

溶接の 金属組織学

アプリケーション ノート

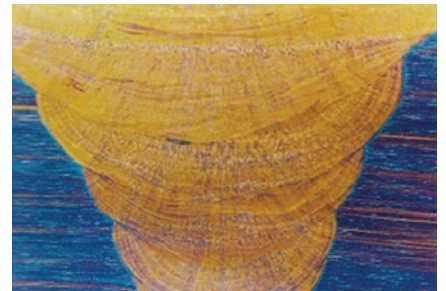
19世紀末まで、金属の切断面は、鍛造溶接と呼ばれる加熱とハンマーで叩く工程によって接合されていました。今日、多岐多様な溶接工程が利用可能なため、さまざまな組成、部品形状、サイズの材料の接合用の製造工程として、溶接が幅広く使用されています。

多くの種類の製造業は、さまざまな溶接プロセスを使用しています。

- 航空機産業および航空宇宙産業、例：翼と機体。
- 造船および海洋産業、例：デッキと上部構造用のパネル。
- 陸上輸送 / 自動車産業。
- 石油・石油化学産業、例：オフショア生産プラットフォームおよびパイプライン。
- 国内、例：白物家電と金属製家具。



被覆金属アーク溶接



オーステナイト鋼の多層盛溶接による琢磨とカラーエッチング部分。Lichtenberger と Bloech によるカラーエッチング。明視野、6.5x。

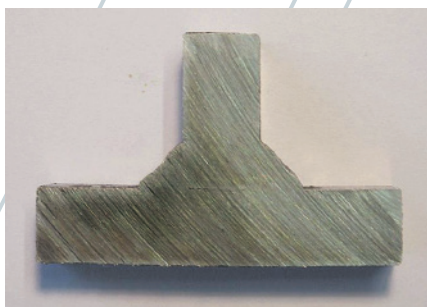
溶接の多くの側面を検査するために研究、不具合分析や金属組織学が工程制御に使用されています。例、パス数とサイズ、溶け込みの深さ、HAZの範囲（熱影響部）、および代表的な試料の孔や割れなどの欠陥。溶接部は多くの異なる材料で作られるため、適切な金属組織学的試料作製方法を選

択することが不可欠です。

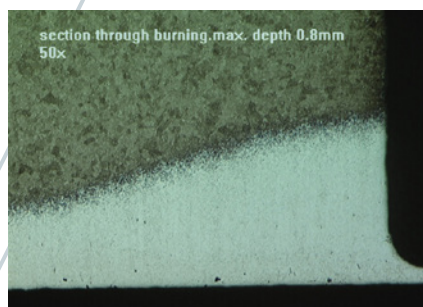
金属組織試料作製時の課題

切断作業中に熱損傷が生じると、溶接接合部の微細構造や特性が変質する可能性があるため、避ける必要があります。

異なる硬さ値を持つ微細構造特性の平坦度を達成するには、溶接接合部内および接合部全体の材料特性のばらつきによって生じる課題に対処するために、試料作製工程を完全に理解する必要があります。



鋼溶接部の熱損傷。



琢磨およびエッチングされた横断面は、熱損傷が貫通する深さを示します。明視野、50x。

ソリューション

試料の熱損傷を回避するために、適切な切断パラメータを備えた正しい切断ホイールを選択することが重要です。

溶接の材料種類に合わせて試料作製方法を選択し、溶接の硬質相と軟質相の間の浮彫、熱影響部、母材のリスクを最小限に抑えるように最適化する必要があります。

熱を伴う接合工程 溶接工程



金属と合金の接合に利用できる工程は、次のとおりです。

- 軟質はんだ付け*
- ろう付け溶接**
- 溶接

溶接、はんだ付け、ろう付けを区別する特徴は以下のとおりです。

- はんだ付け(図1)およびろう付け(図2)材料間の接合を形成するために、材料間で融点が高い材料を溶解させること。この際、ワークピースは溶解しません。
- 溶着が行われるように、接合部付近の被溶接材料を融点より高くなるように熱を加えます。
- 上記の結果として、溶接接合部の付近の材料に複雑な化学的および冶金学的変化が生じます。
- このような微細構造の変化は、接合特性とサービスへの適合性に大きな影響を与える可能性があります。

* 軟質はんだ付け はんだ付けとは、比較的低い融点を有する第3の金属または合金によって2つの金属を接合する工程です。軟質はんだ付けは、第3の金属または合金の融点の値が450℃(840°F)未満であることが特徴です。この工程で使用する3番目の金属または合金は、はんだと呼ばれます。

