República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102022019353-3 A2

(22) Data do Depósito: 26/09/2022

(43) Data da Publicação Nacional: 11/04/2023

(54) Título: PRODUTOS DE LIGA DE ALUMÍNIO 7XXX DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTA TENACIDADE À FRATURA E MÉTODO DE FABRICAÇÃO DE UM PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA DE UMA LIGA DA SÉRIE AA7XXX

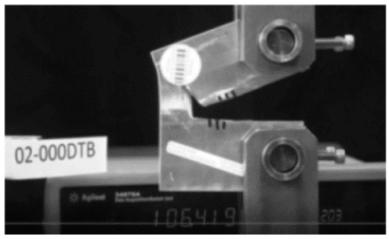
(51) Int. Cl.: C22C 21/10.

(30) Prioridade Unionista: 20/09/2022 US 17/933,633; 27/09/2021 US 63/248,690.

(71) Depositante(es): KAISER ALUMINUM FABRICATED PRODUCTS, LLC.

(72) Inventor(es): ZHENGDONG LONG; PHILIPPE GOMIERO; RAVI RASTOGI; ROBERT A. MATUSKA; GARRY R. MCDANIEL; JASON N. SCHEURING.

(57) Resumo: PRODUTOS DE LIGA DE ALUMÍNIO 7XXX DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTA TENACIDADE À FRATURA E MÉTODO DE FABRICAÇÃO DE UM PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA DE UMA LIGA DA SÉRIE AA7XXX. São divulgados produtos de liga de alumínio dispersóides 7xxx com desvio de crescimento de trincas por fadiga aprimorado e resistência a Craqueamento Ambientalmente Assistido (EAC - Environmentally Assisted Cracking). A liga de alumínio 7xxx compreende de 1 a 3% em peso de Cu, 1,2 a 3% em peso de Mg, 4 a 8,5% em peso de Zn, até 0,3% em peso de Mn, até 0,15% em peso de Zr, até 0,3% em peso de elementos dispersóides de Cr, elementos incidentais e o saldo Al. Em uma forma de realização, a liga inclui Zr + Cr + Mn na faixa de 0,2 a 0,8% em peso. Em outra forma de realização, a liga inclui Zr + Mn na faixa de 0,07 a 0,7% em peso. Esta liga pode ser fabricada para produtos de placa, extrusão ou forjamento e é especialmente adequada para componentes estruturais aeroespaciais. Os produtos melhoraram a resistência ao EAC e a resistência ao desvio de crescimento de trincas por fadiga. Enquanto isso, os produtos têm uma excelente combinação de resistência, tenacidade à fratura, ductilidade em diferentes orientações e Corrosão por (...).



"PRODUTOS DE LIGA DE ALUMÍNIO 7XXX DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTA TENACIDADE À FRATURA E MÉTODO DE FABRICAÇÃO DE UM PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA DE UMA LIGA DA SÉRIE AA7XXX"

REFERÊNCIA CRUZADA A PEDIDOS RELACIONADOS

[001] Este pedido reivindica os benefícios, sob 35 U.S.C. 119(e), do Pedido Provisório U.S. No. 63/248.690 depositado em 27 de setembro de 2021, cujo conteúdo é aqui incorporado por referência.

CAMPO DA INVENÇÃO

[002] A presente invenção refere-se a produtos de liga de alumínio 7xxx de alta resistência. A liga de alumínio 7xxx de alta resistência pode ser fabricada em placas, extrusão ou produtos de forjamento adequados para componentes estruturais aeroespaciais, especialmente grandes aplicações de estrutura de asa de avião comercial que exigem melhor ramificação de trincas por fadiga, resistência a EAC (rachaduras assistidas pelo meio ambiente), resistência, tenacidade à fratura, ductilidade anisotrópica, Corrosão por Estresse (SCC - Stress Crack Corrosion) e desempenho de resistência à corrosão por esfoliação.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

[003] As ligas de alumínio 7xxx de maior resistência estão sendo buscadas de forma assertiva por fabricantes de estruturas de aeronaves e fabricantes de materiais de alumínio para reduzir agressivamente o peso da aeronave para eficiência de combustível devido à sua extensa combinação de resistência do material, tenacidade à fratura e resistência à fadiga.

[004] Nos últimos anos, os novos desafios de resistência à ramificação de trincas por fadiga, resistência EAC e ductilidade anisotrópica também estão sendo abordados de forma significativa pelos fabricantes de estruturas de aeronaves, bem como pelos produtores de ligas de alumínio.

[005] O desvio ou ramificação da trinca de fadiga, como mostrado na Figura 1, é um fenômeno no qual uma trinca muda repentinamente seu caminho de propagação para longe do plano de fratura esperado sob a condição de carregamento de fadiga do Modo I. Esse desvio de fissura é uma preocupação significativa para os fabricantes de aeronaves, pois é difícil levar em conta a natureza imprevisível desse fenômeno durante o projeto estrutural.

[006] Para a indústria aeronáutica, a degradação do material de liga de alumínio devido ao Craqueamento Ambientalmente Assistido (EAC - *Environmentally Assisted Cracking*) é um desafio fundamental. Em geral, o EAC é um fenômeno de falha intergranular para a aplicação de aeronaves. Embora não seja totalmente compreendido, existem duas causas potenciais. Uma é a dissolução anódica e a outra é a fragilização por hidrogênio. No entanto, é extremamente difícil entender os mecanismos devido à dificuldade em quantificar os níveis de hidrogênio (H) com precisão. A solubilidade da rede de equilíbrio do H é extremamente baixa e os hidretos no alumínio de forma geral não são estáveis.

[007] Além do desvio de trincas por fadiga e EAC, a ductilidade anisotrópica da placa de alumínio é outra característica cada vez mais crítica para a aplicação aeroespacial, especialmente para a tecnologia de usinagem de peças monolíticas recentemente usada na fabricação de estruturas de aeronaves. A ductilidade anisotrópica refere-se à redução significativa na ductilidade quando a orientação do teste de tração está entre as orientações comumente testadas, ou do fluxo de metal do material ou direção microestrutural, comumente notada como direção de laminação (L). A ductilidade de forma geral é significativamente menor quando a direção da tração difere da direção do fluxo do metal.

[008] As propriedades críticas, incluindo ramificação de trincas

por fadiga, EAC e ductilidade anisotrópica, bem como a resistência, tenacidade à fratura e resistência à corrosão são significativamente afetadas pela composição química. Também é bem conhecido que o zinco é o principal elemento de liga para alcançar alta resistência através do envelhecimento. O magnésio é normalmente adicionado junto com o zinco para produzir $MgZn_2$ e suas fases variantes para endurecimento por precipitação. O cobre é frequentemente adicionado para melhorar o desempenho da resistência do SCC.

[009] Como é do conhecimento dos técnicos no assunto, os chamados elementos dispersóides são muito críticos para as ligas de alumínio, a fim de controlar as estruturas de grãos de recristalização. Os elementos dispersóides típicos para ligas 7xxx são Zr e Cr. O elemento dispersóide típico para ligas 2xxx é o Mn. O efeito de elementos dispersóides individuais nas propriedades tradicionais do material, como resistência e tenacidade à fratura, é relativamente bem conhecido. No entanto, não é bem conhecido se o(s) elemento(s) dispersóide(s), individualmente ou em diferentes combinações, tem um efeito significativo nas propriedades críticas de ramificação de crescimento de trinca por fadiga, EAC e ductilidade anisotrópica. Na técnica atual relacionada, essencialmente, apenas Zr ou apenas Cr é usado como elemento dispersóide para ligas aeroespaciais 7xxx. Nenhuma liga 7xxx de alta resistência usa uma combinação de Zr, Cr e Mn como dispersóides para melhorar as propriedades críticas de ramificação de crescimento de trinca por fadiga, EAC e ductilidade anisotrópica. Historicamente, o Cr foi inicialmente usado como elemento dispersóide para a liga 7xxx, como a popular liga 7075. No entanto, acreditava-se que o Cr tem um impacto negativo na resistência e tenacidade à fratura devido à sensibilidade à têmpera. Assim, as gerações posteriores da liga 7xxx usaram Zr como elemento dispersóide. O exemplo mais típico é o Zr contendo a liga 7050, que é a liga 7xxx mais utilizada para

aplicação aeroespacial. A maioria das ligas 7xxx usa Zr ou Cr como elemento dispersóide. Com base em “International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys” publicado pela Aluminium Association, é o Zr, sem outro elemento dispersóide, que é o elemento dispersóide dominante para ligas 7xxx, como AA7160, AA7199, AA7003, AA7040, AA7140, AA7041, AA7056, AA7068, AA7168, AA7099, AA7065, AA7097, AA7037, AA7081, AA7047, AA7021, AA7033, AA7034, AA7035, AA7050, AA7150, AA7250, AA7055, AA7155, AA7085, AA7093, AA7095, AA7181, AA7255, AA7185, AA7010, AA7015, AA7122, AA7136, AA7046, AA7048, AA7108. O segundo elemento dispersóide mais comum é o Cr para ligas 7xxx, como AA7075, AA7175, AA7475, AA7009, AA7049, AA7149, AA7349, AA7349, AA7249, AA7008, AA7032, AA7060, AA7278, AA7178, AA7001, AA7277.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DA INVENÇÃO

