

Materiais

Estudo traça relações entre microestrutura e propriedades mecânicas em aços estruturais

Há uma relação bastante significativa entre as microestruturas e as propriedades mecânicas dos aços, particularmente os do tipo estrutural. A compreensão e quantificação dos efeitos microestruturais sobre as propriedades mecânicas destes metais é o caminho para o desenvolvimento de produtos cada vez melhores, tornando possível atender de maneira econômica aos requisitos cada vez mais severos impostos pelos seus usuários.

A. A. Gorni

As enormes pressões econômicas, ambientais e políticas que caracterizam o mundo moderno refletem-se na área dos materiais, em uma busca constante por alternativas que ofereçam baixo custo, boas propriedades de engenharia, construção leve e fácil manufatura. Portanto, não é à toa que nas últimas décadas verificou-se uma progressiva aplicação de conceitos metalúrgicos na concepção e processamento das ligas metálicas, no sentido de melhorá-las e garantir sua posição privilegiada como materiais de engenharia, em especial na indústria automobilística, cuja enorme escala é garantia de alta lucratividade.

A otimização de ligas metáli-

cas – particularmente aços, tema deste trabalho – requer um conhecimento aprofundado sobre seus mecanismos microestruturais de endurecimento. O princípio básico desses mecanismos consiste em dificultar ao máximo a mobilidade das discordâncias presentes na estrutura cristalina do metal, pois são justamente esses defeitos que fazem com que a resistência mecânica dos materiais reais corresponda a menos de 10% do valor teoricamente possível.

A resistência mecânica de um aço estrutural corresponde à soma-tória das contribuições dos diversos mecanismos de endurecimento atuantes em sua microestrutura. Os principais tipos são⁽¹⁾:

- Resistência básica dos átomos de ferro;

- Endurecimento por solução sólida proporcionado pelos elementos de liga solubilizados (C, N, P, Mn, Si, Cr, Mo, etc.);
- Endurecimento por refino do tamanho de grão;
- Endurecimento por precipitação de compostos intermetálicos;
- Endurecimento por segunda fase;
- Endurecimento por discordâncias.

A contribuição desses mecanismos de endurecimento varia conforme o tipo de aço considerado. Todos eles elevam as propriedades mecânicas determinadas sob condições estáticas, ou seja, as que são medidas sob baixas velocidades de deformação, como é o caso dos limites de escoamento e resistência, levantados por meio de ensaios de tração. Infelizmente, a maioria dos

Antonio Augusto Gorni (agorni@iron.com.br) é analista de processos da Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa) e editor técnico da revista *Corte e Conformação de Metais*. Reprodução autorizada.

Tab. 1 – Coeficientes de endurecimento por solução sólida para vários elementos de liga normalmente presentes nos aços⁽¹⁾

Elemento	P	Sn	Cu	Mo	Cr	Ni
Fator (MPa/% peso)	680	124	39	12	0	-31

mecanismos de endurecimento tende a degradar as propriedades mecânicas determinadas sob condições dinâmicas, ou seja, as medidas sob altas velocidades de deformação, como a tenacidade ou a capacidade que o material tem para resistir à nucleação e avanço de uma trinca – por exemplo, a energia absorvida durante um ensaio de impacto Charpy ou a temperatura de transição entre fratura dúctil e frágil.

O endurecimento por solução sólida decorre da presença de átomos de elementos de liga solubilizados no reticulado do elemento solvente – no caso, o Fe. Com exceção do P, todos os demais provocam dilatação do reticulado. A intensidade de seu efeito no endurecimento é função dos seguintes fatores:

- Diferença de tamanho entre os átomos de soluto e o de solvente;
- Perturbações na estrutura eletrônica, que podem estar presentes em termos da diferença

no módulo de cisalhamento entre o soluto e solvente;

- Concentração do soluto.

Do ponto de vista prático, o efeito do endurecimento por solução sólida é diretamente proporcional ao teor em peso do soluto. A tabela 1 mostra o efeito de endurecimento por solução sólida de diversos elementos de liga comumente presentes no aço.

O endurecimento por refino de tamanho de grão $\Delta\sigma_{ig}$ é quantificado pela já consagrada equação de Hall-Petch, sendo proporcional ao inverso da raiz quadrada do diâmetro médio dos grãos:

$$\Delta\sigma_{ig} = \frac{k_{ig}}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

onde k_{ig} é uma constante que depende da liga e d é seu tamanho de grão.

Este é o único mecanismo de endurecimento que aumenta tanto a resistência mecânica como a tenacidade dos metais. Por esse motivo, o refino de grão geralmente é o primeiro mecanismo de endurecimento cogitado durante a definição dos processos metalúrgicos de conformação e tratamento térmico de aços estruturais.

O endurecimento por precipitação $\Delta\sigma_{ppt}$ é muito comum nos aços microligados, em razão das partículas extremamente finas que se precipitam na ferrita durante o resfriamento lento desses aços após laminação a quente ou tratamento térmico. A intensidade desse endurecimento depende das características das partículas precipitadas, tais como resistência mecânica, estrutura, espaçamento, tamanho, formato e distribuição. Ele pode ser quantificado a partir do modelo de Ashby-Orowan:

$$\Delta\sigma_{ppt} = \frac{5,9 \sqrt{X_p}}{\bar{x}} \ln(4.000 \bar{x}) \quad (2)$$

O mercado de corte já está trabalhando com mais agilidade e com a qualidade Kortlaser.

