

Introdução

O feixe de elétrons é uma tecnologia utilizada para processamento de materiais, utilizando o calor gerado pelo impacto dos elétrons com o material a trabalhar. Devido às diferentes possibilidades de aplicar-se este calor sobre a peça (convergindo-o ou espalhando-o por mecanismos óticos) tem-se diferentes formas de utilizar o feixe eletrônico; como por exemplo:

- Soldagem
- Corte
- Tratamento superficial
- Micro-usinagem

Porém, é importante destacar que, os três últimos processos não competem técnica e economicamente com os existentes para as mesmas funções. Por enquanto, o feixe de elétrons é utilizado quase que unicamente em Soldagem.

Embora já se tenha o conhecimento da teoria do bombardeamento eletrônico há anos, a utilização do processo necessitou aguardar um maior desenvolvimento da área de vácuo, pois este é necessário para evitar a dispersão do feixe, e com isto, dar maior penetração à Soldagem, pois esta foi a primeira utilização do processo.

O processo veio a desenvolver-se, juntamente com a técnica de vácuo, no início da época das construções nucleares (anos 50), quando se precisou soldar materiais reativos (Ti,Zr), e se teve problemas de oxidação.

Como os elétrons podem ser projetados no vácuo, resolveu-se assim o problema, passando-se a fazer as Soldagens em câmaras de vácuo. Com isto, obteve-se Soldagens com:

- Zonas fundidas muito estreitas,
- Livres de oxidações devido a serem feitas em vácuo, e
- Zonas termicamente afetadas (ZTA) reduzidas em conseqüência da grande convergência do feixe. Esta grande convergência resultará em uma interação feixe/matéria diferente das interações que temos quando soldamos com os processos convencionais.

Princípio de funcionamento

O processo é baseado na utilização otimizada do calor sobre a peça de trabalho. Para melhor entender este mecanismo, é importante ter uma idéia global da máquina de feixe de elétrons, o que é mostrado na figura 1.

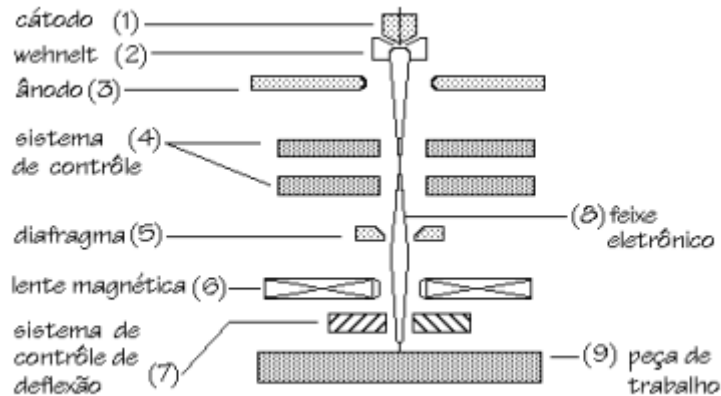


Figura 1 - Esquema geral de um equipamento de feixe de elétrons

O filamento mostrado na figura Detalhe do filamento, é o responsável pelo mecanismo de geração dos elétrons, e isto é conseguido por efeito Joule (aquecendo-o). Ele é montado dentro do wehnelt, e este está inserido no cátodo. O cátodo é conectado com uma grande diferença de potencial (DDP) em relação ao ânodo.

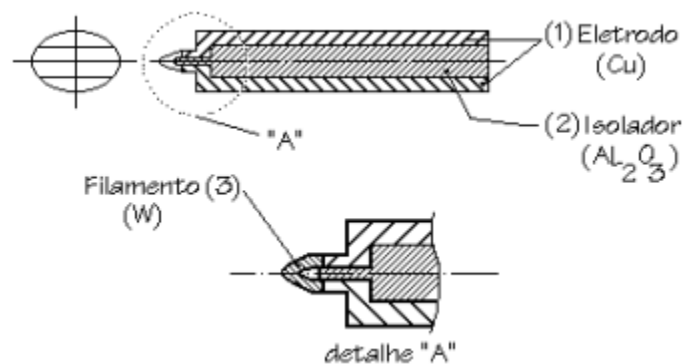


Figura 2 - Detalhe do filamento

O wehnelt tem uma geometria especial que permite criar equipotenciais para facilitar a retirada dos elétrons gerados no cátodo.

Assim, os elétrons produzidos, são acelerados entre o cátodo e o ânodo, chegando a atingir velocidades da ordem de 0.2 à 0.7 vezes a velocidade da luz.

Para que esta aceleração ocorra, a DDP estabelecida entre o ânodo e o cátodo é da ordem de 25 à 200 KV (com correntes da ordem de 0.5 à 1500 mA).

Como o ânodo é perfurado, os elétrons que passarem por este (devido a inércia causada pela grande aceleração), e serão direcionados para a peça a trabalhar, devido a presença do colimador.

