

鑄鉄の金属組織学試料作製

アプリケーション ノート

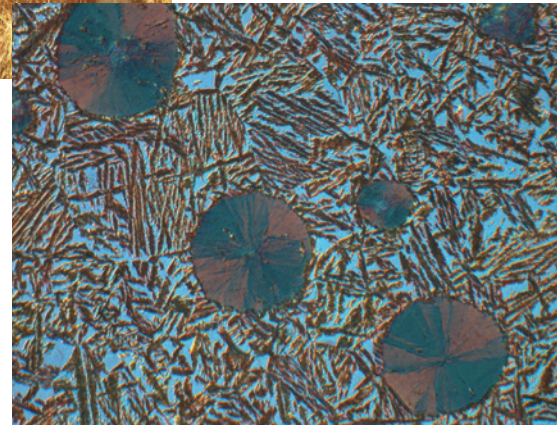
鉄は最も多様な金属の 1 つであり、炭素およびその他の元素と合金化され、膨大な種類の鑄鉄と鋼合金を提供します。鑄鉄は早くも紀元前 600 年に中国で生産され、欧州では 14 世紀に初めてその存在が知られました。高炉の開発により、鉄の特性は改善し、鑄造性が向上し、日常生活における製品の新しい応用分野が開かれました。19 世紀以降の建築物が示すように、工業化に伴い鑄鉄は重要な建築材料となりました。例えば、鉄道駅のドーム、屋根つき市場、植物園の温室、橋梁、エッフェル塔は、当時の鑄鉄の多方面の応用を示しています。

鑄鉄という用語は、通常、2.5 - 4% の炭素、1 - 3% のケイ素を含む、鉄-炭素-ケイ素の合金を指します。鑄鉄は、主に優れた鑄造性、可鍛性と適度な機械的特性という多くの利点を持つ重要な工業材料です。

経済的利点から、鑄鉄は自動車、エンジニアリング業界において、多くの用途で使用されています。また、海水ポンプ筐体、圧延ロール、土木機械用部品では特定の鑄鉄が最適です。黒鉛の形態は鑄鉄の機械的特性に大きく影響するため、ねずみ鑄鉄の



金属組織学品質管理は生産工程に不可欠な業務です。基準の参照比較表と画像分析を使用して、エッチングされていない研磨済みの試料で黒鉛の形態、サイズ、分布が特定されます。その後、仕様に応じて、素地の構造を確認するために試料がエッチングされます。



オーステンバーダク
タイル鑄鉄、ベラハカ
ラーエッチング、DIC
500x

金属組織試料作製時の課題

切断: 白鑄鉄は非常に硬く、そのため切断が困難です。

研磨および琢磨: グラファイトは柔らかく、その真の形状とサイズの保持

は困難な場合があります。フェライトおよび / またはオーステナイト鑄鉄の素地は、変形や研磨傷を受けやすい傾向があります。

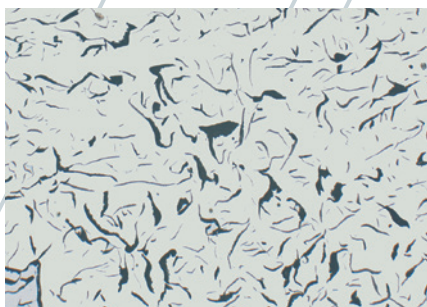


図1: 片状黒鉛を含むねずみ鑄鉄、不十分な琢磨
200x

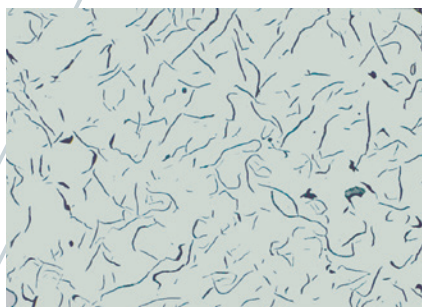


図2: 図1と同じ鑄鉄、正しい琢磨結果

200x

ソリューション

- 立方晶窒化ホウ素切断ホイール
- 硬い琢磨布での徹底的なダイヤモンド琢磨および最終的な酸化物琢磨。

鑄鉄の製造と用途

図6: 排気マニホールド、CV黒鉛鑄鉄



製造方法

鑄鉄は、一般的には銑鉄、鑄鉄のスクラップ、鋼鉄のスクラップ、さまざまな添加物をキューポラ炉または誘導炉内で溶融して製造します。合金組成と冷却速度に依存して、鉄はねずみ色または白色に凝固します。

