

Tema: Diagramas de fases e transformações de fases

AVALIAÇÃO DE TRINCAS A QUENTE EM FUNDIDOS DE PRECISÃO EM SUPERLIGAS POR TERMODINÂMICA COMPUTACIONAL *

*Flávio Beneduce Neto¹
Rodrigo Magnabosco²
André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva³*

Resumo

As trincas a quente ou de solidificação em peças micro-fundidas em superligas a base de níquel podem ser um item importante no índice de perdas em componentes específicos. O aparecimento desse defeito está ligado fundamentalmente à quantidade de líquido interdendrítico nos últimos estágios da solidificação e, principalmente, ligado à composição química desse líquido. Há duas ligas amplamente utilizadas na produção de rotores para turbo-compressores ou turbinas para a geração de energia: o Inconel 713C e o Inconel 713LC. A diferença entre estas duas ligas é essencialmente o teor de carbono. Curiosamente, a liga LC tem uma maior tendência ao aparecimento de trincas de solidificação. O presente trabalho procura identificar as diferenças de comportamento na solidificação dessas duas ligas através da termodinâmica computacional e ligar essas diferenças no aparecimento das trincas. Os resultados indicaram que os teores de Zr e Nb do líquido remanescente da solidificação são muito superiores na liga LC causados pelo atraso na precipitação dos carbonetos tipo MC nessa região que deve ser a fase que aumenta a resistência mecânica da área. O correto balanceamento da composição química da liga em relação aos elementos citados permitiu que o índice de perdas por trincas de solidificação caísse para níveis próximos a zero.

Palavras-chave: Trinca a quente; Superligas; Inconel 713; Fundição de precisão.

EVALUATION OF HOT TEARING IN SUPERALLOYS INVESTMENT CASTING USING COMPUTATIONAL THERMODYNAMICS

Abstract

The hot tears or solidification cracking in Ni-based superalloys investment casting parts can be an important item in the scrap rate in specific components. The appearance of this defect is linked to the amount of interdendritic liquid of the last stages of solidification and it is mainly linked to the chemical composition of the liquid. There are two widely used alloys in the production of rotors for turbo-chargers or turbines for power generation: Inconel 713C and Inconel 713LC. The difference between these two alloys is essentially carbon. Interestingly, the LC alloy has a greater tendency to cracking. This paper try to identify the differences on solidification behavior of these two alloys through computational thermodynamics and link these differences in the appearance of cracks. The results indicated that the contents of Zr and Nb of liquid remaining in the alloy is much higher on LC alloy caused by the delay in the precipitation of MC type carbides in this region which must be the phase that increases the mechanical strength of the area. The correct balancing of the chemical composition of the alloy regarding those elements allowed the scrap rate for hot tearing decreased to near zero levels.

Keywords: Hot tears; Superalloys; Inconel 713; Investment casting.

¹ *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EPUSP, São Paulo, São Paulo, Brasil*

² *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Chefe de Departamento de Engenharia de Materiais, UNIFEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil*

³ *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Professor da UFF, Diretor Técnico do IBQN, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

As superligas à base de níquel são utilizadas largamente na produção de palhetas de turbinas e rotores de turbo-compressores devido à sua alta resistência mecânica a alta temperatura e sua alta resistência à fluência. Essas peças são normalmente fundidas sob vácuo pela técnica da fundição em cera perdida também chamada de fundição de precisão. Tais peças são submetidas a um rigoroso controle de qualidade que inclui várias inspeções visuais em 100% da produção incluindo um ensaio não-destrutivo, de líquido penetrante fluorescente (LPF) como apresentado na figura 1. Neste ensaio detecta-se descontinuidades superficiais em baixo relevo incluindo trincas de solidificação ou trincas a quente. Apesar de alguns defeitos superficiais serem aceitos pelas normas dos clientes, elas devem ser sucateadas na ocorrência de trincas em qualquer região da peça.

