|  |  |
| --- | --- |
|  | UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP)  ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA (EEL)  DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS (DEMAR) |

Fabricação de palhetas de superligas monocristalinas para turbinas

Autores: Taisa Fonseca

Elisa Rocha

Renan Bezerra

Isabela Atílio

Beatriz Menezes

Raquel Mesquita

Professor: Gilberto Coelho

LORENA – SP – JUNHO 2012

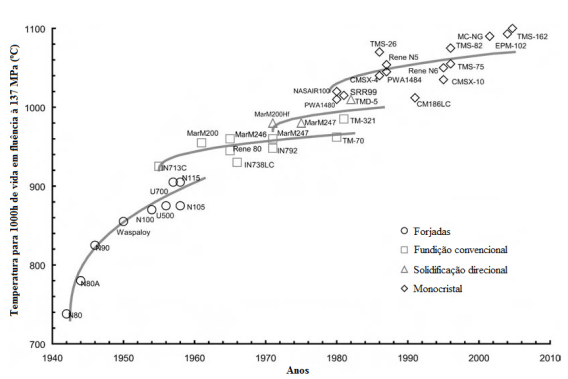
*Fabricação de palhetas de superligas monocristalinas para turbinas  
Comparação entre palhetas monocristalinas, policristalinas e solidificadas direcionalmente*

