

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

超合金Inconel 718之真空硬銲研究

Study of Vacuum Brazing of Inconel 718 Superalloys

計畫編號：NSC 87-2216-E-009-008

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：周長彬 國立交通大學機械工程研究所

一、中文摘要（關鍵詞：真空硬銲、微觀結構、填充金屬、最大硬銲間隙、穿透深度、搭接長度、單疊剪力試驗、金屬間化合物）

本文主要是探討硬銲溫度與時間、銲後熱處理溫度與時間、間隙寬度、搭接長度填及充金屬等真空硬銲參數，對硬銲接頭品質的影響程度，並由單疊剪力試驗加以驗證。

實驗結果發現：當硬銲溫度大於1070°C時，母材晶粒有明顯成長現象，對母材機械性質有不利的結果。硬銲間隙中如果存有大量的硬脆金屬間化合物，會造成硬銲接頭機械性質的嚴重衰退。間隙寬度愈大，中心之金屬間化合物愈多。當硬銲、銲後熱處理溫度愈高或持溫時間愈長，沒有硬脆金屬間化合物產生之間隙寬度（MBC）會愈大。硬銲間隙如為均勻的固溶組織，接頭機械性質較好。

經由各種參數之評估，BNi-2、BNi-3填充金屬之最理想硬銲參數為：1070°C硬銲10分鐘，隨後980°C銲後熱處理60分鐘，間隙寬度小於50mm，適當搭接長度為6-8T。而BNi-5之理想參數為：1170°C硬銲10分鐘，隨後980°C銲後熱處理60分鐘，間隙寬度小於35mm，搭接長度亦為6-8T。此外，因BNi-2與BNi-3對母材的穿透深度過大，不能使用於薄片母材之硬銲，BNi-5則可。

二、計畫緣由與目的

Inconel 718是一種應用非常普遍的超合金(Superalloy)，可廣泛地使用在航空、核能、石化等工業。雖然擁有優良的可銲性(Weldability)，但銲接(Welding)加工時，銲道缺陷、組合元件的外觀與變形量等問題，使銲件品質大打折扣。例如，當母材使用於火箭燃燒室時，因其外形複雜，如以TIG組合零件，則必須以精密夾具加以固定，否則易因

局部受熱，熱應力分佈不均，而導致嚴重的扭曲變形。而在真空爐中進行硬銲，經由可程式控制升溫與冷卻，此問題可以獲得改善。

自1944年德國首先使用85%Ag-15%Mg作為填充金屬硬銲噴射引擎之中空葉片以來[1]，硬銲技術之發展日新月異。Inconel 718在它的應用領域中，需要有良好的接合品質。而在 10^{-4} ~ 10^{-6} Torr的真空氣氛爐中實施硬銲，因其優良的爐內純淨度，可使施銲中母材的氧化反應降至最低，而母材氧化反應的降低，則有助於硬銲接頭表面潤濕(Wetting)及毛細作用的進行。對Inconel 718這一類析出硬化型的超合金而言，因含有Ti、Al等易於高溫氧化之元素，真空硬銲技術的應用便非常地重要。

本研究的重點，即在以真空硬銲技術應用於Inconel 718板材，並選用適當的鎳基填充金屬，利用硬銲溫度、硬銲時間、接頭間隙、搭接長度及填充金屬等參數的控制與銲後熱處理，作一分析探討。並藉此此實驗對真空硬銲的影響參數，作更深入的瞭解，以為應用於其他材料的參考與基礎。

三、實驗方法

本實驗以Inconel 718母材配合BNi-2、BNi-3、BNi-5三種鎳基填充金屬施銲，其組成列於表1。依圖1之外形尺寸及圖2之熱循環參數施銲Wedge Gap試片[2]，BNi-2、BNi-3硬銲溫度為1040、1070、1120、1155°C，BNi-5硬銲溫度為1155、1170、1200°C，三種填充金屬再於980°C分別進行1hr、2hr、3hr之銲後熱處理，最後再經Aging處理。並以此製成金相試片，經母材晶粒尺寸、最大硬銲間隙（MBC）、晶界穿透深度及微硬度量測後，評估最理想的硬銲熱循環與間隙寬

度。再以此理想參數製成單疊剪力試片，如圖3，以測試其適當的搭接長度。其中，穿透深度係指填充金屬與母材元素交互作用，形成化合物沿母材晶界析出之深度，以微硬度試驗儀直接量測並取多點平均值。MBC為硬銲接頭間隙中沒有硬脆金屬間化合物形成之間隙寬度。量測方法如圖4所示。

