

BENEFÍCIOS E PROBLEMAS DO COBRE NOS AÇOS C¹

Oswaldo Guilherme Comineli²

Resumo

Aços contendo cobre apresentam um alto potencial de aplicação, resultado dos benefícios deste elemento nas propriedades dos aços estruturais. Além do envelhecimento por precipitação, que resulta em excelente combinação de tenacidade e resistência mecânica, o cobre produz o efeito de pátina que aumenta consideravelmente a resistência à corrosão. Porém, o uso do cobre como elemento de liga é muito limitado, por causa do sério problema de fragilidade a quente na fabricação do aço, que provoca trincas no lingotamento contínuo, laminação a quente e soldagem. Esta limitação reduz a reciclabilidade das sucatas, na medida em que a contaminação com cobre tende a aumentar, resultado do aumento da quantidade de componentes eletrônicos na automação dos automóveis e eletrodomésticos descartados. O controle da fragilidade a quente é pela adição de níquel, que encarece o aço. Resolvendo-se o problema da fragilidade a quente, além do benefício ambiental, pode-se aumentar o uso destes aços patináveis, para aplicações em construção civil e mecânica, estruturas *on shore* e *offshore*, automobilística, naval, ferroviária e dutos. Este trabalho é uma revisão sobre o efeito do cobre nos aços C e também propõe uma nova tecnologia patenteada para estes aços patináveis.

Palavras-chave: Aços patináveis com cobre; Fragilidade a quente; Inclusões; CuS.

ADVANTANTAGES AND PROBLEMS OF THE COPPER ADDITON IN CARBON STEELS

Abstract

Copper containing steels have a great potential of application as a result of the age hardening that increases the mechanical and corrosion properties of the copper containing weathering steels. However, its broad use is restricted due to the "hot shortness" which causes cracks on the hot processing of those steels on rolling, welding and continuous casting. Restrictions of additions of copper in steels also worsens the environmental problem, once its presence in the scrap is also increasing due to the increased amount of electronics devices boarded in cars and electrical appliances discarded. That ends in increase of cost of contaminated scraps and turns its use inviable, so it has to be discarded in the nature generating environmental problems. The control of the hot shortness is by addition of nickel, which increases the price of the steel. Finding an easier solution for the problem of hot shortness, cooper containing weathering steels could make them to be widely used in civil and mechanical construction, on shore and offshore structures, automobile, shipping, railroad equipments and pipelines with considerable environmental benefits. This work is an overview of the influence of the Cu addition in C steels and introduces a patented technology for a novel conception of environmentally friendly weathering copper containing steels.

Key words: Weathering steels; Hot shortness; Inclusions; Copper; CuS.

¹ Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

² Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil – comineli@npd.ufes.br

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A adição do cobre nos aços é reconhecidamente de grande importância,⁽¹⁾ tendo em vista seus consideráveis benefícios no aumento de resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão. Portanto, os aços patináveis contendo cobre apresentam um grande potencial de utilização em estruturas soldadas para a construção naval e petrolífera.

Por outro lado, dentro da planta siderúrgica, o processamento do aço com alto cobre é um pesadelo, por causa da fragilidade a quente (*hot shortness*), que gera trincas, dificulta muito seu processamento a altas temperaturas e acaba encarecendo o aço. Pesquisas recentes⁽²⁻¹⁰⁾ mostram avanços que podem ajudar a solução deste problema.

Paralelamente, a contaminação de cobre nas sucatas de aço tende a crescer, na proporção em que aumenta a eletrônica embarcada nos automóveis e eletrodomésticos descartados. Como os componentes eletrônicos estão menores a cada dia, a separação do cobre desta sucata torna-se difícil e cara e estes resíduos contaminados acabam descartados na natureza.

Se for resolvido este problema de fragilidade na fabricação, a adição de cobre nos aços só traz benefícios, tanto no aspecto tecnológico como no ambiental. Atualmente o problema é reduzido com a adição de níquel no aço, embora com custo elevado.

A fragilidade a quente é resultado da oxidação preferencial do ferro no processamento a quente do aço, que resulta em segregados de baixo ponto de fusão por conter alta quantidade de cobre. Este segregado pode formar uma fase líquida na temperatura de processamento, fragilizando o aço e produzindo trincas durante o lingotamento contínuo, laminação e soldagem.

O presente trabalho é resultado de pesquisas sobre a fragilidade a quente causada pela segregação de cobre, e sugere uma nova tecnologia, já patenteada, para se minimizar os efeitos nocivos deste elemento na fabricação dos aços patináveis. Com esta nova concepção, poderemos desenvolver um aço com baixo custo, reunindo os grandes benefícios da adição de cobre nas propriedades tecnológicas e melhorar a reciclabilidade das sucatas contaminadas que poluem o meio ambiente.

1.1 Os benefícios

Propriedades de resistência à corrosão, resistência mecânica e impacto dos aços contendo cobre.

1.1.1 Corrosão

A adição de cobre nos aços proporciona uma combinação de propriedades de resistência à corrosão, tenacidade e resistência mecânica que vem despertando interesse de pesquisadores para o uso destes aços em estruturas – os chamados aços patináveis ou *weathering steels*. Publicação recente⁽¹⁾ reporta que a adição de cobre aumenta consideravelmente a resistência à corrosão dos aços patináveis, comparando aos aços estruturais básicos (A 36). A adição de cobre resulta numa melhora de resistência à corrosão que é aumentada conforme aumenta a quantidade de cobre adicionado, conforme mostram as Figuras 1 e 2.