**ろう付け溶接 ろう付け溶接は、母材の融点(例、軟鋼の場合、1600℃(2900°F))よりも大幅に低い充填剤の溶融温度(例、青銅合金の場合、870℃~980℃、または1600~1800°F)で行われます。

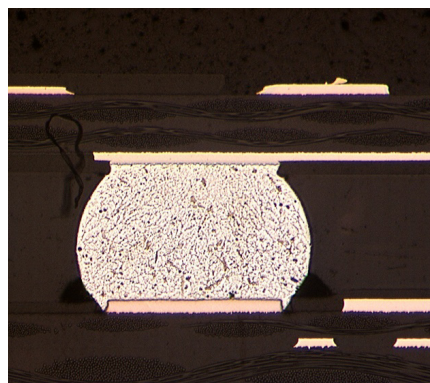
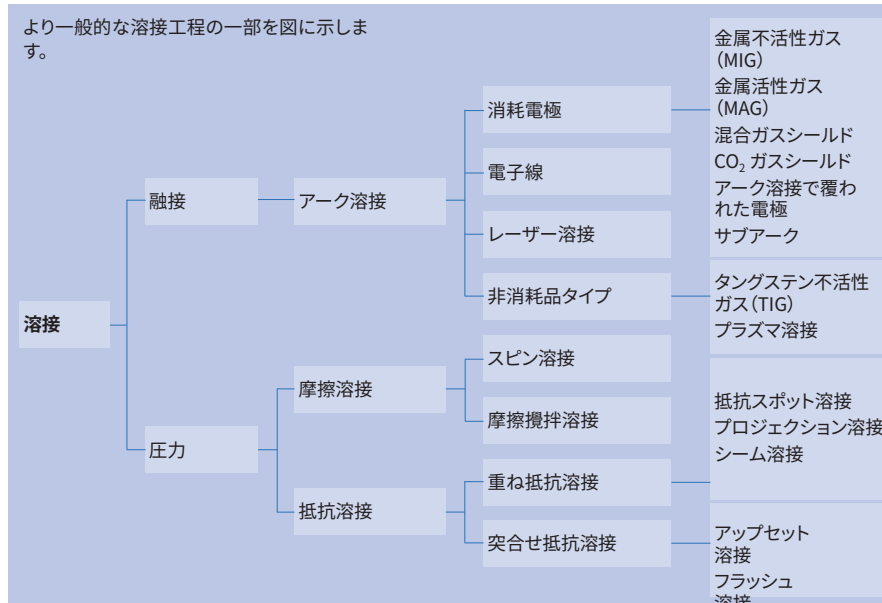


図1: プリント基板の銅導体路間のはんだボール接続による琢磨済み切断面。明視野、100x。



一般的に、溶接は、2つ以上の金属片の間の接合点と見なされ、金属を添加するかどうか、圧力を加えるかどうかに関わらず、熱を加えることにより、それらの表面をプラスチック状態(例えば、摩擦溶接 図3)もしくは液体状態にします。

これらの各々の工程には、独自の特徴があります。例えば、溶込み、溶接速度、スラグ発生、入熱、溶接特性など。これらは、結果として得られる微細構造の細部に大きな影響を与える可能性があります。

その結果、特定の溶接工程の影響に関する研究では、溶接の総合的な完全性を検査するか、微細構造 / 特性の関係を検査するか、または欠陥の性質と発生源を特定するかに関わらず、代表的な溶接試料に対する慎重な金属組織学的検査が必要となり

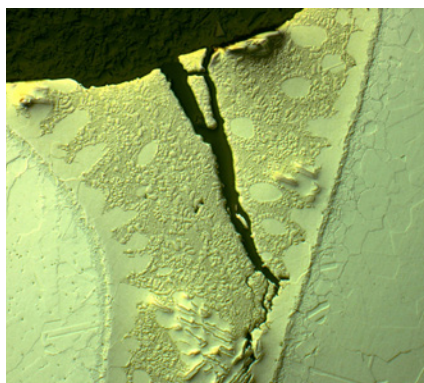
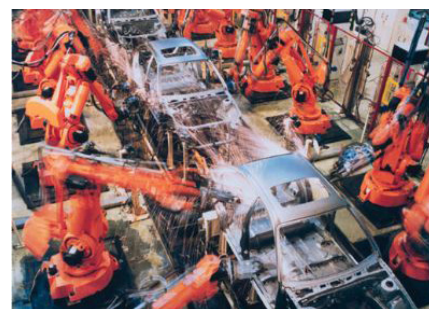


