



Friction Stir Welding European Qualifications

UC10 – Projeto de Ferramentas

Engenheiro SFL

10. Definição de junta

10.1 Boas Práticas no Desenvolvimento de Ferramentas SFL

10.2 Características do material da ferramenta

10.3 Referências

Introdução

- A ferramenta de soldadura é um componente inseparável para a soldadura pelo processo SFL
- A ferramenta de soldadura serve para plasticizar e processar do material soldado



Ferramenta de Soldadura – Requisitos

Os seguintes requisitos são impostos à ferramenta de soldadura:

- ✓ Formas mais simples ajudam a reduzir de custos
- ✓ Resistência a altas temperaturas
- ✓ Desgaste
- ✓ Alta tenacidade à fratura
- ✓ Baixa expansividade térmica
- ✓ Boa maquinabilidade
- ✓ Preço baixo

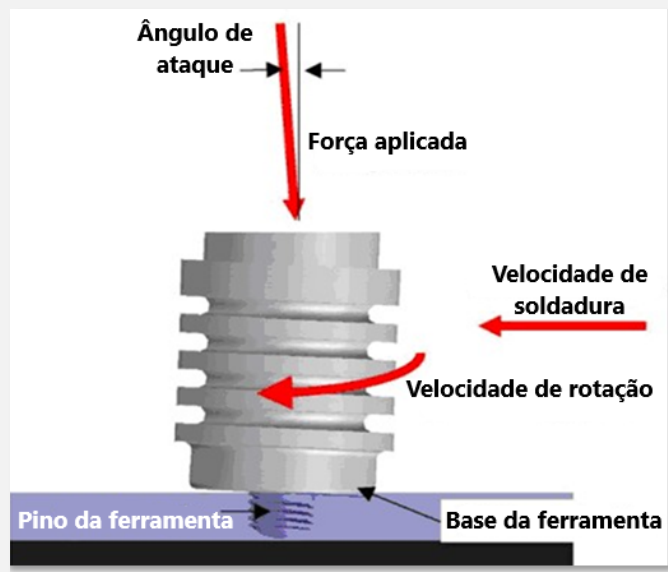
Ferramenta de Soldadura

- A ferramenta de soldagem é exposta a cargas elevadas e altas temperaturas, especialmente no caso na soldadura de materiais com ponto de fusão acima de 900°C (aços e ligas de titânio).
- A aplicação comercial destas ligas é limitada pelo preço e vida curta das ferramentas de soldadura.
- Houve um progresso considerável no campo de soldadura de aços com o processo SFL foi alcançado nas últimas duas décadas.
- O fabrico de ferramentas de soldadura exige uma seleção adequada do material, desenvolvimento de geometria adequada e o tratamento térmico necessário.

Ferramenta de Soldadura – Geometria

A ferramenta de soldadura pode ser dividida em **dois componentes principais**:

- ✓ Base da ferramenta de soldadura
- ✓ E pino da ferramenta de soldadura



Ferramenta de Soldadura – Funções Principais

- O contacto do pino da ferramenta de soldadura com material soldado gera calor, necessário para a plasticização do material soldado.
- A base da ferramenta executa a função de pressionar e forjar para o material plasticizado.
- A ferramenta de soldadura serve para a formação de juntas soldadas.
- O primeiro projeto de desenvolvimento TWI feito no campo de soldadura de Al e suas ligas, empregou a ferramenta de forma cilíndrica, côncava e roscada.
- As ferramentas de soldadura são geralmente feitas de aço ferramenta.

