

República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(11) **PI 0207928-3 B1**



(51) Int.Cl.:
C22B 9/18

(22) Data de Depósito: 25/02/2002
(45) Data da Concessão: 07/02/2012
(RPI 2144)

(54) Título: PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE LINGOTES DE GRANDE DIÂMETRO DE LIGAS À BASE DE NÍQUEL.

(30) Prioridade Unionista: 08/03/2001 US 09/802.064

(73) Titular(es): ATI Properties, Inc.

(72) Inventor(es): A. Stewart Ballantyne, Betsy J. Bond, Laurence A. Jackman

"PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE LINGOTES DE GRANDE DIÂMETRO DE LIGAS À BASE DE NÍQUEL"

CAMPO TÉCNICO E APLICABILIDADE INDUSTRIAL DA INVENÇÃO

A presente invenção se refere a um processo para a produção de lingotes de alta qualidade de grande diâmetro de superligas à base de níquel. Mais particularmente, a presente invenção se refere a um processo para a produção de lingotes de superligas à base de níquel, incluindo a Liga 718 (UNS N07718) e outras superligas à base de níquel que experimentam uma segregação significativa durante a fundição, e em que os lingotes têm um diâmetro superior a 762 mm (30 pol) e são substancialmente isentos de segregação negativa, são isentos de sardas, e são isentos de outra segregação positiva. A presente invenção também é dirigida a lingotes da Liga 718, que têm diâmetros superiores a 762 mm (30 pol), bem como a quaisquer lingotes, independentemente do diâmetro, formados usando o processo da invenção. O processo da presente invenção pode ser aplicado na, por exemplo, manufatura de lingotes de alta qualidade de grande diâmetro de superligas à base de níquel, que são produzidas em peças rotativas para geração de energia. Essas peças incluem, por exemplo, rodas e espaçadores para turbinas com base terrestre e componentes rotativos para turbinas aeronáuticas.

DESCRÍÇÃO DOS ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

Em determinadas aplicações críticas, os componentes devem ser manufaturados de superligas à base de níquel, na forma de lingotes de grande diâmetro que carecem de segregação significativa. Esses lingotes devem ser substancial-

almente isentos de segregações positiva e negativa, e devem ser completamente isentos da manifestação de segregação positiva, conhecida como "sardas". As sardas são a manifestação mais comum de segregação positiva e são regiões atacadas 5 escuras enriquecidas em elementos solutos. As sardas resultam do fluxo de líquido interdendrítico rico em soluto na zona esponjosa do lingote, durante a solidificação. As sardas na Liga 718 são, por exemplo, enriquecidas em nióbio, comparadas com a matriz, têm uma alta densidade de carbonetos e contêm, usualmente, fase Laves. "Pontos brancos" são o grande tipo de segregação negativa. Essas regiões atacadas escuras, que são exauridas em elementos solutos mais duros, tal como nióbio, são classificadas, tipicamente, em manchas brancas dendríticas, discretas e de solidificação. Ainda que 10 possa haver alguma tolerância para as manchas brancas dendríticas e de solidificação, as manchas brancas discretas são de maior preocupação, porque são freqüentemente associadas com um grupo de óxidos e nitretos, que pode agir como um iniciador de fendimento.

15

Os lingotes carecendo substancialmente de segregações positiva e negativa e que são também isentos de sardas 20 são aqui referidos como lingotes de "alta qualidade". Os lingotes de superligas à base de níquel de alta qualidade são necessários em determinadas aplicações críticas, incluindo, por exemplo, componentes rotativos em turbinas de geração de potência aeronáuticas ou de base terrestre e em outras aplicações nas quais os defeitos metalúrgicos relacionados com segregação podem resultar em uma falha catastrófi-

ca do componente. Como aqui usado, um lingote "carece substancialmente" de segregação positiva e negativa quando esses tipos de segregação estão inteiramente ausentes ou estão presentes apenas a um ponto que não torna o lingote inadequado para uso em aplicações críticas, tal como uso para fabricação em componentes rotativos, para aplicações em turbinas aeronáuticas e com base terrestre.

As superligas à base de níquel submetidas a segregações positiva e negativa significativas, durante a fundição, incluem, por exemplo, a Liga 718 e a Liga 706. Para minimizar a segregação, quando da fundição dessas ligas para uso em aplicações críticas, e também para garantir melhor que a liga fundida é isenta de inclusões não metálicas nocivas, o material metálico em fusão é refinado adequadamente antes de ser finalmente fundido. A Liga 718, bem como determinadas outras superligas à base de níquel propensas à segregação, tal como a Liga 706 (UNS N09706), é refinada tipicamente por uma técnica de "fusão tripla", que combina, seqüencialmente, fusão por indução a vácuo (VIM), refusão eletróscórica (ESR) e refusão sob vácuo a arco (VAR). Os lingotes de alta qualidade desses materiais propensos à segregação são, no entanto, difíceis de serem produzidos em grandes diâmetro por fusão VAR, a última etapa na seqüência de fusão tripla. Em alguns casos, os lingotes de grande diâmetro são fabricados em componentes únicos, de modo que as áreas de segregação inaceitável em lingotes fundidos por VAR não podem ser removidas seletivamente antes da fabricação do com-

ponente. Conseqüentemente, todo o lingote ou uma parte dele pode precisar ser raspado.

Os lingotes VAR das Liga 718, Liga 706 e de outras superligas à base de níquel, tais como as Liga 600, Liga 5 625, Liga 720 e Waspaloy, são necessários crescentemente em maiores pesos, e em diâmetros correspondentemente maiores, para aplicações emergenciais. Essas aplicações incluem, por exemplo, componentes rotativos para turbinas com base terrestre e aeronáuticas em desenvolvimento. Os lingotes maiores 10 são necessários não apenas para obter economicamente o peso do componente final, mas também para facilitar o trabalho termomecânico suficiente, para desbastar adequadamente a estrutura do lingote e obter todos os requisitos mecânicos e estruturais finais.

15 A fusão de grandes lingotes de superligas acentua vários aspectos metalúrgicos básicos e os relacionados com o processamento. A extração térmica durante a fusão fica mais difícil com o aumento do diâmetro do lingote, resultando em tempos de solidificação mais longos e recipientes de material fundido mais profundos. Isto aumenta a tendência para segregações positiva e negativa. Os lingotes e eletrodos maiores 20 também podem gerar tensões térmicas mais elevadas, durante o aquecimento e o resfriamento. Ainda que os lingotes do tamanho considerado por esta invenção tenham sido produzidos 25 de vários ligas à base de níquel (por exemplo, Ligas 600, 625, 706, e Waspaloy), a Liga 718 é particularmente propensa a esses problemas. Para propiciar a produção de lingotes VAR de grande diâmetro de qualidade metalúrgica, a

partir de Liga 718 e de determinadas outras superligas à base de níquel propensas à segregação, seqüências de fusão e tratamento térmico especializadas foram desenvolvidas. A despeito desses esforços, os lingotes VAR de alta qualidade 5 disponíveis comercialmente maiores de Liga 718, por exemplo, são atualmente de 508 mm (20 pol) de diâmetro, com um material limitado produzido de diâmetros de até 711 mm (28 pol). As tentativas de fundição de lingotes VAR de maior diâmetro de material de Liga 718 não foram bem sucedidas, devido à 10 ocorrência de fendimento térmico e de segregação indesejável. Devido às restrições de comprimento, os lingotes VAR de 711 mm (28 pol) de Liga 718 não pesam mais do que cerca de 9.772 kg (21.500 lb). Desse modo, os lingotes VAR de Liga 718 nos maiores diâmetros disponíveis comercialmente não 15 correspondem, de modo algum, aos pesos necessários em aplicações emergenciais requerendo material de superliga à base de níquel de alta qualidade.

Conseqüentemente, há uma necessidade para um processo aperfeiçoado de produção de lingotes VAR de grandes 20 diâmetros de alta qualidade de Liga 718. Há também uma necessidade para um processo aperfeiçoado de produção de lingotes de outras superligas à base de níquel propensas à segregação, que são substancialmente isentas de segregação negativa, são isentas de sardas e carecem, substancialmente, 25 de outras segregações positivas.

RESUMO DA INVENÇÃO

Para abordar as necessidades descritas acima, a presente invenção proporciona um novo processo para a produ-

ção de superliga à base de níquel. O processo pode ser usado para fundir lingotes VAR de alta qualidade de Liga 718, em diâmetros superiores a 762 mm (30 pol) e tendo pesos superiores a 9.772 kg (21.500 lb). Acredita-se que o processo da 5 presente invenção também pode ser aplicado na produção de lingotes VAR de grande diâmetro de outras superligas à base de níquel, submetidas à segregação significativa durante a fundição, tal como, por exemplo, a Liga 706.

