acréscimo na resistência à fadiga de baixa ciclagem à temperatura ambiente; e
- 50% acréscimo na resistência à fadiga de baixa ciclagem a 649°C.

8. Para o programa otimizado 3 ficaram diminuídas as elongações à temperatura ambiente, como era de se esperar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao U.S. Naval Air Development Center, Department of the Navy, pelo contrato No. N62269-73C-0376 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudos a um dos autores.

BIBLIOGRAFIA

1. COUTS, W. H. & COYNE, J. E. — Proc. 2nd Conf. on Superalloys, Capítulo K, Relatório n.º MCIC — 72 — 10, Metals and Ceramics Information Center, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 1972.
2. SLUNDER, C. J. & HALL, A. M. — NASA TMX — 53443, Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, 1966.
3. KEAR, B. H.; OBLAK, J. M. & OWCZARSKI, W. A. — J. Metals, vol. 24, p. 25-32, 1972.
4. RICHMOND, F. M. — J. Eng. for Power, vol. 89, p. 61-74, 1967.
5. CREMISIO, R. S.; BUTLER, H. M. & RADAVIDICH, J. F. — J. Metals, vol. 21, p. 55-61, 1969.
6. DECKER, R. F. — Steel — Strengthening Mechanisms, Chlmax Molibdenum Co., p. 147-170, 1969.
7. UY, J. C.; NOLAN, C. J. & DAVIDSON, T. E. — Trans. ASM, vol. 60, p. 693-698, 1967.
8. ORAVA, R. N. — Mat. Sci. Eng., vol. 11, p. 177-180, 1973.
9. OBLAK, J. M.; PAULONIS, D. F. & DUVALL, D. S. — Met. Trans., vol. 5, p. 143-153, 1974.
10. ORAVA, R. N. — Denver Research Institute, Final Report No. DRI 2638, Contrato No. N 62269-73-C-0376, U.S. Naval Air Systems Command, 1974.
11. MEYERS, M. A. — Tese de Doutorado, University of Denver, Colorado, 1974.
12. WAGNER, H. J.; BURNS, R. S.; CAROLL, T. E. & SIMON, R. C. — Nickel Base Alloys/Alloys 718, Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, Columbus Ohio, 1968.
13. CONSERVA, M.; BURATTI, M.; DI RUSSO, E. & GATTO, F. — Mat. Sci. Eng., vol. II, p. 103-112, 1973.
14. STEIN, B. A. & JOHNSON, P. C. — Trans. TMS-AIME, vol. 227, p. 1188-93, 1963.
15. WITTMAN, R. H. — Proc. of a Symposium on Metallurgical Effects at High Strain Rates, ed. R. W. Rohde et al., Plenum Press, New York, p. 669-688, 1973.
16. CARVALHO, M. B. — Tese de Mestrado, University of Denver, Colorado, 1974.

DEBATE

GUSTAU FERRAN (1) — O endurecimento por choque gerou alta densidade de defeitos? Por que a curva

de análise térmica diferencial para material chocado mostrou uma deflexão térmica maior que para o material laminado?

MARC ANDRÉ MEYERS — A densidade de defeitos gerada é realmente elevada em endurecimento por choque. Esta densidade de defeitos é função, entre outros parâmetros, da amplitude da onda plástica. Esta, por sua vez, é determinada pela carga explosiva. Sobre a segunda pergunta: a maior deflexão térmica para a condição laminada indica que a densidade de defeitos é mais elevada para esta condição. Isto é confirmado pelos ensaios de tração: para o programa PTM 3 o limite de escoamento da condição laminada é superior ao da condição chocada.

G. FERRAN — Que temperatura atingiu o material durante a explosão?

M. A. MEYERS — Há duas temperaturas a considerar. A "temperatura transiente" existente dentro da onda de choque, e a "temperatura residual" existente imediatamente após a onda de choque. Para a pressão de 510 MN/m² estas temperaturas são de aproximadamente 280 e 160°C, respectivamente.

G. FERRAN — Estas temperaturas não poderiam produzir uma recuperação parcial?

M. A. MEYERS — Não. Inconel 718 é uma liga que pode trabalhar até 600°C. A recuperação somente começa a aparecer acima desta temperatura.

CARLOS ALBERTO GUIMARÃES PAGNANO (2) — Quais as tensões residuais geradas?

M. A. MEYERS — Em blocos grandes há tensões residuais consideráveis. A superfície que recebe o impacto fica em compressão. Em nosso caso, usaram-se chapas finas (2 mm) protegidas por uma chapa de proteção. Assim, estas tensões residuais são pequenas. Além disto, o material sofre um tratamento térmico de precipitação após ser chocado. Este tratamento propicia certamente um alívio de tensões.

C. A. G. PAGNANO — Por exemplo, se fosse aplicado este processo a uma aleta de turbina, qual seria o efeito?

M. A. MEYERS — É difícil de se prever o estado de tensões internas gerado. A carga explosiva teria que ser ajustada de tal modo a oferecer resultados satisfatórios. As múltiplas reflexões sofridas pela onda plástica afetam o estado final de tensões residuais.

C. A. G. PAGNANO — Quais as aplicações comerciais deste processo nos EUA?

M. A. MEYERS — O endurecimento por choque possui algumas aplicações industriais: "jacarés" ferroviários são endurecidos, assim como mandíbulas de trituradores. O aço Hadfield, em particular, apresenta excelente endurecimento por choque. Esta tecnologia está sendo implantada no Brasil pelo IPT. O IME se preocupa com os aspectos científicos e de interesse militar de deformação por choque. O trabalho apresentado sobre Inconel 718 faz parte de um estudo executado pelo Instituto de Pesquisas de Denver para a Marinha norte-americana.

(1) Membro da ABM. Doutor em Ciências; Professor do COPPE da UFRJ; Rio de Janeiro RJ.

(2) Membro da ABM. Doutor e Engenheiro; EMBRAER; São José dos Campos SP.