

INFLUÊNCIA DO TEOR DE COBRE DO AÇO SAE 1012 NA FRAGILIZAÇÃO A QUENTE DURANTE LAMINAÇÃO DE PERFIL I 6”^{*}

Marina Furtado Freire¹
Hélio Fidêncio Linhares²
Carlos Henrique Gomes Sampaio³
José Adilson de Castro⁴
André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva⁵

Resumo

O Cobre (Cu), oriundo de sucata metálica utilizada no processo de aciaria elétrica, se apresenta no aço como elemento residual. A interação da variação do teor de Cobre residual no aço, com parâmetros de laminação a quente, como tempo (minutos) e temperatura (°C), geram produto laminado (Perfil I de 6”), defeitos superficiais, sendo a ocorrência de trincas por fragilização a quente um destes. O presente estudo visa validar, por meio de análises macroestruturais e microestruturais, que o cobre é o responsável pela fragilização a quente, que leva às trincas observadas em perfis I (ASTM A36 bitola 6” aço SAE 1012), fabricados na ArcelorMittal unidade Barra Mansa.

Palavra-chave: Aços longos; influência teor de Cobre; Laminação a quente; Fragilidade a quente.

INFLUENCE THE COPPER CONTENT OF SAE 1012 STEEL ON HOT CRACK DURING LAMINATION

Abstract

Copper (Cu), which comes from recycled steels used in the electric melting process, is present in steel as a residual element. The interaction of the variation of the residual Copper content in the steel with hot rolling parameters, such as time (minutes) and temperature (° C), generates surface defects in the laminated product (Profile I of 6 "). hot shortness are one of these. The present study aims to present, through macrostructural and microstructural analyzes, the responsible for the hot shortness, which leads to the cracks observed in I (ASTM A36 (SAE 1012) 6 ") profiles, manufactured at ArcelorMittal Barra Mansa.

Keywords: Long steels; Influence of Copper; Hot rolling; Hot shortness.

¹ Engenheira Metalúrgica, Gerente de laminação a quente, Gerência de laminação a quente, ArcelorMittal Barra Mansa, Volta Redonda-RJ, Brasil.

² Técnico em Metalurgia, Metalógrafo, Laboratório de metalografia, ArcelorMittal Resende, Resende-RJ, Brasil.

³ Graduando em Engenharia metalúrgica, estagiário de ensino superior, ArcelorMittal Barra Mansa e EEIMVR-UFF, Volta Redonda-RJ, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Msc em Metalurgia e PhD em simulação de processos, Professor Titular, EEIMVR-UFF, Volta Redonda –RJ, Brasil.

⁵ Engenheiro Metalúrgico, PhD, Professor Titular, EEIMVR-UFF, Volta Redonda –RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO e OBJETIVOS:

O Cobre (Cu), oriundo de sucata metálica utilizada no processo de aciaria elétrica a arco (FEA), se apresenta no aço SAE 1012 como elemento residual, ou seja, não é adicionado e nem é facilmente retirado.