[010] A ramificação de crescimento de trincas por fadiga aprimorada, EAC e ductilidade anisotrópica, bem como alta resistência, tenacidade à fratura, fadiga, SCC e esfoliação de produtos de liga de alumínio 7xxx, como placas, forjados e extrusões, adequados para uso na fabricação de componentes estruturais aeroespaciais como grandes componentes da asa do avião, compreende 1 a 3% em peso de Cu, 1,2 a 3% em peso de Mg, 4 a 8,5% em peso de Zn, até 0,3% em peso de Mn, até 0,15% em peso de Zr, até 0,3% em peso de elementos dispersóides Cr, elementos incidentais e o saldo Al. Em uma forma de realização, a liga inclui Zr + Cr + Mn na faixa de 0,2 a 0,8% em peso. Em outra forma de realização, a liga inclui Zr + Mn na faixa de 0,07 a 0,7% em peso.

[011] Descobriu-se que uma liga de alumínio 7xxx usando as diferentes combinações de Zr, Cr e Mn como elementos dispersóides é capaz de produzir produtos de placa com melhor resistência à ramificação por fadiga,

EAC e ductilidade anisotrópica, bem como alta resistência, tenacidade à fratura, fadiga, CCS e resistência à esfoliação.

[012] O produto de alumínio de placa grossa 7xxx de alta resistência oferece uma oportunidade promissora de eficiência de combustível significativa e vantagem de redução de custos para aviões comerciais. Um exemplo de tal aplicação para a presente invenção é a caixa de asa de projeto integral, que requer produtos de liga de alumínio 7xxx de seção transversal espessa. A resistência do material é um fator chave de projeto para redução de peso. Também são importantes a ductilidade, tolerância a danos, resistência à corrosão sob tensão e resistência ao crescimento de trincas por fadiga.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[013] As características e vantagens da presente invenção se tornarão evidentes a partir da seguinte descrição detalhada de uma forma de realização preferencial da mesma, tomada em conjunto com os desenhos anexos, nos quais:

A Figura 1 é uma imagem que mostra o desvio de trinca por fadiga em uma amostra de teste de crescimento de trinca por fadiga;

A Figura 2 é um gráfico que mostra a tenacidade à fratura S-L da idade de laboratório de uma invenção e duas ligas fora da invenção;

A Figura 3 é um gráfico que mostra a tenacidade à fratura das ligas da invenção e fora da invenção com teores semelhantes de Zn, Cu e Mg;

A Figura 4 é um gráfico que mostra a combinação de resistência na direção LT e tenacidade à fratura na orientação L-T para ligas da invenção e fora da invenção;

A Figura 5 é um gráfico que mostra a combinação de resistência na direção LT e tenacidade à fratura na orientação T-L para ligas da invenção e fora da invenção;

A Figura 6 é um gráfico que mostra a combinação de resistência

na direção LT e tenacidade à fratura na orientação S-L para ligas da invenção e fora da invenção;

A Figura 7 é um gráfico que mostra o Kmax-dev e o comprimento de fissura normalizado (a/w) das ligas da invenção e fora da invenção; e

A Figura 8 são imagens da microestrutura de ligas de invenção e fora da invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[014] Um produto de liga de alumínio aeroespacial 7xxx é produzido usando várias combinações de Zr, Cr e Mn como elementos dispersóides para obter maior resistência ao desvio de trincas por fadiga, resistência EAC e ductilidade anisotrópica, bem como alta resistência, tenacidade à fratura, fadiga, SCC e resistência a esfoliação. A liga de alumínio 7xxx compreende, consiste essencialmente em, ou consiste em 1 a 3% em peso de Cu, 1,2 a 3% em peso de Mg, 4 a 8,5% em peso de Zn, até 0,3% em peso de Mn, até 0,15% em peso de Zr, até 0,3% em peso de elementos dispersóides Cr, elementos incidentais e o saldo Al. Em uma forma de realização, a liga inclui Zr + Cr + Mn na faixa de 0,2 a 0,8% em peso. Em outra forma de realização, a liga inclui Zr + Mn na faixa de 0,07 a 0,7% em peso.

[015] A presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou inferior para a quantidade de Zn na liga de alumínio 7xxx pode ser selecionado a partir de 4,0, 4,5, 5,0, 5,5, 6,0, 6,5, 7,0, 7,5, 8,0 e 8,5% em peso. Além dos limites superiores e inferiores alternativos listados acima para Zn, a presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou inferior para a quantidade de Cu pode ser selecionado a partir de 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,1, 2,2, 2,3, 2,4, 2,5, 2,6, 2,7, 2,8, 2,9 e 3,0% em peso. Além dos limites superiores e inferiores alternativos listados acima para Zn e Cu, a presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou

inferior para a quantidade de Mg pode ser selecionado a partir de 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 1,6, 1,7, 1,8, 1,9, 2,0, 2,1, 2,2, 2,3, 2,4, 2,5, 2,6, 2,7, 2,8, 2,9 e 3,0% em peso. Além dos limites superiores e inferiores alternativos listados acima para Zn, Cu e Mg, a presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou inferior para a quantidade de Zr pode ser selecionado a partir de 0,04, 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,09, 0,10, 0,11, 0,12, 0,13, 0,14 e 0,15% em peso. Além dos limites superiores e inferiores alternativos listados acima para Zn, Cu, Mg e Zr, a presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou inferior para a quantidade de Mn pode ser selecionado a partir de 0, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25 e 0,30% em peso. Além dos limites superiores e inferiores alternativos listados acima para Zn, Cu, Mg, Zr e Mn, a presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou inferior para a quantidade de Cr pode ser selecionado a partir de 0, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25 e 0,30% em peso. Além dos limites superiores e inferiores alternativos listados acima para Zn, Cu, Mg, Zr, Mn e Cr, a presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou inferior para a quantidade de Zr + Cr + Mn pode ser selecionado a partir de 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7 e 0,8% em peso. Além dos limites superiores e inferiores alternativos listados acima para Zn, Cu, Mg, Zr, Mn, Cr e Zr + Mn + Cr, a presente invenção inclui formas de realização alternativas em que o limite superior ou inferior para a quantidade de Zr + Mn pode ser selecionado a partir de 0,07, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 e 0,7% em peso.

[016] Em uma forma de realização, a liga de alumínio 7xxx inclui ≤ 0,12% em peso de Si, de forma preferencial ≤ 0,05% em peso de Si. Em uma forma de realização, a liga de alumínio 7xxx inclui ≤ 0,15% em peso de Fe, de forma preferencial ≤ 0,10% em peso de Fe. Em uma forma de realização, a liga de alumínio 7xxx inclui 0,005 a 0,10% em peso de Ti, de forma preferencial 0,008 a 0,08.

[017] Os “elementos incidentais” não são incluídos intencionalmente e estão presentes de forma preferencial até 0,15% em peso de elementos incidentais, ou até 0,10% em peso de elementos incidentais, ou até 0,05% em peso de elementos incidentais, com o total desses elementos incidentais não excedendo 0,35% em peso, ou 0,30% em peso, ou 0,25% em peso, ou 0,20% em peso, ou 0,15% em peso, ou 0,10% em peso.

[018] De forma preferencial < 0,15% em peso de elementos incidentais totais, ou < 0,10% em peso de elementos incidentais totais, ou < 0,05% em peso de elementos incidentais totais. “Elementos incidentais” significa quaisquer outros elementos, exceto os descritos acima Al, Cu, Mg, Zn, Mn, Zr, Cr, Si, Fe e Ti.