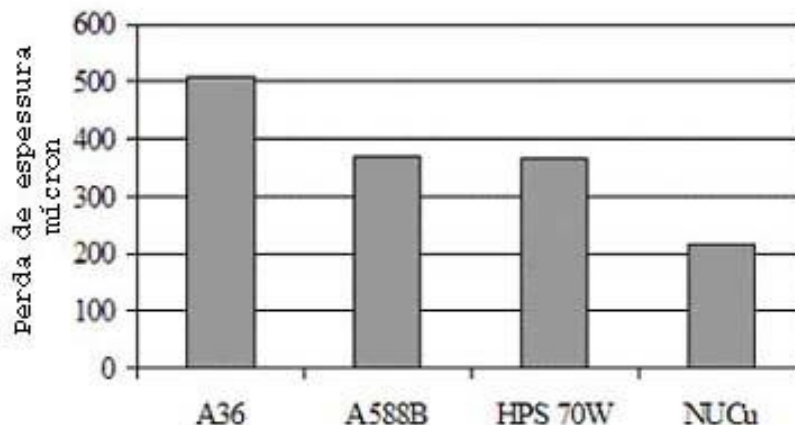


Figura 1 - Perda de espessura em teste de corrosão acelerada (Conforme padrão SAE J2334) - Aços ASTM: A 36 (0,3%C-1%Mn); A 588B (0,2%C-1%Mn-0,5%Cr; 0,4%Ni; 0,3%Cu); HPS 70W (0,11%C-1,2%Mn; 0,3%Cu; 0,3%Ni; 0,6%Cr); NUCu (0,06%C; 0,6%Mn; 1,4%Cu; 0,8%Ni; 0,004Nb; 0,03Ti).⁽¹⁾

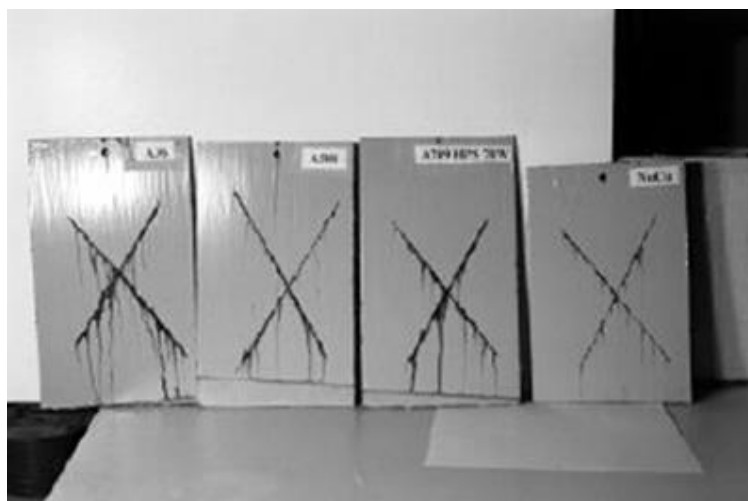


Figura 2 - Corrosão dos aços pintados mostrados na figura 1, depois de 3 semanas em câmara de sal, 35°C. Da esquerda para a direita:(A36; A588; ASTM HPS 70W; NUCu).⁽¹⁾

1.1.2 Propriedades mecânicas

Os aços NUCu-60 (0,03%C; 0,5% Mn; 0,5%Ni e 1,3% Cu e pequenas adições de Ti e Nb)⁽¹⁾ testados em laboratório apresentam uma tenacidade à fratura bastante alta, a ponto dobrar o corpo-de-prova (sem fraturar durante a queda do martelo) Charpy, mesmo a temperaturas de -79°C(>360 J). Atualmente, estas pesquisas estão empenhadas em desenvolver estes aços patináveis para ambientes agressivos, como as atmosferas marinhas, e melhorar ainda mais as propriedades destes aços contendo cobre. Os resultados já produziram ligas com 1500 MPa de tensão de escoamento.

O fundamento desta tecnologia está no fato do cobre produzir o fenômeno de envelhecimento por precipitação, ou seja, formar nanopartículas levemente incoerentes com a matriz, que atuam localmente no movimento das discordâncias em hélice do ferro, conforme mostra microscopia eletrônica na Figura 3.