Durante o refino do aço, temos a impossibilidade de oxidação do Cu no banho metálico, em função da ocorrência preferencial de oxidação do Fe e outros elementos. Desta forma o cobre residual permanece presente no aço mesmo após refino secundário e assim se apresenta na composição química final em teores que são apenas estimados em função da carga metálica utilizada (Cada sucata tem um histórico de composição química obtida). Como consequência temos que, o cobre estará presente nos tarugos de aço SAE 1012 utilizados na laminação a quente de perfil I6", produto este crítico em função de sua calibração e dimensional final. O controle defeitos superficiais no perfil I 6" é importante para sua aprovação e ao mesmo tempo difícil de ser atingido em função da sua geometria final. Na Laminação a quente da AcerlorMittal Barra Mansa, se observa trincas superficiais ao longo das abas paralelas e a suspeita é de que a interação de teores de Cu maiores que 0,30% com variáveis do processo (tempo de enformamento, temperatura do forno de reaquecimento, etc) leva à fragilização a quente do aço, podendo ocasionar problemas na qualidade superficial, tais como trincas e formação de palhas durante o processo de laminação a quente. Isto se explica pois durante o processamento a quente ocorre a oxidação preferencial do Fe, que é removido na carepa. Retirado o Fe, forma-se então uma segregação de Cu metálico no contorno de grão da austenita [2]. O Cu segregado, após o aquecimento, se apresenta abaixo da carepa, propiciando durante o processo de conformação mecânica o surgimento de trincas a quente. Isto se deve ao fato do Cupuro possuir temperatura de fusão ($T_f \cong 1083^\circ C$) menor que a empregada no processo de laminação a quente ($\approx 1100^\circ C$), e, portanto, se encontra no estado líquido (Ou pastoso), durante a laminação. Com objetivo de controlar o efeito de fragilização a quente causado pelo Cu, faz-se uso da adição de Níquel (Ni) durante o processo na aciaria elétrica. Um problema é que este elemento é caro, e torna o processo de obtenção de aços "mais simples" como o SAE 1012 economicamente inviável. O controle do efeito de fragilização a quente pelo Cobre se dá pelo fato do Ni interagir com o Cu de maneira a aumentar sua solubilidade no grão austenítico, desta forma reduzindo a segregação de Cu. Estudos também concluíram que o papel do Ni na verdade consiste em formar uma liga com o Cu segregado, com ponto de fusão mais alto que o Cu segregado [2].

O primeiro objetivo deste trabalho é validar que as trincas superficiais que se apresentam nas abas dos perfis I6" são decorrentes desta interação do % de Cobre presente no aço com os parâmetros de laminação a quente.

Uma forma simples e direta de se controlar este efeito fragilizador do Cobre nos aços é descobrir a faixa de tolerância deste residual para o produto final. Este é um dos objetivos deste trabalho, validar a faixa de composição de cobre permitida no aço SAE 1012 aplicado a produção de Perfis I6". O problema é que quando se limita o teor de cobre presente no aço a limites abaixo de 0,35% começa-se a encarecer o aço, pois para trabalhar nestes níveis é preciso trabalhar com carga metálica mais nobre e por isso mais cara.

O ideal seria uma alternativa economicamente mais viável. Ultimamente tem estudos que mostram, que causar a formação de CuS (Sulfeto de cobre) minimiza o efeito da fragilização a quente pelo Cobre. É sabido que o enxofre (S) também é um elemento

nocivo ao aço (fragilizador a quente) e deve ser controlado. O enxofre S que não é removido durante o processo de refino do aço pode apresentar-se na forma de Sulfeto de Ferro (FeS), causando grave fragilização do material. Para evitar a precipitação de FeS, utiliza-se a adição de Mn, e dessa forma, temos a formação de sulfeto de Manganês (MnS). Pesquisas recentes [2-10] relatam que inclusões de sulfetos (como o MnS) maximizam o efeito de segregação do Cu em seu entorno. Propondo uma solução ao problema da fragilidade a quente causada pelo Cu, temos a possibilidade de que a redução da quantidade de MnS formado supostamente reduziria os problemas de fragilidade a quente causada pelo Cu. Estas pesquisas também afirmam [4] que o Cu pode formar sulfetos de Cobre (CuS), podendo assim ser responsável pelo controle do residual de S, assim como o Mn, e dessa forma controlaríamos a fragilização causada tanto pela formação de FeS, quanto pela segregação de Cu no contorno de grão austenítico.