Com o impacto, os elétrons convertem instantaneamente a sua energia cinética em térmica, gerando com isto altas temperaturas na peça a trabalhar. Esta conversão é da ordem de alguns KW até aproximadamente 100 KW por mm². Porém, não é a totalidade da energia do elétron que se converte devido a perdas diversas, nomeadamente no impacto.

As lentes eletromagnéticas, permitem que se obtenham diferentes regulagens na utilização do feixe produzido. Com isto, é possível se obter as diferentes aplicações, mostradas na Figura 3.

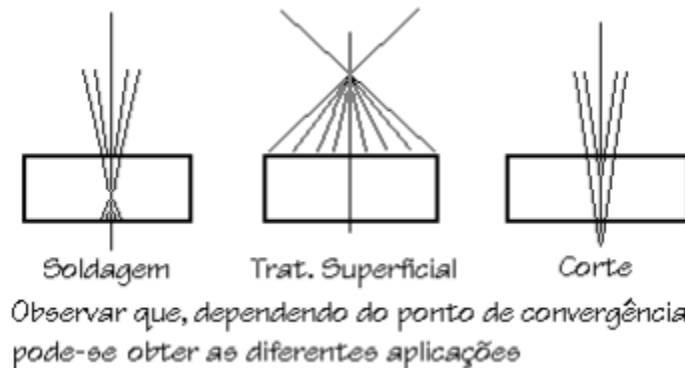


Figura 3 - Diferentes aplicações do processo Feixe de Elétrons

A figura exemplifica também a versatilidade do processo. Mudando-se o ponto de foco, e conseqüentemente os parâmetros, pode-se obter mais potência por área (aplicações em corte e Soldagem), ou menos (aplicações em tratamentos de superfície).

Equipamentos

Pode-se classificar os componentes do equipamento em dois grandes grupos: Os que aparecem em todos os equipamentos, e os que somente aparecem nos equipamentos que trabalham em vácuo.

Componentes presentes em todas as máquinas

Os componentes apresentados a seguir são básicos em todos os equipamentos de feixe de elétrons:

Canhão emissor de elétrons

É o local onde são gerados os elétrons, e conseqüentemente é onde se inicia todo o processo. O canhão é composto essencialmente de duas partes:

- sistema de focalização.
- O dispositivo de emissão e aceleração dos elétrons. Este dispositivo é formado pelo ânodo e pelo cátodo.

O canhão, trabalha sempre em alto vácuo (10⁻⁴ Torr ou menos), devido a:

- filamento quando aquecido (efeito Joule), liberta elétrons e estes terão tanto mais facilidade de serem transportados, quanto maior for a condição de vácuo.
- As moléculas de ar diminuem com o aumento do vácuo, com isto, a probabilidade de formar plasmas ou abrirem arcos quando submetidos a uma grande DDP, diminui consideravelmente.

Além disto, o vácuo também ajuda a:

- Evitar oxidação do filamento e
- Manter a limpeza do componente.

A alimentação do canhão é feita por um transformador especial de alta tensão.

Cátodo

Os cátodos podem ser de dois diferentes tipos:

- Diretamente aquecidos: São os de construção mais simples e os que apresentam maior confiabilidade. Pode-se retirar-lhes o excesso de calor por refrigeração externa. Por outro lado, apresentam um tempo de vida menor e uma má distribuição dos elétrons. São exemplos destes tipo de cátodo os seguintes: Hamilton-Standard e Sciaky.
- Indiretamente aquecidos: Tem maior estabilidade e apresentam tempo de vida superior, além de apresentarem a mancha catódica mais definida. Por outro lado, apresentam menor confiabilidade. Exemplos: Bas e Vickers.

Lente de focalização

Esta lente serve para convergir o feixe, que quando gerado tende a dispersar-se. Embora se possam utilizar sistemas contendo mais que uma lente, o mais usual é usar apenas uma lente circular, devido a facilidade de regulagens e manutenção que esta pode oferecer.

Sistema de ajuste de foco

Normalmente é necessário o ajuste da focagem devido as seguintes razões:

- Aberrações devida a curvatura das linhas de campo.
- Aberrações cromáticas devido a repartição Gaussiana da velocidade dos elétrons.
- Repulsões devidas as cargas de espaço, proporcionadas pela corrente. (Daí advém o fato de preferir-se altas tensões e baixas correntes).

O equipamento de feixe de elétrons, deverá permitir a possibilidade de fazer o ajuste do foco, e isto é conseguido pois, o sistema de controle, é na verdade um conjunto de bobinas dentro das quais passa o feixe.

Estas bobinas interferem no feixe por eletromagnetismo. Este sistema, é mostrado na Figura - Interação da corrente das bobinas com o feixe eletrônico, e o seu funcionamento.