急速な冷却速度の場合、白色に凝固し、炭化鉄 (Fe_3C : セメント) を形成します。共析変態の場合、高速の冷却速度ではパーライトの形成を促進し、低速の冷却速度ではグラファイトとフェライトの形成を促進します。

ねずみ鑄鉄の微細構造は、それぞれ薄片、団塊、又は焼き戻し炭素形態の遊離黒鉛を有するパーライト及び / 又はフェライト素地のいずれかを有します。合金化と熱処理により、鑄鉄の特性を特定の用途に合わせて調整できます。例えば、モリブデンとニッケルによる合金化は、耐熱性と耐食性を改善します。

以下では、個々の鑄鉄について簡単に説明し、その主な応用分野について言及します。

片状黒鉛 (FG) を含むねずみ鑄鉄

は、2.5-4%の炭素、1-3%のケイ素、0.2-

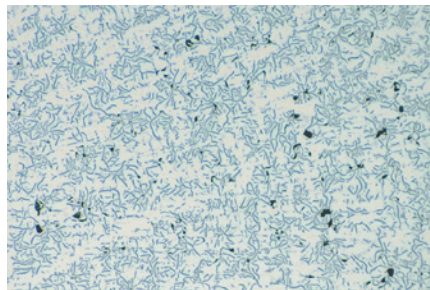


図3: 微細な片状黒鉛を含むねずみ鑄鉄、エッチングなし 100x

1%のマンガン含有します。炭素とケイ素は、片状黒鉛とフェライトの形成を促進します。微量のリンは、ねずみ鑄鉄の流動性を高めます。また、「ステダイト」と呼ばれる三元リン共晶を形成し、これは摩耗抵抗を向上させる網状の構造を構成します。

黒鉛が片状に存在する場合、黒鉛端部が切欠状となるため、特に薄片が非常に大きい場合、引張り強度を低下させます。合金化されていないねずみ鑄鉄では、パーライト素地中に片状黒鉛が微細で均一に分散している場合、最高の機械的特性が得られます (図3および図4)。



図4: パーライト素地に片状の黒鉛を含むねずみ鑄鉄 200x

ねずみ鑄鉄は、高い減衰能、優れた摺動特性、熱伝導率を備えており、機械の躯体、ピアノ用減衰プレート、エンジンブロック、フライホイール、ピストンリング、ブレーキディスク、ブレーキドラムに適しています。

球状黒鉛 (SG) を含む ダクタイル鑄鉄

は、ノジュラー鑄鉄または球状黒鉛鑄鉄とも呼ばれ、ねずみ鑄鉄と同じ原材料で作られますが、より高い純度が必要です。溶解物には Pb、As、Sb、Ti、Al が含まれず、リンや硫黄もほとんど含まれません。鑄造前に微量のマグネシウムを溶融物に添加すると、黒鉛は、片状ではなく球状に形成されます。

ダクタイル鑄鉄は、同様の組成物のねずみ鑄鉄よりも高い強度と延性を有します。ダクタイル鑄鉄は良好な機械加工特性を持ち、高荷重ギア、ピストン、圧延用ロール、ギアケース (図10)、バルブ、チューブ、ドアヒンジに使用されます。パーライトダクタイル鑄鉄は、耐摩耗のために表面硬化されたカムおよびクランクシャフトの素材です (図8)。



図5: プラスチック用圧力ダイカスト機械の油圧システム用 ADI 鑄鉄のフィルタヘッド

オーステンパ球状黒鉛鑄鉄 (ADI)

は、840~950°C でオーステナイト化され、次に 250~400°C に急冷され、その温度で素地がオースフェライトに変わるまで保持された鑄鉄です。これは、針状のフェライトと炭素が飽和した残留オーステナイトの混合物で、ADI 鉄に高強度と高延性を与えます。この微細構造は、ベイナイトのように見えますが、炭化物を含みません。