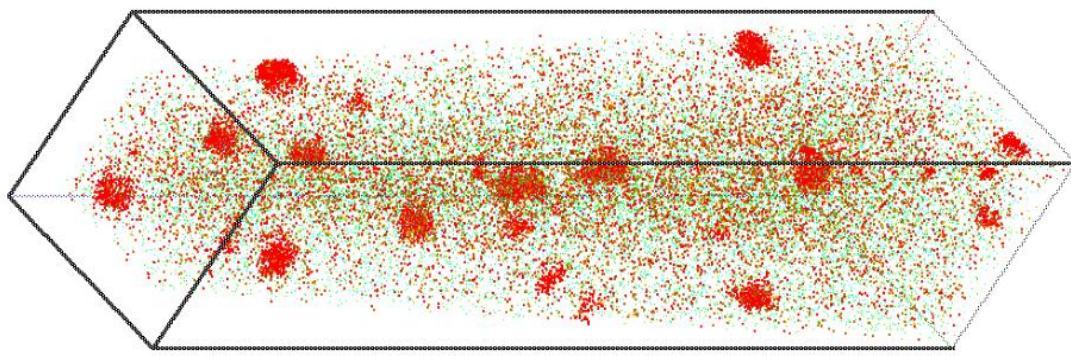


Figura 3 – Microscopia eletrônica mostrando distribuição do Cu e Ni em aços. Manchas: Precipitação do cobre em aço; Pontos: Vermelhos=Cu; Verdes=Ni; Aço 0,06%C; 1,36%Cu; 0,85%Ni; 0,45%Mn - Solubilizado e envelhecido até resistência máxima a 500°C. Dimensões $14 \times 14 \times 101(\text{nm})^3$.⁽¹⁾

Nestas pesquisas não se leva em conta o problema sério de fragilidade a quente causado pelo cobre na fabricação destes aços, que é o foco deste trabalho.

Nos dias de hoje, para minimizar este problema, adiciona-se níquel na fabricação destes aços. Como regra geral, quando a composição do aço excede 0,4%Cu procede-se a uma adição similar de níquel para evitar o problema de trincas. Isto aumenta consideravelmente o custo.

Resultados recentes⁽²⁻¹⁰⁾ indicam que o cobre também precipita nos aços na forma de CuS (Figura 4). Outra conclusão importante destas mesmas pesquisas é de que o cobre também segrega no entorno das inclusões de MnS. Baseando-se nestes fatos, foi patenteada uma proposta de uma nova metodologia de combate ao problema de fragilidade a quente. Desta forma, em não havendo manganês no aço não teremos inclusões de MnS que são os pontos de segregação do cobre. Como o cobre também é formador de sulfeto, ele poderá substituir o manganês na função de estabilizar o enxofre, formando então precipitados de CuS, que é uma fase mais fina e dispersa na matriz, ou mesmo dissolvido na ferrita. Desta forma o cobre produz os seus benefícios conhecidos, ao invés de formar a segregação causadora da fragilidade a quente.

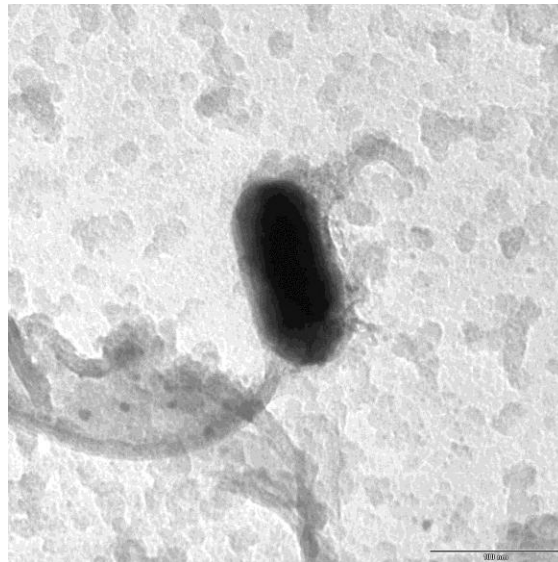


Figura 4 – Partícula de CuS em aço com 0,5%Cu resfriado a 100°C/min e testado a 850°C – Microscopia Eletrônica de Transmissão – tamanho 100nm, 200.000X.⁽⁵⁾

1.1.3 Ambiental – reciclabilidade

O baixo índice de impacto ambiental junto com as propriedades tecnológicas e o baixo custo são requisitos básicos nas atividades econômicas modernas, na medida em que cresce a pressão por atividades ambientalmente corretas.

Assim, também para um novo material, a redução do nível de agressão ao meio ambiente também se torna mais importante a cada dia e pode ter um peso decisivo para o seu sucesso comercial.

Os metais em geral, e o aço em particular, são materiais de boa reciclabilidade. Contudo, a contaminação de sucata por alguns elementos como o cobre, proveniente de componentes eletroeletrônicos, contidos em eletrodomésticos e automóveis descartados, pode tornar esta sucata inservível ou encarecer a sua reciclagem. Com o crescente aumento da automação e redução de tamanho destes componentes, o problema de contaminação só tende a piorar⁽¹¹⁾ e a sucata contaminada com cobre torna-se inviável e acaba sendo descartada na natureza.

Portanto, em se resolvendo o problema da fragilidade a quente, a adição do cobre nos aços passa a ser um benefício não só tecnológico como também ambiental.

1.2 O Problema

1.2.1 Fragilidade a quente

Elementos mais nobres que o ferro, como o cobre, não podem ser removidos por oxidação do banho de aço fundido nos processos convencionais de aciaria. Portanto, o cobre presente num aço líquido irá fatalmente estar presente no produto final.

Durante o processamento do aço solidificado ocorre a oxidação preferencial do ferro que é removido nas carepas. Retirado o ferro, forma-se então uma segregação de cobre metálico, não oxidado, no contorno de grão da austenita.^(2,3) Tradicionalmente, a fragilidade a quente é explicada⁽¹²⁾ como resultado desta oxidação preferencial do ferro, o que acaba por formar uma fase rica em cobre. Como a temperatura de fusão deste cobre segregado é mais baixa, ele pode estar líquido na temperatura de deformação, provocando o fenômeno da fragilidade a quente que causa trincas durante o processamento a quente do aço - lingotamento e laminação. Portanto, a quantidade de cobre na sucata carregada deve ser rigorosamente controlada.