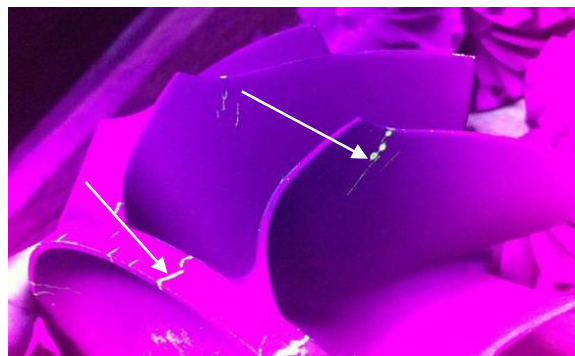


Figura 1: Trincas em rotores de turbo-compressores reveladas pelo LPF

Dentre as várias superligas fundidas destacam-se as ligas INCONEL 713C (liga C) e INCONEL 713LC (liga LC) cujas composições estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Composições químicas das ligas estudadas

Liga	Elemento (% em massa)									
	C	Al	B	Cr	Fe	Mo	Ti	Nb	Zr	
IN713C	0,08-0,20	5,5-6,5	0,005-0,015	14-17	2,5 max	3,1-5,2	0,5-1,0	1,8-2,8	0,05-0,15	resto
IN713LC	0,03-0,07			11-13	0,5 max	3,8-5,2	0,4-1,0	1,5-2,5		

É muito interessante que, apesar dessas duas ligas serem muito semelhantes, a liga LC tem uma tendência muito maior no sucateamento por trincas no LPF do que a liga C.

O presente trabalho procura identificar as razões desta diferença utilizando cálculos termodinâmicos no programa comercial de termodinâmica computacional, o ThermoCalc.

2 TRINCAS A QUENTE EM SUPERLIGAS

As trincas a quente são definidas como trincas que ocorrem durante o processo de solidificação na ausência de forças externas causadas por manipulação. Este fenômeno foi detalhadamente estudado por Sigworth [1], principalmente para as ligas de Al. Há um consenso na literatura de que elas ocorrem durante os últimos estágios da solidificação, ou seja, quando ainda há uma pequena fração de líquido

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

remanescente [2-4] e, obviamente, a presença de tensões de tração locais, como por exemplo, associadas à contração de solidificação. Nas figuras 2 e 3 pode-se observar claramente que a trinca a quente da peça apresentada na figura segue a região interdendrítica.