O processo da presente invenção inclui a etapa 10 inicial de fundição de uma superliga à base de níquel dentro de um molde de fundição. Esta pode ser feita por VIM, descarbonatação com oxigênio sob proteção de argônio (AOD), descarbonatação de oxigênio a vácuo (VOD) ou qualquer outra técnica de fusão e vazamento primária adequada. O lingote fundido é subseqüentemente recozido e superenvelhecido por aquecimento da liga a uma temperatura do forno de pelo menos 649°C (1.200°F), por pelo menos 10 horas. (Como aqui usado, "subseqüente" e "subseqüentemente" se referem às etapas ou eventos do processo que ocorrem imediatamente uma depois da 15 outra, mas também se referem às etapas do processo ou outros eventos que são separados no tempo e/ou por etapas ou outros eventos do processo intermediários.) Em uma etapa subseqüente, o lingote é aplicado como um eletrodo ESR e é refundido por electroescória em uma velocidade de fusão de pelo menos 20 3,63 kg/min (8 lb/min). O lingote ESR é transferido para um forno de aquecimento por um período de 4 horas de solidificação completa, e é submetido subseqüentemente a um pós-tratamento térmico ESR. O tratamento térmico inclui as eta- 25

pas de retenção da liga a uma primeira temperatura do forno de 316°C (600°F) a 982°C (1.800°F) por pelo menos 10 horas, e depois aumentando-se a temperatura do forno, em um único estágio ou em múltiplos estágios, da primeira temperatura do forno para uma segunda temperatura do forno de pelo menos 1.163°C (2.125°F), de uma maneira que inibe as tensões térmicas dentro do lingote. O lingote é mantido na segunda temperatura por pelo menos 10 horas, para proporcionar ao lingote uma estrutura homogênea e com fase Laves mínima.

10 Em alguns casos, o lingote ESR pode ser fundido com um diâmetro que é maior do que o diâmetro desejado do eletrodo VAR, a ser usado em uma etapa subsequente do processo. Portanto, o processo da presente invenção pode incluir, subsequente à retenção do lingote ESR na segunda temperatura do forno, e antes da refusão a arco a vácuo, o trabalho mecânico do lingote ESR a uma temperatura elevada para alterar as dimensões do lingote e proporcionar um eletrodo VAR do diâmetro desejado. Desse modo, após o lingote ESR ter sido retido na segunda temperatura do forno, pode ser processado posteriormente em um de vários modos, incluindo o resfriamento a uma temperatura de trabalho mecânico adequado, ou resfriamento em torno da temperatura ambiente e reaquecimento subsequente a uma temperatura de trabalho mecânico adequada. Alternativamente, se o ajuste do diâmetro do lingote é desnecessário, o lingote pode ser resfriado diretamente à temperatura ambiente e processado subsequente por refusão a arco elétrico, sem a etapa de trabalho mecânico. Todas as etapas de resfriamento e reaquecimento do lin-

gote ESR, subseqüentes à retenção do lingote ESR na segunda temperatura , são conduzidas de uma maneira que inibe as tensões térmicas e que não vão resultar em fendimento térmico do lingote.

5 Em uma etapa subseqüente do presente processo, o lingote ESR é refundido em arco a vácuo a uma velocidade de fusão de 3,63 a 5 kg/minuto (8 a 11 lb/min), para proporcionar um lingote VAR. A velocidade de fusão VAR é, de preferência, de 4,09 a 4,66 kg/min (9 a 10,25 lb/min) e é, particularmente, de 4,20 a 4,63 kg/min (9,25 a 10,2 lb/min). O lingote VAR tem, de preferência, um diâmetro superior a 762 mm (30 pol) e, mais preferivelmente, tem um diâmetro de pelo menos 914 mm (36 pol).

A presente invenção é dirigida adicionalmente a um processo de produção de uma superliga à base de níquel, que é substancialmente isenta de segregações positiva e negativa e que inclui a etapa de fundição em um molde de fundição de uma liga selecionada de Liga 718 e outras superligas à base de níquel, submetidas a uma segregação significativa durante a fundição. O lingote fundido é subseqüentemente recozido e superenvelhecido a uma temperatura do forno de pelo menos 843°C (1.550°F) por pelo menos 10 horas. O lingote recozido é subseqüentemente refundido em eletroescória, a uma velocidade de fusão de pelo menos 4,54 kg/min (10 lb/min), e o lingote ESR é depois transferido para um forno de aquecimento por um período de 4 horas de solidificação completa. Nas etapas subseqüentes, o lingote ESR é submetido a um pós-tratamento térmico ESR multiestágio, por retenção do lingote

a uma primeira temperatura do forno de 482°C (900°F) a 982°C (1.800°F) por pelo menos 10 horas. A temperatura do forno é aumentada subseqüentemente por não mais do que 55,6°C/hora (100°F/hora), a uma temperatura do forno intermediária, e é 5 aumentada subseqüentemente ainda mais por não mais do que 111°C/hora (200°F/h), a uma segunda temperatura do forno de pelo menos 1.163°C (2.125°F). O lingote é mantido na segunda temperatura do forno por pelo menos 10 horas. O lingote ESR pode ser convertido em um eletrodo VAR de dimensões adequadas, se necessário, e é subseqüentemente refundido em arco a 10 vácuo, a uma velocidade de fusão de 3,63 a 5 kg/min (8 a 11 lb/min), para proporcionar um lingote VAR. Se desejado, o lingote VAR pode ser processado posteriormente, tal como por homogeneização e/ou conversão mecânica adequada às dimensões 15 desejadas.

A presente invenção também é dirigida a lingotes VAR produzidos de acordo com o processo da invenção. Além disso, a presente invenção é dirigida a lingotes VAR da Liga 718 que têm um diâmetro superior a 762 mm (30 pol), e é adicionalmente dirigida a lingotes da Liga 718 de alta qualidade, 20 tendo um diâmetro superior a 762 mm (30 pol) e que são produzidos por VAR ou por qualquer outra técnica de fusão e fundição.

A presente invenção também abrange artigos manufaturados produzidos por fabricação de artigos dos lingotes de 25 acordo com a presente invenção. Os artigos manufaturados representativos, que podem ser fabricados a partir dos lingotes da presente invenção incluem, por exemplo, rodas e espa-

çadores para uso em turbinas de base terrestre e componentes rotativos para uso em turbinas aeronáuticas.

O leitor vai considerar os detalhes e vantagens precedentes da presente invenção, bem como outros, mediante 5 consideração da descrição detalhada a seguir das modalidades da invenção. O leitor também pode compreender essas vantagens e detalhes adicionais da presente invenção mediante condução ou uso da invenção.

DESCRÍÇÃO SUCINTA DOS DESENHOS

10 Os aspectos e vantagens da presente invenção podem ser melhor entendidos por referência aos desenhos em anexo, em que:

a Figura 1 é um diagrama ilustrando genericamente uma modalidade do processo da presente invenção, em que o 15 lingote ESR tem um diâmetro de 1.016,0 mm (40 pol) e é convertido em um eletrodo VAR de diâmetro de 812,8 mm (32 pol), antes da refusão em arco a vácuo;

a Figura 2 é um diagrama ilustrando genericamente uma segunda modalidade do processo da presente invenção, em 20 que o lingote ESR tem um diâmetro de 914,4 mm (36 pol) e é convertido em um eletrodo VAR de diâmetro de 812,8 mm (32 pol), antes da refusão em arco a vácuo; e

a Figura 3 é um diagrama de uma terceira modalidade do processo da presente invenção, em que um lingote ESR 25 de diâmetro de 838,2 mm (33 pol) é fundido e é adequado sem conversão mecânica, para uso como o eletrodo VAR.

DESCRÍÇÃO DETALHADA DAS MODALIDADES DA INVENÇÃO

O processo da presente invenção propicia a produção de lingotes de grandes diâmetros, de alta qualidade da Liga 718, uma superliga à base de níquel que é propensa à segregação na fundição. Antes do desenvolvimento do presente processo, os lingotes mais pesados disponíveis comercialmente da Liga 718 eram limitados a diâmetros de cerca de 711 mm (28 pol), com pesos máximos de cerca de 9.773 kg (21.500 lb), por causa das limitações de comprimento / diâmetro. Os inventores produziram com sucesso lingotes de alta qualidade da Liga 718, com diâmetros superiores a 762 mm (30 pol) e pelo menos 915 mm (36 pol) por meio do presente processo. Esses lingotes pesaram tanto quanto 16.363 kg (36.000 lb), bem acima do peso máximo anterior para os lingotes VAR da Liga 718 de alta qualidade. Os inventores acreditam que o processo da presente invenção pode ser usado para produzir lingotes VAR de outras superligas à base de níquel, que experimentam, tipicamente, uma segregação significativa durante a fundição. Essas outras ligas incluem, por exemplo, a Liga 706.

O processo da presente invenção inclui a etapa de fundição de uma superliga à base de níquel dentro de um molde de fundição. Como verificado, a liga à base de níquel pode ser, por exemplo, a Liga 718. A Liga 718 tem a seguinte composição ampla, tudo em porcentagem em peso: cerca de 50,0 a cerca de 55,0 de níquel; cerca de 17,0 a cerca de 21,0 de cromo; 0 até cerca de 0,08 de carbono; 0 até cerca de 0,35 de manganês; 0 até cerca de 0,35 de silício; cerca de 2,8

até cerca de 3,3 de molibdênio; pelo menos um de nióbio e tântalo, em que a soma de nióbio e tântalo seja cerca de 4,75 até cerca de 5,5; cerca de 0,65 até cerca de 1,15 de titânio; cerca de 0,20 até cerca de 0,8 de alumínio; 0 até 5 cerca de 0,006 de boro; e ferro e impurezas eventuais. A Liga 718 é disponível com o nome comercial Allvac 718, da divisão Allvac da Allegheny Technologies Incorporated, Pittsburgh, Pensilvânia. A Allvac 718 tem a seguinte composição nominal (em porcentagens em peso), quando fundida em 10 diâmetros de lingotes VAR maiores: 54,0 de níquel; 0,5 de alumínio; 0,01 de carbono; 5,0 de nióbio; 18,0 de cromo; 3,0 de molibdênio; 0,9 de titânio; e ferro e impurezas eventuais.