図2: オーステナイト系ステンレス鋼の銅合金ろう付け接合部による琢磨済み切断面。微分干渉コントラスト、100x。

ます。その後、微細構造分析と解釈の精度は、試料作製工程のあらゆる段階で発生する可能性があるアーチファクトの有無や作製された試料の生産に依存することになります。



ロボット溶接



図3: 熱影響部および関連塑性変形を示す、圧力摩擦溶接による低合金鋼の融合インターフェイス。明視野、25x。



ニッケル基合金の電子ビーム溶接による断面。散乱ガス孔がほとんどない、溶接された柱状微細構造。明視野、50x。



パイプ溶接部

溶接部から試験部を取る

金属組織学の原則と実践は、溶接部の検査に適用して多くの目標を達成できます。その一般的な内容を以下に示します。

• 溶接工承認試験

この種の試験では、指定された条件下で、個別の溶接工が適切な試験片を溶接します。次に、溶接を通して作製された切断面の測定、目視検査、検査によってこの試験片を検査します。溶接が合意された基準に達した場合、その溶接工は試験溶接と同じタイプの溶接を承認されます。

• 手順承認試験

この種類の試験は、特定の接合部構成と特定の材料における溶接手順を承認します。完成した溶接部はさまざまな手段で検査されますが、そのうちの1つは溶接の接合部を通して作製された切断面を含みます。通常、母材、熱影響部、溶接金属を横断する硬さの検査が実行されます。

• 生産品質管理

この種の試験では、生産工程の一環として代表数の溶接部が切断され、検査されます。

• 不具合分析

• 研究開発

2レベルの金属組織学的検査

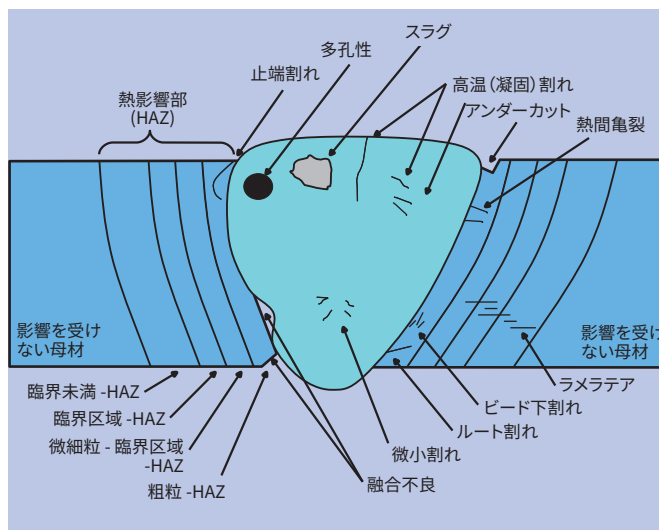
溶接された接合部の微細構造切断面は、一般に2レベルで検査されます。

マクロ: 実体顕微鏡に最大 50 倍の倍率を使います。

マイクロ: 光学顕微鏡に高い倍率(最大 1000 倍)を使用して試験します。

マクロ試験は、一般に溶接接合部からの埋込のない断面図で実施します。これには、切断および粗/微研磨作業が伴います。最終的にエッチングできる状態に仕上げた後、溶接接合部の特徴をマクロレベルで試験します。

マイクロ試験と硬度分布の場合、洗練された光学的平面の規定が必要です。これには切断、埋込み、研磨、琢磨が含まれます。アーチファクトは試料作製工程のあらゆる段階で発生する可能性があることを最初から認識する必要があります。これは特に溶接部に当てはまります。溶接では比較的短い距離で微細構造にばらつきが生じるだけでなく、広範囲の特性を持つ異種金属間の接合部が関与することがあるためです。



ワンパス溶接内のHAZの様々な領域と潜在的な欠陥を示す図。

溶接マイクロ部試料作製の推奨事項

切断

ほとんどの溶接工承認試験では、マクロ切断面を溶接停止 / 開始位置の横断方向に切断することが推奨されています。溶接工側のスキルが不足している場合、溶接不良が発生するのは、この箇所です。

溶接性およびその他の調査のために、切断面は真に代表的でなければなりません。大規模作製時により管理しやすい溶接部を取り除くため、主にフレーム切断を行うことがあります。この場合、マクロ/マイクロ部を湿式砥粒切断で切断することが重要です。このとき、前段階の熱切断で熱損傷の影響を受けた箇所から離れた箇所を切り取ります。