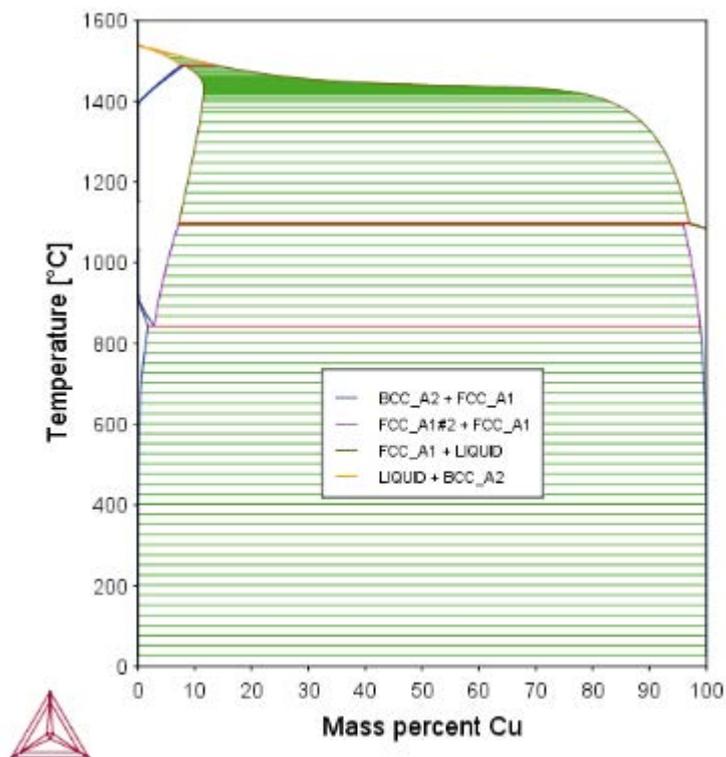


Figura1. Diagrama Fe-Cu- Cobre em estado líquido na temperatura de laminação.

Este trabalho tem por objetivo principal, validar através de análise microestrutural e macroestrutural, da região das trincas observadas nos perfis I 6" laminados a quente, que estas são causadas pelo efeito de fragilização a quente em função da interação dos parâmetros de laminação a quente com o teor residual de Cobre presente no aço SAE 1012 e também definir a melhor faixa deste residual para redução das ocorrências de trincas a quente neste produto. O Fator motivador deste trabalho é redução de rejeitos de produtos com trincas superficiais e assim consequentemente redução de custos.

2 DESENVOLVIMENTO

Os resultados deste trabalho foram obtidos no laboratório metalográfico da ArcelorMittal unidade Resende e também na USP-Lorena. Utilizou-se amostras de três corridas de aço SAE 1012 sob forma de perfil I 6" laminados a quente, a fim

de avaliar a influência do Cobre livre no contorno de grão e na região da trinca. Nestas três corridas o percentual de Cobre estava no limite máximo permitido pelo padrão de composição química (0,35% Cu), o que nos sugere que a faixa é crítica para ocorrência deste defeito.



Figura 2 - Perfil I 6" dimensional e plano de calibração – Nota-se a complexidade das reduções desde o primeiro passe

2.1 Caracterização macroestrutural

Constatou-se por meio da análise macrográfica defeitos superficiais graves nas abas paralelas do perfil I 6" laminado, e também nas faces. Previamente, pode-se constatar ausência de partículas não metálicas (escória e/ou macro inclusões), defeitos de tarugo (trincas, pele dupla e/ou perfurações) que pudessem contribuir para a ocorrência do defeito.

Foram analisadas amostras de 3 corridas de aço SAE 1012 com teores de Cu conforme apresentados na *tabela 1*:

Tabela 1. Composição química das corridas analisadas

Corrida	% Cu
1-53680	0,36
1-67645	0,37

2-42951	0,35
---------	------



(a)



(b)

Figura 3. Amostra de Perfil I 6'' (a) com defeito de trincas a quente nas abas paralelas. (b) Aspecto macrográfico do mesmo (Corrida 1_53680).



(a)



(b)

Figura 4. Amostra de Perfil I 6'' com defeito de trincas a quente nas abas e aspecto macrográfico do mesmo (Corrida 1_67645).



(a)



(b)

Figura 5. Amostracom defeito de trincas a quente nas abas paralelas (a) e (b) aspecto macrográfico realizado com solução de HCl em água 1:1 (Corrida 2_42510).

2.2 Caracterização microestrutural

Para a constatação de possíveis causas que pudessem contribuir para ocorrência dos defeitos grosseiros observados pela análise macrográfica, realizou-se, por meio da microscopia ótica, a análise das regiões onde ocorreram os defeitos, tanto no sentido longitudinal como na seção transversal do perfil I 6''.