Qualquer técnica adequada pode ser usada para fundir e moldar a liga dentro de um molde de fundição. As técnicas adequadas incluem, por exemplo, VIM, AOD e VOD. A seleção da técnica de fusão e molde é freqüentemente ditada por uma combinação de aspectos de custo e técnicos. A fundição AOD em forno a arco elétrico facilita o uso de matérias-20 primas de baixo custo, mas tende a ter um menor rendimento do que a fundição VIM, particularmente, se o vazamento pelo fundo é usado. À medida que o custo das matérias-primas aumenta, o maior rendimento da fundição VIM pode tornar essa abordagem mais econômica. As ligas contendo níveis mais altos de elementos reativos podem requerer a fundição VIM, 25 para garantir uma recuperação adequada. A necessidade para teores residuais gasosos baixos, particularmente nitrogênio,

também pode ditar o uso da fundição VIM para atingir os níveis desejados.

Após a liga ter sido moldada, pode ser mantida dentro do molde por um determinado período, para garantir 5 uma solidificação suficiente, de modo que possa ser desmolhada seguramente do molde de fundição. Aqueles versados na técnica podem determinar facilmente um tempo suficiente, se algum, para reter o lingote fundido dentro do molde. Esse tempo vai depender, por exemplo, do tamanho e das dimensões 10 do lingote, dos parâmetros da operação de fundição e da composição do lingote.

Subseqüente à remoção do lingote fundido do molde de fundição, ele é colocado em um forno de aquecimento e é recozido e superenvelhecido por aquecimento a uma temperatura 15 do forno de pelo menos 649°C (1.200°F), por pelo menos 10 horas. De preferência, o lingote é aquecido a uma temperatura do forno de pelo menos 649°C (1.200°F), por pelo menos 18 horas. Uma temperatura de aquecimento particularmente preferível é de pelo menos 843°C (1.550°F). O tratamento térmico 20 de recozimento e superenvelhecimento é intencionado para remover tensões residuais dentro do lingote, criadas durante a solidificação. À medida que o diâmetro do lingote aumenta, as tensões residuais ficam mais preocupantes, por causa dos maiores gradientes térmicos dentro do lingote e dos aumentos 25 dos graus de microssegregação e macrossegregação, aumentando a sensibilidade ao fendimento térmico. Quando as tensões residuais ficam excessivas, as fendas térmicas podem começar. Algumas fendas térmicas podem ser catastróficas, resultando

em necessidade de raspagem do produto. O fendimento pode ser também mais sutil e resultar em irregularidades na fundição e em uma segregação posterior inaceitável. Um tipo de irregularidade de fundição, conhecida como "ciclo de velocidade de fusão", é provocada pelas fendas térmicas introduzidas nos eletrodos ESR e VAR, que interrompem a condução térmica ao longo do eletrodo a partir da ponta que está em fusão. Isto concentra o calor abaixo da fenda, o que faz com que a velocidade de fusão aumente à medida que a interface de fusão se aproxima da fenda. Quando a fenda é atingida, a extremidade do eletrodo fica relativamente fria, tornando o processo de fusão subitamente mais lento. À medida que a região da fenda funde, a velocidade de fusão aumenta gradualmente até um gradiente de temperatura de estado constante ser restabelecido no eletrodo e a velocidade de fusão nominal é atingida.

Em uma etapa subsequente, o lingote é usado como um eletrodo ESR para formar um lingote ESR. Os inventores determinaram que uma velocidade de fusão ESR de pelo menos cerca de 3,63 kg/min (8 lb/min) e, particularmente, pelo menos 4,54 kg/min (10 lb/min) deve ser usada para proporcionar um lingote ESR adequado para processamento posterior em um lingote VAR de grande diâmetro. Qualquer fundente e vazão de fundente podem ser usados, e aqueles versados na técnica podem determinar prontamente os fundentes e vazões adequados para um determinado processo ESR. Até um certo ponto, a velocidade de fusão adequada vai depender do diâmetro do lingote ESR desejado e deve ser selecionada para proporcionar

ao lingote ESR uma construção sólida (isto é, carecendo substancialmente de vazios e fendas), tendo uma qualidade superficial razoavelmente boa, e carecendo de tensões residuais excessivas de modo a inibir o fendimento térmico. A 5 operação geral do equipamento ESR e a maneira geral de conduzir a operação de refusão são bem conhecidas daqueles versados na técnica. Essas pessoas podem refundir facilmente por eletroescória um eletrodo VAR de uma superliga à base de níquel, tal como a Liga 178, na velocidade de fusão especificada no presente processo, sem instrução adicional.

Uma vez que a operação de refusão por eletroescória tenha sido completada, o lingote ESR pode ser deixado esfriar no cadiño, para garantir melhor que todo o metal em fusão tenha solidificado. O tempo de resfriamento adequado 15 mínimo vai depender, em grande parte, do diâmetro do lingote. Uma vez removido do cadiño, o lingote é transferido para um forno de aquecimento, de modo que pode ser submetido a novo pós-tratamento térmico ESR, de acordo com a presente invenção e como se segue.

20 Os inventores descobriram que na produção de lingotes de grande diâmetro da Liga 718, é importante que o lingote ESR seja transferido quente para o forno de aquecimento e que o pós-tratamento térmico ESR seja iniciado em um período de 4 horas a partir da solidificação completa do 25 lingote ESR. Uma vez que o lingote ESR tenha sido transferido para o forno de aquecimento, o pós-tratamento térmico ESR é iniciado por retenção do lingote em um primeira temperatura do forno na faixa de pelo menos 316°C (600°F) até 982°C

(1.800°F) por pelo menos 10 horas. Particularmente, a faixa de temperaturas do forno é de pelo menos 482°C (900°F) até 982°C (1.800°F). Também se prefere que o tempo de aquecimento na temperatura do forno selecionada seja de pelo menos 20 horas.

Após a etapa de retenção na temperatura do forno por pelo menos 10 horas, a temperatura do forno de aquecimento é aumentada da primeira temperatura do forno até uma segunda temperatura do forno de pelo menos 1.163°C (2.125°F), e, de preferência, pelo menos 1.191°C (2.175°F), de uma maneira que inibe a geração de tensões térmicas dentro do lingote ESR. O aumento na temperatura do forno de até a segunda temperatura do forno pode ser feito em um único estágio, ou como uma operação multiestágio, incluindo dois ou mais estágios de aquecimento. Os inventores determinaram que uma seqüência particularmente satisfatória de aumento da temperatura, da primeira para a segunda temperatura do forno, é uma seqüência de dois estágios, incluindo: aumentar a temperatura do forno da primeira temperatura por não mais do que 55,6°C/hora (100°F/hora) e, de preferência, cerca de 13,9°C/hora (25°F/hora), para uma temperatura intermediária; e depois um outro aumento da temperatura do forno a partir da temperatura intermediária, por não mais do que 111°C/hora (200°F/hora) e, de preferência, cerca de 27,8°C/hora (50°F/hora), para a segunda temperatura do forno. De preferência, a temperatura intermediária é de pelo menos de 583°C (1.000°F) e, particularmente, é de pelo menos 760°C (1.400°F).

O lingote ESR é mantido na segunda temperatura do forno por pelo menos 10 horas. Os inventores determinaram que após ser mantido na segunda temperatura do forno, o lingote deve apresentar uma estrutura homogênea e incluir apenas uma fase Laves mínima. Para garantir melhor que a estrutura desejada e o grau desejado de recocimento sejam alcançados, o lingote ESR é, de preferência, mantido na segunda temperatura do forno por pelo menos 24 horas e é, particularmente, mantido na segunda temperatura do forno por cerca de 32 horas.

Após o lingote ESR ter sido mantido na segunda temperatura do forno pelo período especificado, pode ser processado novamente em um de vários modos. Se o lingote ESR não vai ser trabalhado mecanicamente, pode ser resfriado da segunda temperatura do forno para a temperatura ambiente, de uma maneira que inibe o fendimento térmico. Se o lingote ESR tem um diâmetro que é maior do que o diâmetro desejado do eletrodo VAR, o lingote ESR pode ser trabalhado mecanicamente, tal como, por exemplo, por forjamento a quente. O lingote pode ser resfriado da segunda temperatura do forno para uma temperatura de trabalho mecânico adequada, de uma maneira selecionada para inibir o fendimento térmico. Se, no entanto, o lingote ESR tiver sido resfriado abaixo de uma temperatura de trabalho adequada, o mesmo pode ser reaquecido à temperatura de trabalho de um modo que inibe o fendimento térmico, e pode ser trabalhado para as dimensões desejadas.