切断による変形を最小限に抑え、切断面の熱損傷のリスクを回避するためには、以下のことが重要です。

- 正しいタイプの砥粒切断ホイールが選択されている。
- 適切な送り速度が使用されている。
- 切断中に十分な量の冷却液が供給されている。

埋込み

通常、マクロ部の手順試験は、時間的な制約があるため、埋込なしで作製されます。一般的にマクロ試験には、細かく研削仕上げされた面が使われます。半自動試料作製が可能な場合は、複数の試料ホルダーに溶接接合部から埋込のない切断面を使用します。

埋込が必要な場合は、熱間埋込または冷間埋込が選べます。一般的に、溶接試験では、比較的大規模な切断面が使われます。この場合、最大 120 x 60 x 45 mm サイズの部分で、冷間埋込用の長方形モールドであるストルアスフレキシフォームに収容できます。

機械研磨

マクロ部

従来、マクロ試験用溶接部の切断面は、ケイ素フォイル/研磨紙で 1200 グリッド仕上げのグレードまで手作業で作製されてきました。

これは通常、母材、熱影響部、溶接金属を横断する硬さに十分であり、溶接マクロ試験を容易にするマクロエッチングに適しています。SiC フォイルは切断寿命 (1.0-1.5 分) が限られており、切断面サイズの増加に伴って悪化します。ストルアスMD-ピアノ円板は、手動試料作製の代替研磨 / 精研磨媒体の代替方法として、多くの利点があります。

- 長い切断寿命。
- 長期間にわたる一定の除去率。
- 広範囲の材料の硬さ (HV150-2000) に適している。
- 廃棄物の削減。

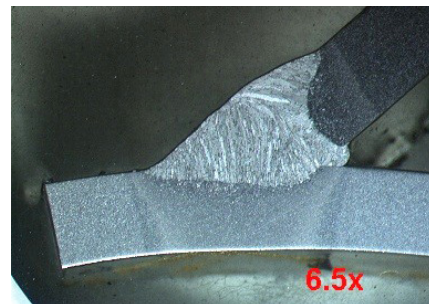
MD-ピアノ円板は、樹脂結合ダイヤモンド円板で、硬さHV150-2000 の範囲の材料を粗研磨および精研磨するために開発されました。SiC フォイル / 研磨紙 80, 120, 220, 600, 1200 相当の粒度で利用可能です。

マイクロ部

溶接試料は、溶接中に相が変化したり、または異種金属を接合したりすることがあるため、材料の硬さが幅広く変化します。溶接金属には、硬い沈殿物や溶接に適さない物質が含まれていることがあります。したがって、微細構造の特徴を研磨する際に浮彫を最小限に抑え、微細構造の要素をすべて残せる試料作製方法を選ぶことが重要です。このため、一貫性と再現性のある研磨によって正確な微細構造分析を可能にする半自動または自動試料作製機の使用が推奨されています。この文書では、幅広い溶接材料の試料作製方法をす



さまざまな溶接の長方形の埋込み。

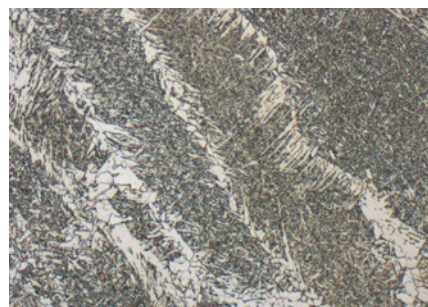


MIG (金属不活性ガス) 溶接による炭素鋼に、研磨およびエッチングを行ったマクロ部、4% ナイタルによるエッチング。明視野、6.5x。

べて網羅することはできません。ただし、次に説明する 4 つの方法は、より一般的に使用される溶接材料を対象としています。

炭素および低合金鋼の溶接。				
作業工程	PG	FG	DP 1	DP 2
作業面	MD-ピアノ 220	MD-アレグロ	MD-Plus	MD-Nap
砥粒	種類			
	サイズ			
懸濁液/ルーブリカント	水	ダイヤモンドアレグロ/ラルゴ9	ダイヤモンドプロ Plus 3	ダイヤモンドプロ NapB 1
回転数	300	150	150	150
加圧力[N]/試料	150	210	180	150
時間	1分	4分	4分	1分