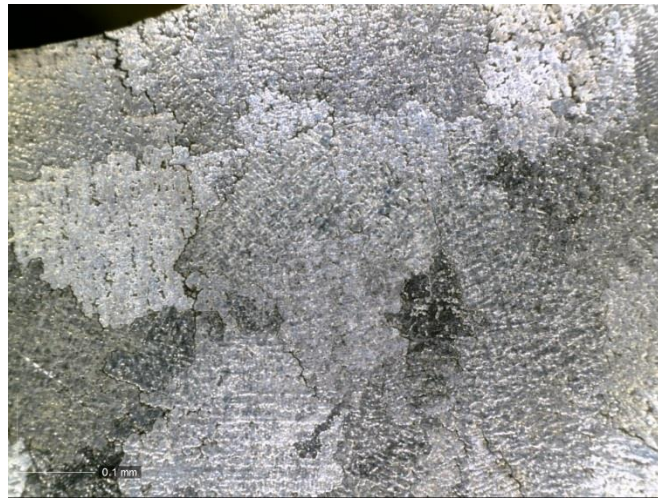


Figura 2: Trinca a quente da peça mostrada na figura 1

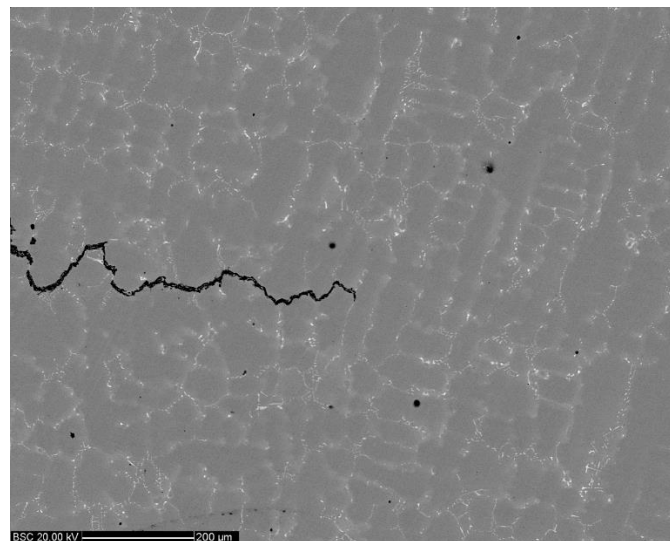


Figura 3: Imagem de elétrons retroespalhados (MEV) de uma trinca a quente da peça mostrada na figura 1

Não há consenso, entretanto, quanto ao volume de líquido mínimo para que o material fique vulnerável a esse tipo de problema [2]. Por exemplo, algumas ligas apresentam comportamentos ao trincamento a quente muito diferentes para frações de líquido remanescentes de 5% [5]. Também não é bem estabelecido os efeitos dos elementos de liga na susceptibilidade a este problema[6-8].

De qualquer forma, é intuitivo que quanto maior é a quantidade de líquido no estágio final de solidificação, ou quanto maior for o intervalo de solidificação da liga, maior será a tendência no aparecimento de trincas a quente. Como consequências, quanto maior for o superaquecimento para o vazamento e quanto maior for o tamanho da peça (menor velocidade de resfriamento), maior deverá ser essa tendência.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

3 ABORDAGEM DO PROBLEMA

Os cálculos termodinâmicos foram realizados utilizando o programa de termodinâmica computacional Thermo-Calc tendo como base a composição química nominal (centro da faixa) apresentada na tabela 1. A base de dados utilizada foi a SSOL4. Não foram incluídos nos cálculos os elementos residuais tais como O, N, Si, S e P mas considerou-se o teor de Fe próximo ao limite máximo da especificação (2,4% e 0,4% para as ligas C e LC, respectivamente) dada a grande diferença nos limites estabelecidos para este elemento, entre as duas ligas. Para a avaliação da composição química do líquido do último estágio de solidificação considerou a solidificação de não-equilíbrio segundo o modelo de Scheil que considera homogeneização da composição química do líquido mas não no sólido, ou seja, não há difusão no sólido [9].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4 mostra a evolução em equilíbrio das fases no resfriamento a partir do líquido.