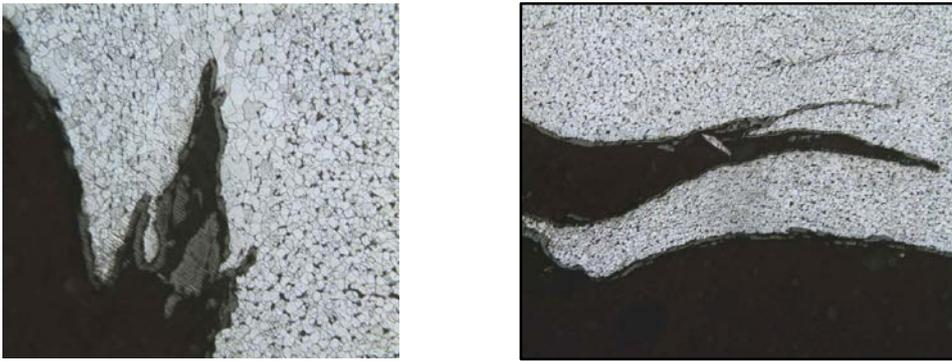


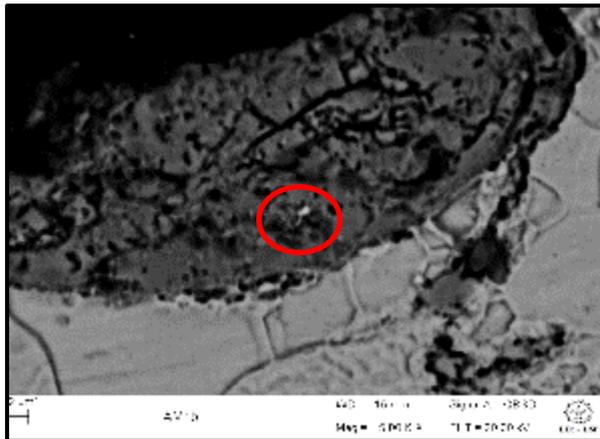
Figura 6. Aspecto micrográfico na região do defeito (trincas).



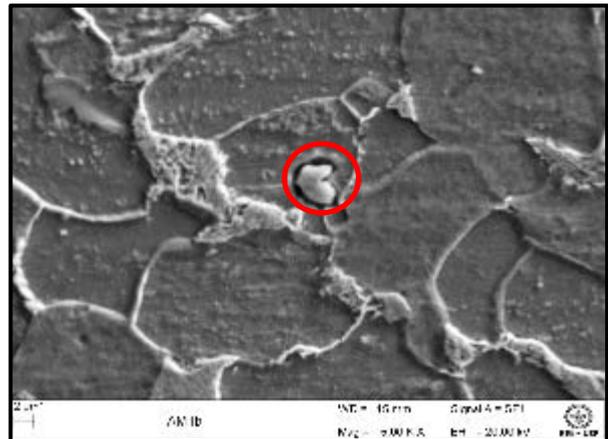
Figura 7. Aspecto micrográfico na região das trincas por meio de ampliação de 2000x evidenciando possíveis partículas de Cobre na matriz ferrítica.

Como pode-se observar, constatou-se a possível presença de partículas de Cobre não dissolvidos na matriz ferrítica a partir da microscopia ótica.

Após esta constatação, realizaram-se análises em MEV-EDS (Microscópio Eletrônico de Varredura). Enquanto o MEV proporciona nítidas imagens das fases e dos microconstituintes presentes, o EDS permite sua imediata identificação. Além da identificação mineral, o equipamento ainda permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados. Com MEV identificamos a presença de Cobre associada ao defeito (trinca) nos perfis I e em que quantidades.

