

## محاضرة تعريفية بأقطاب الجرافيت

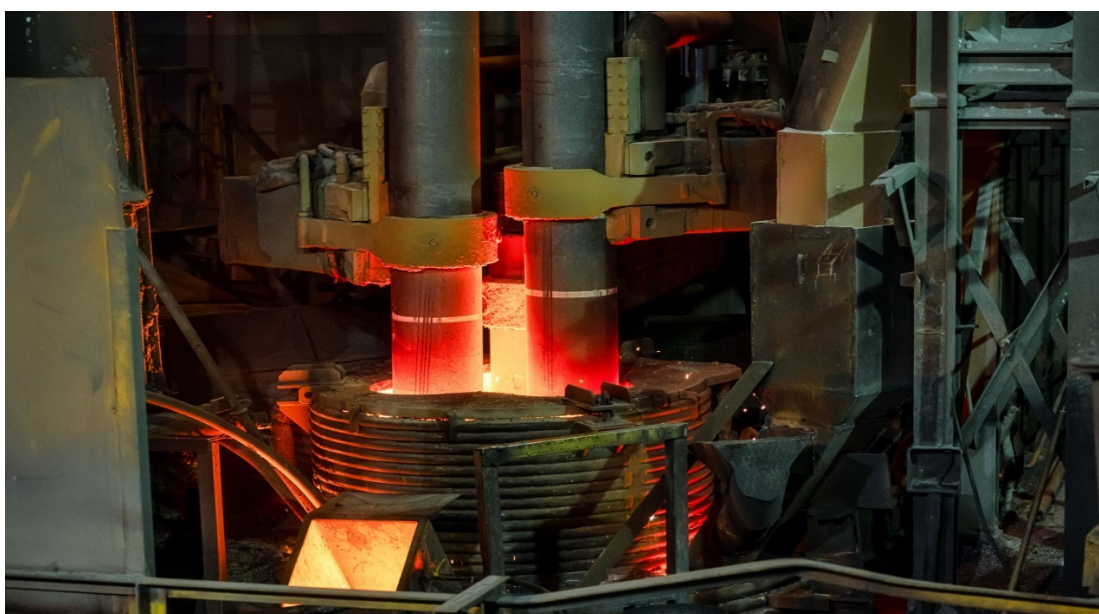
### عن

### كيفية تصنيعها وأنواعها

### و استخداماتها وطرق رفع كفاءتها و معدل استهلاكها

### و اسباب زيادة معدل استهلاكها

تعد أقطاب الجرافيت (Graphite Electrodes) المكون الأساسي لنقل الطاقة الكهربائية وتوليد القوس الكهربائي القادر على صهر الخرقة والسبائك داخل أفران القوس الكهربائي (EAF) وأفران المغرفة (LF).



أقطاب الجرافيت في فرن صهر. Source: Nordroden / Getty Images

### التصنيفات الرئيسية (RP / HP / UHP)

يتم تصنيف أقطاب الجرافيت تبعاً لكثافة التيار الكهربائي التي تتحملها وجودة المواد الخام المصنعة منها:

| التصنيف | الاسم الكامل     | نوع فحم الكوك المستخدم (Raw Material)                           | كثافة التيار المسموح بها (2A/cm) | التطبيق الأساسي                                                              |
|---------|------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| RP      | Regular Power    | فحم بترولي عادي (Regular Petroleum Coke)                        | 14-18                            | أفران القوس الصغيرة، صهر خامات السليكون، الفوسفور الأصفر، والسبائك الحديدية. |
| HP      | High Power       | فحم بترولي مدمج مع نسبة (حوالي 30%) من فحم الإبرة (Needle Coke) | 18-24                            | أفران القوس الكهربائي متوسطة القدرة وأفران معالجة المغرفة (LF).              |
| UHP     | Ultra High Power | 100% فحم إبري عالي الجودة (Premium Needle Coke)                 | +24-32                           | أفران القوس الكهربائي الضخمة وسريعة الصهر (Modern High-Capacity EAF).        |