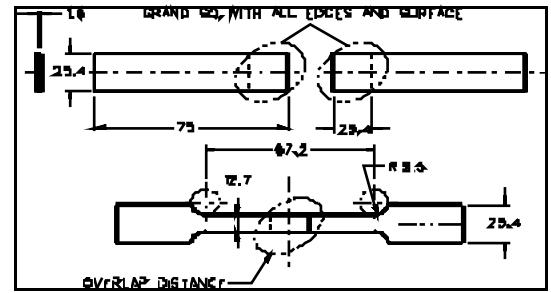


圖3 單疊剪力試片

表1 填充金屬成分與硬銲溫度範圍

	Ni	Cr	Si	B	Fe	Braz. T. Ran. (°C)
BNI-2 bal	7	4.5	3.1	3		1010~1175
BNI-3 bal		4.5	3.1	0.5		1010~1175
BNI-5 bal	19	10.2				1150~1204

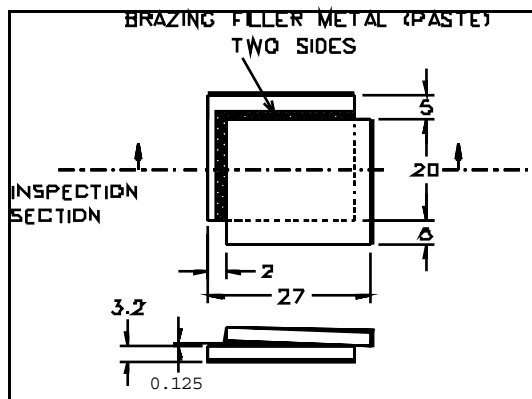


圖1 wedge gap 試片

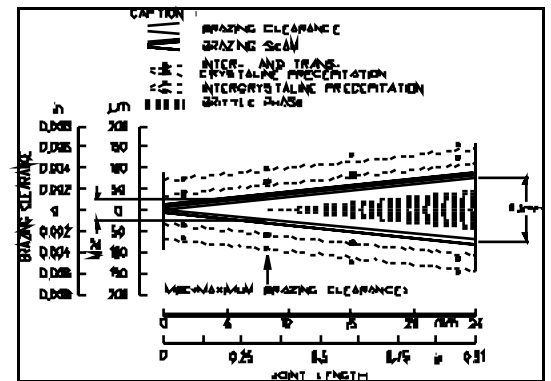


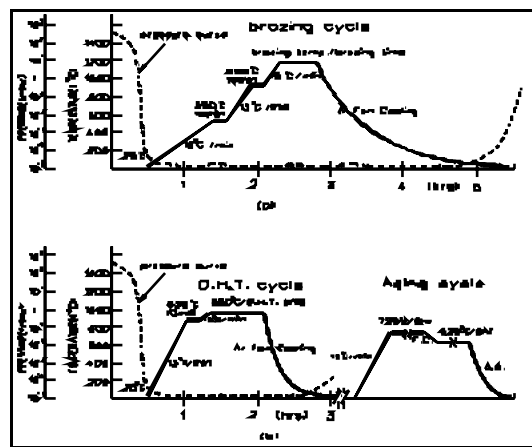
圖4 最大硬銲間隙量測示意圖

四、結果與討論

1. 最大硬銲間隙量測

沿硬銲間隙中心線所形成的共晶組織，是屬於過渡相的金屬間化合物（Intermetallic Compound），它會隨溫度與持溫時間、硬銲間隙寬度的變化而改變。當溫度愈高或是持溫時間愈長，這些金屬間化合物的組成元素（如BNI-2、BNI-3的Si及B，BNI-5的Si）會擴散至母材中，而使原來沿中心呈連續帶狀分佈的共晶組織，逐漸成為不連續的鏈狀分佈，最後消失殆盡。圖5為BNI-2填充金屬施銲60分鐘，且同樣間隙寬度之金相照片，其硬銲溫度分別為：1040、1070、1120、1155°C，其中（a）及（b）圖顯示，共晶組織均呈連續帶狀分佈，（a）圖寬度較大，（c）圖呈不連續鏈狀分佈，（d）圖中則為均勻的固溶組織。顯而易見地圖5中，隨硬銲溫度的增加，整個硬銲間隙逐漸形成固溶體。圖6則顯示，三種填充金屬之MBC隨硬銲溫度與時間、銲後熱處理時間的提高而增大。