Os inventores determinaram que, quando do resfriamento do lingote ESR a partir da segunda temperatura do for-

no, é desejável que isso seja feito de uma maneira controlada, por redução da temperatura do forno a partir da segunda temperatura do forno, enquanto o lingote se mantém no forno de aquecimento. Uma seqüência de resfriamento preferida, que 5 foi mostrada para impedir fendimento térmico, inclui: redução da temperatura do forno a partir da segunda temperatura do forno, a uma velocidade não superior a 111°C/hora (200°F/hora) e, de preferência, em torno de 55,6°C/hora (100°F/hora), para uma primeira temperatura intermediária 10 não superior a 954°C (1.750°F) e, de preferência, não superior a 871°C (1.600°F); retenção na primeira temperatura intermediária por pelo menos 10 horas e, de preferência, pelo menos 18 horas; redução posterior da temperatura do forno da primeira temperatura intermediária, a uma velocidade não superior a 83,3°C/hora (150°F/hora) e, de preferência, em torno de 41,7°C/hora (75°F/hora), para uma segunda temperatura intermediária não superior a 760°C (1.400°F) e, de preferência, não superior a 621°C (1.150°F); retenção na segunda temperatura intermediária por pelo menos 5 horas e, de preferência, pelo menos 7 horas; e, subseqüentemente, resfriamento ao ar do lingote à temperatura ambiente. Uma vez resfriado à temperatura ambiente, o lingote deve apresentar uma estrutura superenvelhecida de precipitados de fase delta.

Se o lingote ESR é resfriado a partir da segunda 25 temperatura do forno para uma temperatura na qual o trabalho mecânico vai ser conduzido, então a parte relevante da seqüência de resfriamento recém-descrita pode ser usada para atingir a temperatura de trabalho. Por exemplo, se o lingote

5 ESR está sendo aquecido em um forno de aquecimento a uma se-
gunda temperatura do forno de 1.191°C (2.175°F) e vai ser
forjado a quente, a uma temperatura de forjamento de 1.107°C
(2.025°F), o lingote ESR pode ser resfriado por redução da
temperatura do forno a partir da segunda temperatura do for-
no, a uma velocidade não superior a 111°C/hora (200°F/hora)
e, de preferência, em torno de 37,8°C/hora (100°F/hora),
para a temperatura de forjamento.

10 Os inventores determinaram que se o lingote ESR
tiver sido resfriado a partir da segunda temperatura do for-
no para uma temperatura na ou próxima da temperatura ambien-
te, então o aquecimento do lingote de volta para uma tempe-
ratura de trabalho mecânico adequada pode ser conduzido
usando a seguinte seqüência, para inibir o fendimento térmico:
15 carregar o lingote em um forno de aquecimento e aquecer
o lingote a uma temperatura do forno inferior a 556°C
(1.000°F) por pelo menos 2 horas; aumentar a temperatura do
forno a menos do que 22,2°C/hora (40°F/hora) para menos do
que 816°C (1.500°F), aumentar novamente a temperatura do
20 forno a menos do que 27,8°C/hora (50°F/hora), a uma tempe-
ratura de trabalho a quente adequada inferior a 1.149°C
(2.100°F); e manter o lingote na temperatura de trabalho por
pelo menos 4 horas. Em uma seqüência de aquecimento alterna-
25 tiva desenvolvida pelos inventores, o lingote ESR é colocado
em um forno de aquecimento e a seguinte seqüência de aqueci-
mento é seguida: o lingote é aquecido a uma temperatura do
forno de pelo menos 260°C (500°F) e, de preferência, a 277 -
556°C (500 - 1.000°F), por pelo menos 2 horas; a temperatura

do forno é aumentada por cerca de 11,1 - 22,2°C/hora (20 - 40°F/hora) para pelo menos 427°C (800°F); a temperatura do forno é aumentada ainda mais por cerca de 16,7 - 27,8°C/hora (30 - 50°F/hora) para pelo menos 649°C (1.200°F); a temperatura do forno é aumentada ainda mais por cerca de 22,2 - 33,3°C/hora (40 - 60°F/hora) para uma temperatura de trabalho a quente inferior a 1.149°C (2.100°F); e o lingote é mantido na temperatura de trabalho a quente, até que o lingote atinja completamente uma temperatura substancialmente uniforme.

Se o lingote ESR tiver sido resfriado ou aquecido a uma temperatura de trabalho mecânico desejada, é então trabalhado de qualquer maneira adequada, tal como por forjamento sob pressão, para proporcionar um eletrodo VAR tendo um diâmetro predeterminado. As reduções no diâmetro podem ser necessárias por, por exemplo, limitações no equipamento disponível. Como um exemplo, pode ser necessário trabalhar mecanicamente um lingote ESR tendo um diâmetro de cerca de 864 a cerca de 1.016 mm (cerca de 34 a cerca de 40 pol) a um diâmetro de cerca de 864 mm (34 pol) ou menos, de modo que pode ser usado adequadamente como o eletrodo VAR no equipamento VAR disponível.

Nesse ponto, o lingote ESR vai ser submetido ao pós-tratamento térmico ESR. Considera-se, tanto fundido no aparelho ESR ou após trabalho mecânico, um diâmetro adequado para uso como o eletrodo VAR. O lingote ESR pode ser depois condicionado e aparado para ajustar a sua forma àquela adequada para uso como um eletrodo VAR, como é conhecido na

técnica. O eletrodo VAR é subseqüentemente refundido a arco elétrico, a uma velocidade de 3,63 a 5 kg/minuto (8 a 11 lb/min), de uma maneira conhecida por aqueles versados na técnica, para proporcionar um lingote ESR de diâmetro desejado. A velocidade de fusão VAR é, de preferência, de 4,09 a 4,66 kg/min (9 a 10,25 lb/min) e é, particularmente, de 4,20 a 4,63 kg/minuto (9,25 a 10,2 lb/min). Os inventores determinaram que a velocidade de fusão VAR é crítica para obter lingotes VAR de alta qualidade de material de Liga 718.

10 O lingote VAR fundido pode ser processado posteriormente, se desejado. Por exemplo, o lingote VAR pode ser homogeneizado e superenvelhecido usando técnicas convencionais na produção de lingotes VAR de superligas à base de níquel de grande diâmetro disponíveis comercialmente.

15 Os lingotes de superligas à base de níquel produzidos por este processo da presente invenção podem ser fabricados em artigos manufaturados por técnicas de manufatura conhecidas. Esses artigos vão incluir, naturalmente, determinados componentes rotativos adaptados para uso em turbinas 20 de geração de energia aeronáuticas e com base terrestre.

Os exemplos do processo da presente invenção são os seguintes.

Exemplo 1

A Figura 1 é um diagrama ilustrando genericamente 25 uma modalidade do processo da presente invenção, adaptado para produzir lingotes de alta qualidade de Liga 718 com diâmetros superiores a 762 mm (30 pol). Vai ser evidente que a modalidade da presente invenção mostrada na Figura 1 seja,

em geral, um processo de banho triplo, que inclui as etapas de VIM, ESR e VAR. Como indicado na Figura 1, um aquecimento de Liga 718 foi preparada por VIM e fundida em um eletrodo VIM de diâmetro de 152,4 mm (36 pol), para uso como um eletrodo ESR em uma etapa subsequente. O lingote VIM foi deixado ficar no molde de fundição por 6 a 8 horas, após a fundição. O lingote foi depois desmoldado e transferido quente para um forno, no qual foi recozido e superenvelhecido a 843°C (1.550°F) por um mínimo de 18 horas.

Após a etapa de recozimento / superenvelhecimento, a superfície do lingote foi esmerilada para remover crostas. O lingote foi depois transferido quente para um aparelho ESR, no qual foi usado como o eletrodo consumível ESR e foi refundido por electroescória para formar um lingote ESR de 1.016,0 mm (40 pol). Como é bem conhecido, um aparelho ESR inclui uma fonte de energia elétrica, que fica em contato elétrico com o eletrodo consumível. O eletrodo fica em contato com uma escória disposta em um recipiente resfriado com água, construído, tipicamente, de cobre. A fonte de energia elétrica, que é tipicamente de corrente alternada, proporciona uma corrente de baixa voltagem e alta amperagem a um circuito, que inclui o eletrodo, a escória e o recipiente. À medida que a corrente passa pelo circuito, o aquecimento por resistência elétrica da escória aumenta a sua temperatura a um nível suficiente para fundir a extremidade do eletrodo em contato com a escória. À medida que o eletrodo começa a fundir, gotículas do material em fusão se formam e um mecanismo de alimentação do eletrodo avança o eletrodo para a escória,

para proporcionar a desejada velocidade de fusão. As gotículas do material em fusão passam pela escória aquecida, que remove inclusões de óxidos e outras impurezas. A determinação da velocidade de fusão adequada é crucial para proporcionar um lingote que é substancialmente homogêneo e desprovido de vazios, e que tem uma superfície de qualidade razoavelmente boa. Aqui, os inventores determinaram por meio de experimentação que uma velocidade de fusão de 6,3 kg/min (14 lb/min) proporcionou um lingote ESR homogêneo e sem defeitos.

Após o lingote ESR de 1.016,0 mm (40 pol) ter sido fundido, é deixado esfriar dentro do molde por 2 horas e depois submetido ao seguinte pós-tratamento térmico ESR. O tratamento térmico impediu o fendimento térmico no lingote no processamento subsequente. O lingote ESR foi removido do molde e transferido quente para um forno de aquecimento, no qual foi mantido em torno de 482°C (900°F) por 20 horas. A temperatura do forno foi depois aumentada por cerca de 13,9°C/hora (25°F/hora) a cerca de 760°C (1.400°F). A temperatura do forno foi depois aumentada ainda mais, a uma velocidade de cerca de 27,8°C/hora (50°F/hora) a cerca de 1.191°C (2.175°F), e o lingote foi mantido a 1.191°C (2.175°F) por pelo menos 32 horas. O lingote foi depois resfriado por redução da temperatura do forno a cerca de 55,6°C/hora (100°F/hora) a cerca de 871°C (1.600°F). Essa temperatura foi mantida por pelo menos 18 horas. O lingote foi depois mais resfriado, por redução da temperatura do forno por cerca de 41,7°C/hora (75°F/hora) para cerca de

621,1°C (1.150°F), e essa temperatura foi mantida nele por cerca de 7 horas. O lingote foi removido do forno e deixado esfriar ao ar.