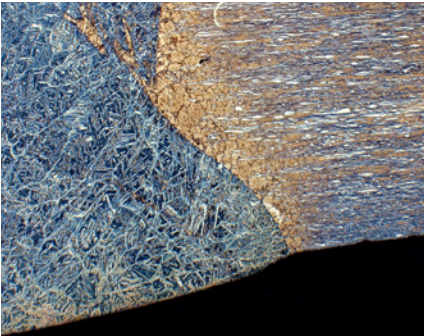
約 40 cm² の試料総面積に有効。ホルダーのパランスを取る必要があります。ダイヤモンドの代替として、DP-懸濁液 P、9 μm、3 μm および 1 μm と DP-ルーブリカント 青を併用できます。



MAG (金属活性ガス) 溶接による炭素鋼に、琢磨・エッチングしたマイクロ部。微細構造は、アシキュラーフェライトと初晶フェライトで構成される。2% ナイタルでエッチング。明視野、200x。

ステンレス鋼の溶接				
作業工程	PG	FG	DP 1	DP 2
作業面	SiC # 220	MD-ラルゴ	MD-Dac	MD-Chem
研磨剤	種類			
	サイズ			
懸濁液/ルーブリカント	水	ダイヤプロアLEGRO/ラルゴ9	ダイヤプロDac3	OP-A
回転数	300	150	150	150
加圧力[N]/試料	150	180	150	120
時間	1分	5分	4分	2分

約 40 cm² の試料総面積に有効。ホルダーのバランスを取る必要があります。MD-ラルゴは MD-Planと交換 できます。ダイヤプロの代替として、DP-懸濁液 P、9 μmおよび 3 μmとDP-ルーブリカント 青を併用できます。MD-Chem と OP-A懸濁液 は、MD-Napとダイヤプロ NapB で 交換できます。



二相ステンレス鋼上の溶接母材のインターフェース
機械試料作製、40% 水酸化ナトリウム水溶液中の電解エッチング。明視野、25x。

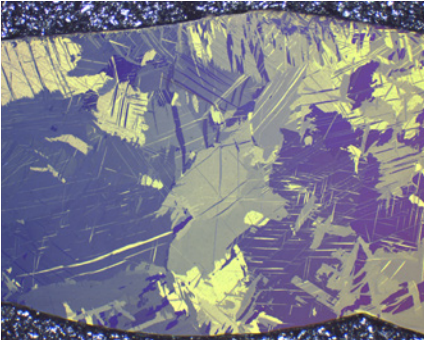


同材料。溶接微細構造は、主にデルタフェライトとオーステナイトで構成されている。
明視野、200x。

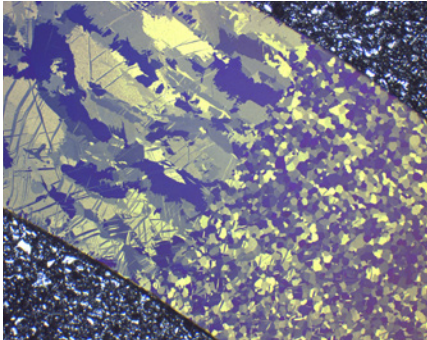
チタン溶接			
作業工程	PG	FG	OP
作業面	SiC # 220	MD-ラルゴ	MD-Chem
研磨剤	種類		
	サイズ		
懸濁液/ルーブリカント	水	ダイヤプロアLEGRO/ラルゴ9	OP-S懸濁液*
回転数	300	150	150
加圧力[N]/試料	150	180	120
時間	1分	5分	5-10 分

約 40 cm² の試料総面積に有効。ホルダーのバランスを取る必要があります。ダイヤプロの代替として、DP-懸濁液 P、9 μmとDP-ルーブリカント 青と併用できます。

*注記: OP-S懸濁液と容量10-30%の過酸化水素を加えたもの (30%)



溶接領域。グレード1 のチタンに完全裏波溶接を施し、機械的な琢磨を行った溶接部。溶接微細構造はWidmanstätten α相で構成される。鋭敏色板 (λ1/4 板) による偏光下での観察、50x。