24 horas
prestando serviços

Com equipamentos
de última geração



Máquinas laser
4400W 2500x4000mm
Capacidade de corte
Aço Carbono.....25mm
Aço Inox.....20mm
Alumínio.....12mm
MDF.....30mm

Dobradeiras
CNC 3/8 4000mm

NOVIDADE Bystar 2500x4000mm
4400W

• Peças • Serviços • Qualidade • Rapidez • Baixo Custo • Pontualidade

KORTLASER

Materiais

onde $\Delta\sigma_{ppt}$ é o endurecimento por precipitação, X_p é a fração de precipitados na microestrutura e \bar{x} é o diâmetro médio do intercepto planar dos precipitados. Esta fórmula deixa claro que o endurecimento por precipitação é diretamente proporcional à quantidade dos precipitados e inversamente proporcional ao seu diâmetro. Sua aplicação prática é restrita, já que nos aços microligados os precipitados que aumentam a dureza somente podem ser detectados por microscopia eletrônica de transmissão, cuja complexidade dificulta muito a obtenção das grandes massas de dados necessárias para o ajuste estatístico das equações experimentais.

O endurecimento por segunda fase decorre da presença de mais de uma fase ou constituinte na microes-

trutura do aço – como a perlita, por exemplo. No caso específico de uma microestrutura ferrítico-perlítica, a resistência mecânica pode ser calculada de acordo com a lei de misturas:

$$\sigma_y = X_f^{1/3} \sigma_{yf} + (1 - X_f^{1/3}) \sigma_{yp} \quad (3)$$

onde σ_y é o limite de escoamento do aço, X_f é a fração de ferrita, σ_{yf} é o limite de escoamento da ferrita e σ_{yp} é o limite de escoamento da perlita.

O endurecimento por discordâncias Δ_{disc} ocorre, por exemplo, em aços microligados que contenham constituintes formados sob temperaturas relativamente baixas como, por exemplo, ferrita acicular ou bainita. A ferrita acicular, ao contrário da poligonal, contém discordâncias

em sua estrutura que aumentam sua resistência mecânica. O efeito de endurecimento é diretamente proporcional à raiz quadrada da densidade de discordâncias ρ presente na microestrutura:

$$\Delta\sigma_{disc} = k_{disc} \sqrt{\rho} \quad (4)$$

onde k_{disc} é uma constante que depende da liga.

Eventualmente, esse tipo de endurecimento pode ocorrer na própria ferrita poligonal, que originalmente está isenta de discordâncias. Por exemplo, em determinados aços a transformação da austenita dá origem a grandes frações de ferrita poligonal, formadas sob temperaturas relativamente altas. Contudo, a ferrita rejeitada durante

ALIMENTADORES PARA PRENSAS

- Desbobinadores • Endreitadores
- Alimentadores Pneumáticos e Eletrônicos
- Reforma e Manutenção de Máquinas
- Assistência Técnica Preventiva
- Oleadores



Monitor para Proteção de Ferramentas/Came Programável

Mais uma vez em 1º lugar na preferência do mercado!

Sistema de Troca Rápida de Ferramentas

Régua para Elevação e Transporte de Ferramentas Grampos Hidráulicos para Fixação de Ferramentas



STAMPACO

AS MELHORES SOLUÇÕES PARA AUTOMAÇÃO EM PRENSAS

LIGUE: 011 5507-3636/4030

www.stampco.com.br e-mail: vendas@stampco.com.br



Divisão de Erosão a Fio

Com Equipamentos de ponta na prestação de serviço, fornecendo Soluções Rápidas e de Qualidade a custo Competitivo.

Divisão de Ferramentaria

Especializada em...

Ferramentas de Corte, Dobra, Repuxo e Progressivas até 1500kgs. Construções de máquinas e Dispositivos Especiais Projeto Próprio.

Fresa CNC - KAO1500

1500x740x680mm





Divisão de Estamparia

Experiência e inovação com Estamparia de Metais em Prensas Excêntricas

Divisão de Cortes Técnicos

Especializada em Cortes Técnicos de Perfil de Alumínio Equipamento Automatizado - Alta Produção





BEATPRESS

Av. Henry Ford 1129 Pq. Mooca - 07099-000 São Paulo - SP

T. (11) 6168 8454 F. (11) 6168 9456

www.beatpress.com.br



essa transformação se concentra em uma pequena fração de austenita remanescente, que assim ganha temperabilidade e se estabiliza momentaneamente. Dessa forma, ela só irá se transformar posteriormente, sob temperaturas relativamente baixas, formando constituintes aciculares, como ferrita acicular, bainita ou mesmo martensita. O volume desses constituintes é significativamente maior em relação à austenita que lhes deu origem. Isso gera tensões de compressão na matriz de ferrita poligonal já existente, deformando-a localmente e gerando discordâncias na mesma, as quais também exercem efeito endurecedor.