1.2.2 Soluções do problema

1.2.2.1 Solução tradicional pela adição de níquel

O remédio para a fragilidade é a adição de níquel, cuja ação é explicada pelo fato deste elemento aumentar a solubilidade do cobre na austenita, desta forma reduzindo a segregação do cobre.⁽²⁾ Contudo, investigação usando Microscopia Eletrônica Varredura (MEV)⁽²⁾ aponta que o níquel forma uma liga com o cobre segregado, conforme mostra a Figura 5. Na verdade, a função principal do níquel é formar uma liga de ponto de fusão mais alto que o cobre puro segregado, desta forma retardando a formação do filme líquido.

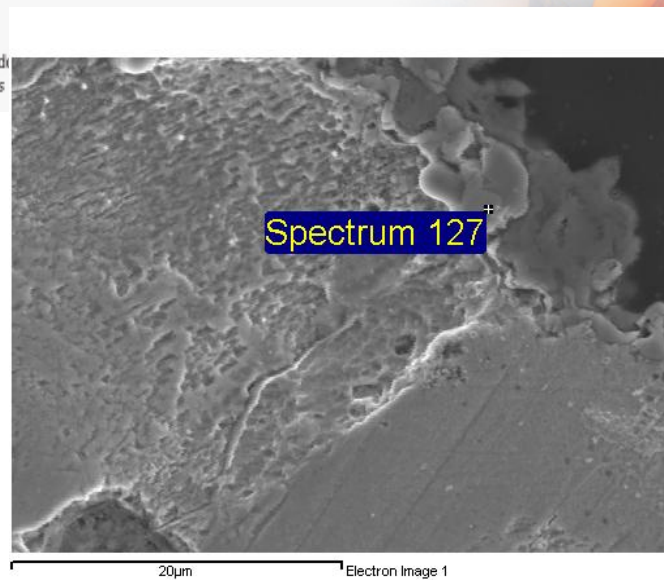


Figura 5 – Liga de Cu/Ni (~5,8%Cu;10,5%Ni) em aço com 0,5%Cu; 0,5%Ni, testado ao ar; temperatura de teste 800°C. 2000X

Por outro lado, a presença do cobre é também importante para o aço, pois melhora as propriedades de resistência mecânica, corrosão e impacto. Resumindo, a adição do cobre no aço é um problema sério dentro da Usina. Fora dela ele bastante benéfico para as propriedades do aço. Portanto, resolvido o problema da fabricação, a adição do cobre só traz benefícios.

1.2.2.2 Nova solução sugerida – eliminação do manganês do aço

- **Fundamentação científica**

A fundamentação científica deste trabalho é resultado de extensas pesquisas realizadas nos últimos anos em investigação da fragilidade a quente dos aços.

É sabido que o enxofre é um elemento nocivo aos aços e deve ser controlado. Num processo similar ao que ocorre com o cobre, o enxofre residual (que não é removido no processamento do aço líquido), pode precipitar-se na forma FeS causando trincas durante o processamento a quente do aço, devido ao seu baixo ponto de fusão. Para se evitar a precipitação de FeS, adiciona-se manganês ao aço, de forma a estabilizar este enxofre na forma de inclusões de sulfeto de manganês (MnS) no interior do aço. Assim o problema de fragilidade a quente causado pelo enxofre fica resolvido. Resta então o problema similar de fragilidade a quente causada pelo cobre.

- **As pesquisas**

Solução da fragilidade a quente – menos problemas de produção e menor custo

Pesquisas recentes,⁽²⁻¹⁰⁾ sobre o problema de fragilidade a quente relatam que inclusões de sulfetos (como MnS) pode ser muito nociva para a fragilidade a quente causada pelo cobre, uma vez que a presença do enxofre atrai o cobre e acaba por formar segregação do Cu no seu entorno (Figuras 6-10). Esta constatação é de grande importância no combate a trincas a quente, pois aponta para o fato de que a formação da segregação do cobre, que é a causa da fragilidade a quente, fica muito piorada se o aço tiver inclusões. Pesquisa sobre nucleação de ferrita⁽¹³⁾ também relata a presença de Cu no entorno de MnS, num fenômeno similar.

A adição de níquel é uma solução efetiva para o problema, já que o níquel forma uma liga com o cobre, que tem ponto de fusão mais elevado, e reduz a possibilidade de fragilidade a quente⁽²⁾ e trincas.

Por outro lado, para que produza os efeitos benéficos ao aço o cobre deve estar dissolvido na matriz ao invés de segregado.

Estas investigações indicam ainda que o Cu pode estabilizar o S, precipitando-se na forma de CuS, figura 4. Portanto, em se eliminando o manganês do aço não teremos as inclusões de MnS, que são os pontos de segregação do cobre. O cobre então poderá fazer o papel do manganês em estabilizar o enxofre, na forma de CuS. Como o CuS é de tamanho muito menor que as inclusões de MnS, teremos uma conseqüente melhoria das propriedades mecânicas. Uma vez que as inclusões são reduzidas ou mesmo extintas, o cobre que não foi estabilizado pelo enxofre fica disperso na matriz do aço. Assim, substituindo-se o manganês pelo cobre, o problema de fragilidade a quente pode ser reduzido ou eliminado, e não será necessária a adição de níquel para evitá-lo. Portanto, estará controlado o efeito maléfico do cobre nos aços, podendo-se então permitir os benefícios da sua adição e permitir um maior uso de sucata contaminada.