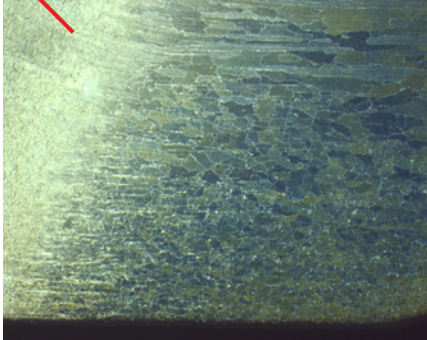
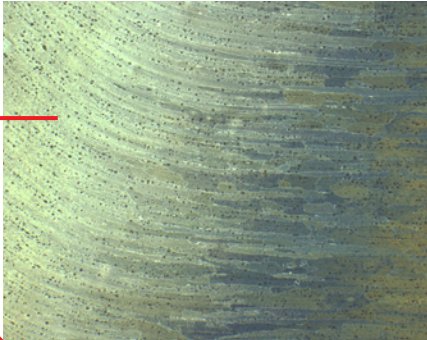
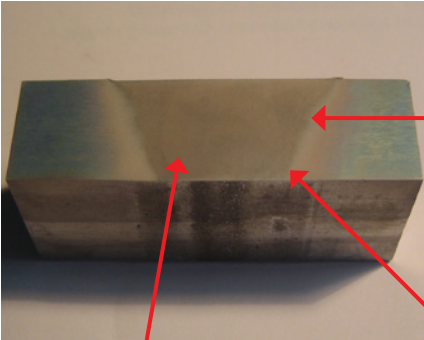


同材料。母材 - 熱影響部インターフェース。鋭敏色板 (λ1/4 板) による偏光下での観察、50x。

アルミニウム溶接 (摩擦攪拌接合)				
作業工程	PG	FG	DP	OP
作業面	SiC # 220	MD-ラルゴ	MD-Mol	MD-Chem
砥粒	種類			
	サイズ			
懸濁液/ルーブリカント	水	ダイヤプロアLEGRO/ラルゴ9	ダイヤプロMol R3	OP-S ノンドライ懸濁液
回転数	300	150	150	150
加圧力[N]/試料	120	150	120	100
時間	1分	5分	4分	1-2 分

約 40 cm² の試料総面積に有効。ホルダーのバランスを取る必要があります。ダイヤプロの代替として、DP-懸濁液 P、9 μmおよび 3 μmと青色/赤色のルーブリカントを併用できます。

アルミニウム摩擦攪拌接合、Barkerに従って15Vを使用して3分間、外部にエッチングを施した。鋭敏色板 (λ1/4 板) による偏光下での観察、25x





エッチング

電解研磨/エッチング

作業現場での生産管理用途として、マクロ試験用に作製された溶接断面を得るために、電解研磨 / エッチングを使用することは珍しいことではありません。切断面は研磨切断機で切断され、その後、単一の研磨段階後、マクロ試験に適した切断面を提供するために、試料に電解研磨とエッチングを行います。この手法の利点は次の通りです。

- 速度。
- 簡単な操作。
- ユーザーと酸性エッチング液との接触を最小限に抑制。
- 化学エッチングが困難な広範囲のステンレス鋼とその他の金属に適したオプション。

詳しい微細構造分析が必要な場合は、電解研磨および電解エッチング用の試料は、1000 グリッド (またはより軟質の金属) まで細かくします。

さまざまな材料における溶接接合部の一般的な化学および電解エッチング試薬の一部を以下に示します。

材料	エッチング液	コメント
炭素および低合金鋼	100 ml エタノール (95%) またはメタノール (95%) 1-5 ml 硝酸 (ナイトール) 蒸留水 100 ml 過硫酸アンモニウム 10g	優れた汎用試薬; マクロエッチング用に 15 ml の硝酸に増量可能。 良好なマクロエッチング
ステンレス鋼:	蒸留水 480 ml 塩酸 120 ml (32%) 塩化鉄(III) 50 g、 蒸留水 100 ml シュウ酸 10g 蒸留水 100 ml 硫酸 5 ml (95-97%)	マクロエッチング 4-6 ボルトで数秒間の電解エッチング。 2-4 ボルトで数秒間の電解エッチング
ニッケル合金	蒸留水 100 ml 硫酸 5 ml (95-97%)	3-6 ボルトで数秒間の電解エッチング。
銅合金	蒸留水 100 ml 水酸化アンモニウム 10 ml (25%) と過酸化水素水溶液 (3%) 数滴	新鮮なものを使用してください
アルミニウム合金	蒸留水 100 ml 水酸化ナトリウム 15 g	マクロエッチング

化学試薬を取り扱うときや化学エッチング液を使用するときは、推奨される安全上の注意事項に従うことが重要です。

金属組織学

マクロ部

エッチングされたマクロ部は、溶接金属、熱影響部、溶融境界、結晶粒成長、ワンパス溶接およびマルチパス溶接の識別を可能にします。さらに、割れ、孔 / ボイド、融合不良、溶込み不良などの溶接不良も特定できます。