Relações quantitativas entre propriedades mecânicas, microestrutura e composição química dos aços estruturais

Serão expostas a seguir diversas equações disponíveis na literatura

em que foram aplicados os princípios descritos acima para permitir o cálculo de propriedades mecânicas em função dos parâmetros microestruturais e da composição química para vários tipos de aço estrutural. Na maioria dos casos, são apresentadas equações para cálculo dos limites de escoamento e de resistência. As equações para cálculo de parâmetros ligados à ductilidade e tenacidade são um pouco mais raras.

Aços doces ao C-Mn para estampagem⁽²⁾

$$YS = 53,9 + 32,3Mn + 83,2 Si + 354,2 \sqrt{N_{sol}} + \frac{17,4}{\sqrt{d}} \quad (5)$$

$$TS = 294,1 + 27,7Mn + 83,2 Si + 2,85 Pearl + \frac{7,7}{\sqrt{d}} \quad (6)$$

$$\frac{d\sigma}{de} = 370 + 120C + 23,1Mn + 116 Si + 554 P + 143Sn + 1.509 N_{sol} + \frac{15,4}{\sqrt{d}} \quad (7)$$

$$\epsilon_{unif} = 0,28 - 0,20C - 0,25Mn - 0,044Si - 0,039Sn - 1,2N_{sol} \quad (8)$$

$$\epsilon_{tot} = 1,40 - 2,90C + 0,20 Mn + 0,16 Si - 2,2S - 3,9P + 0,25Sn + \frac{0,017}{\sqrt{d}} \quad (9)$$

$$50\% ITT = -19 + 44Si + 700\sqrt{N_{sol}} + 2,2Pearl - \frac{11,5}{\sqrt{d}} \quad (10)$$

$$\Delta Y = 12,32 - 19.250 N_{sol} + 162Mn + 462 O \quad (11)$$

Notação:

YS: limite de escoamento a 0,2% de deformação (MPa)



SÉRIE MASTER OXIPIRA

A mais alta performance em tecnologia plasma.

Envie seus desenhos e solicite amostras de corte.



Acabamento em tubos, hastes e barras.



• Solução definitiva em acabamentos como desbaste, lixamento, polimento, microacabamento, em tubos, barras, hastes, cilindros entre outras aplicações, nos mais diversos tipos de materiais.

• Desenvolvimento de sistemas para acabamento e automatização de processos.

• Para mais informações, acesse nosso site ou consulte nossos técnicos.

NESSIN

Fone: (19) 3834-3790 Fax (19) 3885-5450
Indaiatuba - SP
www.nessin.com.br
comercial@nessin.com.br

PEÇAS ESPECIAIS CONFORME DESENHO OU AMOSTRA CORTE DOBRA USINAGEM



• CORTE LASER • PUNÇONADEIRA
• DOBRADEIRA CNC • TORNOS CNC
• SOLDA PONTO • SOLDA MIG
• TORNOS REVOLVER E AUTOMÁTICO
• LAMINADORAS DE ROSCA

www.flamel-sp.com.br
flamel@flamel-sp.com.br
Tel. (11) 6721-6959 • 6721-5857

Materiais

TS: limite de resistência (MPa)
 $d\sigma/d\varepsilon$: coeficiente de encruamento a 0,2% de deformação (1/MPa)

ε_{unif} : alongamento uniforme, expresso como deformação real

ε_{tot} : alongamento total, expresso como deformação real

Pearl: fração de perlita na microestrutura (%)

50% ITT: temperatura de transição para 50% de fratura dúctil (°C)

ΔY : envelhecimento após 10 dias sob temperatura ambiente (MPa)

d: tamanho de grão (mm)

Este conjunto de equações foi desenvolvido por Pickering para aços destinados à estampagem profunda, com teor de C entre 0,08 e 0,12%. É interessante notar que a equação para cálculo do limite de escoamento leva em conta o endurecimento por solução sólida dos elementos de liga; o efeito do N solúvel é expresso pela raiz quadrada de seu teor. A contribuição do tamanho de grão é incluída por meio de um termo similar à equação de Hall-Petch. Já a equação do limite de resistência não leva em conta o efeito do N, mas inclui o da fração de perlita multiplicado por um fator constante. Em ambos os casos, o efeito do Si foi superior ao do Mn. Os mesmos efeitos foram incluídos no cálculo do coeficiente de encruamento, levando em conta maior número de elementos de liga, com destaque para o papel do N solúvel e do P.

Os elementos de liga tenderam a reduzir a ductilidade dos aços ao C-Mn, exceto o Mn, Si e Sn no caso do alongamento total. O efeito do refino de grão sobre a ductilidade também foi positivo para esse

parâmetro. Já a tenacidade não é favorecida pela presença de Si, N solúvel e perlita mas, como já era esperado, é promovida pelo refino de grão.