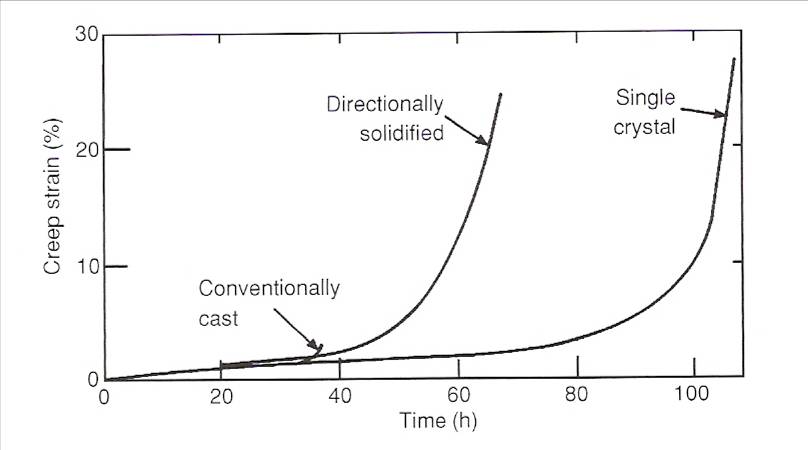
* Desenvolvimento das Superligas

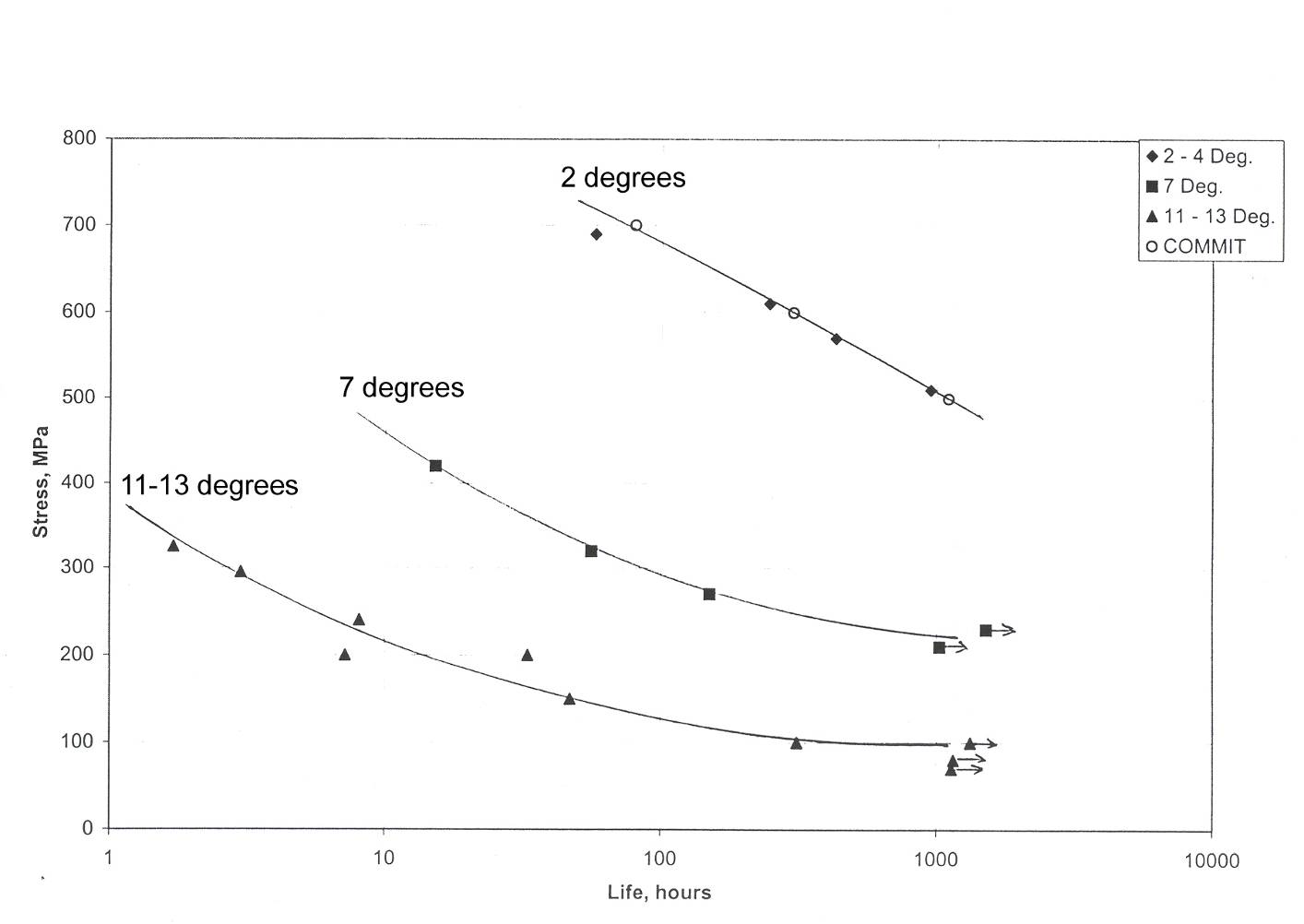
As primeiras palhetas para turbina eram produzidas por extrusão e operações de forjamento, um procedimento com limitações;

O progresso da capacidade de operar em altas temperaturas das superligas evoluiu juntamente com o desenvolvimento das tecnologias de fundição à vácuo e solidificação controlada;

A técnica de fundição para produção de monocristais permitiu uma melhora ainda maior nas propriedades de fluência;

A vantagem nesse processo é a eliminação dos contornos de grãos, o que não pode ser alcançado utilizando processos termomecânicos.





Variação das propriedades de tração para superliga CMSX-4 a 850°, medidas em amostras com contronos de grãos com diferentes valores de θ.

Após o desenvolvimento do método de solidificação direcional,tentou-se remover totalmente os contornos de grão afim de se ter um material monocristalino.

Assim que os contornos de grão foram removidos, os elementos que fortaleciam os contornos de grão, como o boro e o carbono, foram retirados da composição das ligas.

Isto permitiu uma melhoria no tratamento térmico para reduzir a microsegregação e a fusão incipiente. A vida em fadiga foi então melhorada.

* Fabricação do Molde- Moldagem de cera:

- Produção do modelo ( Injeção e extração);

- Montagem;

- Produção da casca cerâmica( imersão, estocagem e secagem)

- Deceragem;

- Sinterização;

- Vazamento;

- Quebra da casca;

- Acabamento e inspeção

* Solidificação Direcional:

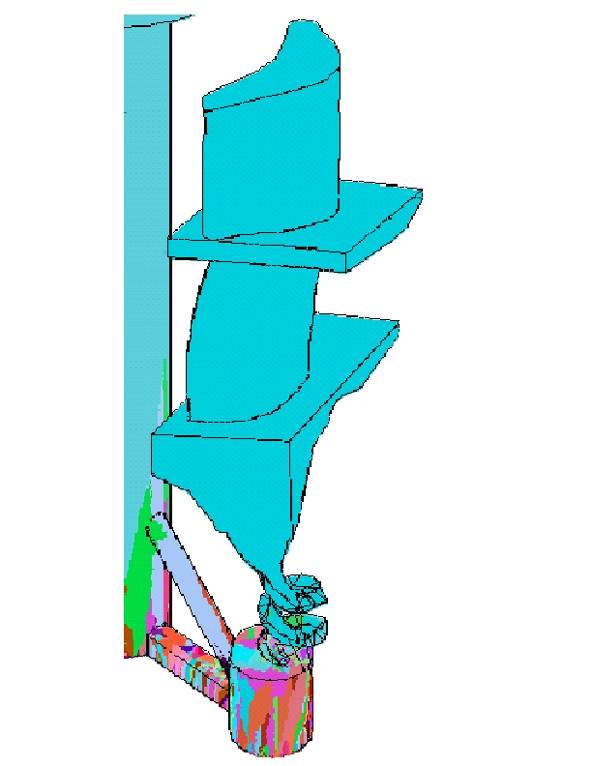
Após o vazamento do metal no molde, o material fundido é retirado do forno em uma taxa controlada, de acordo com o método convencional denominado Bridgmancrystal-growing.

Normalmente se utiliza uma velocidade de poucos centímetros por horas. Assim, a interface sólido/líquido se movimenta gradativamente ao longo do molde, começando em sua base.

Esse processo tem o efeito de produzir grãos grandes e colunares, os quais são alongados na direção de retirada da molde do forno. Então, os contornos de grãos transversais não mais existem.

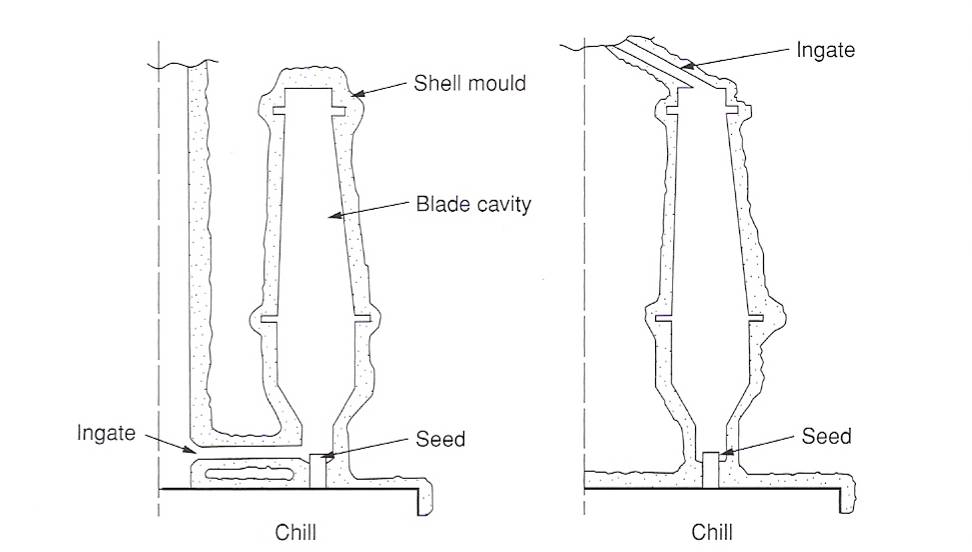
* Fabricação de monocristais- Método grain-selector:

A diferença do processo de produção de monocristais está no fato em que os contornos de grãos são totalmente removidos através da adição de “seletores de grãos” (grainselector) no molde de gesso;

A remoção dos contornos de grãos através de seletor de grãos, ou por semente, possui orientação preferencial de crescimento do monocristal. A direção preferencial de crescimento é<001>.

* Fabricação de monocristais- Método da Semente:

Um outro método para fabricação de monocristais seria a adição de uma semente monocristalina na base da fundição.

A solidificação ocorre com uma orientação coerente com a da semente e as condições de processamento não podem permitir que a semente seja refundida.