O foco deste trabalho consiste em desenvolver um novo tipo de aço patinável, de baixo custo, com excelentes propriedades mecânicas, de resistência à corrosão atmosférica, soldabilidade e ambientais, fundamentado na redução gradual do manganês até a sua substituição total pelo cobre, de forma a evitar a formação de inclusões e combater a fragilidade a quente.

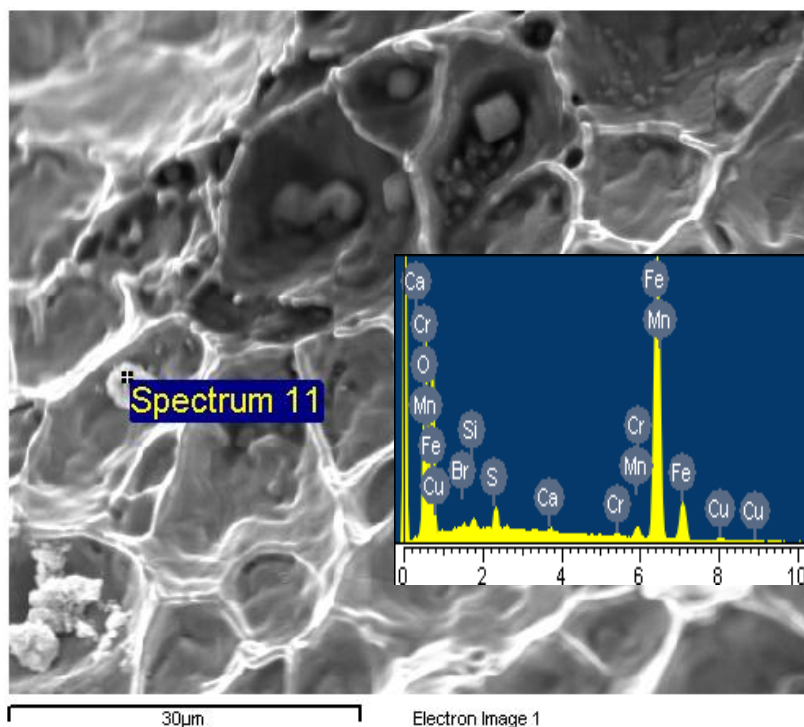


Figura 6 – Segregação de cobre no entorno de inclusão de Ca/MnS na superfície de fratura a quente e respectiva análise de raios X. Aço 0,5%Cu, resfriado a 25°C/min e testado a 800°C.^(2,3)

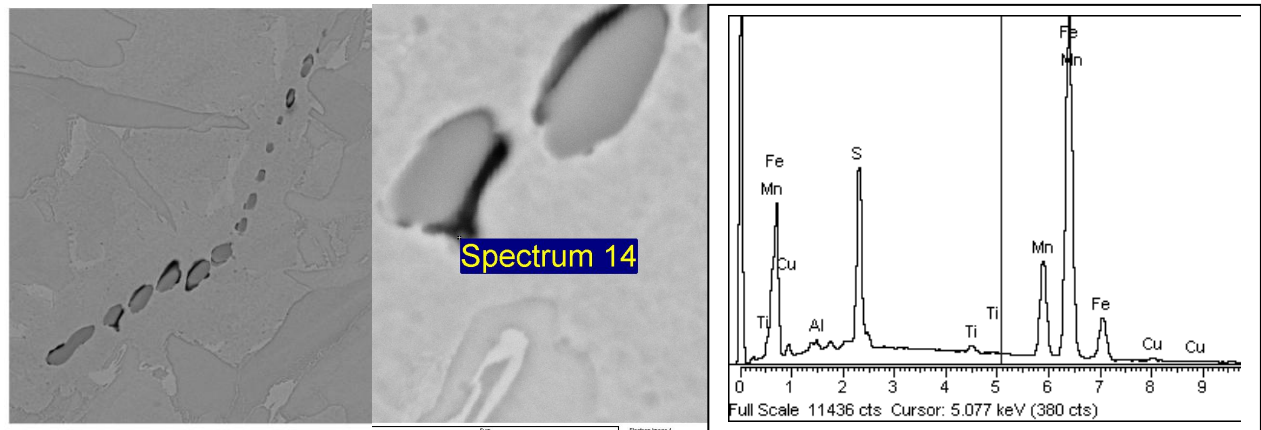


Figura 7 – Mesmo aço e temperatura da figura 6 - taxa de resfriamento de 200°C/min. – esquerda – linha de inclusões de MnS - 1.200X; centro - detalhe mostrando segregação de Cu no entorno da inclusão de MnS – 6.100X - e o respectivo espectro.^(2,3)