[019] A liga de alumínio 7xxx pode ser fabricada em placas, produtos de extrusão ou forjamento, de forma preferencial adequados para componentes estruturais aeroespaciais. Em uma forma de realização, a liga de alumínio 7xxx é um produto de liga de alumínio de alta resistência de placa grossa com uma espessura de 1 polegada a 10 polegadas, em que os limites superiores ou inferiores para a espessura podem ser 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ou 10 polegadas.

[020] Os lingotes do produto de liga de alumínio 7xxx de alta resistência podem ser fundidos, homogeneizados, laminados a quente, tratados termicamente em solução, temperados com água fria, opcionalmente esticados e envelhecidos até a têmpera desejada. Em uma forma de realização, a liga de alumínio 7xxx de alta resistência de placa grossa é um produto de placa fornecido em um temperamento T7651 ou T7451 e na faixa de espessura de 1 polegada a 10 polegadas. Os lingotes podem ser homogeneizados em temperaturas de 454 a 495ºC (849 a 923ºF). A temperatura inicial de laminação a quente pode ser de 385 a 450ºC (725 a 842ºF). A temperatura de saída da laminação a quente pode estar em uma

faixa semelhante à temperatura inicial. As placas podem ser tratadas termicamente por solução em uma faixa de temperatura de 454 a 495ºC (849 a 923ºF). As placas podem ser temperadas com água fria à temperatura ambiente e podem ser esticadas em cerca de 1,5 a 3%. A placa temperada pode ser submetida a quaisquer práticas de envelhecimento conhecidas pelos técnicos no assunto, incluindo, mas não se limitando a, práticas de envelhecimento em duas etapas que produzem um temperamento T7651 ou T7451 final. Ao usar um temperamento T7651 ou T7451, a temperatura do primeiro estágio pode estar na faixa de 100 a 140ºC (212 a 284ºF) por 4 a 24 horas e a temperatura do segundo estágio pode estar na faixa de 135 a 200ºC (275 a 392ºF) por 5 a 20 horas, de forma que o segundo estágio esteja a uma temperatura mais alta que o primeiro estágio.

[021] Em uma forma de realização preferencial, o produto de liga de alumínio 7xxx tem uma sobrevivência EAC de mais de 60 dias sob as condições de teste de “Temperatura = 70ºC, umidade relativa = 85%, tensão de carga é de 85% de Rp0,2 na direção ST”. Além disso, em uma forma de realização preferida, o produto de liga de alumínio 7xxx tem K1c L-T > 100 - 0,85 * LT-TYS, K1c T-L > 54,7 - 0,34 * LT-TYS e K1c S-L > 61,2 - 0,46 * LT-TYS. As unidades de K1c e TYS são (ksi*in$^{1/2}$) e ksi respectivamente.

[022] Embora os exemplos a seguir demonstrem várias formas de realização da presente invenção, um técnico no assunto deve entender como produtos adicionais de liga de alumínio de alta resistência podem ser fabricados de acordo com a presente invenção. Os exemplos não devem ser interpretados como limitando o escopo da proteção fornecida pela presente invenção.

EXEMPLOS (ENSAIO EM ESCALA COMERCIAL DA FÁBRICA)

[023] Dez (10) placas em escala industrial foram produzidas por lingotamento comercial DC (Diret Chill) seguido de processos de

homogeneização, laminação a quente, tratamento térmico de solução, têmpera, estiramento e envelhecimento para placas de diferentes espessuras. A Tabela 1 apresenta as composições químicas de 10 placas de tamanho comercial.

[024] Os últimos 7 exemplos (313016B8, 313026B7, 313027B5, 313119B0, 313163B8, 313209B9 e 313231B3) são ligas da invenção com as combinações de Zr + Cr + Mn e Zr + Mn. As três primeiras ligas (312999B6, 313001B0 e 313010B1) são ligas fora da invenção, pois possuem apenas Zr ou Cr ou Mn.

Invenção, sim ou não	ID	Calibre, in	Elementos dispersóides	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Cr	Mn	Zr	Ti
Não	312999B6	3,5	Zr	0,042	0,051	1,715	2,040	6,665	0,001	0,000	0,093	0,022
Não	313001B0	3,5	Mn	0,047	0,050	1,755	1,960	6,820	0,002	0,247	0,001	0,020
Não	313010B1	3,5	Cr	0,053	0,063	1,750	2,010	6,765	0,152	0,001	0,001	0,024
Sim	313016B8	3,5	Mn + Zr	0,045	0,055	1,710	1,895	6,730	0,003	0,248	0,094	0,023
Sim	313026B7	3,5	Cr + Mn + Zr	0,045	0,061	1,725	1,935	6,700	0,155	0,252	0,099	0,022
Sim	313027B5	3,5	Cr + Mn + Zr	0,049	0,055	1,730	1,890	6,740	0,150	0,252	0,099	0,025
Sim	313119B0	3,5	Cr + Mn + Zr	0,044	0,056	1,665	2,085	7,885	0,146	0,251	0,098	0,025
Sim	313163B8	3,5	Cr + Mn + Zr	0,045	0,057	1,640	2,060	7,730	0,149	0,252	0,099	0,022
Sim	313209B9	2	Cr + Mn + Zr	0,045	0,061	1,650	2,080	7,885	0,147	0,258	0,100	0,024
Sim	313231B3	2	Cr + Mn + Zr	0,046	0,064	1,685	2,090	7,810	0,150	0,251	0,100	0,024

TABELA 1: COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE LINGOTES DE LIGA DA INVENÇÃO EM ESCALA INDUSTRIAL E FORA DA INVENÇÃO

[025] Os lingotes foram homogeneizados, laminados a quente, tratados termicamente em solução, temperados, esticados e envelhecidos até placas de têmpera final na faixa de espessura de 1 polegada a 8 polegadas. Os lingotes foram homogeneizados a uma temperatura de 465 a 490ºC (869 a

914ºF). A temperatura inicial de laminação a quente é de 400 a 440ºC (752 a 824ºF).

[026] As placas foram tratadas termicamente em solução na faixa de temperatura de 465 a 490ºC (869 a 914ºF), extintas em água fria até a temperatura ambiente e esticadas em cerca de 1,5 a 3%.

[027] Uma prática de envelhecimento em duas etapas foi usada para produzir têmperas T7651 e T7451. A temperatura do primeiro estágio está na faixa de 110 a 130ºC (230 a 266ºF) por 4 a 12 horas e a temperatura do segundo estágio está na faixa de 145 a 160ºC (293 a 320ºF) por 8 a 20 horas.

[028] O teste de resistência à tração foi realizado com base na especificação ASTM B557, cujo conteúdo é expressamente incorporado neste documento por referência. A tenacidade à fratura por deformação plana (K1c) foi medida de acordo com ASTM E399, cujo conteúdo é expressamente incorporado aqui por referência, usando amostras de CT.

[029] A resposta ao envelhecimento de resistência e tenacidade à fratura foi avaliada para variantes de liga selecionadas. A Tabela 2 mostra as propriedades para diferentes tempos de envelhecimento. Os resultados mostram que a resistência diminui e a tenacidade à fratura aumenta à medida que o tempo de envelhecimento aumenta. No entanto, a liga da invenção, para um determinado nível de resistência, tem melhor tenacidade à fratura do que as ligas que não são da invenção. Este resultado pode ser ainda mais claramente demonstrado pela Figura 2

Liga da invenção, Sim ou Não	**Lote**	**Liga**	**Tempo de envelhecimento (hora)**	**LT YTS**	**LT ELG**	**S-L K1c (ksi*in*1/2)**	**EC (%/ACS)**
N	312999B6	Zr	3,0	79,1	10,6	27 A	39,2
N	312999B6	Zr	3,9	74,9	9,3	27,5	39,3
N	312999B6	Zr	7,8	70,7	11,3	29,1	41,4

Liga da invenção, Sim ou Não	Lote	Liga	Tempo de envelhecimento (hora)	LT YTS	LT ELG	S-L K1c (ksi*in*1/2)	EC (%/ACS)
N	312999B6	Zr	11,2	67,2	12,0	31,0	42,2
N	313010B1	Cr	3,0	76,4	11,6	31,2	39,9
N	313010B1	Cr	3,9	73,0	10,5	31,1	39,4
N	313010B1	Cr	7,8	66,2	10,9	33,4	41,5
N	313010B1	Cr	11,2	62,5	11,0	34,8	42,5
S	313026B7	Zr + Cr + Mn	3,0	76,1	10,6	34,0	36,3
S	313026B7	Zr + Cr + Mn	3,9	73,2	11,0	33,2	36,8
S	313026B7	Zr + Cr + Mn	7,8	70,3	10,4	35,4	36,8
S	313026B7	Zr + Cr + Mn	11,2	66,3	11,4	38,2	37,8

TABELA 2: A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO LT, ALONGAMENTO, TENACIDADE À FRATURA S-L E EC DE UMA INVENÇÃO E DUAS PLACAS DE LIGA FORA DA INVENÇÃO.