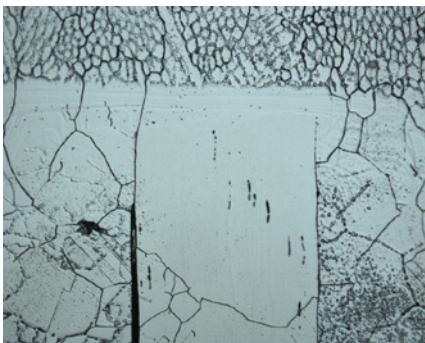
マイクロ部

溶接接合部で実施される一般的な金属組織学的試験の一部を以下に示します。

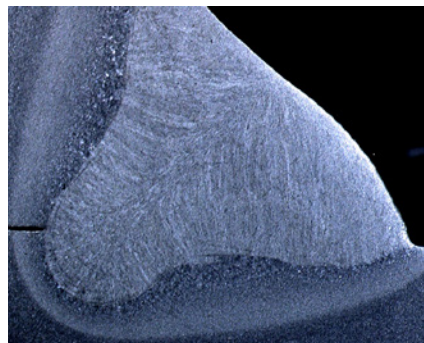
構成成分の 面積分率 - 個別の相の特定と点数カウントによる面積分率の決定。
例: オーステナイト系ステンレス鋼溶接におけるデルタフェライト。



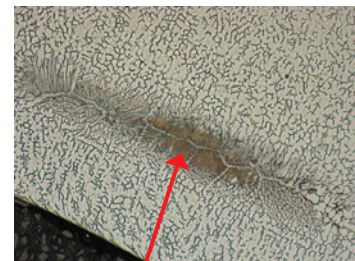
インコネル 625 合金にマイクロパルスタングステン不活性ガス溶接を施し、機械研磨と電解エッチングを行った切断面。10% シュウ酸でエッチング、10ボルトで10 秒間。明視野、2.5x。



同材料。溶接部の微細構造は、一次固溶体と微細な不溶性二次相で構成される。切断面は、融合面の付近における基材の顕著な粒の粗化を示す。明視野、10x。



炭素鋼の深部溶込み隅肉溶接によるマクロ部。切断面は5% ナイタールでセクションでエッチング。明視野、2.5x。

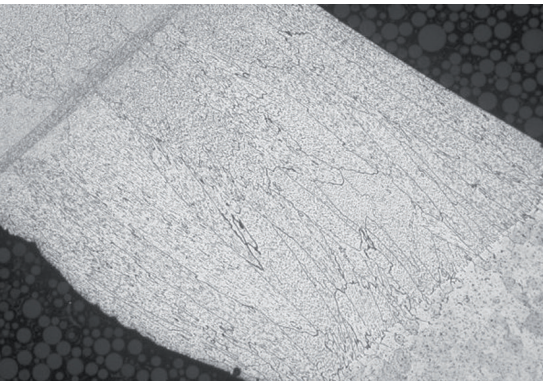


明視野、100x。



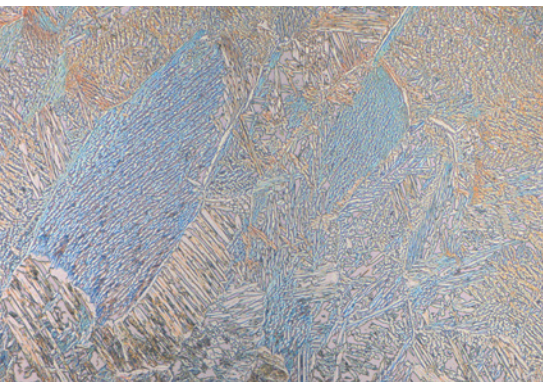
明視野、500x。

オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の研磨・エッチング部分。島状のデルタフェライトと小領域のパーライトを示す