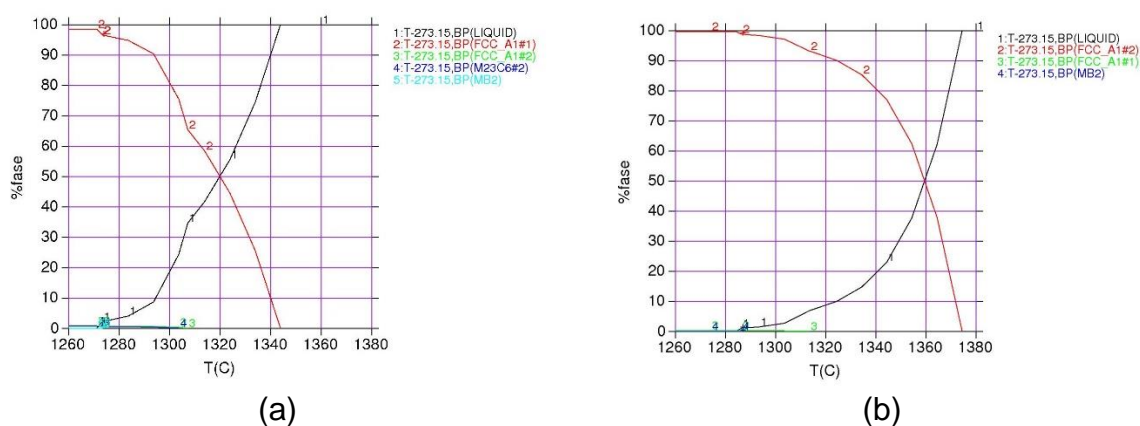


Figura 4. Evolução de equilíbrio das fases durante o resfriamento das ligas (a)IN713C e (b)IN713LC

Na figura 4 pode ser observado que a temperatura liquidus da liga LC é cerca de 30°C mais alta que a da liga C. A temperatura solidus, por sua vez, é aproximadamente 15°C mais elevada na liga LC. Conseqüentemente, os intervalos de solidificação são 68°C e 83°C, respectivamente para as ligas C e LC. Esta diferença já pode explicar, inicialmente, a maior tendência a formação de trincas a quente na liga LC. Além disso, a precipitação do carboneto MC em equilíbrio (FCC_A1#2 na liga C e FCC_A1#1 na liga LC, na figura 4), ocorre mais próximo ao início da solidificação na liga C, quando a quantidade de líquido é muito maior, 35% contra 8% na liga LC. Obviamente a quantidade de carboneto ao final da solidificação é muito maior na liga C. De acordo com Zhou e Volek [10], o carbono diminui a presença de fases eutéticas contínuas, tornando o esqueleto de solidificação mais resistente, devido à formação de pontes nos entre os braços das dendritas. Pode-se ainda sugerir que a precipitação prematura de carbonetos no líquido na liga C também pode servir como ponte na estrutura de solidificação aumentando sua resistência.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Para verificar a possibilidade de minimização das perdas por sucateamento da liga LC, foi avaliada a composição química do líquido tanto em condições de equilíbrio como não-equilíbrio (Scheil). Esta avaliação está apresentada na figura 5.

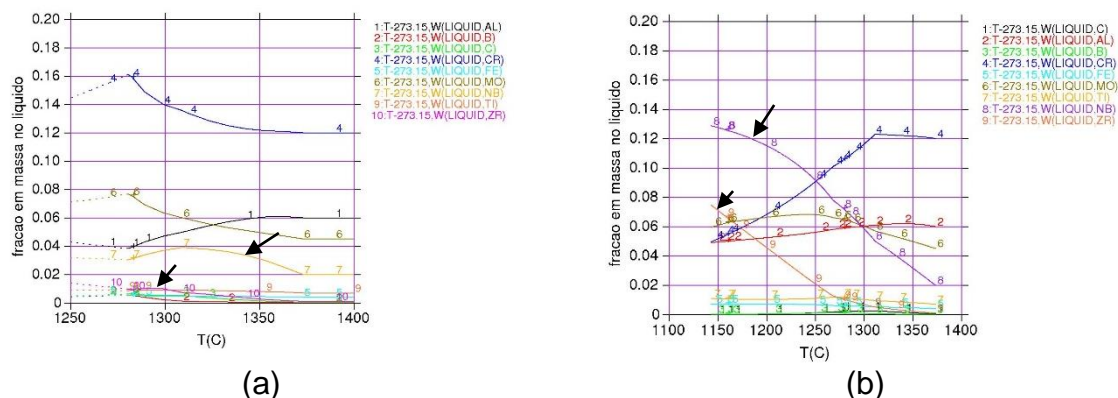


Figura 5. Evolução da composição química de (a)equilíbrio e (b) não-equilíbrio do líquido da liga IN713LC. As setas indicam as curvas de Nb e Zr.