Aços ao C-Mn com microestrutura ferrítico-perlítica⁽³⁾

$$YS = 246 + 4,15 Pearl + 44,6Mn + 138Si + 923P + 169Sn + 3.754 N_{sol} + \frac{14,9}{\sqrt{d}} \quad (12)$$

$$TS = 492 - 3,38 Pearl + 246Mn + 277Si + 2.616S + 723P + 246Cr + 6.616N_{sol} + \frac{44,6}{\sqrt{d}} \quad (13)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 385 + 1,39Pearl + 111Si + 462P + 152Sn + 1.369N_{sol} + \frac{15,4}{\sqrt{d}} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{unif} = 0,27 - 0,016Pearl - 0,015Mn - 0,040Si - 0,043Sn - 1,0N_{sol} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{tot} = 1,30 - 0,020Pearl + 0,30Mn + 0,20Si - 3,4S - 4,4P + 0,29Sn + \frac{0,015}{\sqrt{d}} \quad (16)$$

$$T_{trans} = 43 + 1,5 Pearl - 37Mn - \frac{6,2}{\sqrt{d}} \quad (17)$$

Notação:

YS: limite de escoamento a 0,2% de deformação (MPa)

TS: limite de resistência (MPa)

$d\sigma/d\varepsilon$: coeficiente de encruamento a 0,2% de deformação (1/MPa)

ε_{unif} : alongamento uniforme, expresso como deformação real

Tab. 2 – Valores de tensão de fricção α_0 para determinar o limite de escoamento em aços microligados⁽⁴⁾

Condição	α_0 (MPa)
Média	70
Resfriado ao ar	88
Super envelhecido	62

ϵ_{tot} : alongamento total, expresso como deformação real

Pearl: fração de perlita na microestrutura (%)

T_{trans} : temperatura de transição dúctil-frágil (°C)

d: tamanho de grão (mm)

Este conjunto de equações, também de autoria de Pickering, foi desenvolvido para aços estruturais com até 0,25% C, sendo bastante similares às deduzidas para o aço doce, vistas no tópico anterior. A única discrepância ficou por conta dos efeitos contraditórios da fração de perlita sobre o limite de escoamento e de resistência.

Aços microligados⁽⁴⁾

$$YS = \sigma_0 + 37Mn + 83Si + 2.918N_{sol} + \frac{15,1}{\sqrt{d}} + \Delta\sigma_{ppt} \quad (18)$$

Notação:

YS: limite de escoamento a 0,2% de deformação (MPa)

σ_0 : tensão de fricção (MPa)

d: tamanho de grão (mm)

$\Delta\sigma_{ppt}$: endurecimento por precipitação para aços com Nb, Ti e/ou V (MPa)

Este modelo, também proposto por Pickering, apresenta algumas diferenças em relação aos dois já vistos anteriormente. Em primeiro lugar, ele inclui um termo de tensão de fricção σ_0 que, na verdade, serve para incluir na equação o efeito do processamento do material, conforme mostra a tabela 2. Além disso, a equação permite a incorporação da contribuição do endurecimento por solução sólida de outros elementos de liga dissolvidos na ferrita, cujos fatores de multiplicação encontram-se na tabela 3. Neste caso, é interessante notar que o Cr é o único elemento que apresentou efeito negativo sob este aspecto.

Uma vez que se trata de aço microligado, esta equação inclui a contribuição do endurecimento por precipitação interfásica na ferrita, $\Delta\sigma_{ppt}$, similar ao modelo de Ashby-Orowan:

$$\Delta\sigma_{ppt} = \frac{5,9\sqrt{f}}{\bar{x}} \ln\left(\frac{\bar{x}}{2,5 \times 10^{-4}}\right) \quad (19)$$

Contudo, tendo em vista a difícil determinação quantitativa

Tab. 3 – Valores dos fatores de multiplicação para cálculo do efeito de endurecimento por solução sólida de elementos solubilizados na ferrita para determinação da resistência mecânica de aços microligados⁽⁴⁾

Elemento	Fator (Mpa/% peso)
Ni	33
Cr	-30
P	680
Cu	38
Mo	11
Sn	120
C	5.000
N	5.000



LÍDER MUNDIAL NA TECNOLOGIA DE CURVAR TUBOS




Curvadora de tubos CNC elétrica de 13 eixos

- Baseada em PC, com monitor LCD colorido e comandos "toque na tela"
- Cabeçote rotativo com capacidade para curvar e calandrar
- Ferramental de múltiplos estágios
- Para diâmetros de 15 a 75 mm

Curvadora de tubos CNC elétrica e hidráulica de 3 a 5 eixos

- Baseada em PC, com monitor LCD colorido e comandos "toque na tela"
- Capacidade para curvar e calandrar
- Ferramental de simples, duplo ou múltiplos estágios
- Para diâmetros de 18 a 150 mm



Curvadora de tubos NC hidráulica de 2 eixos

Baseada em CLP, com monitor LCD e comandos "toque na tela". Transportador.

- Giro do eixo B por servomotor CA
- Controle manual da distância entre curvas
- Fixação hidráulica rápida

Para diâmetros de 50 a 100 mm.