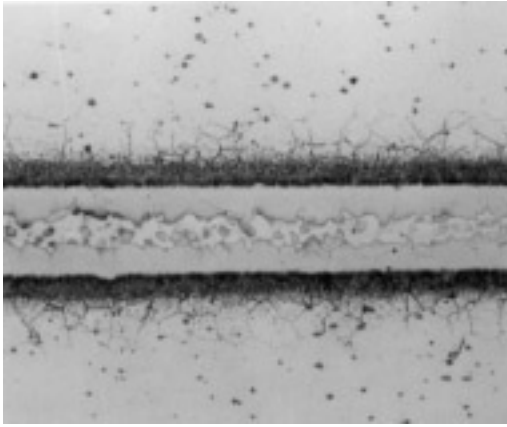
圖2 wedge gap 試片熱循環



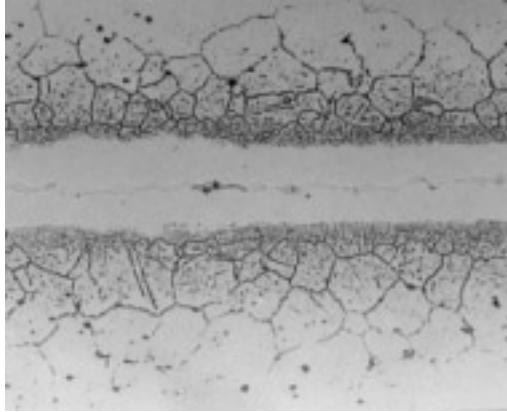
以上三種填充金屬均為粉末狀，使用時以NICROBRAZ cement-S膠和劑[3]混合成為膏狀填充金屬，其混合重量比為88%：12%。施銲前試片裁製均以線切割完成，以避免因剪切造成毛邊，而影響試片間隙的控制。硬銲接合面均以#100砂紙研磨，並浸泡於三氣乙烷中除脂。腐蝕液之組成為：40ml HCl+40ml CH₃OH+2g CuCl₂。此外，並以掃瞄式電子顯微鏡觀察破斷面型態。

2 穿透深度量測

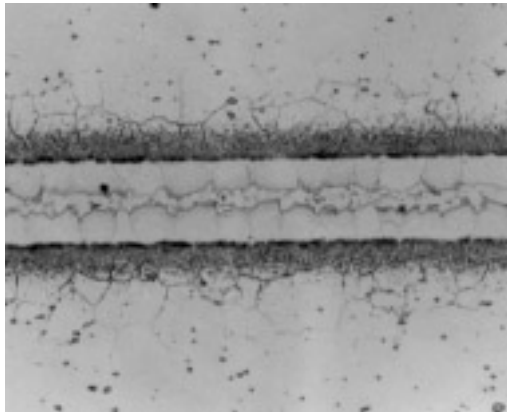
此實驗的目的，除了晶界穿透過深會影響硬銲接頭品質之外，在航空工業上，Inconel 718常以薄片材料常由硬銲加工方式