高強度 ADI 鉄は主に大型トラック、農業機械、土工機器の耐摩耗部品に使用されます。延性 ADI 鉄は、車軸ジャーナル、ギアドライブ、クランクシャフト、プル鉤、ホイールハブなどの動的応力が負荷される部品に使用されます。

コンパクト黒鉛鉄 (CG) の製造には、ダクタイル鑄鉄の製造と同じ 原材料が使用されます。黒鉛球状化のために添加するマグネシウムの量を厳密に制御することで、約80%の黒鉛はコンパクト黒鉛として形成され、残りは球状黒鉛として形成されます。

コンパクト黒鉛鉄の品質管理は非常に重要で、黒鉛の形成が品質を決定します。わずかに高い割合の球状黒鉛は許容されますが、片状黒鉛の形成は、コンパクト黒鉛鉄の有益な特性を低下させたり、または損うことがあるため、回避する必要があります。

コンパクト黒鉛鉄は、ねずみ鑄鉄よりも強度、延性、両振り応力疲労強度、耐酸化性に優れており、鑄造しやすく、機械加工が容易で、減衰品質と熱伝導率に優れており、ダクタイル鑄鉄よりも温



図7: オーステンパーダクタイル鑄鉄のホイールカセットの部品



図8:
クランクシャフト、ダクタイル鋳鉄

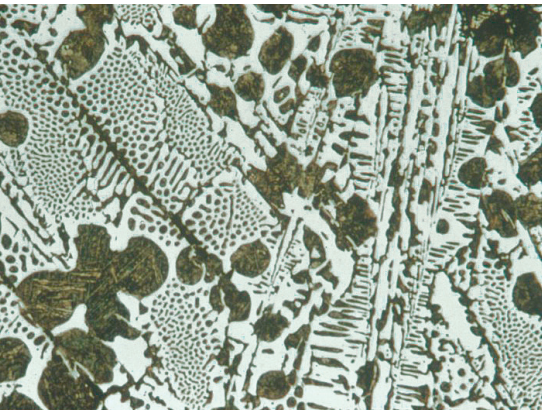


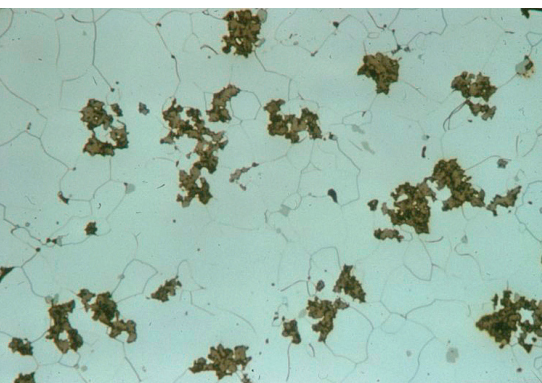
図9: 白鋳鉄、レデブライトを含むパーライト
200x

度変化中に良好な形状保持性を有します。

用途: 高回転ディーゼルモーターのシリンダーヘッド、車軸およびギアケース、排気マニホールド(図6)、ターボチャージャーのハウジング。

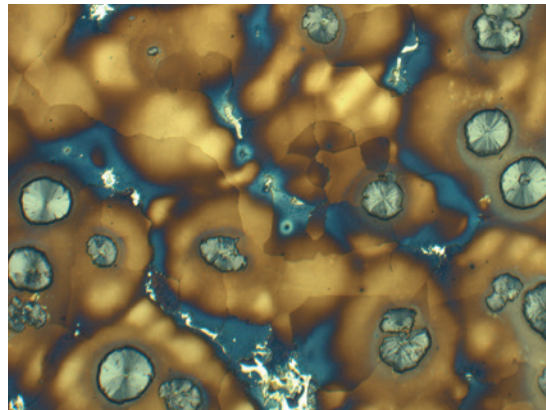
白鋳鉄には、1.8-3.6%の炭素、0.5-1.9%のケイ素、1-2%のマンガンが含まれています。急速な冷却速度は、黒鉛としての炭素の析出を阻害します。代わりに、溶融鋳鉄中の炭素は炭化鉄(Fe_3C 、セメントイトとも呼ばれる)を形成します。白鋳鉄の構造はパーライトとレデブライトで構成されています(図9)。レデブライトはオーステナイトから変態したパーライトとセメントイトの共晶です。ニッケルを添加(クロム8-9%、ニッケル5-6%)して硬化させた場合、炭化クロムを含むマルテンサイト組織を呈します。