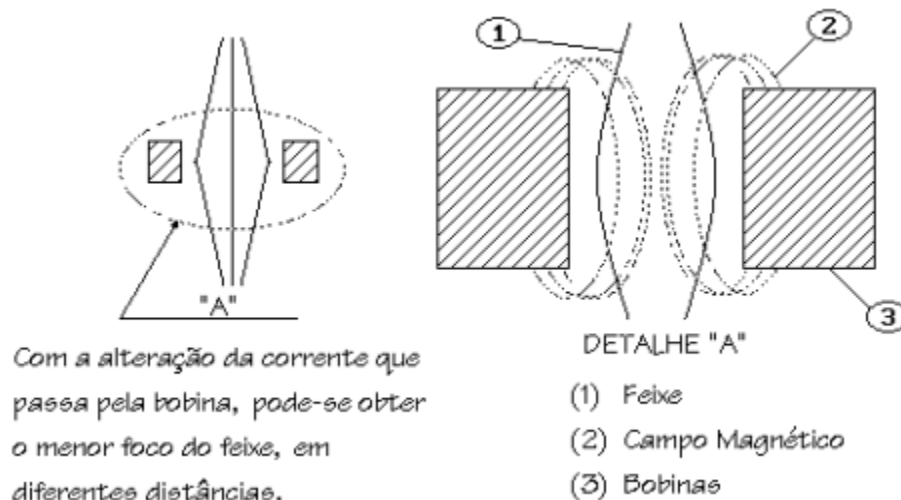


Figura 4 - Interação da corrente das bobinas com o feixe eletrônico

Como mostrado, variando-se a corrente que passa pelas bobinas, tem-se condições de ajustar o foco do feixe.

Componentes presentes somente quando se trabalha em vácuo

O vácuo possibilita a obtenção de elevadas densidades de energia no ponto de impacto, o que é fundamental para obter-se as pequenas ZTA e zonas fundidas. Nas operações em câmaras de vácuo, são também necessários os componentes descritos a seguir:

Câmara

A câmara é o local onde devem ser colocados os materiais a soldar. Ela apresenta um revestimento interno de chumbo, que é necessário devido a emissão de raios X que ocorre, quando do funcionamento do equipamento.

Além disso, o volume da câmara deve ser corretamente escolhido, quando da aquisição do equipamento, pois uma câmara muito pequena, limitaria a dimensão máxima das peças à trabalhar e, uma câmara muito grande, teria o inconveniente de demorar tempo demais para fazer o vácuo necessário para a operação.

Deverá também conter na câmara, uma janela que permita a visualização para auxiliar o posicionamento das peças, e esta deve ser feita no formato sanduíche, com um vidro contendo Pb para conter a radiação, e um vidro vulgar para absorver os vapores metálicos e assim proteger o primeiro.

Por último, a câmara deve ter um bom acesso à limpeza, facilidade de movimentos e boas condições de visualização, e ser construída com um material que resista a altas pressões.

Sistemas de visualização e posicionamento

Estes sistemas são necessários para que se visualize a junta a soldar, e assim se tenha condições tanto de posiciona-la, como de ajustar o feixe sobre a mesma.

Sistema de visualização:

- É constituído por: um jogo de lentes, um visor e uma adequada iluminação da câmara. Em equipamentos mais modernos, tem-se um equipamento de filmagem montado no interior da câmara de vácuo, permitindo assim a visualização durante a Soldagem. Devido a emissão de vapores e, a possibilidade de alguns respingos de Soldagem prejudicarem tanto as lentes como as lâmpadas, ambas são protegidas.

No caso das lâmpadas, usa-se vidros protetores, que são substituídos ou limpos periodicamente, e para as lentes, existe um filtro metálico na forma de disco, que se encontra entre a Soldagem e a lente, que após ter-se posicionado e focado corretamente, pode-se fecha-lo para fazer a proteção enquanto se executa a Soldagem.

Sistema de posicionamento:

- Neste sistema, tem-se uma mesa onde se colocam as peças a serem trabalhadas. Esta mesa está ligada em dois eixos tipo fuso, que por sua vez são acionados por dois motores independentes, que permitirão assim a movimentação nas direções X e Y. Além disto no centro da mesa, tem-se um outro motor, que possibilita o movimento de rotação. Desta forma, tem-se condições de posicionar adequadamente as peças antes de iniciar o trabalho.

Estes sistemas são necessários pois, uma vez feito o vácuo, todos os ajustes de parâmetros e movimentações da peça, deverão ser feitos sem que se abra a câmara, para que o vácuo não seja perdido, o que acarretaria gastos para refazelo, sem contar o tempo desperdiçado.

Variáveis

Parâmetros de operação e sua influência

Sendo a principal utilização do processo a Soldagem, a influência dos parâmetros será avaliada em função desta aplicação.