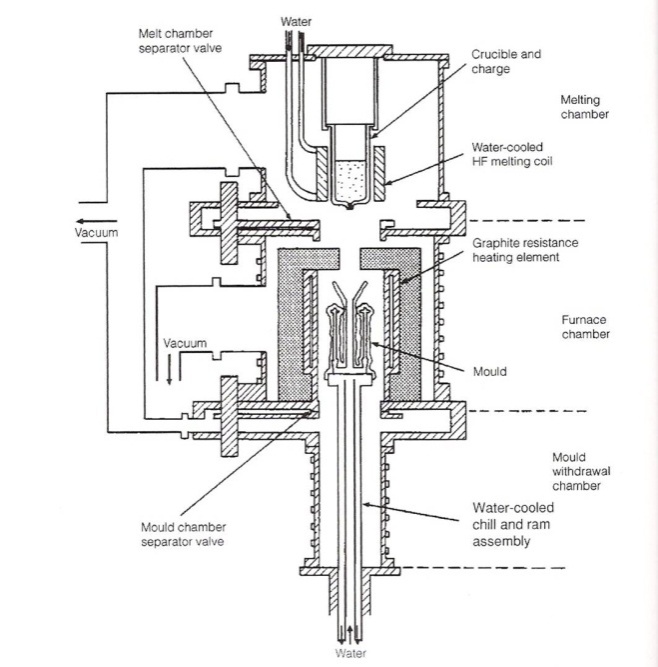
* Processo Bridgman:

O molde cerâmico é colocado em um suporte de cobre refrigerado de cerca de 14cm de diâmetro. Esse tamanho é suficiente para produzir cinco palhetas de turbinas para um jato civil simultaneamente, ou então 20 palhetas para um pequeno helicóptero.

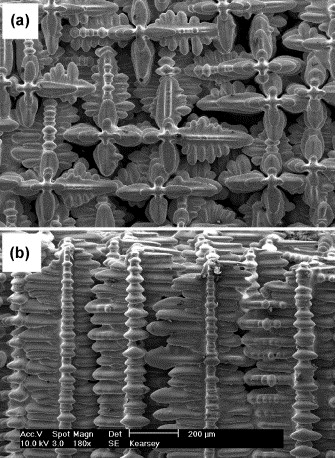
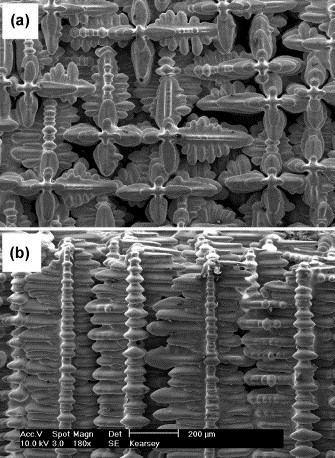
Uma vez que o diâmetro do suporte de cobre é pequeno, menos que 5kg de carga pode ser fundida.A liga é fundida usando um forno de indução de alta frequência.

O forno posssui uma câmara superior na qual ocorre a fusão da liga, uma câmara central onde está posicionado o molde e uma inferior onde será realizada a retirada do molde. Cada uma dessas câmaras possui um sistema individual de vácuo. Assim que é obtido o vácuo em todo o sistema, a liga fundida é despejada no molde, o qual possui uma temperatura acima da temperatura liquidus. Imediatamente após o vazamento, o molde é retirado da parte central do forno com uma taxa previamente estabelecida.

Na prática, o maior gradiente térmico alcançado é de cerca de 4000K/m , o qual é suficiente para a produção de uma microestrutura dendrítica.