Chama a atenção na figura 5(b), em condições de não-equilíbrio, que nos últimos estágios da solidificação das ligas há um significativo aumento dos teores de Nb e Zr. Por exemplo, o último líquido a solidificar tem um teor de Nb de cerca de 13% e um teor de Zr de 7,5%. Essas concentrações são muito superiores aos teores iniciais considerados nos cálculos, de 2% e 0,1%, respectivamente. De fato, Zhang[8] sugere minimizar o teor de Zr e controlar cuidadosamente o teor de B da liga IN792, solidificada direccionalmente para minimizar o trincamento a quente. Para analisar o efeito da minimização dos teores de Zr e Nb da liga LC, foram feitos novos cálculos utilizando o modelo de Scheil e utilizando o teor mínimo da faixa da especificação desses elementos. Os resultados estão apresentados nas figuras 6 e 7.

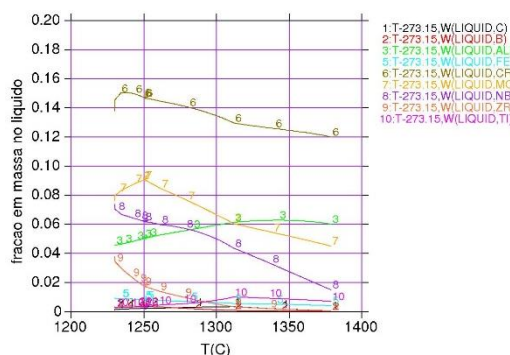


Figura 6. Evolução da composição química de não-equilíbrio do líquido da liga IN713LC minimizando os teores de Zr e Nb na liga

A figura 6 mostra que o enriquecimento do líquido em Nb e Zr é muito menor na liga em que esses elementos tem seus teores minimizados. O teor de Nb do último líquido passa de 13% (figura 4b) para 7%, enquanto que o teor de Zr passa de 7% para 3,5%. Já a figura 7 mostra que há uma diferença fundamental na sequência de precipitação das fases, muito provavelmente causada pela diminuição de elementos formadores de carbonetos tipo MC e pelo enriquecimento mais pronunciado do líquido em Mo, formador do carboneto $M_{23}C_6$. Finalmente, há uma diminuição

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

substancial do intervalo de solidificação, o que por si só deve contribuir para a diminuição da ocorrência de trincas a quente.

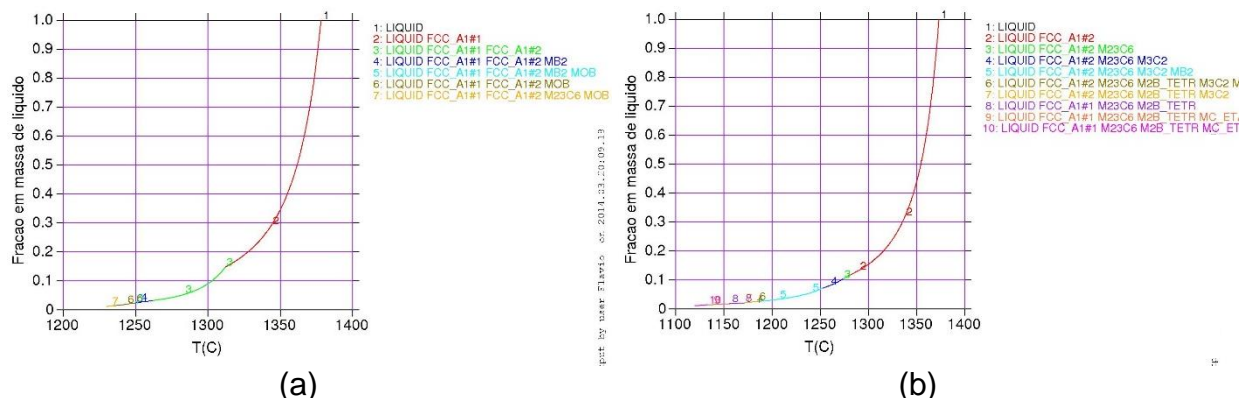


Figura 7. Evolução da fração de líquido de não-equilíbrio da liga IN713LC (a)sem e (b)com minimização dos teores de Nb e Zr

A minimização dos teores de Nb e Zr da liga INCONEL 713LC possibilitou uma redução drástica do sucateamento dos rotores por trincas a quente detectadas no LPF como mostra a figura 8 para os meses do ano de 2013 em que houve a ocorrência deste problema na produção dos rotores.