Curvadora de tubos NC hidráulica de um eixo

- Baseada em CLP, com monitor LCD e comandos "toque na tela"
- Para diâmetros de 38 a 200 mm

CHIAO SHENG MACHINERY CO., LTD.
 tubebend@ms24.hinet.net www.tubebender.com.tw
 No. 2, Sec. 2, Huandong Rd., Tainan Science Park
 Sirshih Township, Tainan 74144, Taiwan
 Tel: +886-6-505-5800 Fax: +886-6-505-5785

Materiais

Tab. 4 – Valores dos fatores de multiplicação B para cálculo do efeito de endurecimento por precipitação proporcionado por elementos de microliga⁽⁴⁾

Liga e precipitado	B _{min} (MPa/% peso)	B _{max} (MPa/% peso)	Faixa (% peso)
V como V ₄ C ₃	500	1.000	0,00 – 0,15
V como VN	1.500	3.000	0,00 – 0,06
Nb como Nb(CN)	1.500	3.000	0,00 – 0,05
Ti como TiC	1.500	3.000	0,03 – 0,18

dos parâmetros necessários ao cálculo da equação de Ashby-Orowan, Pickering propôs que o endurecimento por precipitação fosse calculado com a simples multiplicação dos teores dos elementos de microliga por fatores específicos B. A tabela 4 mostra faixas sugeridas para esses fatores em função do precipitado envolvido. Por sinal, esta abordagem empírica é bastante comum, ainda que restrinja bas-

tante a aplicabilidade do modelo matemático, uma vez que geralmente ela é determinada sob condições muito específicas de processamento.

Aços microligados⁽⁵⁾

$$YS = 62,6 + 26,1Mn + 60,2Si + 759,0P + 212,9Cu + 3.286,0N_{sol} + \frac{19,7}{\sqrt{d}} + \Delta\sigma_{ppt} \quad (20)$$

$$TS = 164,9 + 634,7C + 53,6Mn + 99,7Si + 651,9P + 472,6Ni + 3.339,4N_{sol} + \frac{11,0}{\sqrt{d}} + \Delta\sigma_{ppt} \quad (21)$$

$$\Delta\sigma_{ppt} = 57\log CR + 700V + 7.800N_{sol} + 19 \quad (22)$$

Notação:

YS: limite de escoamento a 0,2% de deformação (MPa)

TS: limite de resistência (MPa)

d: tamanho de grão (mm)

$\Delta\sigma_{ppt}$: endurecimento por precipitação para aços ao V (MPa)

CR: taxa de resfriamento (°C/s)

Este conjunto de equações, proposto por Hodgson e Gibbs⁽⁵⁾, é específico para aços microligados ao V. O destaque aqui é a equação empírica para cálculo do endureci-

O melhor investimento para sua empresa

ALIMENTADORES PARA PRENSAS



- DESBOBINADOR + ENDIREITADOR COMPACTO
- DESBOBINADORES DUPLOS
- PAINEL MONITOR DE FERRAMENTAS
- ALIMENTADORES PNEUMÁTICOS
- ALIMENTADORES ELETRÔNICOS

O compromisso da TecnoPress é viabilizar soluções para o aumento na produção industrial através da automação nos processos de alimentação de prensas. Nossos esforços são direcionados para resultados práticos e lucrativos em sua linha de produção. Hoje, a TecnoPress é a mais moderna indústria de fabricação de equipamentos para automação de prensas do Brasil com serviços de implantação e assistência técnica especializada.

TecnoPress - Mais tecnologia para maior produtividade!

TecnoPress
Automação Industrial
ALIMENTADORES PARA PRENSAS

fone: 11 3834-0300
www.tecnopress.com.br



Primartec
Desenvolvendo tecnologia

Pensou em corte... CutPlus é a solução ideal
De dupla motorização longitudinal é a mais forte do segmento. Que oferece alta precisão e facilidade operacional, COMPROVE!

Compre através do:
BNDES
Cartão BNDES

Lantek Hypertherm
CutPlus oferece alta performance-qualidade e precisão, totalmente integrada com as fontes Plasma Hypertherm e o software Lantek.

São José Rio Preto: vendas.sjrp@primartec.com.br
Curitiba: vendas.curitiba@primartec.com.br
Belo Horizonte: vendas.bh@primartec.com.br
Porto Alegre: vendas.portoalegre@primartec.com.br
São Paulo: vendas.sp@primartec.com.br
www.primartec.com.br - sac@primartec.com.br

Av. Gupé, n° 10.767
Barueri - São Paulo
Fone: 11 4789 9177
Fax: 11 4789 3018

mento por precipitação de VN, $\Delta\sigma_{ppt}$, em função não só dos teores de V e N, como também da velocidade de resfriamento do material após a laminação a quente.