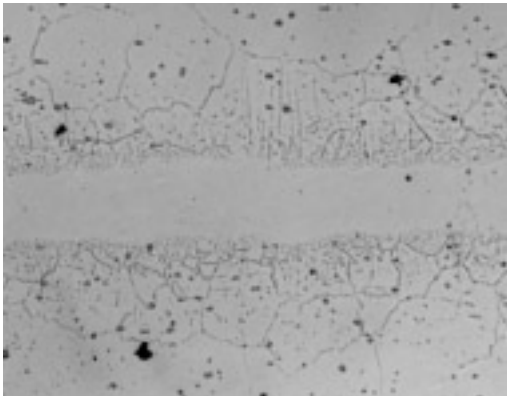
(a) 100x



(b) 100x

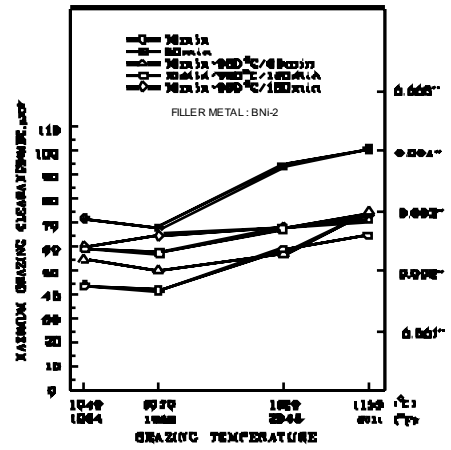


(c) 100x

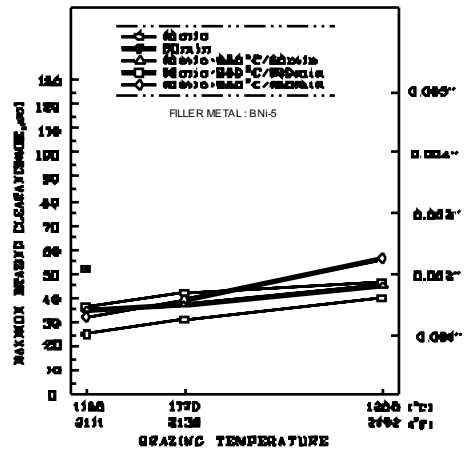


(d) 100x

圖5 硬鋸溫度對接頭微觀結構的影響



(a)

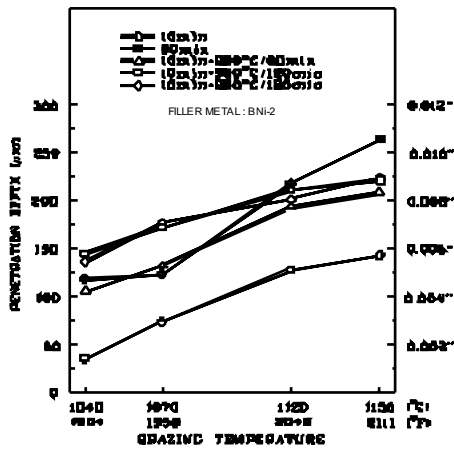


(b)

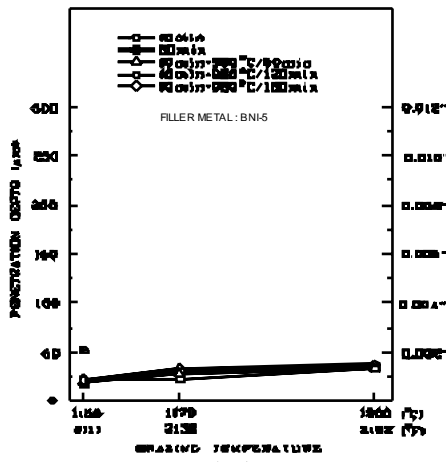
圖6 MBC vs 硬鋸熱循環

，製成蜂窩或格柵狀之結構物，如果填充金屬對母材之穿透性過大，則對薄片材料機械性質的影響將非常巨大。由圖7中顯示，BNi-2及BNi-3兩種填充金屬，對Inconel 718之穿透深度遠大於BNi-5，最大約達250mm，不能使用於Inconel 718薄片材料在蜂窩與格柵結構方面之硬鋸。在BNi-5的硬鋸接頭間隙中，晶界穿透深度幾乎不受硬鋸溫度與鋸後熱處理時間所影響，晶界穿透深度多在35mm以下，因此能使用於上述薄片材料之硬鋸。穿透深度之所以有如此大的差別，最可能的原因為：BNi-5的組成元素中，沒有如BNi-2、BNi-3所含之硼(B)元素，以致無法擴散到較遠的地方。

此外，圖7中亦顯示，填充金屬BNi-2及BNi-3硬鋸接頭的穿透深度隨硬鋸溫度的上升而增加。除此之外，鋸後熱處理亦會再加穿透深度之值。



(a)



(b)

圖7 晶界穿透深度 vs 硬鋅熱循環

3 硬鋅參數討論分析

BNi-2及BNi-3的硬鋅溫度範圍均為1010°C至1177°C。如果選用較高範圍的硬鋅溫度，理論上母材會因溫度上升，使表面能降低，而促進母材表面的潤濕性 (Wettability)，但卻有造成母材晶粒過度成長的負面影響。因此選擇稍低範圍的硬鋅溫度，而又能保有足夠的母材潤濕能力，將是比較理想的選擇。一般而言，硬鋅溫度範圍之最低溫度 (此處為1010°C)，並不被建議採用。因為填充金屬常受本身 (成分不均勻) 或外在 (硬鋅爐溫度誤差) 等因素所影響，會使填充金屬在硬鋅中產生不完全熔融現象。