O diâmetro de 1.016,0 mm (40 pol) do lingote ESR 5 era muito grande para ser refundido por arco a vácuo, usando o aparelho VAR disponível. Portanto, o lingote foi forjado sob pressão a um diâmetro de 812,8 mm (32 pol), adequado para uso no aparelho VAR. Antes do forjamento, o lingote foi aquecido em um forno a uma temperatura de forjamento sob 10 pressão adequada por uma seqüência de aquecimento desenvolvida pelos presentes inventores, para impedir o fendimento térmico. O lingote foi primeiro aquecido a 260°C (500°F) por 2 horas. A temperatura do forno foi depois elevada de 11,1°C/hora (20°F/hora) para 427°C (800°F), aumentada por 15 16,7°C/hora (30°F/hora) para 649°C (1.200°F), e depois aumentada ainda mais por 22,2°C/hora (40°F/hora) para 1.107°C (2.025°F), na qual foi mantido por cerca de 8 horas. O lingote foi depois forjado sob pressão a um diâmetro de 812,8 mm (32 pol), reaquecido à temperatura de forjamento, caso 20 necessário. O eletrodo VAR de 812,8 mm (32 pol) foi mantido em torno de 871°C (1.600°F) por um mínimo de 20 horas e depois condicionado e aparado com serra de fita, para aplinar as suas extremidades.

Os inventores descobriram que apenas uma faixa de 25 fusão VAR estreita e específica vai produzir um lingote VAR substancialmente isento de segregação e que o controle VAR é especialmente crítico durante a partida, para evitar macrossegregação. O eletrodo VAR de 812,8 mm (32 pol) foi refundi-

do a arco a vácuo a um lingote VAR de 914,4 mm (36 pol), a uma velocidade de fusão de cerca de 4,42 kg/min (9,75 lb/min), que deve ser controlada estritamente. O lingote VAR foi depois homogeneizado usando um ciclo de aquecimento de 5 homogeneização de forno padrão, e foi depois superenvelhecido a 871°C (1.600°F) por um mínimo de 20 horas.

O peso do lingote VAR de 914,4 mm (36 pol) foi significativamente além do peso de 9.772 kg (21.500 lb) de lingotes de Liga 718 de diâmetro de 71,1 cm (28 pol). O produto do lingote de 914,4 mm (36 pol) foi inspecionado ultrasonicamente e cortado em escala macro e verificou-se que era isento de sardas, e era substancialmente isento de fendas, vazios, segregação negativa e outra segregação positiva. O lingote ESR foi considerado como sendo de alta qualidade e 10 adequado para fabricação em peças usadas em aplicações críticas, tais como partes rotativas para turbinas de geração 15 de energia com base terrestre e aeronáutica.

Exemplo 2

No exemplo acima, o lingote ESR tinha um diâmetro 20 superior àquele que poderia ser usado no aparelho VAR disponível, que acomodava um eletrodo VAR de até cerca de 863 mm (34 pol). Isto obrigava que o diâmetro do lingote ESR fosse ajustado por trabalho mecânico. Isto requeria, por sua vez, que os inventores desenvolvessem uma seqüência de aquecimento 25 de lingote ESR adequada, para aquecer o lingote ESR à temperatura de forjamento, enquanto impedindo a ocorrência de fendimento térmico durante o forjamento. Se o diâmetro do lingote ESR ficasse mais próximo do diâmetro máximo útil no

aparelho VAR disponível, então o lingote ESR seria menos propenso ao fendimento térmico. O forjamento sob pressão ou outro trabalho mecânico do lingote ESR seria inteiramente desnecessário, se o tamanho do lingote ESR fosse adequado 5 para uso direto no aparelho VAR disponível. Neste caso, o lingote ESR poderia ser enviado para o aparelho VAR, imediatamente após as etapas de pós-tratamento térmico ESR.

A Figura 2 é um diagrama ilustrando genericamente uma modalidade profética de um processo de banho triplo, de 10 acordo com a presente invenção, em que o aparelho ESR pode ser usado para fundir um lingote ESR de 914,4 mm (36 pol). Em virtude de que o lingote ESR tem um diâmetro que é inferior ao diâmetro de 1.016,0 mm (40 pol) do lingote ESR fundido no Exemplo 1, haveria menos risco de fendimento do lingote ou de outras imperfeições induzidas por trabalho. Além 15 disso, o diâmetro reduzido e o maior comprimento do lingote ESR reduziriam a probabilidade de que o lingote ESR fendilhasse ou sofresse de uma segregação significativa, uma vez fundido.

20 Como indicado na Figura 2, o eletrodo VIM é fundido em um lingote de diâmetro de 838,2 mm (33 pol). O lingote VIM é depois transferido quente e pode ser recozido e superenvelhecido como descrito no Exemplo 1. Em particular, o lingote VIM é deixado ficar no molde de fundição por 6 a 8 25 horas, antes de ser desmoldado e carregado no forno de tratamento térmico. Acredita-se que o tempo de retenção no molde de forno de aquecimento possa ser reduzido para lingotes VIM de menor diâmetro. O lingote VIM de diâmetro de 838,2 mm

(33 pol) é depois refundido por eletroescória pelo processo descrito genericamente no Exemplo 1. O lingote é depois transferido quente e submetido a um pós-tratamento térmico ESR, como descrito no Exemplo 1. Subseqüente ao pós-tratamento térmico ESR, o lingote ESR é aquecido à temperatura de forjamento e forjado sob pressão a um diâmetro de 812,8 mm (32 pol), como descrito genericamente no Exemplo 1. O forjamento de 812,8 mm (32 pol) é superenvelhecido e depois refundido por arco a vácuo a um lingote VAR de 914,4 mm (36 pol), como descrito genericamente no Exemplo 1. O lingote VAR pode ser depois homogeneizado por tratamentos de homogeneização usuais, ou pode ser processado adequadamente de outros modos. Acredita-se que um lingote VAR de Liga 718 de alta qualidade, comparável ao lingote produzido pelo processo do Exemplo 1, resulte.

Exemplo 3

A Figura 3 é um diagrama de uma modalidade profética alternativa de um processo de banho triplo, de acordo com a presente invenção, em que o diâmetro de 762 mm (30 pol) do lingote ESR como fundido é diretamente adequado para uso com o aparelho ESR. Um eletrodo VIM de 762 mm (30 pol) é refundido por eletroescória a um lingote ESR de 838,2 mm (33 pol). O lingote ESR é transferido quente e tratado termicamente como descrito no Exemplo 1, e é depois refundido em arco a vácuo, sem redução no diâmetro, a um lingote VAR de 914,4 mm (36 pol) de diâmetro. O lingote VAR pode ser depois homogeneizado e posteriormente processado como descrito no Exemplo 1. O processo ilustrado na Figura 3 difere daquele

da Figura 1 apenas pelo fato de que os diâmetros do eletrodo VIM e do lingote ESR diferem daqueles do Exemplo 1, e nenhuma operação de forjamento sob pressão ou aquecimento significativo para a temperatura de forjamento é necessário. Um 5 lingote de Liga 718 de diâmetro de 914,4 mm (36 pol) de alta qualidade vai resultar.

Exemplo 4

Vários lingotes VAR de material Alivac 718, tendo diâmetros superiores a 762 mm (30 pol) foram preparados pelo 10 processo da presente invenção e inspecionados. Os parâmetros dos vários aquecimentos são apresentados na seguinte tabela. Em vários dos ensaios, foram avaliadas várias velocidades de fusão VAR, para determinar os efeitos na qualidade do lingote VAR resultante.