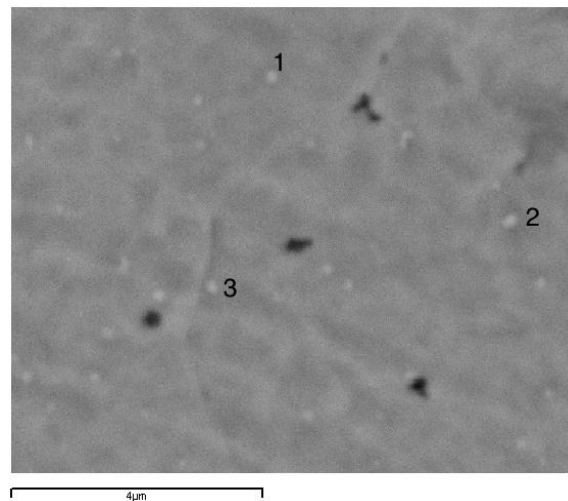


Figura 8 – Segregação de Cu no entorno de inclusões no mesmo aço na figura 6 (Média de ~15%Cu nas partículas 1, 2 e 3) envolvendo inclusões de CaS/MnS em aço contendo 0,5%Cu; C-Mn-Al testado a 800°C. Tamanho médio das partículas 180nm; taxa resfriamento 25°C/min - 10.000X (MEV-BEI).^(2,3)

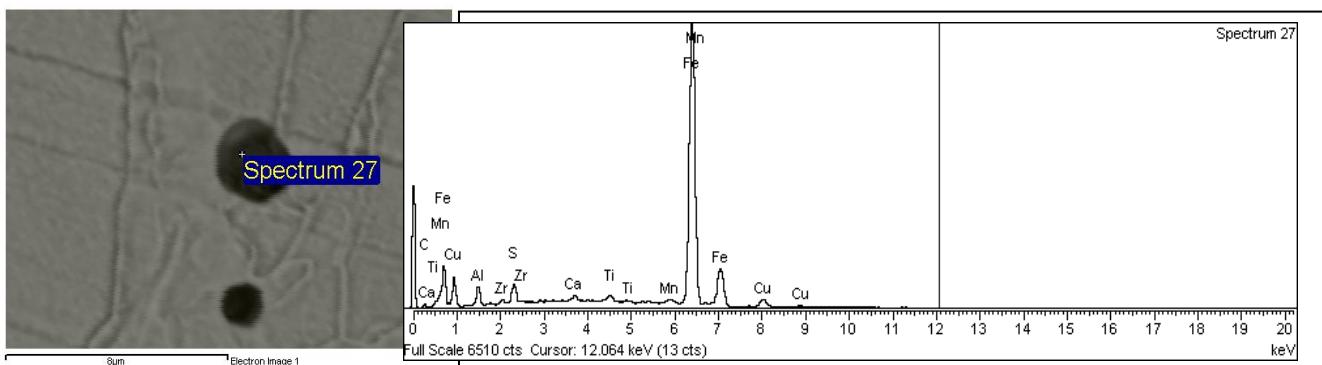


Figura 9 – Cu no entorno de inclusão e espectro respectivo (~5%Cu) na matriz. 4.500X - Aço 0,5%Cu, C-Mn-Al, reaquecido a 1330°C, taxa de resfriamento de 100°C/min e testado a 850°C.^(2,3)

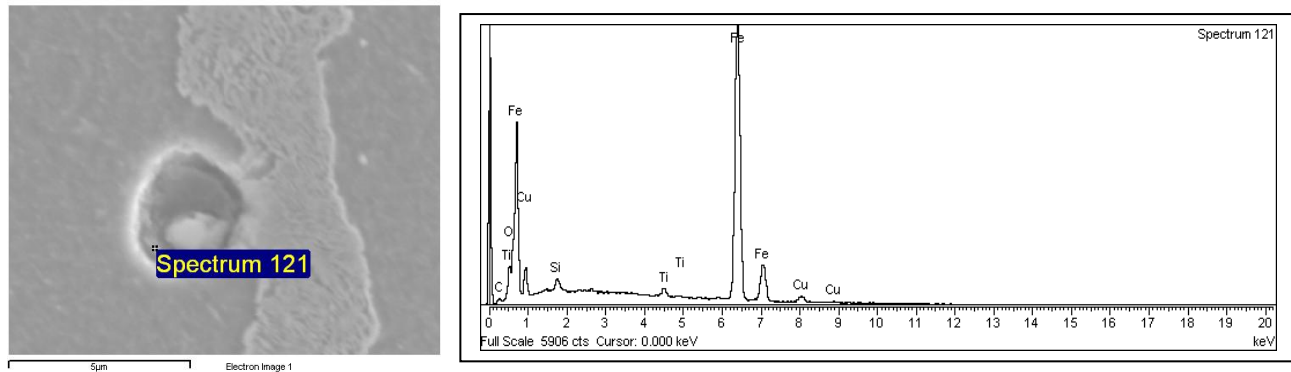


Figura 10 - Segregação de Cu (~3,5%Cu) no entorno de inclusão e espectro respectivo. 6.000X Aço 0,5%Cu reaquecido a 1330°C, resfriamento a 25°C/min e testado a 850°C.^(2,3)

2 DISCUSSÃO

O fato de se produzir aços com maior teor de cobre - que é gratuito por ser originário de sucata - e menor adição de níquel, irá reduzir custos e conferir melhores propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, possibilitando ainda a redução de peso em estruturas e aumentando a sua vida útil quanto à corrosão. Estes aços são chamados Aços Patináveis (*Weathering Steels*), por serem empregados em estruturas metálicas sem pintura e expostas ao tempo.