白鋳鉄は高い圧縮強度を持ち、ニッケル合金化した場合、高温で良好な強度



フェライト可鍛鋳鉄

200x



3% ナイタール + 変性ペラハ試薬でエッチングされたオーステナイト
鋳鉄 200x

と硬さを維持します。白鋳鉄は、特に合金化された場合、大きな炭化物の塊があるため、耐摩耗性に優れています。ショットブラストノズル、圧延ロール、破碎機、粉碎機、ボールミルライナーに使用されます。

ねずみ鋳鉄またはダクタイル鋳鉄の外表面を急冷、内部をゆっくりと冷却することで、内部は延性がありながら白鋳鉄の硬質表面を持つ部品を生産することができます(チル鋳物)。

焼戻し黒鉛(TG)を含む可鍛鋳鉄

可鍛鋳鉄は白鋳鉄に熱処理を施して製造します。長時間にわたる2段階の熱処理(焼戻し)を経て、白鋳鉄はフェライトまたはパーライト可鍛鋳鉄になります。炭化鉄が分解し、焼き戻し炭素と呼ばれる不規則な形状の塊が析出します。パーライト可鍛鋳鉄は硬化可能です。可鍛鋳鉄は経済上の理由から、応用分野が非常に類似しているノジュラー鋳鉄に置き換えられつつあります。

オーステナイト鋳鉄

少なくとも20%のニッケルと1-5.5%のクロムを含む鋳鉄は、片状または塊状の黒鉛が分散したオーステナイトの素地を有します。オーステナイト鋳鉄は、鋳造が容易であるため、肉厚が薄い複雑な形状の部品の精密鋳造に適しており、ステンレス鋼の経済的な代替品です。



図10: ダクタイル鋳鉄製ディファレンシャルハウジング



図10: ダクタイル鋳鉄製ディファレンシャルハウジング

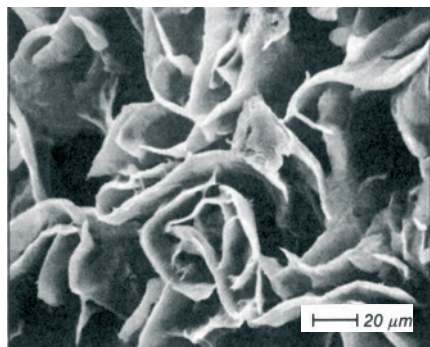
鑄鉄の試料作製における課題

合金化された白鑄鉄は非常に硬質(600HV)なため、特に大きな切断面の切断が困難な可能性があります。ここで重要なのは、この硬さに関わらず、ダイヤモンド切断ホイールは白鑄鉄の切断に適していないことです。

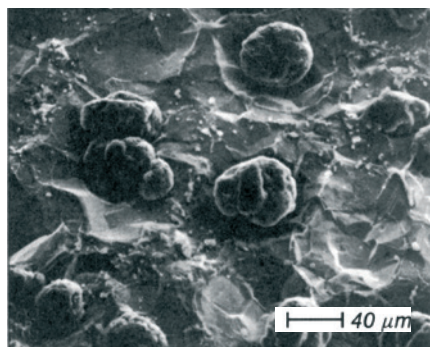
鑄鉄の試料作製時の主要な課題は、黒鉛を元の形状とサイズに保持することです。顕微鏡では、黒鉛の画像は2次元で観察されますが、実際には3次元であることに注意してください。これは研磨と琢磨時に黒鉛の外観に多少の変化が起こり得ること、黒鉛の一定の割合が非常に浅く切断され、基材内で剥離しやすい状態で保持されていることを意味します。したがって、黒鉛を完全に保持できない可能性があります。特に非常に大型の片状黒鉛、片状黒鉛の凝集物の場合、黒鉛が緩む傾向があります。したがって、黒鉛相は、常に良好に保持又は琢磨できるわけではありません。