Etapa	Aqueci- mento 215G	Aqueci- mento 420G	Aqueci- mento 533G	Aqueci- mento 631G	Aqueci- mento 729G
Diâmetro do ele- trodo VIM, cm (pol)	91,4 (36)	91,4 (36)	91,4 (36)	91,4 (36)	91,4 (36)
Recozi- mento / Superen- velheci- mento VIM	843°C (1.550°F) por 13 horas e 24 minu- tos	843°C (1.550°F) por 16 horas e 48 minu- tos	843°C (1.550°F) por 15 horas e 55 minu- tos	843°C (1.550°F) por 41 horas	843°C (1.550°F) por 29 horas
Fundente	60F-20-0- 20 + TiO ₂	60F-20-0- 20 + TiO ₂	60F-20-0- 20 + TiO ₂	60F-20-0- 20 + TiO ₂	60F-20-0- 20 + TiO ₂

Velocida- de de fu- são ESR	6,3 kg/min (14 lb/min)	6,3 kg/min (14 lb/min)	6,3 kg/min (14 lb/min)	6,3 kg/min (14 lb/min)	6,3 kg/min (14 lb/min)
Tempo de resfriar no cadi- nho	1,5 hora (1 hora e 50 minu- tos de tempo de transfe- rência total)	2 horas	2 horas	2 horas (+ 20 mi- nutos para des- moldar para a caixa quente)	2 horas (+ 30 mi- nutos para des- moldar para a caixa quente)
Diâmetro do lingo- te ESR, cm (pol)	101,6 (40)	101,6 (40)	101,6 (40)	101,6 (40)	101,6 (40)
Pós- tratamen- to térmico ESR	482°C (900°F) por 33 horas e 22 minu- tos; 621°C (1.150°F) por 19 horas; por 7 ho- ras; ele- var a 13,8°C/h var a 13,8°C/h (25°F/h) a 704°C (1.300°F) para 704°C (1.300°F) , depois 27,7°C/h (50°F/h) a 899°C (50°F/h) , depois a 899°C	482°C (900°F) por 28 horas; 621°C (1.150°F) por 4 ho- ras; ele- var a 13,8°C/h var a 13,8°C/h (25°F/h) a 704°C (1.300°F) para 704°C (1.300°F) , depois 27,7°C/h (50°F/h) a 899°C (50°F/h) , depois a 899°C	482°C (900°F) por 21 horas; 621°C (1.150°F) por 4 ho- ras; ele- var a 13,8°C/h var a 13,8°C/h (25°F/h) a 704°C (1.300°F) para 704°C (1.300°F) , depois 27,7°C/h (50°F/h) a 899°C (50°F/h) , depois a 899°C	482°C (900°F) por 33 horas; 621°C (1.150°F) por 4 ho- ras; ele- var a 13,8°C/h var a 13,8°C/h (25°F/h) a 704°C (1.300°F) para 704°C (1.300°F) , depois 27,7°C/h (50°F/h) a 899°C (50°F/h) , depois a 899°C	482°C (900°F) por 42,5 horas; elevar a 13,8°C/h (25°F/h) a 760°C (1.400°F) , depois 27,7°C/h (50°F/h) a 1.191°C (2.175°F) ; reter por 32 horas a

	27,7°C/h (50°F/h) a 899°C (1.650°F) , e 41,6°C/h (75°F/h) 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C a 1.191°C 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C por 24 (2.175°F) horas a ; reter por 24 horas a ; baixar 1.191°C (2.175°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) , reter por 6 ho- ras e forjamen- to	(1.650°F) , e 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C a 1.191°C 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C por 24 (2.175°F) horas a ; reter por 24 horas a ; baixar 1.191°C (2.175°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) , reter por 9 ho- ras e forjamen- to	(1.650°F) , e 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C a 1.191°C 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C por 24 (2.175°F) horas a ; reter por 24 horas a ; baixar 1.191°C (2.175°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) , reter por 9 ho- ras e forjamen- to	(1.650°F) , e 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C a 1.191°C 41,6°C/h (75°F/h) a 1.191°C por 24 (2.175°F) horas a ; reter por 24 horas a ; baixar 1.191°C (2.175°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) ; baixar a 1.107°C (2.025°F) , reter por 8 ho- ras, ele- horas,	1.191°C (2.175°F) ; resfri- ar forno a 55,5°C/h (100°F/h) a 871°C (1.600°F) e reter por no mínimo 18 horas; baixar a 41,6°C/h (75°F/h) a 621°C (1.150°F) e reter por 7 ho- ras no mínimo; resfriar ao ar
--	--	---	---	--	---

Etapa	Aqueci- mento 215G	Aqueci- mento 420G	Aqueci- mento 533G	Aqueci- mento 631G	Aqueci- mento 729G
Compre- são	Forjar a 81,12 cm (31 - 15/16 in) em três	Forjar a 81,12 cm (31 - 15/16 in) em três	Forjar a 81,12 cm (31 - 15/16 in) em cinco	reaquecer a 260°C (500°F) por 8 ho- ras, ele- horas,	reaquecer a 260°C (500°F) por 3,5

	operações	operações	operações	var a 13,8°C/h (25°F/h) a 704°C (1.300°F) ; elevar a a 27,7°C/h (50°F/h) a 1.107°C (2.025°F) ; reter a 1.107°C (2.025°F) e forjar	elevar a 11,1°C/h (20°F/h) a 427°C (800°F), elevar a 16,7°C/h (30°F/h) a 649°C (1.200°F) , elevar a 4,4°C/h (40°F/h) a 1.107°C (2.025°F) ; reter por 16 horas a 1.107°C (2.025°F) e compri- mir, rea- quecer se necessá- rio
Diâmetro posterior à forja	81,12 cm (31 - 15/16 in)	81,12 cm (31 - 15/16 in)	81,12 cm (31 - 15/16 in)	não apli- cável	81,28 mm (32 pol)
Superen- velhe- cimento	871°C (1.600°F) por 21 horas e resfria-	871°C (1.600°F) por 23,5 horas e resfria-	871°C (1.600°F) por 25 horas e resfria-	não apli- cável	871°C (1.600°F) por 20 horas e resfria-

	mento ao ar	mento ao ar	mento ao ar		mento ao ar
Velocida- de de fu- são, kg/h (lb/h)	3 ensai- os: 4,42 (9,75); 4,76 (10,5) e 4,08 (9,0)	2 ensai- os: 4,53 (10,0) e 4,31 (9,5)	3 ensai- os: 4,63 (10,2); 4,19 (9,25) e 4,42 (9,75)	não apli- cável	4,42 (9,75)
Diâmetro / peso do lingote VAR	914,4 mm (36 pol) 12,41 kg (27,355 lb)	914,4 mm (36 pol) 12,96 kg (28,570 lb)	914,4 mm (36 pol) 13,94 kg (30,744 lb)	não apli- cável	914,4 mm (36 pol) 17,18 kg (37,880 lb)
Homoge- neizar	sim	sim	sim	não apli- cável	sim
Comentá- rios	Segrega- ção posi- tiva en- contrada na vele- cidade de fusão mais alta; du- as indi- cações ultra- sônicas encontra- das na área de	sem indi- cações ultra- sônicas; material fundido em condi- ções de estado constan- te, acei- tável em aplica- ções de alta qua- lidade	sem indi- cações ultra- sônicas; material fundido em condi- ções de estado constan- te, acei- tável em aplica- ções de alta qua- lidade	lingote ESR fen- dilhado na remo- ção do forno de reaqueci- mento; lingote raspado	lingote isento de fenda por som após VAR

	partida VAR, mas sardas não en- contra- das; ma- terial fundido em condi- ções de estado constan- te, acei- tável em aplica- ções de alta qua- lidade				
--	--	--	--	--	--

A avaliação dos lingotes VAR foi conduzida em um tarugo de diâmetro de 25,4 cm (10 pol), produzido por forja de estiramento dos lingotes VAR, seguida por forja GFM ao diâmetro final. Os tarugos forjados foram descascados e polidos para a remoção de irregularidades superficiais, após o que foram inspecionados por ultra-som para fendas e vazios internos, que são usualmente associados com áreas de segregação negativa. Fatias transversais cortadas de vários locais ao longo do comprimento dos tarugos, representando todas as velocidades de fusão, foram depois atacadas quimicamente para revelar áreas de segregações negativa e positiva. A ausência de indicações sônicas e de defeitos de segregação

foi suficiente para classificar o material como sendo de alta qualidade.

Deve-se entender que a presente descrição ilustra aqueles aspectos da invenção relevantes para um entendimento 5 claro da presente invenção. Determinados aspectos da invenção, que seriam evidentes para aqueles versados na técnica, e que, portanto, não facilitariam um melhor entendimento da invenção, não foram apresentados, para simplificar a presente descrição. Embora a presente invenção tenha sido descrita 10 em conjunto com determinadas modalidades, aqueles versados na técnica, após considerar a descrição acima, vão reconhecer que muitas modificações e variações da invenção podem ser empregadas. Todas essas variações e modificações da invenção são intencionadas para serem cobertas pela descrição 15 acima e pelas reivindicações a seguir.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo para a produção de uma superliga à base de níquel, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende as etapas de:

5 moldar uma liga que é uma superliga à base de níquel dentro de um molde de fundição;

 recozer e superenvelhecer a liga por aquecimento da liga a pelo menos 649°C (1.200°F) por pelo menos 10 horas;

10 refundir por eletroescória a liga, a uma velocidade de fusão de pelo menos 3,63 kg/min (8 lb/min);

 transferir a liga para um forno de aquecimento em um período de 4 horas de solidificação completa;

15 reter a liga dentro do forno de aquecimento, a uma primeira temperatura de 316°C (600°F) a 982°C (1.800°F) por pelo menos 10 horas;

 aumentar a temperatura do forno da primeira temperatura para uma segunda temperatura de pelo menos 1.163°C (2.125°F);

20 reter na segunda temperatura por pelo menos 10 horas; e

 refundir a arco a vácuo um eletrodo VAR da liga, a uma velocidade de fusão de 3,63 a 5 kg/minuto (8 a 11 lb/min), para proporcionar um lingote VAR.

25 2. Processo, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga à base de níquel é uma de Liga 718 e Liga 706.

3. Processo, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga à base de níquel compreende a fusão e, opcionalmente, o refino da liga por pelo menos um de fusão por indução a vácuo, descarbonatação por oxigênio sob atmosfera protetora de argônio e descarbonatação por oxigênio a vácuo.

4. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o recozimento e o superenvelhecimento da liga compreendem o aquecimento da liga a pelo menos 649°C (1.200°F) por pelo menos 18 horas.

5. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o recozimento e o superenvelhecimento da liga compreendem o aquecimento da liga a pelo menos 843°C (1.550°F) por pelo menos 10 horas.

6. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a refusão por eletroescória da liga compreende a etapa de refundir por eletroescória a uma velocidade de fusão de pelo menos 4,54 kg/min (10 lb/min).

7. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a retenção da liga dentro do forno de aquecimento compreende a etapa de reter a liga em uma temperatura do forno de pelo menos 316°C (600°F) até 982°C (1.800°F), por pelo menos 20 horas.

8. Processo, de acordo com a reivindicação 7,
CARACTERIZADO pelo fato de que a retenção da liga dentro do forno de aquecimento compreende a etapa de reter a liga em uma temperatura do forno de pelo menos 482°C (900°F) até 5 982°C (1.800°F), por pelo menos 10 horas.

9. Processo, de acordo com qualquer uma das 1 a 8,
CARACTERIZADO pelo fato de que o aumento da temperatura do forno compreende a etapa de aumentar a temperatura do forno, da primeira temperatura para a segunda temperatura, em uma 10 maneira de multiestágio, compreendendo as etapas de:

aumentar a temperatura do forno da primeira temperatura por não mais do que 55,6°C/h (100°F/h) para uma temperatura intermediária; e

15 aumentar ainda mais a temperatura do forno por não mais do que 111°C/h (200°F/h) da temperatura intermediária para a segunda temperatura.

10. Processo, de acordo com a reivindicação 9,
CARACTERIZADO pelo fato de que a primeira temperatura é inferior a 583°C (1.000°F) e a temperatura intermediária é pelo menos 583°C (1.000°F). 20

11. Processo, de acordo com a reivindicação 9,
CARACTERIZADO pelo fato de que a primeira temperatura é inferior a 760°C (1.400°F) e a temperatura intermediária é pelo menos 760°C (1.400°F).

25 12. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a segunda temperatura é pelo menos 1.191°C (2.175°F).

13. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga é mantida na segunda temperatura por pelo menos 24 horas.

14. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a refusão por eletroescória da liga proporciona um lingote ESR, o processo compreendendo adicionalmente, subseqüente à retenção na segunda temperatura:

10 a etapa de trabalhar mecanicamente o lingote ESR, para alterar as dimensões do lingote e proporcionar um eletrodo VAR.

15. Processo, de acordo com a reivindicação 14, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o lingote ESR tem um diâmetro de 864 mm (34 pol) a 1.016 mm (40 pol) e o eletrodo VAR tem 15 um diâmetro menor não superior a 864 mm (34 pol).

16. Processo, de acordo com a reivindicação 14 ou 15, **CARACTERIZADO** adicionalmente pelo fato de que compreende, subseqüente à retenção da liga na segunda temperatura e antes do trabalho mecânico do lingote ESR, a etapa de:

20 resfriar a liga a uma temperatura de trabalho mecânico, a uma velocidade de resfriamento não superior a 111°C/h (200°F/h).

17. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores, **CARACTERIZADO** adicionalmente pelo 25 fato de que compreende, subseqüente à retenção da liga na segunda temperatura e antes da refusão a arco a vácuo do eletrodo VAR, a etapa de:

resfriar a liga da segunda temperatura à temperatura ambiente por um processo de resfriamento compreendendo a redução da temperatura do forno a uma velocidade não superior a 111°C/h (200°F/h), da segunda temperatura a uma primeira temperatura intermediária não superior a 982°C (1.750°F), e retenção na primeira temperatura intermediária por pelo menos 10 horas.

18. Processo, de acordo com a reivindicação 17,

10 **CARACTERIZADO** pelo fato de que o resfriamento da liga compreende adicionalmente a etapa de:

15 reduzir a temperatura do forno, a uma velocidade não superior a 83,3°C/h (150°F/h), da primeira temperatura intermediária para uma segunda temperatura intermediária não superior a 760°C (1.400°F), e reter na segunda temperatura intermediária por pelo menos 5 horas.

19. Processo, de acordo com a reivindicação 8,

CARACTERIZADO pelo fato de que, subseqüente à retenção na segunda temperatura intermediária, a liga é resfriada em ar para a temperatura ambiente.

20 20. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 19, **CARACTERIZADO** adicionalmente pelo fato de que compreende, subseqüente à retenção na segunda temperatura e antes do trabalho mecânico do lingote ESR, as etapas de:

25 resfriar a liga da segunda temperatura para a temperatura ambiente; e

aquecer a liga a uma temperatura de trabalho mecânico adequada.

21. Processo, de acordo com a reivindicação 20, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o aquecimento da liga a uma temperatura de trabalho mecânico adequada compreende as etapas de:

5 aquecer a liga dentro de um forno de aquecimento a uma temperatura do forno de pelo menos 260°C (500°F) por pelo menos 2 horas;

aumentar a temperatura do forno por pelo menos 11,1°C/h (20°F/h) para pelo menos 427°C (800°F);

10 aumentar ainda mais a temperatura do forno a pelo menos 16,7°C/h (30°F/h) para pelo menos 649°C (1.200°F); e

aumentar mais ainda a temperatura por pelo menos 22,2°C/h (40°F/h) a uma temperatura de pelo menos 1.107°C (2.025°F), e retenção na temperatura, até que a liga atinja 15 uma temperatura completamente uniforme.

22. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 21, **CARACTERIZADO** pelo fato de que compreende as etapas de:

20 moldar uma liga à base de níquel em um molde de fundição, em que a superliga à base de níquel é Liga 718;

recozer e superenvelhecer a liga por aquecimento da liga a pelo menos 843°C (1.550°F) por pelo menos 10 horas;

25 refundir por eletroescória a liga, a uma velocidade de fusão de pelo menos 4,54 kg/min (10 lb/min);

transferir a liga para um forno de aquecimento em um período de 4 horas de solidificação completa, após refusão por eletroescória;

reter a liga dentro do forno de aquecimento, a uma primeira temperatura de 482°C (940°F) a 982°C (1.800°F) por pelo menos 10 horas;

5 aumentar a temperatura do forno por não mais do que 55,6°C/h (100°F/h) a uma temperatura intermediária do forno;

10 aumentar mais ainda a temperatura do forno por não mais do que 111°C/h (200°F/h), da temperatura intermediária do forno a uma segunda temperatura do forno de pelo menos 1.163°C (2.125°F), e retenção na segunda temperatura por pelo menos 10 horas; e

refundir a arco a vácuo um eletrodo VAR da liga, a uma velocidade de fusão de 4,09 a 4,66 kg/minuto (9 a 10,25 lb/min), para proporcionar um lingote VAR.

15 23. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 22, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o lingote VAR tem um diâmetro superior a 762 mm (30 polegadas).

20 24. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 23, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o lingote VAR tem um diâmetro de pelo menos 914 mm (36 polegadas).

25 25. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 24, **CARACTERIZADO** pelo fato de que o peso do lingote VAR é superior a 9.772 kg (21.500 lb).

26. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 25, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a liga à base de níquel compreende:

de 50,0 a 55,0 por cento em peso de níquel;

de 17 a de 21,0 por cento em peso de cromo;

0 até 0,08 por cento em peso de carbono;
0 até 0,35 por cento em peso de manganês;
0 até 0,35 por cento em peso de silício;
De 2,8 até 3,3 por cento em peso de molibdênio;
5 pelo menos um de nióbio e tântalo, em que a soma
de nióbio e tântalo é de 4,75 até 5,5 por cento em peso;
de 0,65 até 1,15 por cento em peso de titânio;
de 0,20 até 0,8 por cento em peso de alumínio;
0 até 0,006 por cento em peso de boro; e
10 ferro e impurezas eventuais balanceados.

27. Processo, de acordo com a reivindicação 26,
CARACTERIZADO pelo fato de que a liga à base de níquel con-
siste de:

15 54,0 por cento em peso de níquel;
0,5 por cento em peso de alumínio;
0,01 por cento em peso de carbono;
5,0 por cento em peso de nióbio;
18,0 por cento em peso de cromo;
3,0 por cento em peso de molibdênio;
20 0,9 por cento em peso de titânio; e
ferro e impurezas eventuais balanceados.

28. Processo, de acordo com a reivindicação 22,
CARACTERIZADO pelo fato de que a refusão por eletroescória
da liga proporciona um lingote ESR, o processo compreendendo
25 adicionalmente as etapas de:

resfriar a liga da segunda temperatura para uma
temperatura de trabalho mecânico adequada, e então trabalhar
mecanicamente a liga para proporcionar um eletrodo VAR.

29. Processo, de acordo com a reivindicação 22, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a refusão por eletroescória da liga proporciona um lingote ESR, o processo compreendendo adicionalmente as etapas de:

5 resfriar a liga da segunda temperatura para a temperatura ambiente;

 aquecer a liga a uma temperatura de trabalho mecânico adequada; e

10 trabalhar mecanicamente a liga para proporcionar um eletrodo VAR.

30. Processo, de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, **CARACTERIZADO** pelo fato de que a superliga à base de níquel produzida pelo processo é isenta de segregações positiva e negativa.