Analisando-se pela ótica do usuário, a adição de cobre é claramente benéfica aos aços patináveis, quer no aspecto tecnológico quer no ambiental. Porém, dentro da siderúrgica, a dificuldade de fabricação leva ao aumento de custo, seja devido a trincas na linha de produção de placas e laminados ou pelo preço do níquel para reduzir o problema. Este trabalho propõe a substituição parcial ou, preferencialmente, total do manganês pelo cobre, como uma alternativa viável para a solução do problema de trincas a quente, o que pode viabilizar definitivamente a aplicação deste aço. Como não existe aço totalmente livre de manganês, esta teoria ainda não foi testada plenamente. No entanto, se observarmos dentre os aços aqui apresentados, nas figuras 1 e 2, nota-se uma tendência natural no sentido da redução de manganês: de 1%Mn (1% Mn; 0,3%Cu; 0,4%Ni para o aço A588B) para 0,6%Mn (0,6%Mn; 1,4%Cu; 0,8%Ni para o aço NUCu). Paralelamente, a adição de cobre aumenta, se comparada aos 0,3%Cu; ~1%Mn do aço HPS 70 W. Ainda, a adição proporcional Ni:Cu para evitar a fragilidade a quente também vem sendo reduzida - (Ni:Cu ~1,3 para o aço A588B; Ni:Cu ~1, para o HPS 70 W e Ni:Cu ~0,6 para o aço NUCu). Observa-se claramente que comercialmente o aumento de cobre já vem acompanhando uma redução de manganês e níquel. Esta é uma evidência de que os fundamentos teóricos aqui apresentados já ocorrem naturalmente, embora seus princípios ainda não tenham sido apresentados em trabalhos científicos.

Aumentando-se o cobre e reduzindo, ou eliminando, o manganês podemos então resolver o problema de fragilidade a quente na fabricação dos aços patináveis e ao mesmo tempo barateá-los.

Esta ação resultará no aumento de uso de sucata altamente contaminada com Cu na produção de uma família de aço patinável ambientalmente amigável.

Como não existe sucata livre de manganês, haverá algum Mn residual no aço reciclado que irá produzir algumas inclusões de MnS. Assim, o cobre terá menos

pontos de segregação e a fragilidade a quente deverá ser reduzida. Com o manganês reduzido e o cobre elevado, o enxofre será então estabilizado na forma de CuS em vez de MnS. O cobre restante ficará dissolvido na ferrita, o que é importante no processo de melhoria das propriedades por envelhecimento por precipitação. Assim, adicionalmente, em reduzir a segregação de cobre, a redução da quantidade de inclusão deverá ainda melhorar as propriedades de impacto do aço.

Em sendo baixa a quantidade de enxofre, a adição de níquel para controle da fragilidade a quente dos aços provenientes de sucata deverá ser menor, ou mesmo desnecessária, na medida em que a quantidade de inclusões vai sendo reduzida. A adição do níquel para prevenção de trincas nestes aços vai sendo desnecessária, e a tenacidade a fratura deverá também ser aumentada.

Novos aços sem manganês e com o enxofre totalmente estabilizado pelo cobre poderão ser totalmente livres de manganês para esta finalidade e também dispensarão a adição de níquel. Contudo, eles terão que ser produzidos a partir de novas corridas de gusa sem manganês ou ferro esponja. Estes pontos precisam de maior investigação.

3 CONCLUSÃO

A partir destes resultados experimentais e fundamentos teóricos, fica claro que o fator limitante para a maior utilização de aços patináveis, contendo alto cobre, é a fragilidade a quente. Portanto, em se resolvendo este problema, podemos desenvolver um aço patinável com excelentes propriedades, baixo custo e “ecológico”, para aplicações estruturais, a partir da substituição do Mn pelo Cu e maior reciclabilidade da sucata contaminada. Numa primeira etapa, basicamente será necessário investigar aços com baixo Mn e alto Cu, tendo em vista que praticamente não existe sucata livre de manganês. Por causa do baixo Mn e da precipitação de enxofre como CuS, o aço deverá ter menos inclusões e menos segregação de cobre que se forma no entorno delas. Como o S é estabilizado pelo Cu, deve-se reduzir a possibilidade de trincas a quente na soldagem, lingotamento contínuo e laminação. Posteriormente, numa segunda etapa, deverão ser investigados aços totalmente livres de manganês, produzidos a partir de minérios e matéria-prima mais selecionada. Portanto, sobre os benefícios e problemas da adição de cobre nos aços C, que é o objetivo do presente trabalho, podemos concluir:

- 1 - O cobre produz o envelhecimento por precipitação, que resulta em melhorias das propriedades mecânicas, como resistência e tenacidade à fratura dos aços C;
- 2 – A adição do cobre nos aços é também benéfica por causa do efeito pátina, que resulta em considerável aumento de resistência à corrosão;
- 3 - O problema de fragilidade a quente na fabricação dos aços contendo cobre é por causa da segregação do cobre, principalmente no entorno das inclusões de MnS; a oxidação preferencial do ferro em relação ao cobre é um fator de menor importância;
- 4 – A ação do níquel no combate à fragilidade a quente é efetiva e fundamenta-se na formação de uma liga com o cobre segregado, que aumenta a temperatura de fusão e retarda formação da fase líquida e a fragilização;
- 5 – Reduzindo-se a quantidade de inclusões pode-se reduzir o problema de fragilidade a quente;
- 6 - O cobre forma precipitados de CuS e pode ser usado como estabilizador do S em aços livre de manganês, de forma a evitar a formação de MnS e a fragilidade a

quente. Por ser menos eficiente formador de sulfetos que o manganês como, e para ser mais efetivo a relação Cu:S deve ser mais alta que a relação Mn:S;

7 – A solução do problema da fragilidade a quente causada pelo cobre pode resultar em benefícios ambientais por causa de uma maior reciclabilidade de sucatas contaminadas com cobre.