* Micrografia dendrítica

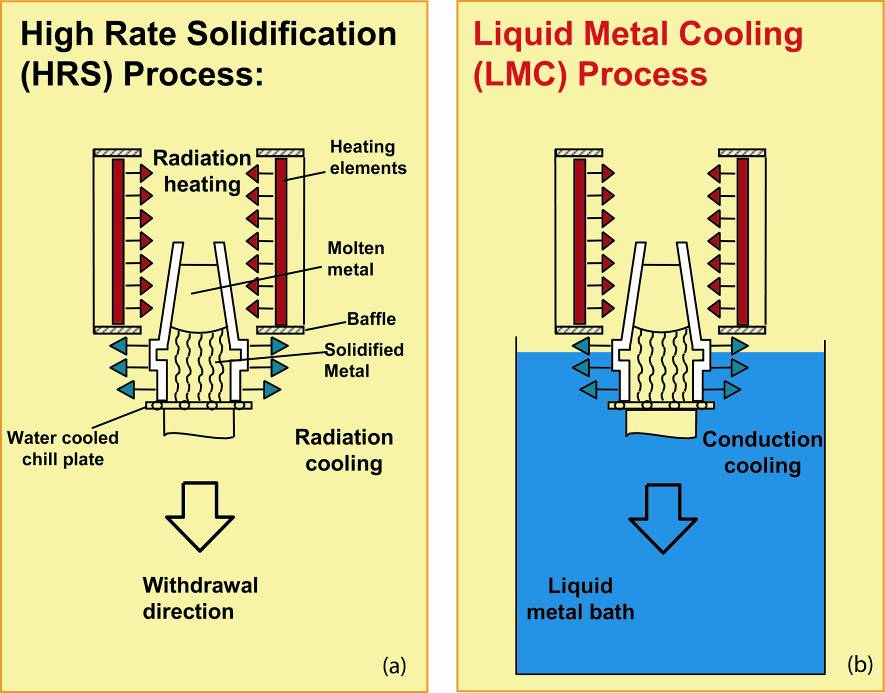


1. seçãotransversal, (b) seção longitudinal.

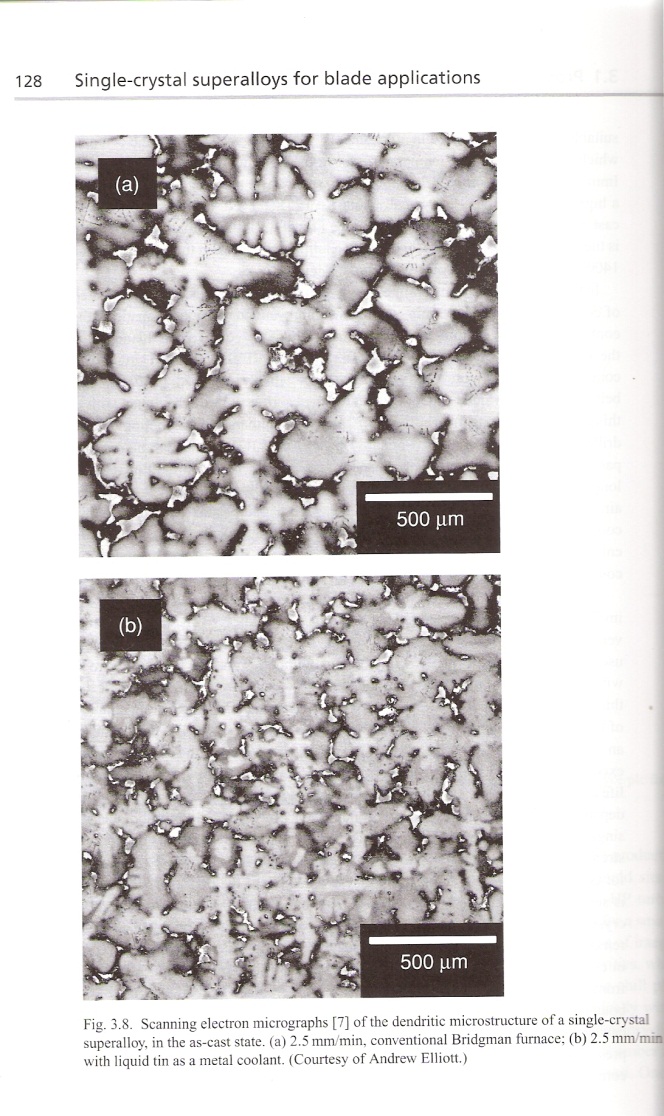
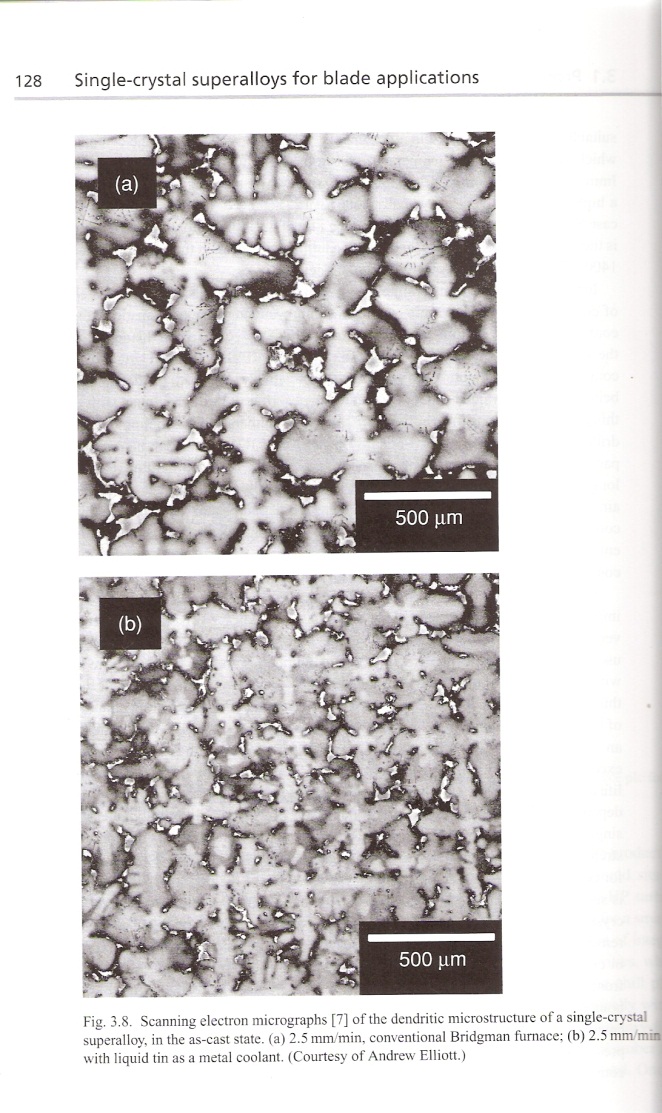
* Fabricação de monocristais – Resfriamento