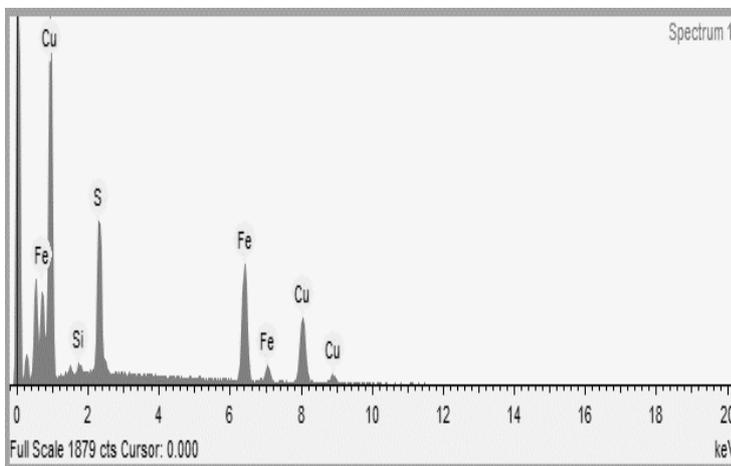


(a)



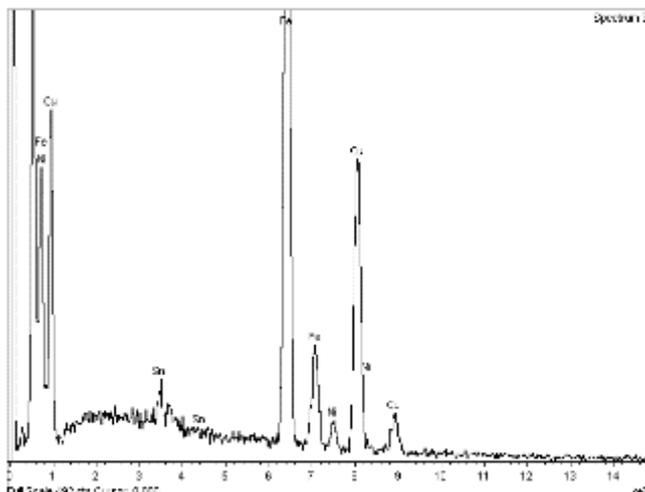
(b)

Figura 8. Aspecto em MEV evidenciando a presença de Cu na carepa (a) e partícula de Cu metálico não dissolvido na matriz ferrítica.



Element	Weight %	Weight % σ	Atomic %
Silicon	0.558	0.099	1.102
Sulfur	9.654	0.214	16.694
Iron	32.029	0.479	31.800
Copper	57.759	0.506	50.404

Figura 9. Análise em MEV-EDS da região do defeito.



Element	Weight%	Weight % σ	Atomic %
Fe K	52.35	0.69	55.99
Ni K	3.04	0.36	3.10
Cu K	42.28	0.69	39.74
Sn L	2.33	0.38	1.17
Totals	100.00		

Figura10. Análise em MEV-EDS da região do defeito.