De forma a se produzir aços com excelente combinação de valor tecnológico, comercial e ambiental, duas novas famílias de aços patináveis (contendo Cu, com baixo ou nenhum Mn) foram patenteadas, conforme são descritas abaixo:

Família 1) – “Aços Ecológicos” ou “aços verdes”: Produzidos a partir de sucata contaminada com cobre. Estes aços têm um grande apelo ambiental por causa da possibilidade de uso de sucata altamente contaminada, que é inservível na fabricação convencional. Pelo fato de serem produzidos a partir de sucata, estes aços terão sempre algum Mn, ainda que residual, e obviamente algum MnS. Portanto eles deverão ter algum problema de fragilidade a quente e precisarão de alguma adição de níquel para evitá-la. Estes aços devem ter boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e soldabilidade.

Família 2) – Aços com médio e alto Cu, sem Mn – “Aços Comineli”: produzidos a partir de gusa livre de manganês ou do ferro esponja (redução direta) que tem também carbono muito baixo. Prevê-se que eles não terão grande problema de fragilidade a quente pelo fato de serem limpos de inclusões. Portanto, pouco ou nenhum níquel terá que ser adicionado para o controle das trincas a quente. O cobre, neste caso, só será benéfico, pois fará o papel de estabilizador do S na forma de CuS e melhora das propriedades. Estes aços deverão ter boa combinação de custo, propriedades, resistência à corrosão e excelente soldabilidade.

Agradecimento

O autor agradece a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio dado nas pesquisas.

4 REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 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.
- 3 COMINELI, O.; KARJALAINEN, L. P. and DIPPENAAR, R. “The Influence of Inclusions on the “HOT SHORTNESS” of Cu Containing Steels”. In: 45th ANNUAL CONFERENCE OF ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2007, Vitória. Espírito Santo: ABM, 2007. ref. 11999.
- 4 COMINELI, O.; TULING, A.; MINTZ, B. and KARJALAINEN, L. P. “The Influence of a Small Ti Addition on the HOT DUCTILITY of Cu Containing Steels”. In: 62nd ANNUAL CONFERENCE OF ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2007, Vitória. Espírito Santo: ABM, 2007. ref. 11998.
- 5 COMINELI, O.; MINTZ, B. and KARJALAINEN, L. P. “The influence of cooling rate on the hot ductility of Cu containing steels”. In: XXXVII STEELMAKING SEMINAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2006, Porto Alegre. Rio Grande do Sul: ABM, 2006.
- 6 MINTZ, B.; COMINELI, O. and KARJALAINEN, L. P. “The Influence of Ni on the Hot Ductility of C-Mn-Al, Cu Containing Steels as a Way of preventing “Hot Shortness””. In:

- 59th ANNUAL CONFERENCE OF ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2004, São Paulo. São Paulo: ABM, 2006. ref. 3638.
- 7 LUO, H.; LIIMATAINEN, H-M and KARJALAINEN, L. P. "Influence of Ni Alloying on Hot Ductility of Ti-Nb Microalloyed Steels". In: 59th ANNUAL CONFERENCE OF ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2004, São Paulo. São Paulo: ABM, 2006. ref. 3639.
 - 8 COMINELI, O.; LUO, H.; LIIMATAINEN, H-M and KARJALAINEN, L. P. "Influence of Cu alloying on hot ductility of C-Mn-Al and Ti-Nb microalloyed steels". Revista de Metalurgia, Vol. Extr. p. 407-411, 2005, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas – CENIM, Madrid, Spain.
 - 9 COMINELI, O.; ABUSHOSHA, R. and MINTZ, B. "Influence of Ti and N on the hot ductility of C-Mn-Nb-Al steels". Materials Science and Technology, v. 15, p. 1058-1068, September 1999, The Institute of Materials, 1 Carlton House Terrace, London.
 - 10 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.
 - 11 LINO, Y. "Steps toward Building an Environmentally Advanced Steel Works". NKK Technical Review, v. 88, p 28-36, 2003.
 - 12 Harley, A.J.; Estburn, P. and Leece, N. In: RESIDUALS ADDITIVES AND MATERIALS PROPERTIES. The Royal Society, London, UK, 1980, p. 45-55.
 - 13 LIU, Z.; KOBAYASHI, Y.; YIN, F.; KUWABARA, M and NAGAI, K. "Nucleation of Acicular Ferrite on Sulfide Inclusion during Rapid Solidification of Low Carbon Steel" ISIJ International, v. 47, 2007, No. 12, p. 1781–1788.