[030] A caracterização abrangente de resistência, tenacidade à fratura, resistência à corrosão, resistência ao desvio de trincas por fadiga e ductilidade anisotrópica que são críticas para aplicações aeroespaciais foram conduzidas para temperatura e tempo de envelhecimento selecionados.

[031] A Tabela 3 fornece as propriedades de tração e tenacidade à fratura para amostras de liga da invenção e fora da invenção. As terminologias comuns familiares aos técnicos no assunto são usadas nesta tabela para resistência e tenacidade à fratura.

[032] A liga da invenção tem melhor tenacidade à fratura. Isso pode ser visto na Tabela 3 e também demonstrado exemplarmente pela Figura 3, que compara a tenacidade à fratura de ligas da invenção e fora da invenção com teores semelhantes de Zn, Cu e Mg. Conforme mostrado nas Figuras 3, 4, 5 e 6, a liga da invenção tem melhor desempenho em termos da combinação

de resistência e tenacidade à fratura do que a liga fora da invenção.

Liga da invenção, Sim ou Não	ID	Calibre, in	Elementos dispersóides	LTUTS (ks)	LTYTS (ksi)	LTELG(%)	LUTS (ksi)	LYTS (ks)	LELG (%)	STUTS (ks))	STYTS (ks)	STELG (%)	L-TK1C (ksi*in*1/2)	T-LK1C (ksi*in*1/2)	S-LK1c (ksi*in*1/2)
Não	312999B6	3,5	Zr	75,5	67,4	119	75,0	68,2	14,9	74,1	63,6	8,1	39,8	29,8	28,1
Não	313001B0	3,5	Mn	74,3	65,4	9,7	73,9	66,9	114	71,9	62,1	7,2	39,1	31,2	30,6
Não	313010B1	3,5	Cr	68,4	57,9	126	68,5	58,5	15,9	68,4	56,2	7,9	48,8	34,9	32,5
Sim	313016B8	3,5	Mn + Zr	73,1	63,4	117	72,5	64,6	14,5	72,0	60,3	7,6	46,9	36,3	33,7
Sim	313026B7	3,5	Cr + Mr + Zr	70,0	58,8	122	70,0	59,8	14,7	70,6	58,0	9,4	52,8	39,3	37,4
Sim	313027B5	3,5	Cr + Mr + Zr	68,8	59,1	127	70,2	60,4	15,3	70,4	58,1	9,1	53,1	40,0	38,4
Sim	313119B0	3,5	Cr + Mr + Zr	74,9	64,8	110	74,8	66,3	14,6	76,4	63,7	7,7	48,8	31,7	34,5
Sim	313163B8	3,5	Cr + Mr + Zr	75,0	64,8	112	75,0	66,6	13,9	76,6	64,1	9,3	46,4	33,9	30,7
Sim	313209B9	2	Cr + Mr + Zr	82,9	75,7	127	80,9	75,6	13,2	81,1	70,9	5,7	93,3	32,6	28,8
Sim	313231B3	2	Cr + Mr + Zr	82,4	74,9	128	80,6	74,9	13,8	82,1	70,7	7,0	39,2	32,9	30,9

TABELA 3: A RESISTÊNCIA, ALONGAMENTO E TENACIDADE À FRATURA DAS PLACAS DE LIGA DA INVENÇÃO E FORA DA INVENÇÃO

[033] A resistência à fissuração assistida pelo meio ambiente (EAC) é um requisito crítico de propriedade do produto para aplicação aeroespacial. Um método de avaliação comum é testar a duração dias antes da falha sob certas condições de carga e teste de Temperatura = 70ºC, umidade relativa = 85%. No pedido de patente atual, a tensão de carregamento é de 85% de Rp0,2 na direção ST. A amostra é retirada na direção ST centrada em T/2 (meio da espessura da placa).

[034] O EAC é de maior preocupação para as recentes ligas de alumínio 7xxx de alta resistência. A maioria das ligas aeroespaciais 7xxx de alta resistência recentemente desenvolvidas usa Zr como elemento

dispersóide, sem elementos dispersóides de Cr e Mn.

[035] A Tabela 4 apresenta as químicas da liga de alumínio 7xxx de alta resistência recentemente desenvolvida. O Zr está na faixa de 0,07 a 0,12% em peso. O Cr e o Mn só existem nestas ligas como elementos de impureza. Os níveis são extremamente baixos, iguais ou inferiores a 0,01% em peso. Como exemplos experimentais em escala comercial, as placas de tais ligas foram fabricadas de acordo com a prática normal em escala industrial conhecida por qualquer um técnico no assunto.

Liga da invenção, Sim ou Não	Elementos dispersóides	ID da placa	Calibre, in	Cu	Mg	Zn	Cr	Zr	Ml	Ti	Si	Fe
Não	Zr	A7C85	4,50	1,63	1,53	7,32	0,00	0,12	0,00	0,02	0,03	0,03
Não	Zr	C7449	4,00	1,91	2,10	7,82	0,01	0,10	0,01	0,02	0,04	0,07
Não	Zr	C7C56	3,00	1,70	1,70	8,65	0,01	0,07	0,01	0,03	0,04	0,07
Não	Zr	T0C97	4,00	1,36	1,85	8,19	0,00	O,11	0,00	0,02	0,03	0,07
Não	Zr	T0C99	3,00	1,74	2,05	7,73	0,00	0,09	0,00	0,04	0,03	0,05

TABELA 4: AS QUÍMICAS DA LIGA 7XXX DE ALTA RESISTÊNCIA RECENTEMENTE DESENVOLVIDA COM ELEMENTO DISPERSÓIDE DE ZR

[036] A Tabela 5 a seguir fornece os resultados do teste EAC. Três cupons de teste (Rep1, Rep2, Rep3) foram testados para placas de liga da invenção (313016B8 e 313026B7) e placas de liga fora da invenção (A7085, C7449, C7056, T0097, T0099). Os resultados indicam que a liga da presente invenção tem uma resistência EAC muito melhor do que outras ligas de alta resistência fora da invenção. Para a placa de liga da invenção Cr + Mn + Zr ID 313026B7, os três cupons sobreviveram mesmo após 150 dias, que são os dias de corte para o teste EAC. Em contraste, todos os cupons de liga fora da invenção falharam no teste EAC no intervalo de 3 a 21 dias.

Liga da invenção, Sim ou Não	Elementos dispersóides	Placa ID	Calibre, in	Estresse de carregamento % de S TYS	EAC Dias de Falhas		
					Rep1	Rep2	Rep3
Sim	Mn + Zr	313016B8	3,50	85%	69	67	62
Sim	Cr + Mn + Zr	313026B7	3,50	85%	> 150	> 150	> 150
Não	Zr	A7085	4,50	85%	15	20	14
Não	Zr	C7449	4,00	85%	12	12	12
Não	Zr	C7056	3,00	85%	3	1	1
Não	Zr	T0097	4,00	85%	3	3	3
Não	Zr	T0099	3,00	85%	17	18	21

TABELA 5: DESEMPENHO DE TESTE EAC DE LIGAS, A 70ºC E 85% DE UR.

[037] O desvio de trinca por fadiga foi avaliado com base na ASTM E647, cujo conteúdo é expressamente incorporado neste documento por referência. A orientação do cupom é L-S, que tem a maior chance de haver desvio da trinca durante a propagação da trinca. A Tensão Compacta padrão, que é C (T), dimensão do cupom foi usada para este teste. O procedimento de teste FCGR foi de acordo com ASTM E647 em geral com os seguintes requisitos específicos: (1) R = 0,1 e f = 25 Hz; (2) A pré-fissuração foi realizada sob amplitude de carga constante. Após a pré-fissuração, o teste é realizado sob amplitude de carga constante na mesma carga da pré-fissuração. O teste foi realizado à temperatura ambiente (por exemplo 66-85ºF). A umidade relativa (UR) está em ambiente normal de laboratório.