Ferramenta de Soldadura – Geometria

A geometria da ferramenta de soldadura afeta:

- Taxa de geração de calor
- Força aplicada
- Torque (i.e. momento torsor)
- Afinidade termodinâmica do material soldado

Ferramenta de Soldadura

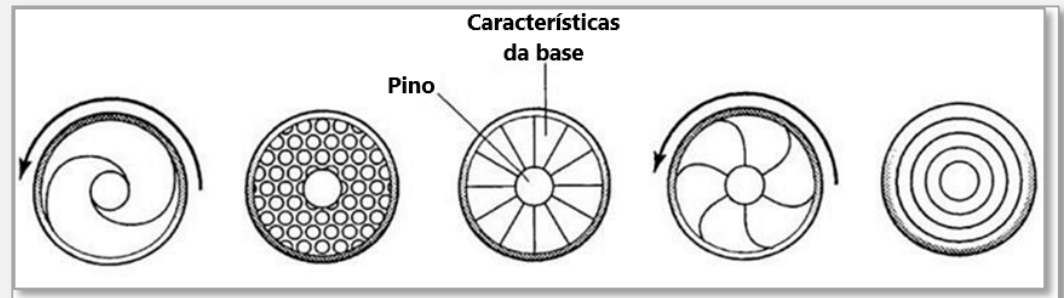
A direção do fluxo do material plasticizado é afetada tanto pela geometria da ferramenta de soldadura quanto pelo movimento linear e rotativo da ferramenta de soldadura.

Parâmetros principais da ferramenta de soldadura:

- ✓ Diâmetro da base
- ✓ Ângulo da base
- ✓ Geometria do pino (incluindo forma e dimensão)

Ferramenta de Soldadura – Geometria da base

- A base da ferramenta serve para gerar de calor na superfície e nas proximidades da superfície do material soldado.
- Em espessuras fortes de material soldado, o calor gerado pela base da ferramenta não exerce efeito na formação de uma soldadura são como o calor gerado pelo pino.
- A base executa a função de forjamento e compressão e forma a superfície da área de soldadura
- A base pode ter diferentes formas:
 - ✓ Estriados
 - ✓ Entalhes
 - ✓ Círculos concêntricos
 - ✓ Lâminas



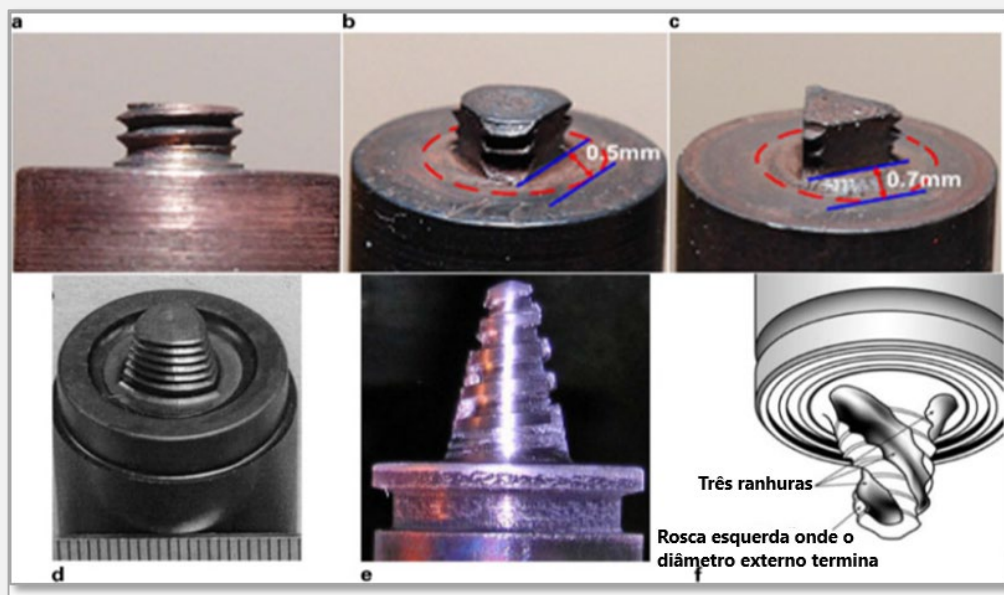
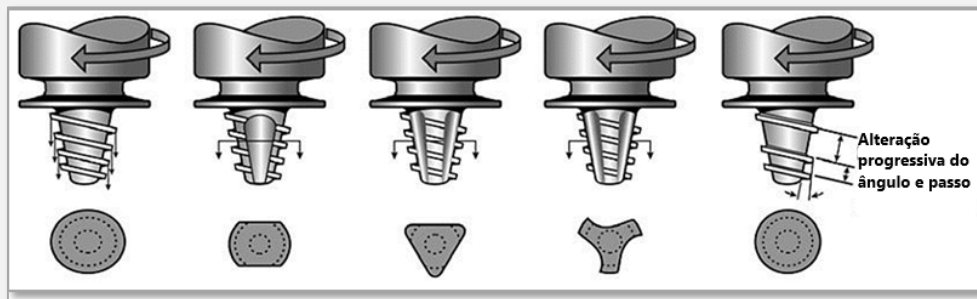
Ferramenta de Soldadura – Geometria da base