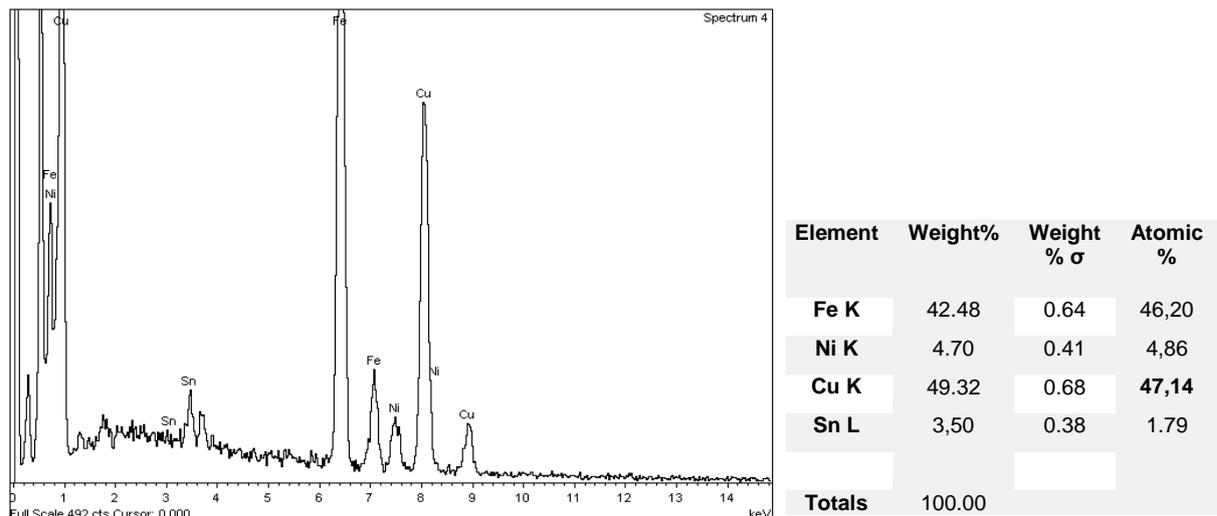


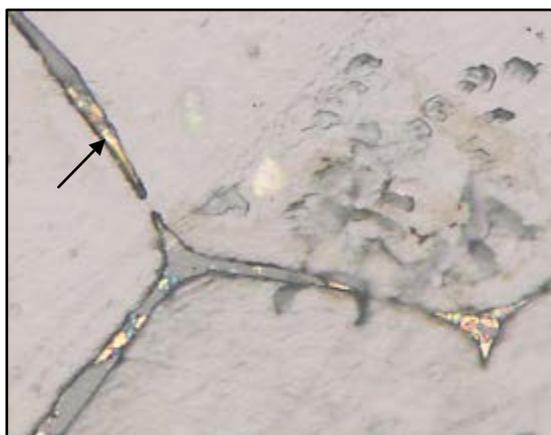
Figura11. Análise em MEV-EDS da região do defeito.

2.3 Experimentos em forno de simulação:

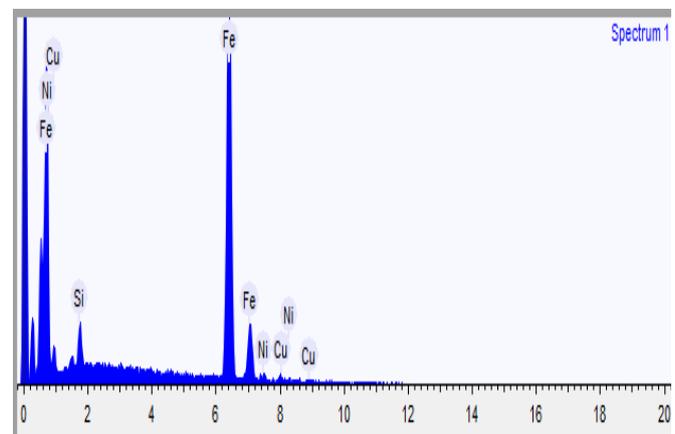
Após a constatação da presença de Cu na região dos defeitos, realizou-se uma experiência com objetivo de comprovar a migração do Cu líquido, por meio do contorno de grão austenítico, para a superfície do material. Utilizou-se o método do aquecimento em forno do tipo mufla, com resfriamento realizado em água, cuja temperatura era ambiente (aprox. 25°C). As imagens foram obtidas por meio da microscopia ótica. As condições nas quais esta experiência foi feita estão na tabela a seguir:

Tabela 2. Composição química das corridas analisadas

Corrida	% Cu	T _{forno} (°C)	t _{forno} (min)	T _{laminação} (°C)
1_53680	0,36	1150	40	1000
1_67645	0,37	1180	50	1000
2_42951	0,35	1195	60	1000



(a)



(b)

Figura 12. Microscopia ótica após o método para revelação do Cu (a) e espectro da região em MEV-EDS.

