

INCLUSÕES NÃO METÁLICAS NOS AÇOS

Metalurgista Industrial

dezembro 2019

www.metalurgistaindustrial.com.br

A menção a inclusões não metálicas e seus efeitos nas propriedades mecânicas dos aços e das ligas metálicas em geral é recorrente em diversas Resenhas Técnicas e de Casos anteriores. Inclusões não metálicas são parte integrante da metalurgia das ligas metálicas como produtos de reações químicas, efeitos físicos e contaminações que ocorrem durante os processos de fusão, vazamento e lingotamento. Essas inclusões, cabe acrescentar, são usualmente classificadas como endógenas e exógenas. As endógenas resultam de precipitações devido a decréscimos de solubilidades das espécies químicas contidas em solução e são tipicamente muito pequenas. Já as exógenas são caracterizadas por maiores dimensões e provenientes de fontes externas, provocadas pelo aprisionamento de materiais não metálicos como escórias, fragmentos de refratários e resíduos de fluxantes. As inclusões exógenas são de difícil reconhecimento. Um exemplo concreto de inclusões dessa natureza é dado na Resenha de Casos Defeitos em Tubos API Conformados a Frio.

Particularmente em relação aos aços, as inclusões não metálicas constituem-se de óxidos, sulfetos, silicatos, nitretos e outros compostos não metálicos, e podem conter múltiplas fases diferentes. Embora se apresentem em reduzidas frações volumétricas expressas em ppm, as inclusões não metálicas exercem o papel de concentradores de tensão, como anteriormente abordado na Resenha Técnica Básico em Fratura e Fadiga, e igualmente promovem efeito significativo na resistência à tração, ductilidade, tenacidade, resistência à corrosão, soldabilidade, polibibilidade e usinabilidade. Nos aços resulfurados (*free cutting steels*), enxofre é deliberadamente adicionado para permitir a formação de inclusões em excesso de sulfetos de manganês. A presença de sulfetos de manganês nos aços promove a redução da tenacidade e da soldabilidade e provoca perda da ductilidade a frio, mas confere maior usinabilidade comparativamente àqueles com baixos teores de enxofre devido à produção de cavacos quebradiços criados pelas inclusões de enxofre.

Formação de inclusões não metálicas

A formação de inclusões não metálica obedece a três estágios:

1. Nucleação, onde são formados núcleos de uma nova fase como resultado de supersaturação por solutos como, por exemplo, o alumínio e o oxigênio, ou em consequência do resfriamento do metal. O processo de nucleação é determinado pela tensão superficial na fronteira inclusão-aço líquido. Quanto menor a tensão superficial, menos supersaturação é requerida para a formação do núcleo da nova fase. A nucleação é facilitada pela presença de uma outra fase (outras inclusões) no metal líquido. Nesse caso, a formação de uma nova fase é determinada pelo ângulo de contato (*wetting angle*) entre o núcleo e o substrato da inclusão.

2. Crescimento da inclusão, até que é alcançado o equilíbrio (ausência de supersaturação). No estado sólido, o crescimento de inclusões é um processo muito lento, então um certo nível de supersaturação não em equilíbrio pode permanecer retido, como, por exemplo, a martensita.

3. Coalescência e aglomeração. O movimento do aço líquido devido à convecção térmica ou agitação forçada provoca coalescência (união de inclusões líquidas) ou aglomeração (união de inclusões sólidas). O processo de coalescência/aglomeração é impulsionado pelo benefício energético obtido pelo decréscimo da superfície de

fronteira entre a inclusão e o aço líquido. As inclusões com energias de superfície mais elevadas têm maiores chances de união quando colidem.

Morfologia

1. Globular

A forma globular de inclusões é preferível, pois modera os efeitos sobre as propriedades mecânicas dos aços. A forma esférica das inclusões globulares resulta da formação destas no estado líquido em um baixo teor de alumínio. Exemplos são os sulfetos de manganês e oxissulfetos formados nos espaçamentos entre os braços de dendritas durante a solidificação, aluminatos de ferro e silicatos.

2. Plaquetas

As inclusões em forma de plaquetas ocorrem em aços desoxidados por alumínio contendo sulfetos de manganês e oxissulfetos na forma de filmes finos localizados ao longo dos contornos de grãos. Essas inclusões são originárias de transformações eutéticas durante a solidificação e enfraquecem consideravelmente os contornos de grãos e exercem efeito adverso nas propriedades mecânicas, particularmente a temperaturas elevadas (fragilização a quente).

3. Dendrítica

Uma alta supersaturação por alumínio utilizado como desoxidante resulta na formação de inclusões de alumina sob a forma de dendritas, que têm ponto de fusão superior ao do aço. Essa forma dendrítica de inclusões impactam significativamente a ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga dos aços. Adicionalmente, esses tipos de inclusões sólidas de elevado ponto de fusão podem se depositar nas válvulas refratárias dos distribuidores de lingotamento contínuo provocando entupimento (*nozzle clogging*).

4. Poliédrica

A morfologia das inclusões dendríticas pode ser combatida pela adição, após desoxidação por alumínio, de elementos formadores de óxidos complexos como o cálcio e magnésio. As inclusões poliédricas, devido à sua forma mais globular, são mais favoráveis em relação a efeitos sobre as propriedades dos aços do que as de forma dendrítica. O tratamento dos aços com cálcio é o meio mais amplamente difundido no setor siderúrgico para controle da morfologia de inclusões. A adição de cálcio altera a composição das inclusões de alumina pura para aluminatos de cálcio no sistema CaO- Al₂O₃.

Distribuição

Além da morfologia, a distribuição de inclusões não metálicas na estrutura cristalina dos aços é fator determinante nas suas propriedades mecânicas. Uma distribuição homogênea de pequenas inclusões é o mais desejável. Em alguns aços, são criados carbeto e nitreto microscópicos homogeneamente distribuídos com o propósito de aumento da resistência. A localização de inclusões ao longo dos contornos de grãos é indesejável porque afeta negativamente a resistência do metal. Do mesmo modo, aglomerações de inclusões são também desfavoráveis, pois podem resultar em prejuízos localizados de propriedades mecânicas como a tenacidade e resistência à fadiga.

A distribuição de inclusões não metálicas pode ser alterada como consequência de processos de conformação mecânica como a laminação. Inclusões dúcteis são deformadas e alongadas na direção de laminação. As inclusões menos dúcteis são quebradas e formam cadeias de fragmentos. As inclusões não metálicas são uma das duas fontes principais que dão origem à anisotropia dos metais como abordado na Resenha Técnica de Eng. de Metais que leva este título.