- O **diâmetro** da base da ferramenta de soldadura é importante, pois a base gera e mantém a maior parte do calor inevitável para plasticização de material soldado.
- Estudos experimentais mostraram que a maior resistência da junta soldada pode ser obtida com um **diâmetro ideal da base da ferramenta de soldadura**.
- A **microestrutura da junta soldada** pode ser significativamente alterada pela substituição da base da ferramenta de forma plana por uma forma côncava.
- A base convexa aumenta a **estabilidade do processo SFL**. Isso resulta na redução da força aplicada e profundidade penetração da ferramenta de soldadura.
- A aplicação de uma **forma convexa da base da ferramenta de soldadura** provou uma ocorrência mínima de rebarba excessiva, quando comparada à forma côncava da base.
- A **base côncava da ferramenta de soldadura** pode resultar num alto gradiente térmico e altas temperaturas de superfície durante a soldadura, o que pode levar à deterioração da qualidade da junta soldada.

Ferramenta de Soldadura – Geometria do pino

- O pino da ferramenta:
 - Causa a fricção e a deformação do material na junta de soldadura
 - É projetado de maneira a permitir sua fácil penetração no material a ser soldado
 - Afeta o grau de deformação e processamento do material
- A geometria do pino afeta significativamente os parâmetros de soldadura:
 - ✓ Velocidade de soldadura
 - ✓ Velocidade de rotação da ferramenta
 - ✓ Força aplicada

Ferramenta de Soldadura – Geometria do pino



Ferramenta de Soldadura – Geometria do pino

- A taxa de força aplicada e direção do fluxo de material na vizinhança da ferramenta de soldadura são afetadas pela **orientação das roscas na superfície do pino**
- As roscas e entalhes no pino aumentam a taxa de geração de calor, devido à maior superfície de contacto, melhoram o fluxo de material e afetam as forças axiais e transversais
- A soldadura experimental provou que o pino triangular aumenta o fluxo de material, quando comparado com o pino de formato cilíndrico.
- É aconselhável o pino triangular na soldadura de **materiais mais duros**.

Características do material da ferramenta de soldadura

- O material da ferramenta de soldadura destinada a ligar materiais com alto ponto de fusão deve exibir boas propriedades a temperaturas acima de 900°C.
- Além das exigências de resistência, resistência à fadiga e tenacidade a temperaturas elevadas, o material da ferramenta de soldadura deve ser resistente também ao desgaste mecânico e químico.
- Nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) e metais refratários são os materiais mais utilizados, atendendo às propriedades de fabrico de ferramentas de soldadura.