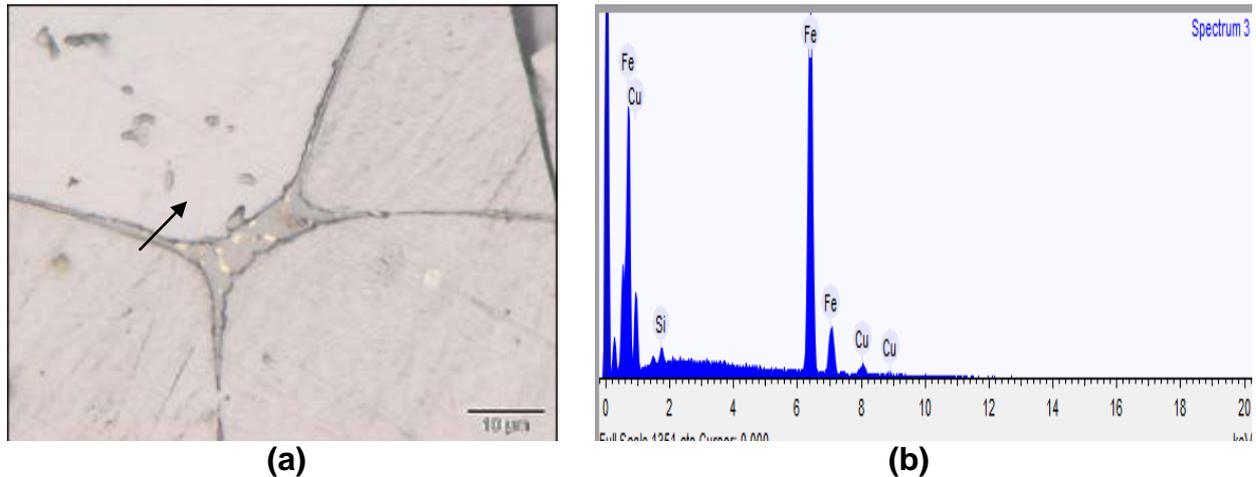


Figura 13. Microscopia ótica após o método para revelação do Cu (a) e espectro da região em MEV-EDS.

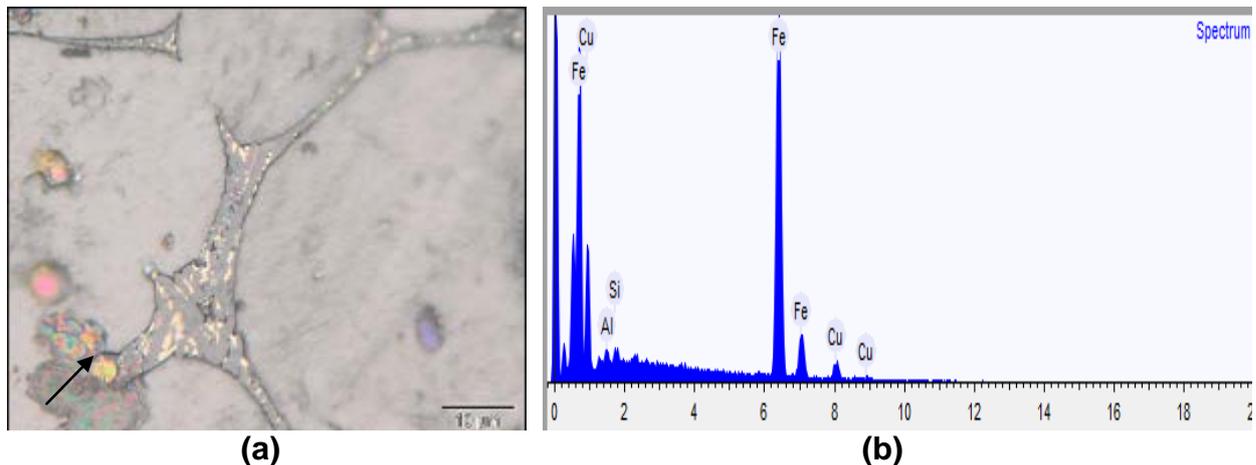


Figura 14. Microscopia ótica após o método para revelação do Cu (a) e espectro da região em MEV-EDS.

Os experimentos realizados em forno de mufla serviram para nos mostrar que mesmo com tempo um pouco menor de forno e variação de temperaturas possíveis para o forno de reaquecimento da laminação a quente da ArcelorMittal Barra Mansa, para esta faixa de cobre entre 0,35 % e acima leva a ocorrência de cobre livre no contorno de grão austenítico, o que gera a trinca a quente durante a laminação do Perfil I 6". Este cobre livre, na temperatura de laminação de 1000°C, chega a se apresentar em estado pastoso, o que facilita a ocorrência de trincas a quente no produto acabado.