Os parâmetros que devem ser controlados, são os seguintes: tensão de aceleração, corrente do feixe, corrente de focalização, velocidade de Soldagem, vácuo da câmara e vácuo do canhão. Eles influenciam da seguinte forma:

Tensão de aceleração

A diferença de potencial existente entre o cátodo e o ânodo, é que determinará a atração dos elétrons. Conforme se aumenta esta tensão, se aumenta a velocidade dos elétrons. Isto é mostrado na Figura Variação da velocidade dos elétrons conforme a variação da tensão.

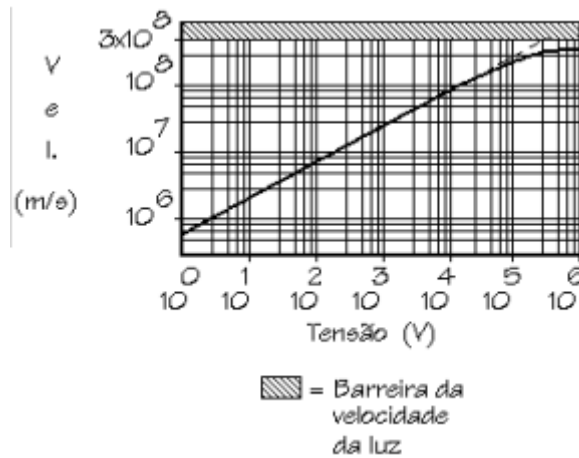


Figura 5- Variação da velocidade dos elétrons conforme a variação da tensão

Com isto, temos maior energia cinética nos elétrons, o que resulta maior penetração, e maior temperatura. Desta forma, pode-se soldar materiais com ponto de fusão mais elevado, e obter menores ZTA nas soldagens. A tensão situa-se normalmente no intervalo de 30 a 180 KV.

Corrente do feixe

Este parâmetro controla basicamente a quantidade de elétrons que atingem a peça, influenciando com isto diretamente na forma do cordão obtido. Além disto, como é o produto $V \times I$ que determina a potência do feixe, torna-se difícil explicar a importância isolada da corrente, sem ser citando-a no contexto global dos parâmetros.

Em geral as correntes usadas são da ordem de 50 a 1000 miliampéres.

Velocidade da soldagem

A velocidade influencia a geometria do cordão, principalmente a profundidade de penetração.

Através da velocidade pode-se exercer um controle mais sensível da penetração, pois mantida a potência do feixe, um aumento na velocidade diminuirá sensivelmente a penetração.

Embora a tensão também influencie a penetração, a penetração é mais facilmente ajustada com a velocidade.

Este efeito pode ser visualizado no gráfico mostrado na Figura - Variação da penetração para diferentes potências e velocidades de soldagem.

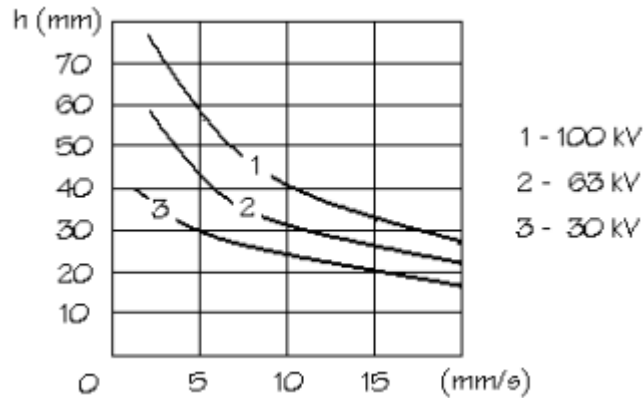


Figura 6- Variação da penetração para diferentes potências e velocidades de soldagem

Corrente da focalização

A corrente que passa por estas bobinas, tem como função criar um campo magnético que interfira com o feixe para que, numa dada distância, tenha-se o menor diâmetro do feixe (ponto focal), pois isto significa que toda a energia do feixe está concentrada na menor área possível, e com isto tem-se a densidade de energia máxima.

O feixe ao ser gerado, é normalmente divergente, porém ao passar e ser submetido a ação de um campo magnético, tende a restringir-se, para logo em seguida, divergir novamente conforme é mostrado na Figura - Divergência do feixe.