Aços bifásicos^(6,7)

$$YS = 203 + 855 \sqrt{\frac{1}{L_{\alpha\alpha}}} \quad (23)$$

$$TS = 266 + 548 \sqrt{\frac{1}{L_{\alpha\alpha}}} + 1.741 \sqrt{\frac{f_{\beta}}{d_{\beta}}} \quad (24)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 386 + 590 \sqrt{\frac{1}{L_{\alpha\alpha}}} + 1.722 \sqrt{\frac{f_{\beta}}{d_{\beta}}} \quad (25)$$

$$a_{unif} = 32 - 64 \sqrt{\frac{1}{L_{\alpha\alpha}}} \quad (26)$$

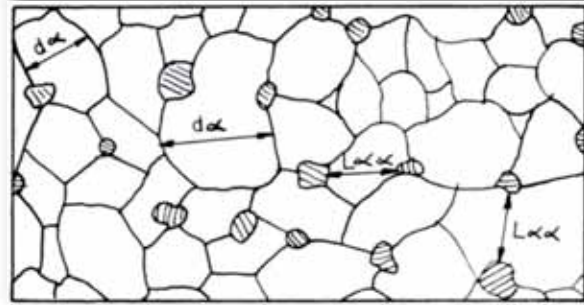


Fig. 1 - Representação esquemática do tamanho de grão ferrítico (d_{α}) e da distância livre ferrítica média ($L_{\alpha\alpha}$) numa microestrutura bifásica⁽⁷⁾

Notação:

LE: limite de escoamento a 0,2% de deformação (MPa)

LR: limite de resistência (MPa)

$d\sigma/d\varepsilon$: coeficiente de encruamento no alongamento uniforme (1/MPa)

a_{unif} : alongamento uniforme (%)

$L_{\alpha\alpha}$: caminho livre ferrítico médio (μm)

f_{β} : fração volumétrica média de martensita (%)

d_{β} : diâmetro médio das ilhas de martensita (μm)

Os aços bifásicos foram desenvolvidos a partir da década de 1970 com o objetivo de aliar alta resistência mecânica com boa estampabilidade. Eles apresentam uma microestrutura peculiar, constituída por uma matriz de 80 a 85% de

ferrita poligonal macia e 15 a 20% de martensita dura. As tensões de compressão induzidas na matriz de ferrita pelas ilhas de martensita facilitam o fluxo do material durante a deformação plástica, reduzindo o valor do limite de escoamento e eliminando o patamar. À medida que a deformação plástica progride, a restrição ao fluxo de material imposta pelas ilhas de martensita proporciona um encruamento significativo ao material, resultando em um componente estampado com alta resistência mecânica.

Essa abordagem microestrutural possui correlações interessantes com as propriedades mecânicas obtidas, as quais diferem um pouco do que normalmente se verifica nos aços comuns ferrítico-perlíticos. Em

TECNOLOGIA MUNDIAL EM SOLDAGEM E AUTOMAÇÃO

Pacote Funcional MERKLE BALMER para Robotização e Células Completas

SUA NECESSIDADE, NOSSA SOLUÇÃO.

- Fontes de Soldagem Nacionais e Importadas para Automação e Robótica
- Sistema de refrigeração
- Tochas para processos automatizados e robotizados
- Sistema de anti-colisão
- Sistema de Limpeza
- Alimentação para Robô
- Solução tipo "Turn Key"
 - Integração
 - Interfaceamento via "Feld Bus"

Merkle Balmer - São Paulo
Tel/Fax: (011) 4398-6440
comercial@merkle.com.br

Merkle Balmer - Ijuí - RS
Tel/Fax: (055) 3332-9856
balmer@balmer.com.br

www.merkle-balmer.com.br

TUBOS DE AÇO INOX TREFILADOS

Indústria de Conformação e Trefilação

Especializada em tubos capilares

Diâmetro Externo: 0,30 a 31,75
Espessuras: 0,05 a 3,91

Produção: em barras - rolos
pçs. cortadas - dobradas

Prestação de serviços

Trefilação - Endireitamento
Solubilização - Polimento -
etc.

Tubos
Capilares - Microtubos

MICROTUBOS - TREFICAP

Fone: (11) 6162-7172

Fax: (11) 6591-3605

E-mail: treficap@treficap.com.br

www.treficap.com.br

FERRAMENTAS PARA TRANSFORMAÇÃO DE TUBOS

Estampos e ferramentas modulares para tubos



- Curvas Americanas
- Prensas
- Alimentadores



• Máquinas e ferramentas especiais



R. Antonio Iervolino, 264 - Guarulhos - SP
Tel.: (11) 6441-9415 • 64413931
contato@sandristampi.com.br
www.sandristampi.com.br

NOVO Após 19/03 Av. Guarulhos, 1077
Tel. (11) 2304-2558

Materiais

primeiro lugar, a relação de Hall-Petch é ligeiramente diferente no caso dos aços bifásicos: o caminho livre disponível para as discordâncias é delimitado pelos contornos ferrita-martensita, e não mais pelos contornos de grão ferríticos⁽⁸⁾. Assim sendo, a equação de Hall-Petch continua válida, só que o valor do tamanho de grão d deve ser substituído pela distância livre ferrítica média $L_{\alpha\alpha}$. A diferença entre esses dois parâmetros microestruturais pode ser vista na figura 1 (pág. 107). É exatamente o que se vê na equação para cálculo do limite de escoamento⁽⁷⁾.

O cálculo do limite de resistência para o caso dos aços bifásicos também deve levar em conta o encruamento ou endurecimento por discordâncias $\Delta\sigma_{disc}$ que ocorre no material. Foi constatado que esse encruamento pode ser expresso por meio do modelo de Ashby^(9,10):

$$\Delta\sigma_{disc} = k \sqrt{\frac{f_{\beta}}{d_{\beta}}} \quad (27)$$

onde k é uma constante empírica. Ou seja, o encruamento de um aço bifásico é proporcional à raiz quadrada da fração de martensita presente na microestrutura e ao inverso de seu tamanho de grão. Como se pode observar, a equação proposta para o cálculo do limite de resistência leva em conta a relação de Hall-Petch usando a distância livre ferrítica média e o modelo de Ashby.