以母材晶粒成長程度及機械性質衰退因素來考量，除了1010°C之外，1040°C至1070°C之間無疑是比較理想的硬鋅溫度，不論在晶粒成長或機械性質方面都有令人滿意的結果。但是以1040°C做Wedge Gap試片時，很多試片因潤濕性不足，熔融填充金屬無法塗佈整個間隙，以致形成諸多潤濕缺陷 (Wetting Defect)。這些情形在BNi-2及BNi-3皆有發生。如以1070°C/10min之參數施鋅於Wedge

Gap試片，潤濕缺陷可以獲得良好的改善。在BNi-5亦避免使用最低硬鋅溫度及三種填充金屬均進行60min鋅後熱處理下，BNi-2、BNi-3之最佳參數為1070°C/10min+ 980°C/60min，而BNi-5為1170°C/10min+ 980°C/60min。其中BNi-5最佳參數之接頭間隙顯微結構與微硬度分佈，如圖8、9所示。

(a) 100mm (b) 30mm

圖8 接頭間隙微觀結構 200x

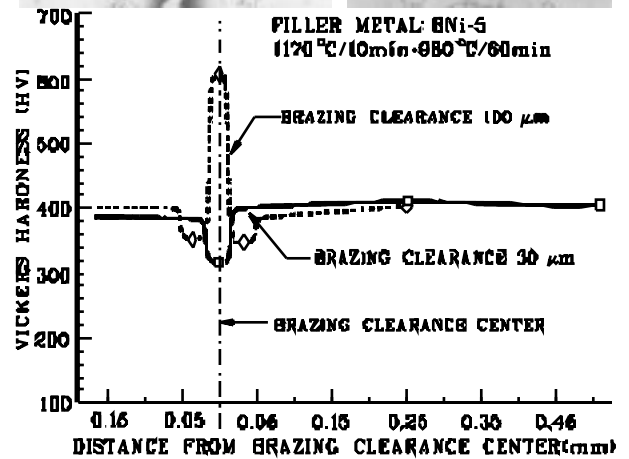
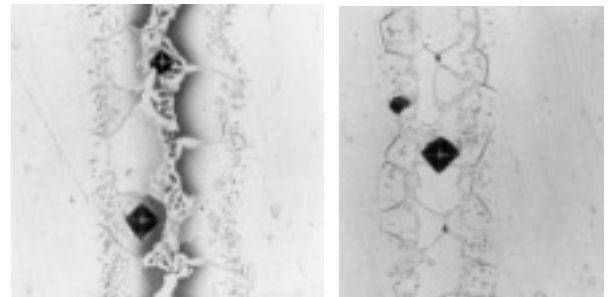


圖9 接頭間隙微硬度分佈

4 單疊剪力試驗

圖10中顯示，間隙寬度為50mm，當BNi-2、BNi-3搭接長度大於4T及BNi-5搭接長度大於6T時，試片破斷發生在母材部份。其中BNi-2、BNi-3隨搭接長度之加長，破斷應力亦有局部之增加。在搭接長度為8T時，BNi-2、BNi-3及BNi-5三種試片之破斷強度分別為：125.1、121.2及112 kg/mm²，其中BNi-5填充金屬試片的強度稍低。此外，在三圖中有一共同現象，在接頭間隙寬度為100mm時，三種填充金屬試片之強度均呈現大幅衰退現象。以搭接長度為8T為例，BNi-2、BNi-3及BNi-5三種試片之破斷強度分別為：92、96及85 kg/mm²僅達間隙寬度為50mm時強度之74、79及76%。此與A. SAKAMOTO等人以BNi-2硬鋅Hastelloy X 超合金[2]之結果相同。依其趨勢研判，在更大的搭接長度時，其破斷強度應會與前者更接近。R. JOHNSON對此強度衰退的解釋為：過大的間隙寬度，以致沿間隙中心形成之金屬間化合物，在此

硬鋅熱循環下無法消除，因此在高應力作用下，在環繞其周圍較軟的固溶體中形成塑性流（Plastic Flow）致產生裂痕，隨後導致失敗[3]。圖中顯示，BNi-2、BNi-3、BNi-5間隙寬度小於50mm、搭接長度6-8T實有良好的接頭品質，其中BNi-5間隙寬度小於35mm時，其接頭品質應可再予改善。