## مراحل التصنيع الأساسية

1. **التكسير والخلط:** سحق فحم الكوك (Needle/Petroleum Coke) وخلطه مع قطران الفحم (Coal Tar Pitch) كمادة رابطة عند درجات حرارة تتجاوز  $150^{\circ}\text{C}$ .
2. **البثق أو التشكيل (Extrusion):** ضغط الخليط لتشكيل أسطوانات خضراء (Green Electrodes) بالأقطار المطلوبة.
3. **التحميص (Baking):** تسخين الأقطاب تدريجياً حتى  $800-1000^{\circ}\text{C}$  في أفران خالية من الأكسجين لتقحيم المادة الرابطة وتحويلها لكاربون صلب.
4. **التشريب (Impregnation):** غمر الأقطاب في قطران سائل تحت ضغط لتعبئة الفجوات وتقليل المسامية وزيادة الكثافة الميكانيكية (تكرر هذه الخطوة للأقطاب من طراز HP و UHP).
5. **إعادة التحميص (Re-baking):** تثبيت القطران المتغلغل داخل المسام.
6. **الجرفنة (Graphitization):** تسخين القطب كهربائياً إلى درجات حرارة تفوق  $2800-3000^{\circ}\text{C}$  في أفران (Acheson أو LWG)؛ حيث يعاد ترتيب ذرات الكربون عشوائية التبلور إلى الهيكل البلوري السداسي للجرافيت.
7. **التشغيل الميكانيكي (Machining):** تشغيل السطح بدقة، وخرط النهايات الملولبة (Sockets)، وتصنيع حلقات التوصيل (Nipples) لربط الأعمدة.

## الخصائص الفنية المقارنة

- **المقاومة النوعية (Specific Resistivity):** تتخفض بشدة في  $5.5-4.5 \mu\Omega\cdot\text{m}$  (UHP) مقارنة بـ RP ( $7.0-8.5 \mu\Omega\cdot\text{m}$ )، مما يسمح بمرور تيارات هائلة دون فقد حراري داخل جسم القطب.
- **معامل التمدد الحراري (CTE):** تستخدم أقطاب UHP فحم الإبرة ذو التمدد المنخفض جداً ( $1.4-1.0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )، مما يمنحها مقاومة فائقة للصدمات الحرارية (Thermal Shock) والتشقق أثناء الإشعال المفاجئ.
- **الكثافة الحجمية (Bulk Density):** تتراوح بين  $1.58 \text{ g/cm}^3$  لأقطاب RP وتصل إلى أكثر من  $1.72-1.68 \text{ g/cm}^3$  لأقطاب UHP.

## عوامل الاستهلاك أثناء التشغيل

- **التسامي والأكسدة القوسية:** تبخر طرف القطب عند منطقة القوس السفلي نتيجة بلوغ درجات حرارة تتعدى  $3000^{\circ}\text{C}$ .
- **الأكسدة السطحية الجانبية:** تفاعل الجرافيت مع أكسجين جو الفرن الساخن عند درجات حرارة أعلى من  $500^{\circ}\text{C}$  (يمثل عادة 40-50% من إجمالي الفقد).
- **الكسر الميكانيكي:** ناتج عن سقوط الخرزة الثقيلة على العمود أثناء الصهر، أو عدم اتزان نظام الهيدروليك وحركة الذراع، أو عيوب الربط بين النبل والوصلة (Nipple joint loosening).

تمثل وصلات أقطاب الجرافيت (حلقات التوصيل - Nipples) أضعف نقطة ميكانيكية وكهربائية في عمود القطب، وتحدث معظم حالات الكسر أو انفكاك الوصلات بسبب أخطاء في عزم الربط أو سوء التجهيز الميكانيكي.