可鍛鑄鉄中の黒鉛は、バラの花びら状または焼き戻し炭素の形態で存在しています。これは試料作製時に、特に保持が困難で、砕けやすい形態の黒鉛です。

試料作製の良くある問題は、研磨で基材金属がスミアリングすることで、これは黒鉛の実際の形状とサイズを不明瞭



片状黒鉛を含むねずみ鑄鉄のSEM像



黒鉛塊を含むダクタイル鑄鉄のSEM像

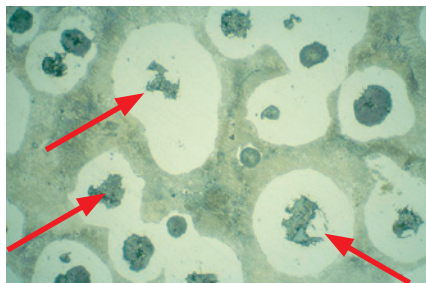


図11: スミアリングした金属で覆われた黒鉛塊が観察される不十分な研磨結果 200x

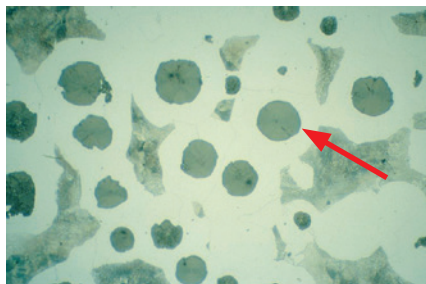


図12: 検査に適した形状とサイズの黒鉛塊を示す正しい研磨結果 200x

にする可能性があります(図11と図12を比較)。これは、変形と研磨疵が発生しやすいフェライトとオーステナイトの鑄鉄で特に顕著です。これらの材料の場合、徹底的なダイヤモンド琢磨と仕上げ琢磨が特に重要です。

金属組織観察が鑄造ライン品質システムの不可欠な要素である場合、黒鉛を含む鑄鉄の試料作製に関する課題は、ますます困難になることがあります。時間の制約により、手動研磨を使用して一貫した試料作製結果を維持することが難しくなります。また、多くの場合、試験片の形状の問題で自動試料作製は適



図13: 鑄造ラインにおける品質管理試料の半自動琢磨用試料ホルダー

切な代替方法ではありません。しかしながら、試験片の形状は通常任意であるので、それらの寸法及び形態を、自動システム(図13)に適合させるために変更することができます。これは試料作製をより効率的にし、黒鉛の評価を改善できるメーカーによって実施され、成功しています。

鑄鉄の標準的な顕微鏡検査のほとんどは、黒鉛が黒く見える100倍の倍率で行われます。高い倍率でのみ、炭素が完全に保持されているかどうかを検証できます。十分に研磨された黒鉛は灰色です(図14)。

注記:黒鉛は電解液で流出してしまうため、黒鉛を含む鑄鉄は電解研磨に適していません。ただし、素地の微細構造の迅速な特定のみが必要な場合、電解研磨とエッチングを使用できます。



図14: 十分に研磨された片状黒鉛 500x

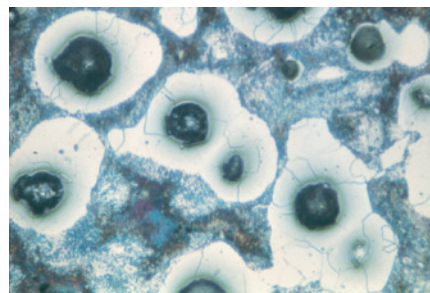


図15: 電解研磨およびエッチングされたダクタイル鑄鉄、パーライト素地および黒鉛を取り巻くフェライトが観察される。グラファイトは流出している

研磨

作業工程		PG	FG
	作業面	MD-ピアノ220	MD-アレグロ
	砥粒	種類	ダイヤモンド
		サイズ	#220
	懸濁液/ループリカント	水	ダイヤモンドアレグロ/ラルゴ9
	rpm	300	150
	加圧力[N] 試料	30	30
	時間(分)	平面まで	5

琢磨

作業工程		DP 1	DP 2
	作業面	MD-Dac	MD-Nap
	砥粒	種類	ダイヤモンド
		サイズ	3 μm
	懸濁液/ループリカント	ダイヤモンドDac3	ダイヤモンドNap B 1
	rpm	150	150
	加圧力[N] 試料	40	30
	時間(分)	4	1-2