Materiais recomendados para a ferramenta de soldadura

Ligas	Espessura [mm]	Materiais da ferramenta de soldadura
Mg	< 6	Aço ferramenta
Al	< 12	Aço ferramenta, MP 159
Cu	< 50	Ligas de Ni, W, PCBN
Ti	< 6	Ligas de W
Aço inoxidável	< 6	PCBN, Ligas de W
Aço de baixa liga	< 10	WC, PCBN
Ni	< 6	PCBN

Características do material da ferramenta

- Cada material da ferramenta de soldadura tem a temperatura máxima definida para a qual ela pode ser aplicada.
- O desgaste excessivo da ferramenta de soldadura provoca a alteração na forma da ferramenta, o que também prejudica a qualidade da soldadura e a probabilidade de defeitos.
- O desgaste da ferramenta pode ser causado pelo desgaste adesivo, abrasivo e químico.
- A ferramenta de soldadura pode ser desgastada pelo mecanismo de interação entre o material soldado e o material da ferramenta.

Características do material da ferramenta

- No caso de uma ferramenta em PCBN, o desgaste adesivo ocorre a baixas rotações da ferramenta, enquanto que as altas rotações da ferramenta, observa-se o desgaste abrasivo.
- A oxidação pode provocar alterações na resistência ao desgaste do material.
- A reatividade da ferramenta pode ser suprimida pela aplicação de gases de proteção fornecidos à zona de soldadura.
- As tensões formadas no primeiro contato da ferramenta com o material soldado podem resultar em rotura da ferramenta.
- Para evitar tal falha, é eficiente utilizar uma taxa de penetração de pino essencialmente lenta.

Características do material da ferramenta

Os materiais mais utilizados no fabrico de ferramentas de soldadura podem ser classificados nos seguintes grupos:

- ✓ Materiais PCBN, PCBN-WRe
- ✓ Metais refratários
- ✓ Ligas leves
- ✓ Aços ferramenta

Características do material da ferramenta

As ferramentas fabricadas em **PCBN** são utilizadas para soldadura de ligas com elevado ponto de fusão:

- Aço inoxidável austenítico
- Aço inoxidável duplex
- Aço inoxidável super martensítico
- Ligas de níquel
- Aços ferramenta

Características do material da ferramenta

- Um nova classe de PCBN foi desenvolvida, utilizando WRe como um ligante.
- A classe PCBN-WRe dos aços ferramenta têm a tenacidade significativamente melhorada, em comparação com o PCBN.
- Os aços inoxidáveis austeníticos geralmente exercem a maior taxa de desgaste nas ferramentas de soldadura.
- Os parâmetros de soldadura desempenham um papel significativo na taxa de desgaste das ferramentas de soldadura.
- Para a ferramenta fabricada em PCBN, deve ser informado que a temperatura da ferramenta de soldadura não deve exceder os 900 °C.

Características do material da ferramenta



Evolução do design da ferramenta PCBN:

- (a) Primeiro design sem características
- (b) Pino com passo espiral
- (c) Pino com passo espiral e base estriada e convexa

Características do material da ferramenta

- No desgaste de peças funcionais de uma ferramenta de soldadura fabricada em PCBN-WRe, as peças desgastadas podem ser perfiladas várias vezes, o que resulta numa vida útil prolongada da ferramenta de soldadura.
- As altas tensões formadas durante a penetração da ferramenta, juntamente com a fadiga do material devido à flexão durante a soldadura, são as principais causas da rotura da ferramenta de soldadura.
- A fim de suprimir a tendência à rotura, é aconselhável perfurar preliminarmente um furo no ponto da suposta penetração da ferramenta de soldadura.
- Os melhores resultados com propriedades de resistência do material de PCBN são obtidos para espessuras até 8 mm. Para espessuras acima de 8 mm, são obtidas melhores propriedades com as ferramentas de soldadura fabricadas em PCBN-WRe.

Ferramentas de metais refratários

- A liga de Tungsténio-Rénio tornou-se um material refratário popular utilizado no fabrico de ferramentas de soldadura destinadas à soldadura de aços.
- A adição do elemento Rénio melhora significativamente a resistência do material em altas temperaturas.
- O Rénio reduziu a deformação do pino durante a penetração e também reduziu o desgaste do pino da ferramenta.
- Apesar disso, a taxa de desgaste ainda é alta. Portanto, é preferencialmente selecionada uma forma simples de ferramenta de soldadura.