O resfriamento pode ser otimizado utilizando-se sprays de água, resfriamento por fluidos, resfriamento por gases usando jatos de Ar/He e resfriamento com metal liquido.

O resfriamento com metal líquido (Liquid Metal Cooling - LCM) é uma técnica que vem sendo estudada, já que proporciona o refinamento das dendritas.Isto se deve ao fato de que a taxa de resfriamento é mais rápida devido à alta condutividade térmica dos metais. Os requisititos do metal líquido utilizado para resfriamento são: baixa temperatura de fusão, baixa pressão de vapor, alta condutividade térmica, baixa viscosidade, baixo custo e não deve reagir com o molde.Por essa razão o alumínio e o estanho são os mais utilizados nesse processo.



* Microestrutura dendrítica de um monocristal



1. Resfriamento convencional ao ar, (b) Resfriamento pelo método LMC.

* Formação de defeitos na produção de monocristais

Requisitos rigorosos são necessários na produção de palhetas para turbinas monocristalinas:

Defeitos como contornos de alto ângulo, os quais podem surgir quando o seletor de grão deixa de funcionar adequadamente ou então, devido a nucleação de grãos indesejáveis, não podem ser tolerados.

A orientação cristalográfica deve ser na direção <001> alinhado com o eixo da peça fundida. O seletor de grãos e a semente devem garantir que isso aconteça.

Podem ser geradas tensões internas devido à diferença entre a contração do metal e do molde na solidificação. Essas tensões internas pode levar com que ocorra a recristalização em tratamentos térmicos posteriores.

A presença de partículas cerâmicas no metal fundido vindas da casca do molde não podem ser toleradas, uma vez que elas diminuem as propriedades de fadiga. Essas partículas podem ser detectadas através de ensaios não destrutivos.



Fotografia da seção de palhetas fundidas mostrando os defeitos

esquerda: contorno de alto ângulo, direita: freckles