[038] A determinação do desvio de fissura foi com base em “qualquer coisa que normalmente invalidaria o teste E647 FCG (até o ponto de desvio de fissura)” invalidaria o teste Kmax-dev (por exemplo, crescimento de fissura fora do plano em mais de 20o ou desvio de fissura após o critério do ligamento remanescente ser excedido). Depois que o ponto de ramificação do

desvio foi determinado, o comprimento da trinca foi medido e calculado pelo método de média ponderada de três pontos com base na amostra de fratura. A equação para o comprimento médio ponderado é a = (frente + verso + 2* centro) /4. O maior comprimento de trinca e maior Kmax-dev indicam melhor resistência ao desvio de trinca.

[039] O comprimento da trinca e Kmax-dev no ponto de desvio da trinca são dados na Tabela 6 para lotes de ligas fora da invenção da invenção. O “Comprimento da rachadura/W” é o comprimento da rachadura normalizado por largura do cupom de teste. A Figura 7 apresenta a comparação da combinação de comprimento de trinca normalizado e Kmax-dev para placas de ligas de invenção e fora da invenção na faixa de espessura de 3,5 polegadas. Pode ser visto que as placas de liga da invenção têm uma resistência ao desvio de crescimento de trinca muito melhor em termos de comprimento de trinca e Kmax-dev no ponto de desvio de trinca.

Liga da invenção, Sim ou Não	**Placa Ga, in**	**ID**	**Elementos dispersóides**	**Repetição de teste**	**Orientação**	**Comprimento da fenda, milímetros**	**Comprimento da rachadura/W**	**Kmax-dev 1,2 MPa*m**
Não	3,5	31299986	Zr	1	L-S	44,11	0,69	44,60
				2	L-S	42,49	0,67	39,15
Não	3,5	312001B0	Mn	1	L-S	43,55	0,69	42,75
				2	L-S	38,76	0,61	30,49
Sim	3,5	313016B8	Mn + Zr	1	L-S	47,38	0,75	57,66
				2	L-S	47,50	0,75	57,95
Sim	3,5	313026B7	Cr + Mn + Zr	1	L-S	47,05	0,74	55,73
				2	L-S	47,88	0,75	60,53

TABELA 6: O KMAX-DEV E O COMPRIMENTO DA TRINCA NO PONTO DE DESVIO DA TRINCA PARA LIGAS DE INVENÇÃO E FORA DA INVENÇÃO

[040] As propriedades de tração anisotrópicas, especialmente a ductilidade de tração anisotrópica, podem ser significativamente diferentes para diferentes direções de teste. Esse comportamento de material anisotrópico é muito importante para aplicações aeroespaciais de placas grossas de alta resistência. Os técnicos no assunto normalmente usam a direção de 45 graus de espessura (ST) para a direção L (ST45L) como direção de teste ortotrópica, uma vez que é a pior orientação de ductilidade. O cupom foi cortado do local T/2. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 7. Conforme demonstrado na Tabela 7, a liga da invenção tem uma melhor combinação de resistência e ductilidade anisotrópica.

Liga da invenção, Sim ou Não	ID	Calibre, in	Química de liga básica	Elementos dispersóides	LT YTS (ksi)	Alongamento, % ST-45-L
Não	312999B6	3,5	NG7x	Zr	67,4	3,35
Não	313CC1B0	3,5	NG7x	Mn	65,4	2,90
Não	313C1CB1	3,5	NG7x	Cr	57,9	5,60
Sim	313C16BS	3,5	NG7x	Mn + Zr	63,4	3,70
Sim	313C26B7	3,5	NG7x	Cr + Mn + Zr	58,8	4,65
Sim	313C27B5	3,5	NG7x	Cr + Mn + Zr	59,1	5,90
Sim	313119B0	3,5	7099	Cr + Mn + Zr	64,8	3,65
Sim	313163BS	3 5	7099	Cr + Mn + Zr	64,8	2,70

TABELA 7: DUTILIDADE ANISOTRÓPICA DE LIGAS DE INVENÇÃO E FORA DA INVENÇÃO

[041] A resistência à corrosão sob tensão é fundamental para a aplicação aeroespacial. O teste padrão de resistência à corrosão sob tensão foi realizado de acordo com os requisitos da ASTM G47, cujo conteúdo é expressamente incorporado aqui por referência, que é a imersão alternada em

uma solução de NaCl a 3,5% sob deflexão constante. Três amostras (Repetição 1, Repetição 2 e Repetição 3) foram testadas por amostra. Os níveis de estresse de teste são 25kSi, 35ksi e 45kSi, que são os limites de estresse para T7651, T7451 e T7351, respectivamente. A duração limite do teste de dias sem falha é normalmente de 20 dias. A direção de teste é a direção ST. Os cupons de teste foram extraídos do centro da placa.

[042] A Tabela 8 apresenta os resultados do teste SCC. Todos os espécimes de liga da invenção e fora da invenção sobreviveram 20 dias de teste a 25ksi. Portanto, todas as amostras atendem aos requisitos de têmpera T7651. Para a placa de 3,5”, todos os espécimes sobreviveram 20 dias testando a 35ksi e 45ksi. Portanto, todas as placas de 3,5” também atendem aos requisitos de têmpera T7451 e T7351.

Liga da invenção, Sim ou Não	**ID**	**Calibre, in**	**Elementos dispersóides**	**SCC a 25 ksi**			**SCC a 35 ksi**			**SCC a 45 ksi**		
				Repetição 1	**Repetição 2**	**Repetição 3**	**Repetição 1**	**Repetição 2**	**Repetições**	**Repetição 1**	**Repetição 2**	**Repetição 3**
Não	31299986	3,5	Zr	> 49	> 45	> 45	36	38	> 45	24	35	> 49
Não	313001B0	3,5	Mi	> 49	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	28	> 45	> 49
Não	313010B1	3,5	Cr	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 49
Sim	313016B8	3,5	M + Zr	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 49
Sim	313026B7	3,5	Cr + Mn + Zr	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 49
Sim	313027	3,5	Cr + Mn +	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	> 49

Liga da invenção, Sim ou Não	ID	Calibre, in	Elementos dispersóides	SCC a 25 ksi			SCC a 35 ksi			SCC a 45 ksi		
				Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 1	Repetição 2	Repetições	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3
	B5		Zr									
Sim	313119B0	3,5	Cr + Mn + Zr	> 45	> 45	> 45	38	48	> 45	21	29	> 49
Sim	313163B8	3,5	Cr + Mn + Zr	48	> 45	> 45	48	> 45	> 45	27	38	44
Sim	31320989	2	Cr + Mn + Zr	35	35	37	5	5	12	5	5	5
Sim	313231B3	2	Cr + Mn + Zr	33	> 45	> 45	12	13	34	5	7	8

TABELA 8: OS RESULTADOS DOS TESTES SCC

[043] A resistência à corrosão por esfoliação foi testada de acordo com ASTM G34, cujo conteúdo é expressamente incorporado neste documento por referência. O tamanho da amostra é de 51 mm (2”) na direção LT e 102 mm (4”) na direção L. O teste foi realizado nas posições de espessura da superfície (T/10) e centro da placa (T/2). Conforme mostrado na Tabela 9, todas as amostras foram classificadas como pico (*pitting*), que está passando com base em ASTM G34.

Liga da invenção, Sim ou Não	ID	Calibre, in	Elementos dispersóides	Classificação EXCO		Resultado EXCO
				T/2	T/10	
Não	312999B6	3,5	Zr	Pico	Pico	Passou
Não	313001B0	3,5	Mn	Pico	Pico	Passou
Não	313010B1	3,5	Cr	Pico	Pico	Passou
Sim	313016B8	3,5	Mn + Zr	Pico	Pico	Passou

Liga da invenção, Sim ou Não	ID	Calibre, in	Elementos dispersóides	Classificação EXCO		Resultado EXCO
				T/2	T/10	
Sim	313026B7	3,5	Cr + Mn + Zr	Pico	Pico	Passou
Sim	313027B5	3,5	Cr + Mn + Zr	Pico	Pico	Passou
Sim	313119B0	3,5	Cr + Mn + Zr	Pico	Pico	Passou
Sim	313163B8	3,5	Cr + Mn + Zr	Pico	Pico	Passou
Sim	313209B9	2	Cr + Mn + Zr	Pico	Pico	Passou
Sim	313231B3	2	Cr + Mn + Zr	Pico	Pico	Passou

TABELA 9: RESULTADO DO TESTE DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR ESFOLIAÇÃO DAS LIGAS DA INVENÇÃO

[044] A propriedade de fadiga suave foi testada de acordo com os requisitos da ASTM E466, cujo conteúdo é expressamente incorporado aqui por referência. Os espécimes LT foram testados de cada placa na espessura média da placa e centrados ao longo da direção transversal. A Tabela 10 fornece o resultado do teste de fadiga. Todas as placas atenderam ao critério comum aceito industrialmente, que é 90.000 ciclos de amostra individual e 120.000 ciclos de média logarítmica de todas as amostras.