Ferramentas de metais refratários

- A base e o pino de material refratário tipo WRe são lisos sem a hélice do fio.
- Também foram adicionadas pequenas quantidades de carboneto de háfnio (HfC) aos materiais refratários
- Outros estudos foram realizados com os materiais como: WC-Co, W-La, La_2O_3 , Si_3N_4
- Embora a qualidade das juntas soldadas fabricadas com ferramentas dos materiais mencionados fosse aceitável, a vida útil da ferramenta e os custos limitaram a sua aplicação principalmente para fins de pesquisa.

Ferramentas de ligas mais leves

- As ligas de Ni e Co são utilizadas como material de ferramenta para a soldadura de aços.
- A ferramenta de ligas de Co é utilizada para soldar aços de alto carbono, o que mostra uma boa resistência ao desgaste.
- As ferramentas de soldadura feitas de ligas leves são fabricadas de forma similar às ferramentas feitas de metais refratários.
- O pino da ferramenta de soldadura tem a forma de um cone truncado.

Ferramentas em aço ferramenta

- Os materiais como ligas de Al, Mg e compósitos de matriz de Al são atualmente soldados por ferramentas de soldadura de aço ferramenta.
- A ferramenta de soldadura fabricada em aço ferramenta é utilizada para soldadura de materiais compósitos.
- O desgaste da ferramenta de soldadura na soldadura das matrizes metálicas dos compósitos é maior, quando comparado à soldadura de ligas leves, devido à presença de partículas abrasivas duras nos materiais compósitos.
- Estudos provaram que a ferramenta de soldadura que soldou os compósitos da matriz de Al foi utilizada durante a soldadura e alcançou uma nova forma própria otimizada, após a qual o desgaste foi significativamente reduzido.
- Esta forma depende dos parâmetros do processo e geralmente pode reduzir o desgaste, como no caso da forma inicial da ferramenta, supõe-se que a integridade das juntas soldadas seja preservada.