Após estes experimentos foi feita análise estatística sobre a base de dados de composição química do aço SAE 1012 para analisar a faixa onde ocorre o defeito de trincas a quente e se observou o seguinte:

- Corridas de aço SAE 1012 com cobre de até 0,28% - 89% sem defeitos
- Corridas de aço SAE 1012 com cobre entre 0,29% e 0,32% - 68% sem defeitos
- Corridas de aço SAE 1012 com cobre acima de 0,33% - 86% com defeitos

(Universo de 400 corridas de aço SAE 1012 de um ano e meio de produção). Desta forma se estabelece com este trabalho a necessidade de restringir a faixa máxima de cobre residual no aço SAE 1012 aplicado na produção do perfil I 6” alterando-se o padrão de máximo 0,35% para máximo 0,30%. Sendo agora necessário avaliar através de um DOE duas faixas possíveis (0,25% e 0,30%) de Cobre com interação de temperatura e tempo de forno de reaquecimento. Assim espera-se assegurar uma faixa segura que leve ao mínimo de rejeito por trincas a quente possível. Além disso, será feito o teste do aço SAE 1012 com manganês no mínimo do padrão e Cobre mais alto, para validar a hipótese de que a formação de CuS (Sulfeto de Cobre) acontece e minimiza ou elimina a ocorrência de trincas a quente.

3 CONCLUSÃO

A partir dos resultados experimentais e fundamentos teóricos podemos afirmar que as trincas à quente nos perfis I 6”, produzidas na laminação a quente da ArcelorMittal unidade Barra Mansa, são resultado da interação de teores residuais de Cobre com o processo de laminação à quente (tempo, temperatura e atmosfera do forno de reaquecimento). Constatou-se a partir das análises microestruturais e MEV-EDS a presença de Cobre nas regiões do defeito (trincas).

Estes testes também serviram para concluir que a faixa de residual de cobre aceitável no padrão atual para o aço SAE 1012 de 0,35% Cu é crítica para ocorrência levando-se a uma revisão imediata desta faixa máxima aceitável para 0,30% de Cobre.

Este trabalho abre a possibilidade ainda de outras análises a serem complementadas: verificação da segurança da faixa de cobre máxima de 0,30% através de DOE (variando tempo e temperatura de forno), avaliação da formação de sulfeto de cobre CuS como alternativa para mitigar a ocorrência das trincas a quente e uma análise mais profunda deste defeito sob o ponto de vista de conformação mecânica (análise da influência da calibração e da interação com o % de cobre presente no aço SAE 1012).

Agradecimentos

O autor agradece a todos aqueles que tornaram possível a realização deste artigo em especial ao Sr. Hélio Fidêncio Linhares, metalógrafo da ArcelorMittal unidade Resende e aos professores André Costa e Silva e José Adilson pelo apoio técnico prestado.

REFERÊNCIAS

- 1 MÜLLER, A.; Solidificação e análise térmica dos metais. Editora: UFRGS; 1ª edição, 2002.
- 2 JARDIM, J. C.; COMINELI, O. “Benefícios e problemas do Cobre nos aços C”
- 3 VAYNMAN, S.; FINE, M. E. and BHAT, S. P. “High Strength Copper Steel for Rail Tank Cars to Bridges”. Copper Applications in Metallurgy of Copper and Copper Alloys, 2006.
- 4 COLPAERT H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 3a Edição, Ed. Edgard Blucher Ltda. pg. 123, 1975.

- 5 JARDIM, J. C.; COMINELI, O. and DIPPENAAR, R. "Investigations on the Influence of Nickel on the "HOT SHORTNESS" of C-Mn-Al, Cu containing steels". In: 45th ROLLING SEMINAR – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008, Porto de Galinhas. Pernambuco: ABM, 2008.
- 6 ABUSHOSHA, R.; COMINELI, O and MINTZ, B. "Influence of Ti on hot ductility of C-Mn-Al steels", R. Materials Science and Technology. V. 15, p. 278-286, March 1999, The Institute of Materials, 1 Carlton House Terrace, London.
- 7 Koji Shibata, Masaki kaga, Hiroshi Uchino "Suppression of surface hot shortness due to Cu in recycled steels", Materials transactions, vol 43, n° 3 (2002) pp 292 to 300 |