É interessante notar que o coeficiente de encruamento também pode ser calculado por uma equação com formato semelhante ao

usado para o limite de resistência. Por sua vez, o alongamento uniforme é inversamente proporcional ao caminho livre ferrítico médio.

Aços de baixo C com ferrita acicular ou bainita

$$YS = 88 + 37Mn + 83Si + 2.900N_{sol} + \frac{15,1}{\sqrt{d_L}} + \sigma_{disc} + \sigma_{ppt} \quad (28)$$

$$TS = 246 + 1.900C + 230(Mn + Cr) + 185Mo + 90W + 125Ni + 65Cu + 385(V + Ti) \quad (29)$$

$$ITT = -19 + 44Si + 700\sqrt{N_{sol}} + 0,26(\sigma_{disc} + \sigma_{ppt}) - \frac{11,5}{\sqrt{d}} \quad (30)$$

Notação:

YS: limite de escoamento para 0,2% de deformação real (MPa)

TS: limite de resistência (MPa)

ITT: temperatura de transição para 50% de fratura dúctil (°C)

d_L : tamanho de ripa para a ferrita acicular ou bainita (mm)

d : espaçamento médio entre contornos de alto ângulo ("pacote" ou antigos contornos de grão austeníticos)

Mais uma vez, o endurecimento por precipitação $\Delta\sigma_{ppt}$ pode ser calculado pelo modelo de Ashby-Orowan, expresso pela fórmula:

$$\Delta\sigma_{ppt} = \frac{5,9\sqrt{f}}{\bar{x}} \ln\left(\frac{\bar{x}}{2,5 \times 10^{-4}}\right) \quad (31)$$

Mas a novidade, neste caso, é o termo que expressa o endurecimento por discordâncias $\Delta\sigma_{disc}$, cuja fórmula geral é:

$$\Delta\sigma_{disc} = \alpha \mu b \sqrt{\rho} \quad (32)$$

onde α é uma constante empírica, μ é o módulo de cisalhamento, b é o vetor de Burgers e ρ é a densidade de discordâncias expressa em linhas por cm². A determinação experimental dos parâmetros necessários para o cálculo dessa expressão é difícil, tendo sido propostas equações empíricas alternativas. Uma delas é a de Pickering⁽⁴⁾:

$$\Delta\sigma_{disc} = 1,2 \times 10^{-3} \sqrt{\rho} \quad (33)$$

e outra foi proposta por Keh⁽¹¹⁾:

$$\Delta\sigma_{disc} = 8 \times 10^{-4} \sqrt{\rho} \quad (34)$$

Aços ferrítico-perlíticos com médio C⁽⁴⁻¹²⁾

$$YS = \sqrt[3]{f_{\alpha}} \left(35 + 58Mn \frac{17,4}{\sqrt{d}} \right) + (1 - \sqrt[3]{f_{\alpha}}) \left(178 + \frac{3,8}{\sqrt{S_0}} \right) + 63Si + 42\sqrt{N_{sol}} \quad (35)$$

$$TS = \sqrt[3]{f_{\alpha}} \left(246 + 1.140\sqrt{N_{sol}} + \frac{18,2}{\sqrt{d}} \right) + (1 - \sqrt[3]{f_{\alpha}}) + \left(720 + \frac{3,5}{\sqrt{S_0}} \right) + 97Si \quad (36)$$

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = 385 + 1.386Pearl + 111Si + 462P + 152Sn + 1.371N_{sol} + \frac{15,4}{\sqrt{d}} \quad (37)$$

$$ITT = f_{\alpha} \left(-46 - \frac{11,5}{\sqrt{d}} \right) + (1 - f_{\alpha}) \left[-335 + \frac{5,6}{\sqrt{S_0}} - \frac{13,3}{\sqrt{p}} + 3,48 \times 10^6 t \right] + 48,7Si + 762\sqrt{N_{sol}} \quad (38)$$

Notação:

YS: limite de escoamento a 0,2% de deformação (MPa)

TS: limite de resistência (MPa)
 $d\sigma/d\epsilon$: coeficiente de encruamento a 0,2% de deformação (1/MPa)
 ITT: temperatura de transição para fratura 50% dúctil (°C)
 f_{α} : fração volumétrica média de ferrita
 d : tamanho de grão médio da ferrita (mm)
 S_0 : espaçamento lamelar médio da perlita (mm)
 p : tamanho da colônia de perlita (mm)
 Pearl: fração de perlita na microestrutura (%)
 t : espessura da lamela de carbonetos perlíticos (mm)

A fração de perlita presente na microestrutura é proporcional ao teor de C. No caso de um aço com médio teor de C, já se faz necessário aplicar a lei da mistura de fases para levar em conta adequadamente o endurecimento proporcionado pela perlita. É interessante notar que tanto o limite de escoamento como o de

CORTES DE ALTA DEFINIÇÃO

Força aliada à alta tecnologia



CORTE A JATO D'ÁGUA



PLASMA CNC DE ALTA DEFINIÇÃO

Bomba de jato d'água KMT



Distribuidor autorizado

Hypertherm KMT



• Fabricado no Brasil
 • Assistência técnica especializada



Financiamento
 Cartão BNDES

Fone: 11 5622 0303

vendas@tectronix.com.br

www.tectronix.com.br

PRENSAS

para dobrar, estampar,
furar, rebitar...