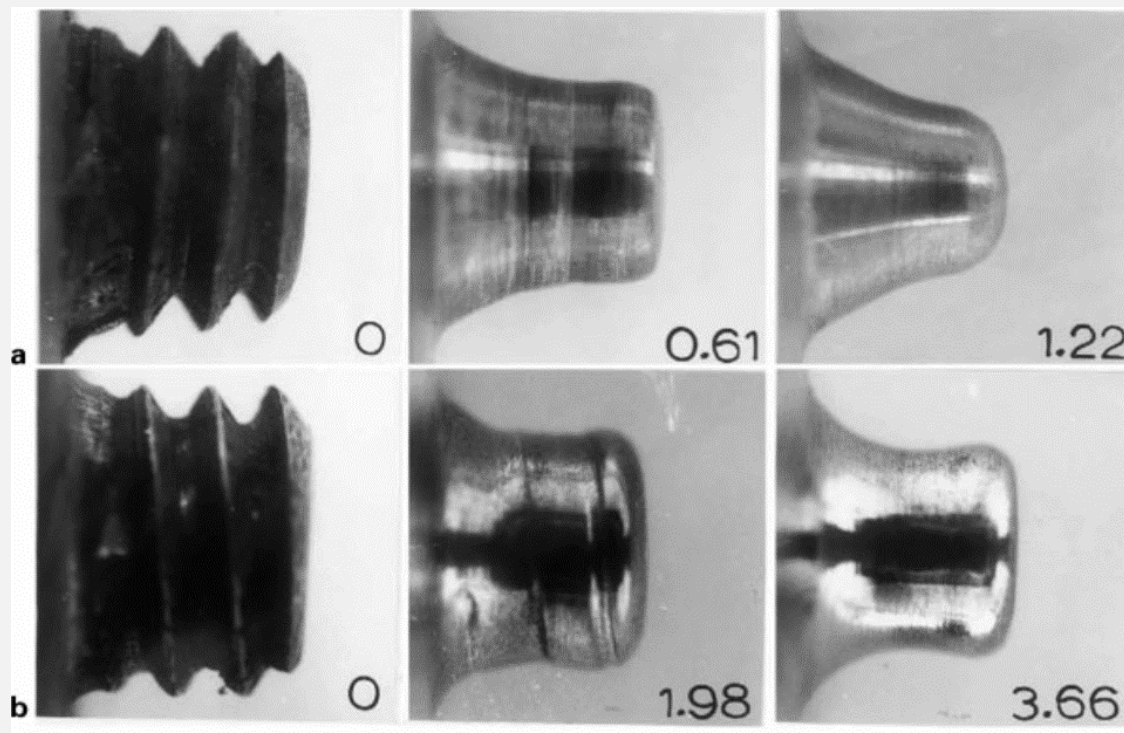
Ferramentas em aço ferramenta

- O desgaste geral da ferramenta de soldadura aumenta com o aumento da velocidade de rotação, no entanto é reduzida para velocidades de soldadura menores.
- A configuração correta dos parâmetros de soldadura resultará num menor desgaste da ferramenta de soldadura.
- Diversos estudos indicam que as ferramentas de soldadura não necessitam da geometria do pino modificada com uma rosca helicoidal.
- Alta dureza, baixo coeficiente de expansão térmica e alta condutividade térmica tornam o material Si_3N_4 adequado para o fabrico de ferramentas de soldadura.
- O revestimento da ferramenta de soldadura com um material inerte como diamante ou TiC, conduz a uma melhoria adicional ao desgaste em altas temperaturas.

Desgaste, deformação e falha da ferramenta de soldadura

- A ferramenta de soldagem é desgastada durante a soldadura (rotação e processamento do material).
- A ferramenta de soldadura pode ser plasticamente deformada devido à reduzida tensão rotura a temperaturas e cargas elevadas.
- Se as cargas forem mais altas que a capacidade de carga da ferramenta de soldadura, pode ocorrer uma falha.
- Os principais mecanismos de desgaste incluem o desgaste adesivo, abrasivo e químico.

Desgaste, deformação e falha da ferramenta de soldadura



Evolução da forma da ferramenta devido ao desgaste na SFL do compósito com matriz de metálica Al 6061 com 20 vol.% de Al₂O₃

Desgaste, deformação e falha da ferramenta de soldadura

Foi provado experimentalmente que:

- Após o desgaste inicial da rosca na ponta do um material de soldadura duro, a taxa de desgaste foi significativamente reduzida e, apesar disso, os pinos macios permitem fabricar juntas soldadas sãs.
- Os materiais de alta resistência como: PCBN e W são selecionados devido à tensão plástica reduzida da ferramenta de soldadura.
- A elevada resistência à fratura do material da ferramenta de soldadura é essencial para reduzir a probabilidade de uma fratura rápida e frágil.

Desgaste, deformação e falha da ferramenta de soldadura

Ao comparar o pino e a base da ferramenta de soldadura, quase sempre o desgaste e as deformações na seção de pino da ferramenta ocorrem pelos seguintes motivos:

- O pino da ferramenta de soldadura penetra no material soldado, onde deve encontrar maior resistência ao seu movimento, em comparação com a base, que penetra **apenas parcialmente** no material soldado.
- O pino da ferramenta de soldadura tem uma capacidade de carga muito menor em comparação com a base.
- As altas cargas combinadas com as tensões de torque e flexão conduzem a uma maior carga exercida no pino, em comparação com a base da ferramenta de soldadura.