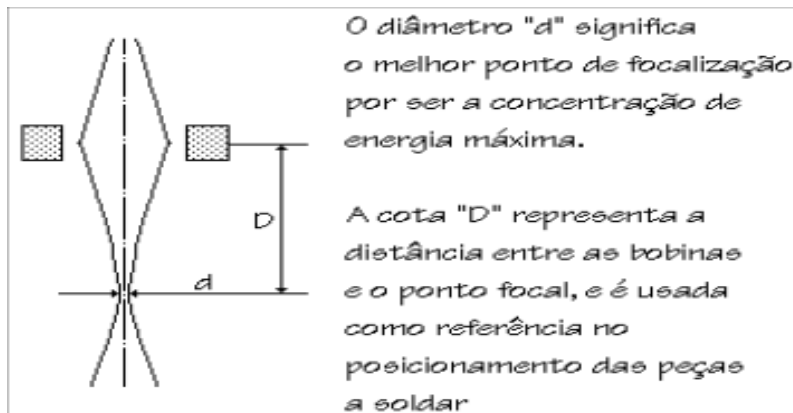


Figura 7 - Divergência do feixe

O ponto de restrição com o menor diâmetro "d" é o ponto de densidade de potência máxima. Assim, a regulagem da corrente de focalização, consiste em fazer alterações na corrente das bobinas até que o ponto (d), ocorra exatamente para a distância canhão/peça "D", que já é estabelecida (e medida) na montagem da peça na câmara.

É comum também, medir-se o diâmetro do foco para controle deste parâmetro. Os diâmetros mais usuais encontram-se na faixa de 0.25 a 0.75 mm.

Vácuo do canhão

Embora não influencie diretamente na Soldagem, o canhão deve sempre trabalhar a partir de um certo nível de vácuo (no mínimo 10⁻⁴ bar).

Distância canhão-peça

Este parâmetro influencia diretamente a tensão e a corrente de focalização. O primeiro porque com uma distância maior, a chance do feixe dispersar-se também aumenta, devendo-se por isto aumentar a tensão sob risco de não obter-se a penetração desejada. O segundo porque a distância "D" aumentará e necessitará de uma corrente diferente nas bobinas para ter-se a focalização adequada.

Técnicas

Pode-se soldar por duas diferentes técnicas: cordões penetrantes na Figura Soldagem penetrante - Técnica do "key-hole", ou não penetrantes na Figura Soldagem não penetrante - Técnica "por condução". Esta escolha é feita, entre outras coisas, em função da resistência que se pretende na junta soldada.

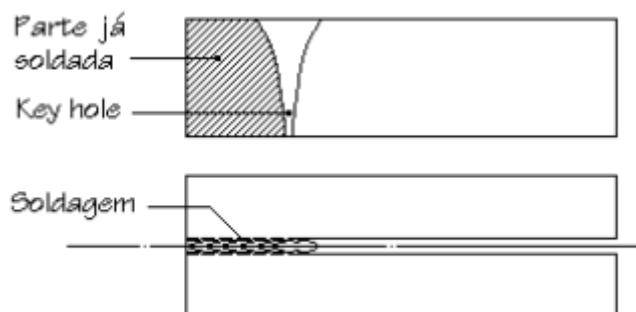


Figura 8- Soldagem penetrante - Técnica do "key-hole"

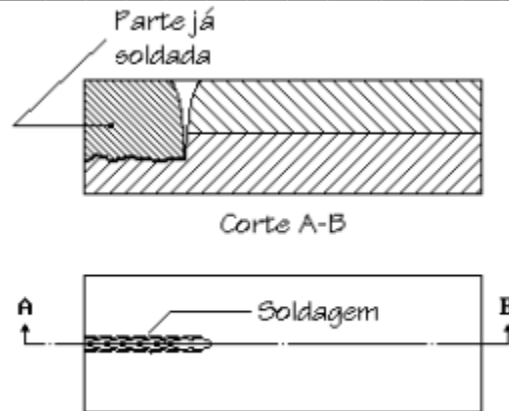


Figura 9- Soldagem não penetrante - Técnica "por condução"

Além disto, em função da densidade de energia, pode-se obter a Soldagem por condução ou por key-hole, sendo Soldagem por condução semelhante ao mecanismo que ocorre nos processos tradicionais.

Na técnica do key-hole, uma série de forças atuam no interior da capilar da Soldagem, como é mostrado na Figura Forças presentes durante a soldagem com a técnica do key-hole, e isto é de particular interesse para alguns tipos de Soldagem, como será visto mais adiante.

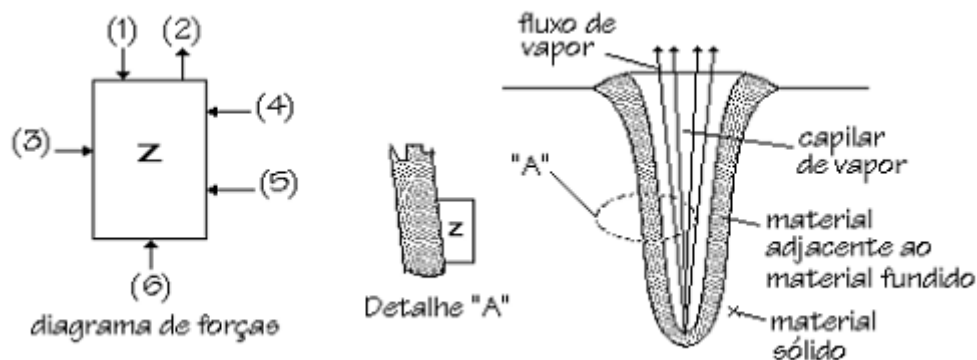


Figura 10 - Forças presentes durante a soldagem com a técnica do key-hole

Considerando o retângulo Z como um elemento de volume temos:

- Pressão hidrostática da coluna de material fundido acima do elemento Z
- Força de atrito do fluxo de vapor na superfície do elemento Z
- Pressão de vapor do material líquido
- Tensão superficial do material
- Pressão de vapor da parte gasosa (plasma de material fundido)
- Força de impulsão do metal líquido abaixo de Z

Relação entre a condição de vácuo e a soldagem

O funcionamento do processo em pressão atmosférica, embora possível, é muito pouco usado. USA-SE somente em espessuras finas, e além disto, não apresenta grandes vantagens econômicas quando comparado com os processos convencionais de Soldagem (TIG por exemplo). Assim, a grande utilização é sempre em vácuo, sendo para isto necessária a existência de alguns sistemas.

A razão de se operar em vácuo é a seguinte: Os elétrons quando estão se direcionando do cátodo para o ânodo, sofrem atrito com as moléculas do ar atmosférico, e este atrito diminui sua energia, fazendo-os dispersarem-se.

Nos casos de Soldagem e corte, é muito importante que isto não ocorra pois se perderia a penetração. Para se quantificar a influência do vácuo, observar que em 10^{-4} Torr o número de moléculas poluentes é 1000 vezes menor do que as encontradas em Ar ou He com pureza "nuclear".

A relação existente entre o vácuo da câmara e a penetração é mostrada na figura abaixo.

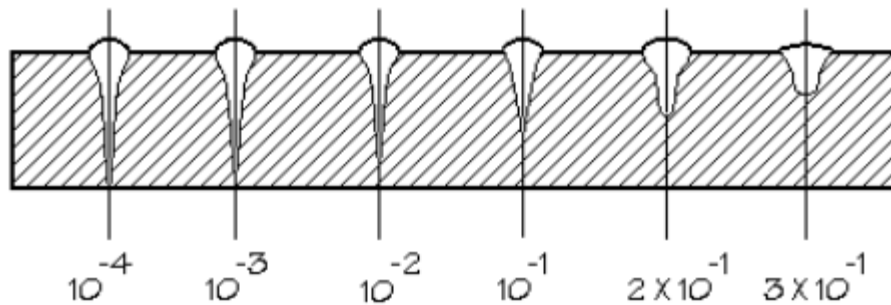


Figura 11 - Relação entre o vácuo e a penetração

Pode-se trabalhar em alto - vácuo (aprox. 10^{-5} Torr) ou médio (aprox. 10^{-3} Torr). As diferentes características destas condições de trabalho, são descritas à seguir: SOLDAGEM EM ALTO VÁCUO (aprox. 10^{-3} a 10^{-6} Torr.)

Apresenta maior penetração e, conseqüente, menor largura do cordão. Além disso, tem-se maior pureza no depósito. As contrações e distorções são mínimas, e pode-se mais facilmente observar a Soldagem. Por outro lado, esta é a forma de menor produtividade, uma vez que é necessário um tempo maior para fazer o vácuo, além de ter-se a limitação dimensional das peças a soldar (tamanho da câmara).

Soldagem a pressão atmosférica

Nestas condições, a distância canhão - peça tem que ser a mínima possível, devido ao atrito do feixe com as moléculas de ar. Isto afetará a penetração da Soldagem, que diminuirá, enquanto a contaminação e largura aumentarão. Por outro lado, por não se ter a necessidade da câmara de vácuo, teremos maior produtividade e a não limitação dimensional das peças a soldar. É importante lembrar também que, esta forma é a que apresenta maior consumo energético, pois será necessária uma tensão maior para que o feixe eletrônico atravessasse a atmosfera.

Soldagem em médio vácuo. (de 10-3 a 25 Torr.)

A Soldagem executada nestas condições apresenta um resultado intermediário entre os dois tipos apresentados acima, embora mantenha os problemas de limitação dimensional e baixa produtividade.

As características de Soldagem nas diferentes condições de vácuo podem ser visualizadas na tabela abaixo.

Tabela - Comportamento do processo para diferentes condições de vácuo

CARACTEÍSTICAS	ALTO VÁCUO		MÉDIO VÁCUO		BAIXO VÁCUO	
tensão máx (KV)	30 a 50		60 a 150		150 a 175	
Potência máxima (KW)	30		25		12 a 25	
máx. Distância canhão - peça	mm <250 <1000	KV 30 150	mm <1000	KV 150	máx. 15 mm.	
Pressão usual na câmara	10-4Torr		10-1 a 10-2Torr		atmosférica	
Máxima penetração em aço inóx.	mm 50 125	KV 6 25	mm 50 100	KV 7,5 25	mm 15 22	KV 12 25
Versatilidade Limitado para grandes volumes de produção.	Bom para materiais de difícil soldabilidade		Ótimo para grandes volumes de produção.Limitado para materiais de difícil soldabilidade		Bastante limitado.	