表1:
白鑄鉄の試料作製
方法。

*[ダイヤモンド懸濁液](#)はDP-懸濁液、
P、9 μm、3 μm、1 μmと置き換え可能です。[青
色の潤滑剤と一緒にご使用ください。](#)

研磨

作業工程		PG	FG
	作業面	研磨フویل/ 研磨紙	MD-ラルゴ*
	砥粒	種類	SiC
		サイズ	#220
	懸濁液/ ループリカント	水	ダイヤモンドアレグロ/ラルゴ9
	rpm	300	150
	加圧力[N] 試料	30	30
	時間(分)	平面まで	5

琢磨

作業工程		PG	FG	OP**
	作業面	MD-Dac	MD-Nap	OP-Chem
	砥粒	種類	ダイヤモンド	コロイダルシリカ
		サイズ	3 μm	0.04 μm
	懸濁液/ ループリカント	ダイヤモンドDac3	ダイヤモンドNap B 1	OP-U ノンドライ懸濁液
	rpm	150	150	150
	加圧力[N] 試料	30	20	10
	時間(分)	4	1-2	1

表2:
黒鉛を含む鑄鉄の試
料作製方法。

*黒鉛の保持が非常に困難な場合、[琢磨布MD-Plan](#)で精研磨してみることも可能です。

***この手順は任意です

*[ダイヤモンド懸濁液](#)はDP-懸濁液P、9 μm、3 μm、1 μmと置き換え可能です。[青色の潤滑剤と一緒にご使用ください。](#)

鑄鉄試料作製の推奨事項

切断: 硬質な白鑄鉄の切断には、立方晶窒化ホウ素ホイールをお勧めします。大きな切断面の場合、手動切断よりも自動切断が効果的です。黒鉛を含む鑄鉄の切断の場合、鑄鉄の硬さに応じて酸化アルミニウムのホイールを選択することが推奨されます。



埋込み: 通常、品質管理用の試料は埋込みされていない状態で作製されます。不具合分析試料には、熱間圧縮埋込の使用をお勧めします。軟質から中程度の硬さの鑄鉄にはフェノール樹脂([マルチファスト](#))が推奨されます。より硬質な鑄鉄には、強化樹脂([デュロファスト](#))が適しています。

研磨および琢磨:

従来、黒鉛を含む鑄鉄は[炭化ケイ素研磨フویل/研磨紙](#)で粗研磨されていました。ダイヤモンド研磨は試料を非常に平坦に保ち、黒鉛を浮き彫りにしないため、近年、ほとんどの鑄鉄の精研磨では、[炭化ケイ素研磨がダイヤモンド研磨に置き換えられています](#)(図16と図17の比較)。硬質白鑄鉄およびADI鉄は、[ダイヤモンド製品\(MD-ピアノ220\)](#)で面出し、および[ダイヤモンド砥粒\(MD-アレグロ、表1参照\)](#)で精研磨できます。フェライト、オーステナイト、またはパーライトの素地からなる軟質及び中程度に硬質な鑄鉄は、[炭化ケイ素の研磨フویل/研磨紙](#)で面出しし、[MD-ラルゴ](#)と[ダイヤモンド砥粒](#)で精研磨します(表2参照)。琢磨中に腐食する傾向のある鑄鉄の場合、無水[ダイヤモンド懸濁液A](#)および[黄色の潤滑剤](#)を使用することを推奨します。試料作製データは試料ホルダーにクランプされた直径30 mmの6個の埋込み試料に対するものです。