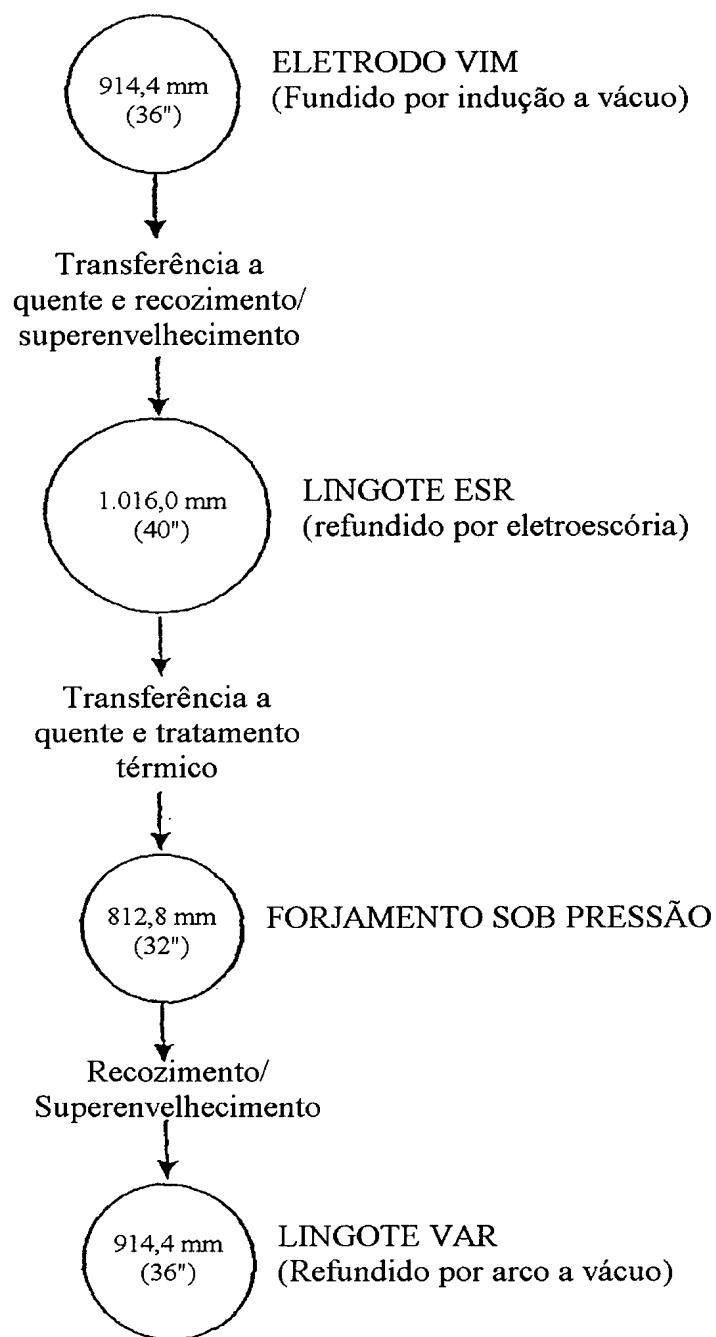


FIG. 1

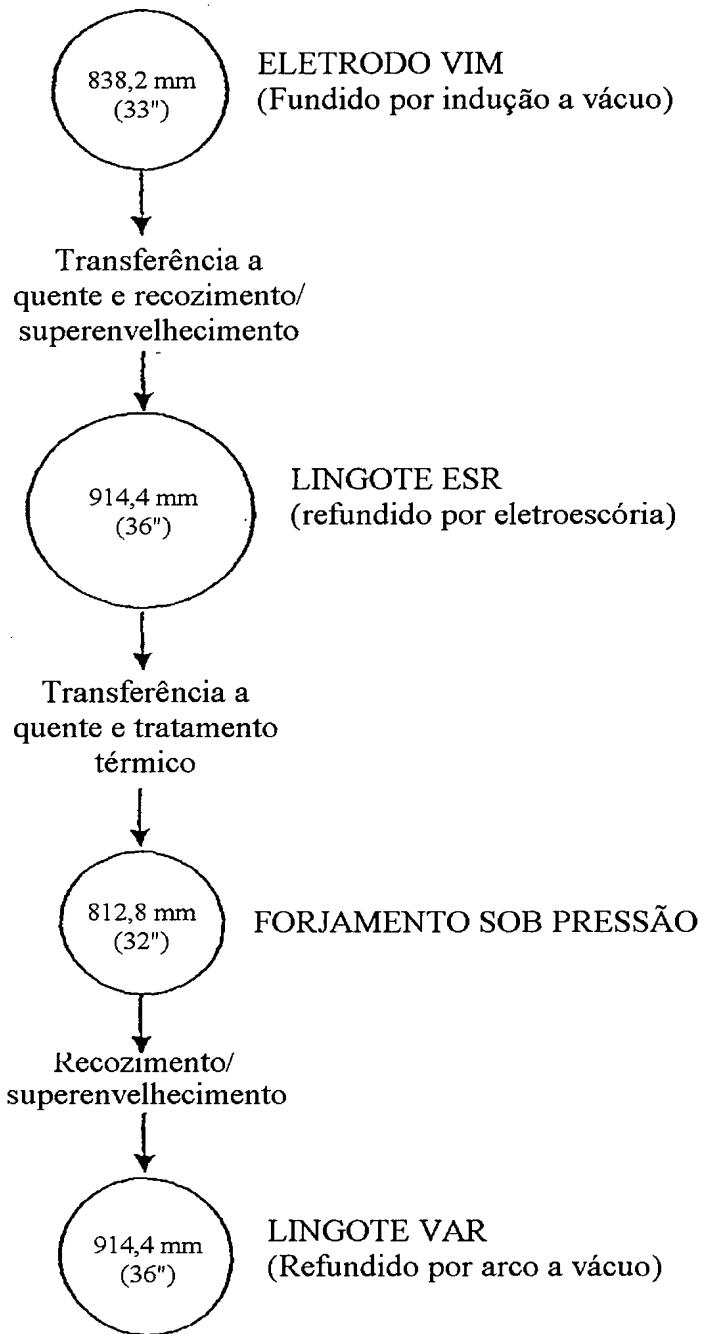


FIG. 2

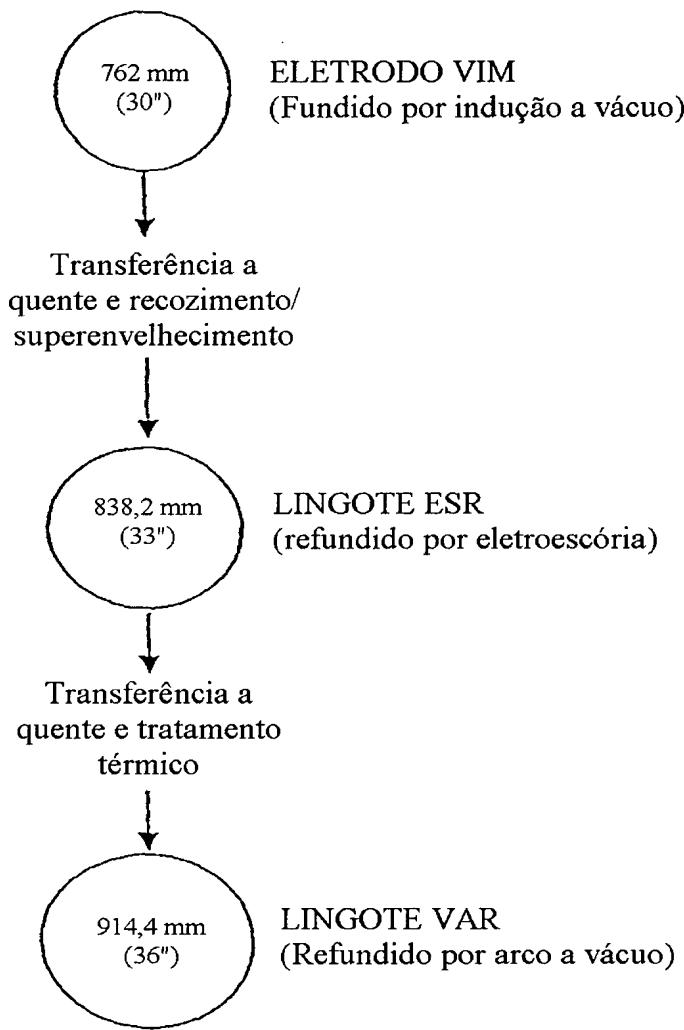


FIG. 3

RESUMO

"PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE LINGOTES DE GRANDE DIÂMETRO DE LIGAS À BASE DE NÍQUEL"

Descreve-se um processo para produção de uma liga à base de níquel, que inclui o molde de uma liga dentro de um molde de fundição, e recozimento e superenvelhecimento subseqüentes do lingote a pelo menos 649°C (1.200°F), por pelo menos 10 horas. O lingote é refundido por eletroescória, a uma velocidade de fusão de pelo menos 3,63 kg/min (8 lb/min), e o lingote ESR é depois transferido para um forno de aquecimento em um período de 4 horas de solidificação completa e é submetido a um novo pós-tratamento térmico ESR. Um eletrodo VAR adequado é proporcionado do lingote ESR, e o eletrodo é refundido a arco a vácuo, a uma velocidade de fusão de 3,63 a 5,00 kg/min (8 a 11 lb/min), para proporcionar um lingote VAR. O processo propicia lingotes VAR de alta qualidade, tendo diâmetros superiores a 762 mm (30 pol), que são preparados de Liga 718 e outras superligas à base de níquel submetidas a segregação significativa durante a fundição.