溶接金属および熱影響部における結晶粒粗大化 / 微細化領域の粒子 / 粒度測定。

溶接、母材、熱影響部における各種微細構造を示すアルミニウム溶接。エッチング液: 蒸留水 100 ml + フッ化水素酸 2 ml。
明視野、100x



溶接金属および熱影響部における微細構造種類 / 形態 / 微細構造変形部の識別。

二相ステンレス鋼溶接内の熱影響部。40% 水酸化ナトリウム溶液と電解エッチング。
明視野、200x。

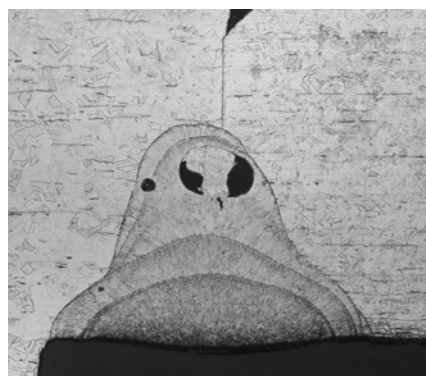


欠陥分析 / 固有の溶接欠陥の識別と特性評価。

自動MAG (金属活性ガス) 溶接鋼材の表面下ガス孔。10% ナイタールで研磨、エッチング。
明視野、2x。

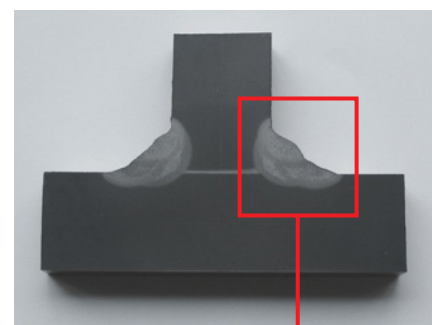


低合金鋼の隅肉溶接部の下の熱影響部の割れ。明視野、5x。

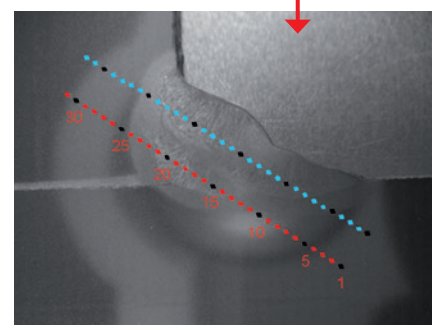


オーステナイト系ステンレス鋼溶接による孔。明視野、100x。

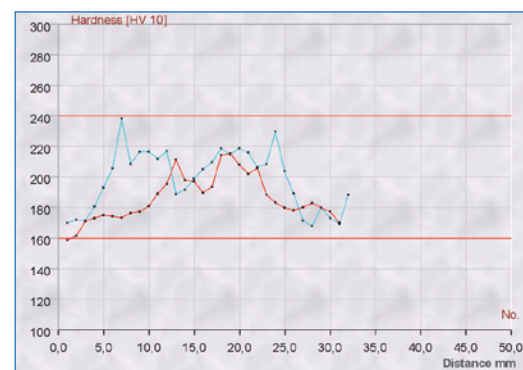
硬さ調査 - 通常、溶接および熱影響領域の特性が満足できるものであることを確認するために、母材の熱影響領域の横断部分と溶接金属の硬さ試験 / 微小硬さ試験が実施されます。



銅溶接



溶接と圧痕による硬さ試験 (標準 DIN EN 1043 に準拠)。



デュラミン-A300 で測定した硬さの違いを示す曲線。

Struers ApS
Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup, Denmark
電話 +45 44 600 800
Fax +45 44 600 801
struers@struers.dk
www.struers.com

溶接接合部に適用される、良好な金属組織学実務の適用が概説されています。溶接材料の物理的特性に応じて適切な試料作製方法を選択する必要があります。溶接領域の微細構造と特性を正しく分析するために、試料作製工程のすべての段階で注意することが重要です。

アプリケーションノート

溶接の金属組織学

ビル・テイラー、アンネ・グエスニエル、Struers A/S
、コペンハーゲン、デンマーク

謝辞

表紙の4番目の写真を複製する許可を与えてくださったErika Weck氏とElisabeth Leistner氏に感謝申し上げます。「オーステナイト系ステンレス鋼マルチパス溶接と琢磨およびカラーエッチングが行われた部分。LichtenbergerとBloechによるカラーエッチング。明視野、6.5x。」

7ページの3

つの顕微鏡写真に関してStruers S.A.S.のBrigitte Duclos氏に感謝申し上げます。:

溶接、母材、熱影響部における各種微細構造を示すアルミニウム溶接。

二相ステンレス鋼溶接内の熱影響部。

オーステナイト系ステンレス鋼溶接の孔。

参考文献

Metallographic instructions for colour etching by immersion

Part 2: Behera colour etchants and their different variants", Erika Weck and Elisabeth Leistner.

Process and Physical Metallurgy; J. E. Garside
2nd Edition 1967.

Metallographic and Materialographic Specimen Preparation,
K. Geels, ASTM, 2007.

Metallographic etching. 2nd Edition, G. Petzow, ASM,
Metals Park Ohio, 1999.