VÁRIAS CAPACIDADES



REBITEX IND. E COM. DE MÁQUINAS LTDA.

Rua Tomás Antônio Vilani, 93

CEP 02562-000 - São Paulo - SP

Tel.: 11 3965-2288 / 3966-1611

Fax.: 11 3966-1891

rebitex@rebitex.com.br - www.rebitex.com.br

Materiais

resistência da perlita são expressos por uma lei similar à de Hall-Petch, na qual o tamanho de grão é substituído pelo espaçamento entre as lamelas desse constituinte. Deve-se destacar também o efeito deletério da espessura da lamela de carbonetos perlíticos sobre a tenacidade do material, uma vez que a temperatura de transição dúctil-frágil é proporcional ao valor desse parâmetro microestrutural.

Conclusão

Como se pode observar, já foram desenvolvidas diversas equações empíricas para o cálculo de propriedades mecânicas a partir da composição química e parâmetros microestruturais observados em aços estruturais. Contudo, sua aplicabilidade a casos específicos não é totalmente garantida, já que inúmeros detalhes associados ao processamento do material podem alterar aspectos sutis da estrutura cristalina do material e prejudicar a precisão dessas equações. Além disso, a determinação experimental dos parâmetros microestruturais quantitativos requer procedimentos algo demorados e eventualmente complexos, considerando nossa realidade industrial. Ainda assim, essas equações são muito importantes para entender os principais fatores que afetam o desempenho desses aços e para definir o rumo dos desenvolvimentos a serem feitos, visando obter materiais cada vez melhores.

Referências

- GINZBURG, V.B. Basic Principles of Modeling in Metallurgical Design of Fat-Rolled Steel Products. In: *AISE Annual Convention. Proceedings*. Pittsburgh, 2003, p. 1-42.
- PICKERING, F.B. *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. Allied Science Publishers, London, 1978, 275 p.
- PICKERING, F.B. The Effect of Composition and Microstructure on Ductility and Toughness. In: *Towards Improved Ductility and Toughness. Proceedings*. Climax Molybdenum Company, Tokyo, 1971, p. 9-32.
- PICKERING, F.B. Some Aspects of the Relationships between the Mechanical Properties of Steels and their Microstructures. *Tisco*. Silver Jubilee Volume, p. 105-132, Jan-Oct 1980.
- HODGSON, P.D. & GIBBS, R.K. A Mathematical Model to Predict the Mechanical Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels. *ISIJ International*, 32:12, p. 1329-1338, December 1992.
- GORNI, A.A. & BRANCHINI, O.L.G. Análise da Evolução do Encruamento de um Aço Bifásico. In: *4º Simpósio de Conformação Mecânica. Anais*. Escola Politécnica da USP, São Paulo, Novembro 1990, p. 23-42.
- GORNI, A.A. & BRANCHINI, O.L.G. Relações Microestrutural-Propriedades Mecânicas em um Aço Bifásico Laminado a Quente. In: *1º Seminário sobre Chapas Metálicas para a Indústria Automobilística. Anais*. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, Setembro 1992, p. 127-145.
- MAID, O, DAHL, W., STRASSBURGER C., MUSCHENBORN, W. *Einfluss der Gefügeparameter auf die mechanischen Eigenschaften von dualphasen Stahl*. *Stahl und Eisen*, 108:8, p. 355-364, 18 April 1988.
- ASHBY, M. The Hardening of Metals by Non-Deforming Particles. *Zeitschrift für Metallkunde*, 55:1, p. 5-17, January 1964.
- LANZILOTTO, C.A.N. & PICKERING, F.B. Structure-Property Relationships in Dual-Phase Steels. *Metal Science*, 16:8, p. 371-382, August 1982.
- KEH, A.S., Work Hardening and Deformation Sub-Structure in Iron Single Crystals in Tension at 298K. *Philosophical Magazine*, 12:115, p. 9-30, 1965.
- GLADMAN, T., MC IVOR, I. & PICKERING, F.B.. Some Aspects of the Structure-Property Relationships in High Carbon Ferrite-Pearlite Steels. *Journal of the Iron and Steel Institute*, v. 210, p. 916-930, Dec. 1972.

MASATO EQUIPAMENTOS P/ AUTOMAÇÃO DE
AUTOMAÇÃO DE **SOLDAGEM**

Cartão BNDES

POSICIONADORA CIRCULAR STD
MOSTRADOR DE VELOCIDADE DIGITAL
AGORA C/ TEMPORIZADOR DIGITAL

Ótimo Preço

Vários Acessórios

www.soldaautomatica.com.br
TEL: 11 4976-1677
soldaautomatica@uol.com.br