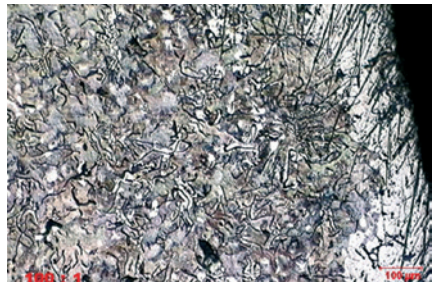


図16: 炭化ケイ素の研磨フویل/研磨紙の精研磨によって試料作製されたねずみ鑄鉄、依然として研磨疵がある



図17: 図16と同じ試料、MD-ラルゴとダイヤモンド砥粒による精研磨で作製された。エッジが良好に保持されている

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

試料洗浄:多くの鋳鉄は腐食しやすいため、試料洗浄は迅速でなければならず、常に冷水を使用する必要があります。いかなる場合でも、試料を水と接触させた状態で放置しないでください。エタノールによる徹底的な洗い流しと強力な温風による迅速な乾燥が推奨されます。それでも腐食が生じる場合は、無水アルコールのみを使用して洗浄し、洗い流してください。

エッチング:鋳鉄試料は、最初に黒鉛の形状、サイズ、分布、および鋳造物の多孔性を評価するために、エッチングされない状態で顕微鏡検査されます。この初期評価の後、微細構造評価のため、試料は1 - 3%のナイタールでエッチングされます。

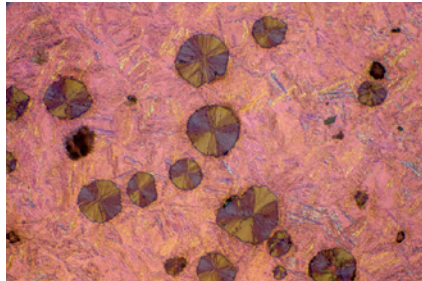
以下のベラハ試薬をカラーエッチングに使用でき、鋳鉄の種類に応じて変更できます:

水 1000 ml
200 ml 塩酸
24 g フッ化水素アンモニウム
この原液 100 ml に1gのメタ重亜硫酸カリウムを添加します。

注記:化学薬品を取り扱う場合、標準の安全対策を行う必要があります!

まとめ

鋳鉄は、主に2.5% - 4%の炭素と1 - 3%のケイ素を含む鉄合金です。炭素は、ねずみ鋳鉄では黒鉛として、白鋳鉄中では炭化鉄および合金炭化物の形態で存在しています。鋳鉄の金属組織学試料作製における主要な課題は、薄片、塊、焼戻された各形態における黒鉛の実際の形状、サイズを保持することです。研磨時、素地が黒鉛上にスミアリングされるため、その後非常に徹底的なダイヤモンド琢磨が行われない限り、黒鉛が実際の形状で現れません。特に軟質なフェライト素地を含む鋳鉄では、スミアリング、変形、研磨疵が発生しやすい傾向があります。そのため、炭化ケイ素の**研磨フویل/研磨紙**による面出し、その後**ダイヤモンド砥粒**による精研磨と琢磨が推奨されます。**コロイドシリカ**による短時間の仕上げ研磨を実施しても構いません。



3%ナイタールでエッチングされた、オーステンパーダクタイル鋳鉄、偏光 200x

白鋳鉄は非常に硬く、切断には立方晶窒化ホウ素切断ホイールが推奨されます。

注記:ダイヤモンド切断ホイールは使用しないでください! 面出し、精研磨、琢磨にはダイヤモンド砥粒が使用されます。

半自動試料作製装置では、手動試料作製よりも、黒鉛評価において信頼性と再現性の高い結果を得ることができます。

執筆者

エリザベス・ワイトマン、アンネ・グエスニエル、
Struers A/S, Copenhagen, Denmark

謝辞

試料材料および1ページの鋳造所の写真と図5と図7の複製を許可していただいたドイツ、ビーレフェルトの**CLAAS GUSS GmbH**に感謝申し上げます。Christine Bartels博士とUte Böhm氏の惜しみない支援にお礼申し上げます。

図6、図8および図10の複製を許可していただいたオーストリア・ヘルツォーゲンベルクの**GF Eisenguss GmbH**に感謝申し上げます。

4ページの2枚のSEM写真の複製を許可していただいた**Zentrale für Gussverwendung, Düsseldorf**にお礼申し上げます。

参考文献

Zentrale für Gussverwendung, Düsseldorf の資料
Vera Knoll, Gusseisen, 2003
Metals Handbook, Desk Edition, ASM, Metals Park, Ohio, 44073, 1997
ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructures, ASM, 2004.
Schumann, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968
Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung W. Domke, Verlag W. Giradet, Essen, 1977