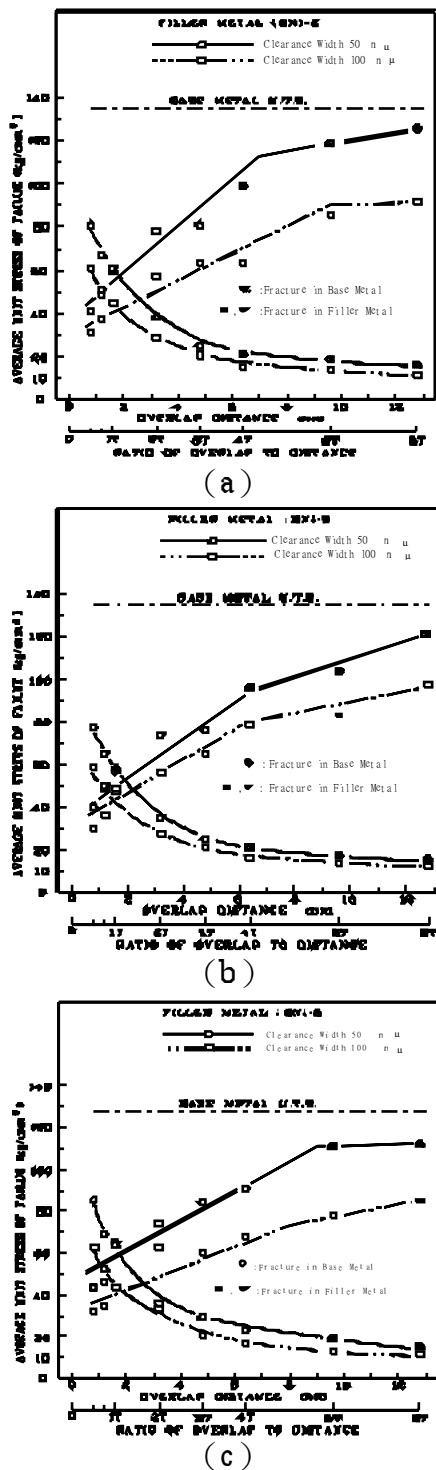


圖10 單疊剪力試驗結果

五、結論

1 當硬鋅溫度大於1070°C時，母材晶粒有明顯的成長。

- BNi-2、BNi-3之理想熱循環為：1070°C /10min + 980°C /60min，間隙寬度小於50mm時，有品質良好的接頭。理想的搭接長度為6-8T。
- BNi-5之理想熱循環為：1070°C/10min+980°C/60min，間隙寬度小於35mm時，有品質良好的接頭。理想的搭接長度為6-8T。
- 填充金屬BNi-2、BNi-3對母材之晶界穿透深度過大（最大約達250nm），不能使用於Inconel 718薄片材料在蜂窩與格柵結構方面之硬鋅，BNi-5則可。
- 間隙過大中心會有金屬間化合物形成，其微硬度值極高，與兩側固溶體相較有很大的差別。此不均勻組織，在高應力作用下，是硬鋅接頭性質衰退之主因。

六、參考文獻

- A.SAKAMOTO " Optimizing Process Variables in High Temperature Brazing with Nickel-Base Filler Metals" , W.J. , 3 , 1989 , P63-71
- WALL COLMONOY Corporation " MICROBRAZ cement -S" , MICROBRAZ Technical data sheet No.2.2.4
- R.JOHNSON " The Use TETIG Diagrams in High Temperature Brazing " , W.J. , 10 , 1981 , P185S-193S
- A.SAKAMOTO " Wetting in Vacuum-Inert Gas Partial Pressure Atmosphere Brazing" , W.J. , 10 , 1983 , P272S-283S
- D.L.KELLER ; M.M.MCDONALD " Wettability of Brazing Filler Metal" , W.J. , 10 , 1990 , P31-34
- E. LUGSCHEIDER ; KKLOHN " Strength of High Temperature Brazed Joint Influence of Brazing Parameters" , W.J. , 10 , 1979 , P296S-300S
- AWS " Brazing Manual" , 3rd , 1984 , P23
- N.BREDZS ; F.M.MILLER " Use of the AWS Standard Shear Test Method for Evaluating Brazing Parameters" , W.J. , 11 , 1968 , P481S-496S
- E.LUGSCHEIDER ; KIVERSEN " Investigations on Capillary Flow of Brazing Filler Metal BNi-5" , W.J. , 10 , 1979 , P319S-324S
- E.LUGSCHEIDER ; K.DPARTZ " High Temperature Brazing of Stainless Steel with Nickel-Base Filler Metals BNi-2、BNi-5、BNi-7" , W.J. , 6 , 1983 , P160S-164S