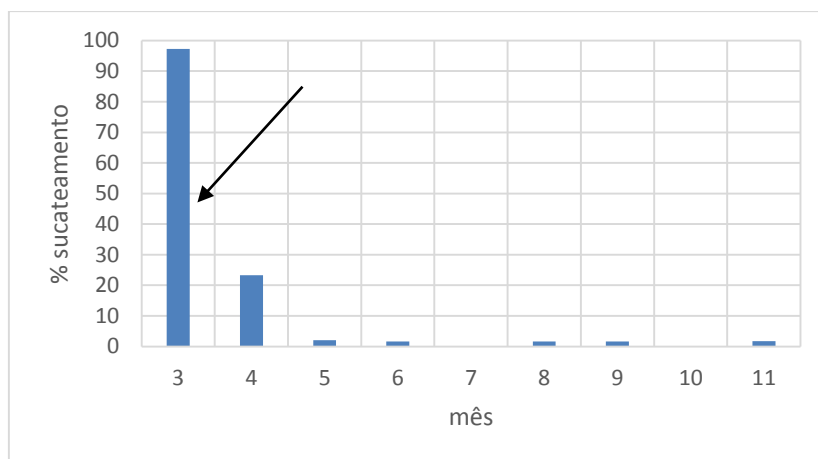


Figura 8. Evolução do índice de sucateamento por trincas a quente dos rotores em IN713LC no ano de 2013. A seta indica o mês que aplicou-se a minimização de Nb e Zr

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que a termodinâmica computacional pode analisar consistentemente as razões para a ocorrência de trincas a quente em peças em superligas à base de níquel e justificar as eventuais diferenças de comportamento entre ligas. Para a liga em questão, o INCONEL 713LC, a minimização dos teores de Nb e Zr reduz drasticamente as perdas por trincamento a quente.

REFERÊNCIAS

- 1 Sigworth GK. Hot tearing of metals. AFS Transactions, 1996;155:1053
- 2 Zhang J, Singer RF. Hot tearing of nickel-based superalloys during directional solidification. Acta Materialia, 2002; 50: 1869-1879
- 3 Rappaz M, Drezet JM, Gremaud A. New Hot-Tearing Criterion, M. Metall. Mater. Trans, 1999; 30 A :449-455
- 4 Farup I, Mo A. Two-phase modeling of mushy zone parameters associated with hot tearing Metall. Mater. Trans. 2000; 31 A:1461-1472
- 5 Heck K, Blackford JR, Singer RF. Castability of directionally solidified nickel base superalloys, Mater. Sci. Technol. 1999; 15:213-220.
- 6 Zhang J. Effect of Ti and Ta on hot cracking susceptibility of directionally solidified Ni-based superalloy IN792. Scripta Materialia, 48 (2003) 677-681
- 7 Dong HB, D'Souza N, Kantor B, Hooper P. Liquid fraction evolution during casting of Ni-based superalloys with emphasis on the last stage solidification. In: European Conference for Aerospace Sciences, 2005
- 8 Zhang J. Hot tearing in directionally solidified Ni-based superalloys. In: Superalloys 2004, 727-733
- 9 Costa e Silva ALV, Mei PR. Aços e ligas especiais. Ed. Edgar Blücher Ltda, São Paulo, Brasil, 2006
- 10 Zhou Y, Volek A. Effect of carbon additions on hot tearing of a second generation nickel-base superalloy. Materials Science and Engineering A, 2008; 479: 324-332.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.