Desgaste, deformação e falha da ferramenta de soldadura

- As ferramentas constituídas por materiais mais resistentes ao desgaste (PCBN, WC) para pinos e material relativamente mais macio (liga W-Re) para a base da ferramenta de soldadura podem ser a solução para problemas relacionados à vida útil da ferramenta e redução de custos .
- No caso de soldar as juntas sobrepostas de um material mais duro com uma matéria mais macio, a ferramenta de soldadura deve ficar situada no material mais macio.
- O contato entre a ferramenta de soldadura e o material mais duro será evitado, a fim de reduzir o desgaste da ferramenta de soldadura.
- Mais pesquisa na área de desgaste conduziram a estudos orientados para soldaduras a velocidades de soldadura mais lentas, pré-aquecimento do material soldado e aplicação de uma atmosfera de proteção.

Custos da ferramenta

- Os custos energéticos na soldadura de ligas de Al são consideravelmente menores quando comparados com a soldadura de aço. O custo está principalmente alocado ao preço do material e preço de fabrico.
- O material de PCBN é frequentemente utilizado para soldar materiais mais duros.
- Os custos para a produção de ferramentas de soldadura fabricados em PCBN são altos.
- As ferramentas de soldadura fabricadas em ligas W-RE e W-La são relativamente mais baratas do que as ferramentas fabricadas em PCBN, mas apresentam um desgaste mais rápido, devido à sua menor resistência e dureza em temperaturas elevadas.
- Devido às razões acima mencionadas, é necessário investir em estudos para um maior desenvolvimento de materiais de ferramentas mais acessíveis e duráveis

Conclusões

- A ferramenta SFL é submetida a elevadas cargas e altas temperaturas principalmente na soldadura de ligas mais resistentes como aços e ligas de titânio.
- A produção de ferramentas de soldadura exige uma seleção de material adequada para o seu fabrico e projeto de uma geometria adequada da forma da ferramenta.
- A ferramenta de soldadura deve atender aos seguintes requisitos: formas o mais simples possível para reduzir os custos de produção, resistência a altas temperaturas e desgaste, alta resistência à fratura, baixa expansão térmica, boa maquinabilidade e preço baixo.
- A ferramenta de soldadura é constituída por duas partes – a base e o pino.
- A base da ferramenta executa a função de comprimir e forjar o material plasticizado.

Conclusões

- O pino da ferramenta causa o atrito e as deformações do material na linha da junta de soldadura.
- Além dos requisitos de resistência, fadiga e tenacidade em temperaturas elevadas, o material da ferramenta de soldadura deve ser resistente ao desgaste mecânico e químico.
- O aço ferramenta é utilizado para a fabricação de ferramentas de soldadura adequadas para a soldadura de ligas de Al e Mg.
- Os materiais mais utilizados no fabrico de ferramentas de soldadura para aços são: PCBN, WC, WRe, ligas à base de Ni e Co.
- Os materiais de alta resistência como: PCBN e W são selecionados devido à redução da deformação plástica da ferramenta de soldadura.

Conclusões

- As ferramentas compósitas fabricadas em materiais mais duros, resistentes ao desgaste (PCBN, WC) para o pino e material relativamente mais macio (a liga W-Re) para a base da ferramenta de soldadura podem ser a solução dos problemas quanto à vida útil da ferramenta e redução de custos no fabrico da ferramenta.
- Pesquisa adicional na área de desgaste conduziram a estudos orientados para soldaduras realizadas a velocidades de soldadura mais lentas, pré-aquecimento do material soldado e aplicação de uma atmosfera de proteção.
- Os custos energéticos na soldadura de ligas de Al são consideravelmente menores quando comparados com a soldadura de aços. O custo está principalmente alocado ao preço do material e preço de fabrico.
- Devido às razões acima mencionadas, é necessário investir em estudos para um maior desenvolvimento de materiais de ferramentas mais acessíveis e duráveis.



Cofinanciado pelo
Programa Erasmus+
da União Europeia



Friction Stir Welding European Qualifications

Obrigado!