Liga da invenção, Sim ou Não	ID	Calibre, in	Elementos dispersóides	Fadiga na cabeça, ciclos	Fadiga nos ciclos da cauda
Não	312999B6	3,5	Zr	200000	200000
Não	313001B0	3,5	Mn	200000	200000
Não	313010B1	3,5	Cr	200000	200000
Sim	313016B8	3,5	Mn + Zr	200000	200001
Sim	313026B7	3,5	Cr + Mn + Zr	200001	200000
Sim	313027B5	3,5	Cr + Mn + Zr	114830	200000
Sim	313119B0	3,5	Cr + Mn + Zr	300000	300000
Sim	313163B8	3,5	Cr + Mn + Zr	300000	300000
Sim	313209B9	2	Cr + Mn + Zr	300000	300000
Sim	313231B3	2	Cr + Mn + Zr	300000	300000

TABELA 10: RESULTADO DO TESTE DE FADIGA SUAVE DAS LIGAS DA INVENÇÃO

[045] A estrutura do grão, especialmente a estrutura do grão de recristalização, é fortemente afetada por elementos dispersóides. A Figura 8

fornece as estruturas de grão típicas da liga fora da invenção somente Zr (312999B6), liga fora da invenção somente Mn (313001B0), bem como a liga da invenção Mn + Cr (313016B8) e a liga da invenção Cr + Mn + Zr (313026B7). A Tabela 11 fornece a porcentagem em volume de grãos recristalizados em diferentes camadas de espessura de T/8, T/4 e T/2. A recristalização foi surpreendentemente reduzida para as ligas Mn + Zr e Cr + Mn + Zr da invenção.

Liga da invenção, Sim ou Não	ID	Calibre, in	Elementos dispersóides	Recristalização, %			
				T/8	T/4	T/2	Média
Não	312999B6	3,5	Zr	1,1	5,0	8,3	4,8
Não	313001B0	3,5	Mn	100	100	100	100
Sim	313016B8	3,5	Mn + Zr	0,2	4,0	4,3	2,8
Sim	313026B7	3,5	Cr + Mn + Zr	0,0	0,3	0,5	0,3
Sim	313027B5	3,5	Cr + Mn + Zr	0,0	0,1	0,5	0,2
Sim	313119B0	3,5	Cr + Mn + Zr	0,0	0,1	0,2	0,1
Sim	313163B8	3,5	Cr + Mn + Zr	0,1	0,1	0,5	0,2
Sim	313209B9	2	Cr + Mn + Zr	0,0	0,1	0,2	0,1
Sim	313231B3	2	Cr + Mn + Zr	0,0	0,2	0,6	0,3

TABELA 11: A RECRISTALIZAÇÃO DE LIGAS DE INVENÇÃO E FORA DA INVENÇÃO EM DIFERENTES CAMADAS DE ESPESSURA DE T/8, T/4 E T/2

[046] Embora a presente invenção tenha sido divulgada em termos de uma forma de realização preferencial, será entendido que inúmeras modificações e variações adicionais podem ser feitas sem afastamento do escopo da invenção, conforme definido pelas seguintes reivindicações:

REIVINDICAÇÕES

1. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO 7XXX DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTA TENACIDADE À FRATURA, caracterizado por compreender:

4,0 a 8,5% em peso de Zn,

1,0 a 3,0% em peso de Cu,

1,2 a 3,0% em peso de Mg,

até 0,15% em peso de Zr como elemento dispersóide,

até 0,30% em peso de Mn como elemento dispersóide,

até 0,30% em peso de Zr como elemento dispersóide,

até 0,15% em peso de elementos incidentais, com o total desses elementos incidentais não excedendo 0,35% em peso, e o saldo Al,

em que Zr + Cr + Mn varia de 0,2 a 0,8% em peso e/ou Zr + Mn varia de 0,07 a 0,7% em peso.

2. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por compreender ainda ≤ 0,12% em peso de Si.

3. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado por compreender ≤ 0,05% em peso de Si.

4. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 2, caracterizado por compreender ainda ≤ 0,15% em peso de Fe.

5. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado por compreender ≤ 0,10% em peso de Fe.

6. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado por compreender ainda 0,005 a 0,10% em peso de Ti.

7. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado por ter uma

sobrevivência EAC superior a 60 dias sob as condições de teste de “Temperatura = 70ºC, umidade relativa = 85%, tensão de carga é de 85% de Rp0,2 na direção ST”.

8. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com a reivindicação 7, caracterizado por ter K1c L-T > 100 - 0,85 * LT-TYS, K1c T-L > 54,7 - 0,34 * LT-TYS e K1c S-L > 61,2 - 0,46 * LT-TYS, em que as unidades de K1c e TYS são (ksi*$in^{1/2}$) e ksi respectivamente.

9. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo referido produto de liga de alumínio ser uma placa, extrusão ou produto de forjamento de 1 a 10 polegadas de espessura.

10. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO 7XXX DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTA TENACIDADE À FRATURA, caracterizado por consistir em:

4,0 a 8,5% em peso de Zn,

1,0 a 3,0% em peso de Cu,

1,2 a 3,0% em peso de Mg,

até 0,15% em peso de Zr como elemento dispersóide,

até 0,30% em peso de Mn como elemento dispersóide,

até 0,30% em peso de Zr como elemento dispersóide,

≤ 0,12% em peso de Si, ≤ 0,15% em peso de Fe, 0,005 a 0,10% em peso de Ti,

até 0,15% em peso de elementos incidentais, com o total desses elementos incidentais não excedendo 0,35% em peso, e o saldo Al,

em que Zr + Cr + Mn varia de 0,2 a 0,8% em peso e/ou Zr + Mn varia de 0,07 a 0,7% em peso.

11. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado por compreender ≤ 0,05% em peso de Si.

12. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 10 a 11, caracterizado por compreender ≤ 0,10% em peso de Fe.

13. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 10 a 12, caracterizado por ter uma sobrevivência EAC superior a 60 dias sob as condições de teste de "Temperatura = 70ºC, umidade relativa = 85%, tensão de carga é de 85% de Rp0,2 na direção ST".

14. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 10 a 13, caracterizado por ter K1c L-T > 100 - 0,85 * LT-TYS, K1c T-L > 54,7 - 0,34 * LT-TYS e K1c S-L > 61,2 - 0,46 * LT-TYS, em que as unidades de K1c e TYS são (ksi*$in^{1/2}$) e ksi respectivamente.

15. PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 14, caracterizado pelo referido produto de liga de alumínio ser uma placa, extrusão ou produto de forjamento de 1 a 10 polegadas de espessura.

16. MÉTODO DE FABRICAÇÃO DE UM PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA DE UMA LIGA DA SÉRIE AA7XXX, o método caracterizado por compreender as etapas de:

a. estoque de fundição de um lingote de uma liga de alumínio da série AA7xxx compreendendo o produto de liga de alumínio, conforme definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 15

b. homogeneização do estoque de fundição;

c. trabalhar a quente o estoque por um ou mais métodos selecionados a partir do grupo que consiste em laminação, extrusão e forjamento;

d. tratamento térmico de solução (SHT) do estoque trabalhado a quente;

e. têmpera com água fria do referido estoque SHT;

f. opcionalmente esticar o estoque SHT; e

h. envelhecimento do SHT, estoque temperado com água fria e opcionalmente estoque esticado para um temperamento desejado.

17. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pela referida etapa de homogeneização incluir homogeneização a temperaturas de 454 a 495ºC (849 a 923ºF).

18. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 16 a 17, caracterizado pela referida etapa de trabalho a quente incluir laminação a quente a uma temperatura de 385 a 450ºC (725 a 842ºF).

19. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 16 a 18, caracterizado pela referida etapa de tratamento térmico em solução incluir tratamento térmico em solução na faixa de temperatura de 454 a 495ºC (849 a 923ºF).

20. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 16 a 19, caracterizado pela referida etapa de alongamento opcional incluir alongamento em cerca de 1,5 a 3%.

21. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 16 a 20, caracterizado pela referida etapa de envelhecimento incluir um processo de envelhecimento em duas etapas em que a temperatura do primeiro estágio varia de 100 a 140ºC (212 a 284ºF) por 4 a 24 horas e uma temperatura do segundo estágio varia de 135 a 200ºC (275 a 392ºF) por 5 a 20 horas, de forma que o segundo estágio esteja a uma temperatura mais alta que o primeiro estágio.

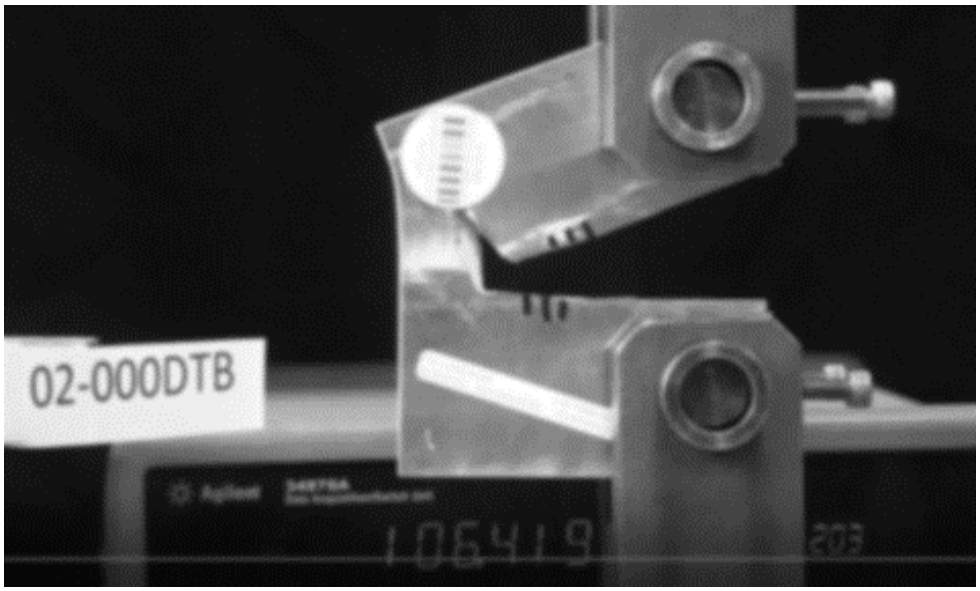


Figura 1

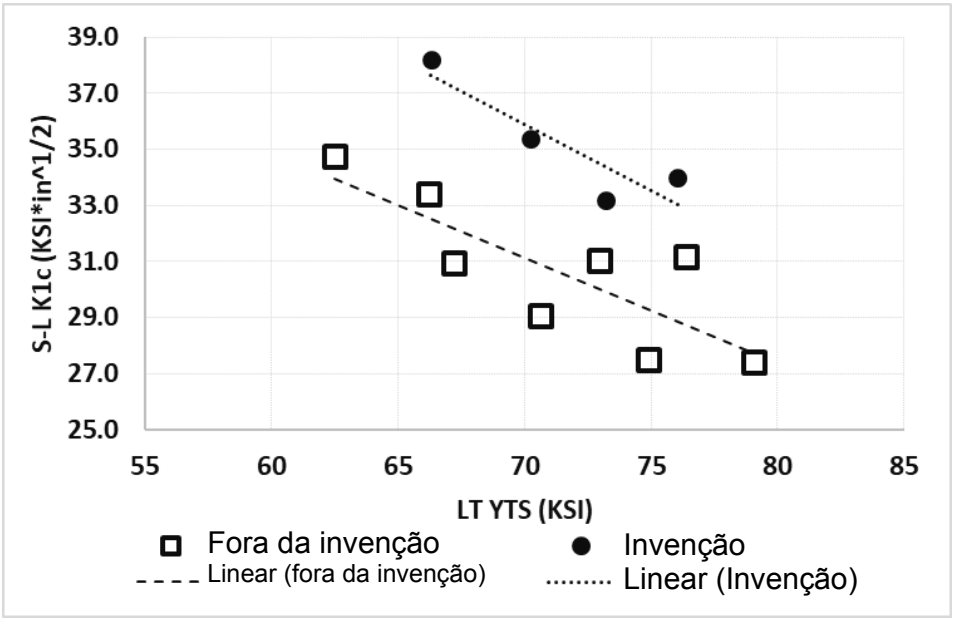


Figura 2

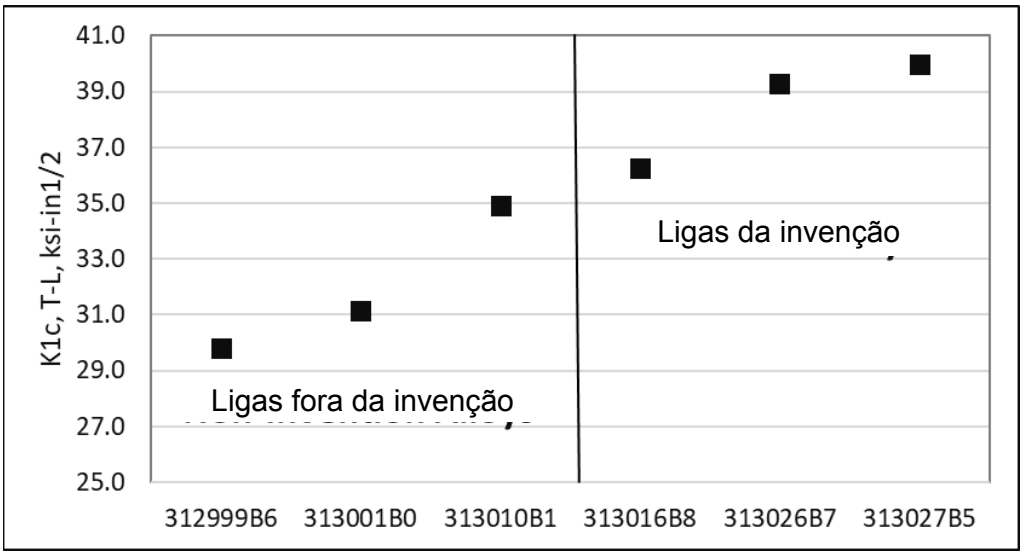


Figura 3

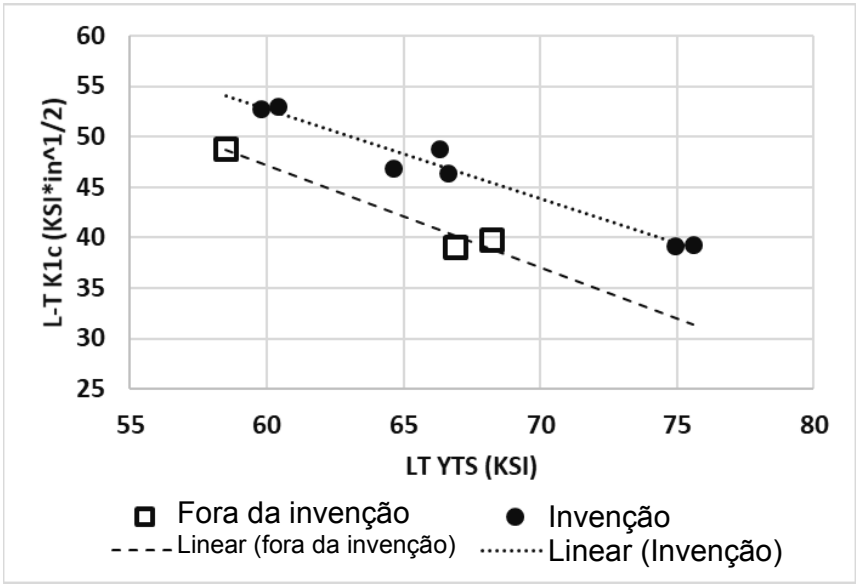


Figura 4

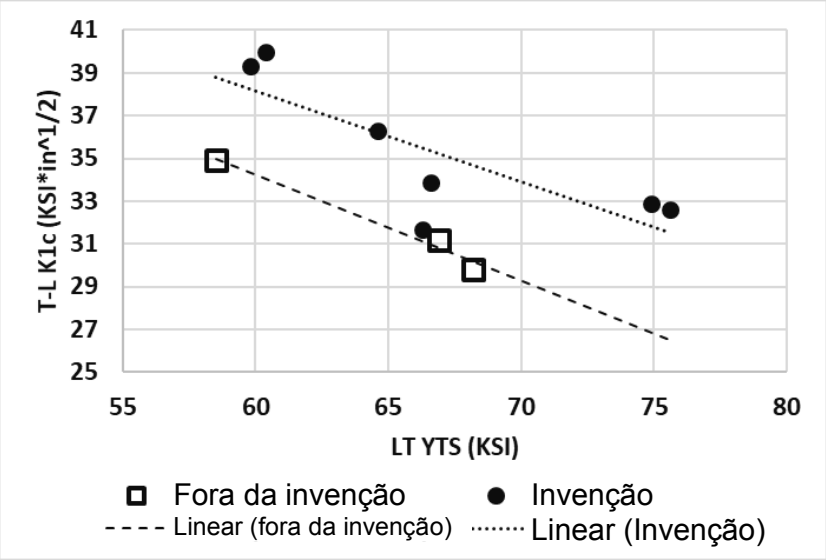


Figura 5

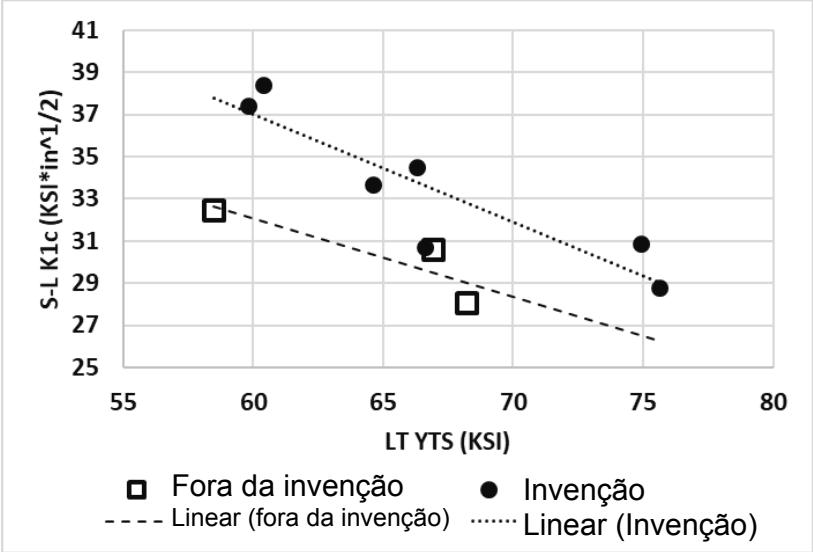


Figura 6

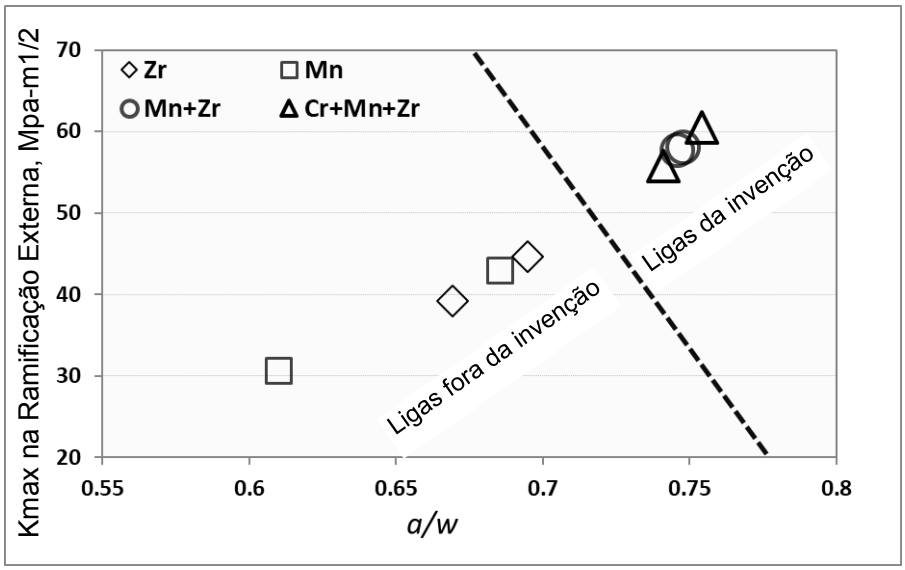


Figura 7

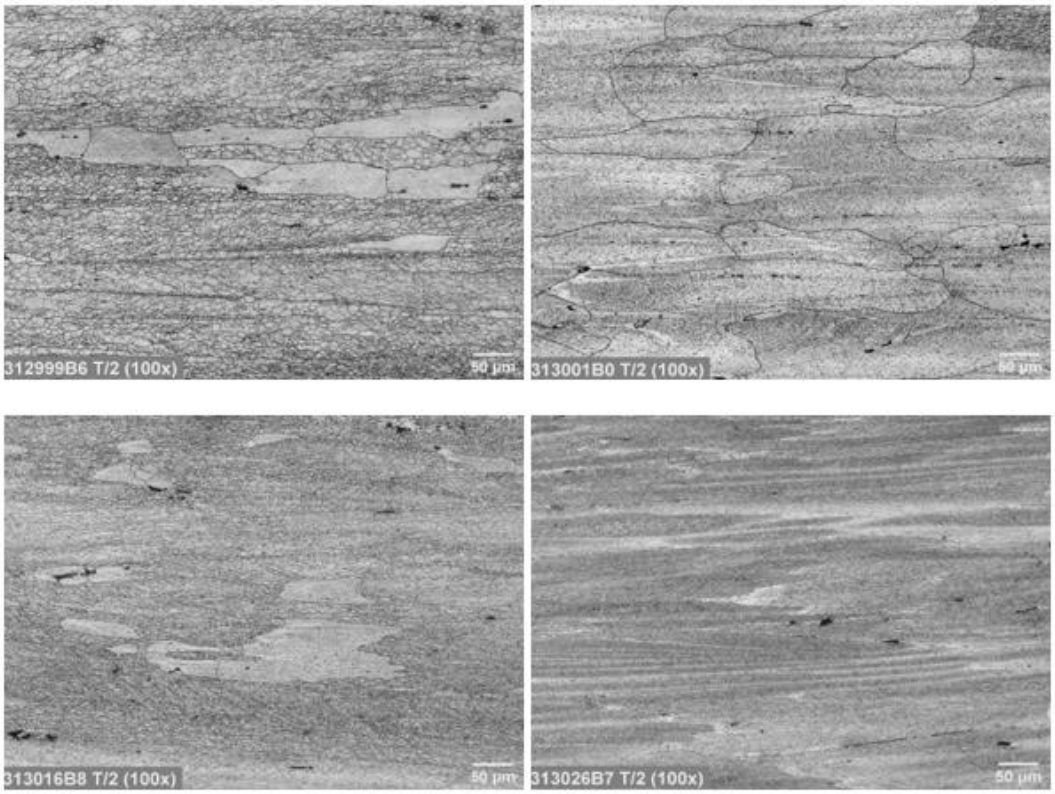


Figura 8

RESUMO

“PRODUTOS DE LIGA DE ALUMÍNIO 7XXX DE ALTA RESISTÊNCIA E ALTA TENACIDADE À FRATURA E MÉTODO DE FABRICAÇÃO DE UM PRODUTO DE LIGA DE ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA DE UMA LIGA DA SÉRIE AA7XXX”

São divulgados produtos de liga de alumínio dispersóides 7xxx com desvio de crescimento de trincas por fadiga aprimorado e resistência a Craqueamento Ambientalmente Assistido (EAC - *Environmentally Assisted Cracking*). A liga de alumínio 7xxx compreende de 1 a 3% em peso de Cu, 1,2 a 3% em peso de Mg, 4 a 8,5% em peso de Zn, até 0,3% em peso de Mn, até 0,15% em peso de Zr, até 0,3% em peso de elementos dispersóides de Cr, elementos incidentais e o saldo Al. Em uma forma de realização, a liga inclui Zr + Cr + Mn na faixa de 0,2 a 0,8% em peso. Em outra forma de realização, a liga inclui Zr + Mn na faixa de 0,07 a 0,7% em peso. Esta liga pode ser fabricada para produtos de placa, extrusão ou forjamento e é especialmente adequada para componentes estruturais aeroespaciais. Os produtos melhoraram a resistência ao EAC e a resistência ao desvio de crescimento de trincas por fadiga. Enquanto isso, os produtos têm uma excelente combinação de resistência, tenacidade à fratura, ductilidade em diferentes orientações e Corrosão por Estresse (SCC) e resistência à corrosão por esfoliação adequada para aplicação aeroespacial.