Características

Uma das grandes vantagens do feixe de elétrons é o baixo heat -input com que este processo efetua as Soldagens. Isto é de especial interesse nos aços, pois evita a fragilização causada pelo crescimento dos grãos, além de minimizar as distorções.

Porém, alguns defeitos são possíveis de acontecer, sendo os principais discutidos a seguir:

Durante a Soldagem, as forças existentes impedem o fechamento do capilar, possibilitando a Soldagem.

Após o avanço da peça ou do canhão, a força do feixe de elétrons cessa, alterando o diagrama mostrado.

Nesta fase inicia-se a contração do material, pois o esfriamento deixará os átomos com menor grau de liberdade, diminuindo assim o seu volume. Isto causará um certo rebaixamento na linha superior da solda conforme indicado no item 2 da Figura Rebaixamento na linha superior causado pela contração do material, que será diretamente proporcional a quantidade de material que sofre contração.

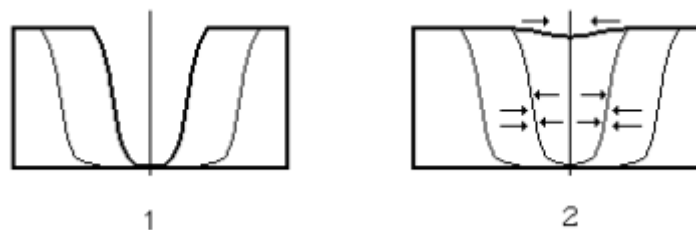


Figura 12- Rebaixamento na linha superior causado pela contração do material

Conclui-se que quanto maior o volume de material fundido, maior será esta contração. Assim, para evitar a formação deste defeito, é preferível a técnica do key-hole em relação a Soldagem por condução, pois esta produz uma poça de fusão menor.

O processo feixe de elétrons pode apresentar alguns tipos de trincas. Os tipos que ocorrem com maior significância são mostrados na Figura Trincas na soldagem por feixe de elétrons

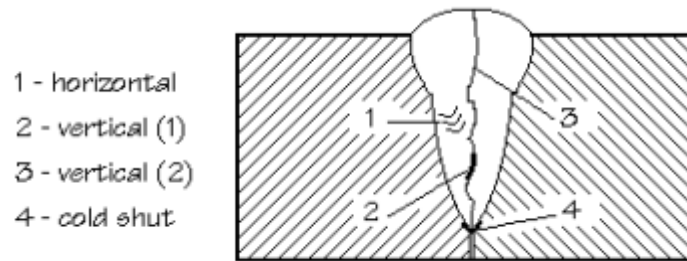


Figura 13 - Trincas na soldagem por feixe de elétrons

A trinca tipo 3 ocorre após o resfriamento, sendo por isto chamada de trinca a frio, enquanto que as outras, conhecidas como trincas a quente, ocorrem durante a solidificação.

Deve sempre ser levado em conta que, o key-hole é dinâmico e não uma condição estática. Esta movimentação também facilitará o aparecimento de trincas. No processo feixe de elétrons, existem praticamente dois tipos de porosidade, e um tipo de falta de fusão. As porosidades são: de raiz, e a porosidade na "zona ativa". Estes defeitos são mostrados na Figura - Porosidades na soldagem por feixe de elétrons.

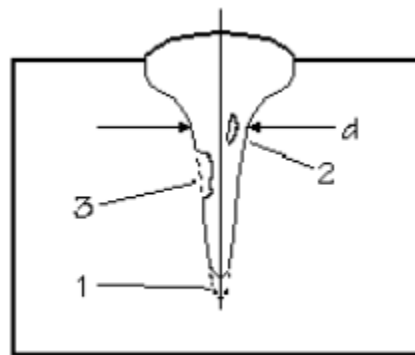


Figura 14- Porosidades na soldagem por feixe de elétrons

A porosidade de raiz (tipo 1) é um outro tipo de defeito que normalmente acontece em soldagens não penetrantes. Ela ocorre no ponto extremo da profundidade de penetração, isto é na vizinhança da raiz, e tende a ocorrer nas zonas mais profundas da penetração.

A porosidade na "zona ativa" (tipo 2) é característica da atividade no centro do cordão ser muito forte, em função da grande densidade de energia. Como os demais defeitos de soldagem, este também acaba por causar uma redução na resistência da junta soldada.

Relação entre os materiais e os defeitos

No processo de Soldagem por feixe de elétrons, existem dois aspectos que minimizam a formação de defeitos: A velocidade de Soldagem e a forma do cordão com pequenas zonas termicamente afetadas. Porém, a composição química do material pode estar diretamente relacionada com vários tipos de defeitos.

Quando o material apresenta Oxigênio em sua estrutura (nomeadamente aços não acalmados), as combinações dos íons para formar moléculas gasosas resultarão em defeitos do tipo porosidade e excesso de respingos.

Os aços com baixo C, S, P, e Mn, e os baixa - liga, são normalmente soldados sem problemas. Como o Oxigênio causa a porosidade nestes materiais, é necessário decapar antes da Soldagem para remover os óxidos da superfície, e assim, minimizar a quantidade de Oxigênio que pode existir na poça de fusão.

O mesmo problema causado pela presença do Oxigênio na formação de porosidades, é também causado pelo Nitrogênio no aço inoxidável e aço Carbono.

A Soldagem do Alumínio e suas ligas requer cuidados especiais devido aos altos níveis de vapores metálicos produzidos por este material durante a Soldagem. Isto poderá acarretar respingos excessivos e porosidades.

O Cobre e suas ligas também necessitam cuidados especiais, para evitar porosidades, sendo também a destacar a necessidade de um feixe com uma grande densidade de potência para compensar a alta condutividade térmica do material.

Nos materiais reativos (Ti Zr), o grande problema de sua Soldagem é a contaminação com Oxigênio antes do total resfriamento. Como no feixe de elétrons o processo transcorre-se em vácuo, estes materiais podem então serem soldados sem maiores problemas.

Finalizando, são apresentados a seguir alguns desenhos ilustrando capacidades do processo:

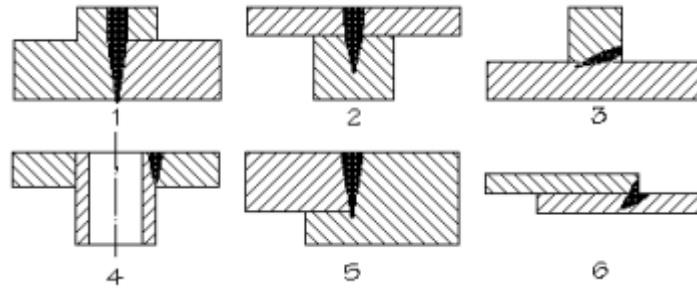


Figura 15- Soldagem em locais de difícil acesso ou inacessíveis.

Outras informações

Bibliografia

- AWS Welding Handbook - Volume 6, 9ª edição
ARATA, Y. Terms and Definitions for Electron Beam Welding, Laser Welding and Laser Cutting used in Japan. The Electron Beam Welding Research Committee-Japan Welding Society
ISQ Apontamentos de Feixe de Electrões. Publicados pelo Instituto de Soldadura e Qualidade. Lisboa, 1985
RAMALHO, J. Notas de Aula do Curso de Especialização em Engenharia Industrial. Instituto de Soldadura e Qualidade. Lisboa, 1990
PANZER S., et al Electron Beam Technology. A Wiley- Interscience Publication. Alemanha, 1982
VANNES, André B. Lasers et Industries de Transformation. CAST Centre D'actualization Scientifique et Technique - Insa de Lyon - França, 1986
MAZUNDER, J. e MUKHERJEE, K Lasers in Metallurgy. AIME - American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers - EUA, 1981
READY, John F. Industrial Applications of Lasers. Academic Press - EUA, 1978
VLACK, L. Van Princípios da Ciência dos Materiais. McGraw- Hill - Brasil, 1977
METZGER, G. e LISON, R Electron Beam Welding of Dissimilar Metals AWS Annual Meeting - EUA, 1968
ARATA, Y. Plasma, Electron and Laser Beam Welding Technology - ASM EUA, 1986
BLAKELEY, P. J. Electron Beam Welding - Some Questions Answered - The Welding Institute Research Bulletin - Inglaterra, 1983
HAMILTON, Operation and Maintenance Instructions for Hamilton-Zeiss Electron Beam Welding Machine W2 Séries, EUA, 1964
HAMILTON, Electron Beam Welding Data Manual - EUA, 1965
ELLIOT, S Joining Dissimilar Metals by EB and Laser Welding - Welding Research Institute Bulletin - Inglaterra, 1983
MOUTINHO, e outros. Tecnologia do Vácuo UNL-FCT Portugal, 1980
TERAI, K. et al Relationship Between Power Density and Penetration Depth in Electron Beam Welding - Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Japão, 1977
ARATA, Y. et al Study on Characteristics of Weld Defect and its Prevention in Electron Beam Welding - Report III Characteristics of Cold Shut - Transactions of JWRI - Japão, 1974
19 - AWS Welding Technology Data - Welding and metal Fabrication - EUA, 1973