## تحذير سلامة ميكانيكي وحراري

**تجنب تماماً استخدام النظم أو الربوت التقليدية على أسنان القلاووظ لتسهيل الربط؛ حيث تنفصم هذه المواد تحت درجات الحرارة العالية مسببة عارلية كهربائية واستعلا وفسلا في الوصلة.**

### معايير عزم الربط الموصى بها (Torque Specifications)

يعتمد عزم الربط الدقيق على قطر القطب ونوع الحزمة الملولبة (شائعة الاستخدام بنظام 3 أو 4 أسنان لكل بوصة - TPI):

| عزم الربط الموصى به (N.m) | نوع الحزمة المعتاد          | قطر القطب (مم / بوصة)    |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 700–900                   | Nipple 4 TPI أو Male-Female | 300 - 350 مم ("12 - "14) |
| 1,100–1,400               | Male-Female / Nipple 4 TPI  | 400 - 450 مم ("16 - "18) |
| 1,800–2,400               | Nipple 3 TPI / 4 TPI        | 500 - 550 مم ("20 - "22) |
| 2,500–3,200               | Nipple 3 TPI / 4 TPI        | 600 مم ("24)             |
| 3,500–4,500               | (Nipple 3 TPI (UHP EAF      | 700 - 750 مم ("28 - "30) |

الربط بعزم أقل من الموصى به يؤدي إلى فجوات هوائية وزيادة المقاومة وننثر كهربائي (Arcing) يؤدي إلى كسر الحزمة. بينها الربط بعزم مفرط يحدث إجهادات تتسبب تكسر تجويف القطب (Socket).

### إجراءات الربط السليم خطوة بخطوة

1

تنظيف التجويف والأسنان

فحص بصري وهواء مضغوط 1. تنظيف التجويف والأسنان: فحص بصري وهواء مضغوط.

نظف تجويف القطب وأسنان الحزمة بالهواء المضغوط الجاف والخالي من الزيت تماماً لإزالة أي غبار كربوني أو شوائب قد تمنع التلامس الكامل. //تنظيف: تأكد من خلو المسار من أي رواسب أو تلف واضح في بدايات السن.

2

محاذاة القطب رأسياً

باستخدام رافعة مرنة 2. محاذاة القطب رأسياً: باستخدام رافعة مرنة.

ارفع القطب الجديد باستخدام حلقة رفع مرنة (Flexible Hoisting Plug) لتجنب أي ميلان أثناء النزول، وثبته رأسياً تماماً فوق القطب القديم قبل البدء بالتدوير. //تنظيف: تطابق محوري تام بين القطبين دون أي احتكاك جانبي حاد.

3

الربط الأولي اليدوي

حتى التلامس المبدئي 3. الربط الأولي اليدوي: حتى التلامس المبدئي.

قم بلف القطب الجديد بحركة سلسلة دون عنف حتى يقترب السطحان النهائيان وتلامس الحزمة القاع مع ترك فجوة طفيفة جداً تضمن توزيع التمدد الحراري. //تنظيف: دوران السن بسلسلة حتى نقطة التوقف دون انحسار.

تطبيق العزم النهائي  
مفتاح عزم ميكانيكي أو هيدروليكي  
**4.تطبيق العزم النهائي:**مفتاح عزم ميكانيكي أو هيدروليكي.

استخدم مفتاح عزم مخصص (Torque Wrench) لتطبيق القيمة المحددة بدفعة واحدة مستمرة حتى سماع الإشارة الصوتية أو توقف المؤشر الهيدروليكي عند الرقم المطلوب. **//التفتت:** عدم وجود أي فراغ مرئي بين وجهي القطبين (Zero clearance at joint face) والتأكد عبر مجس قياس خلوص رفيع (mm 0.05).

#### الصيانة الميكانيكية والوقاية من الكسر

- **فحص فكوك التثبيت (Holder Clamps):** تأكد من نظافة أسطح النحاس في الفكوك وإزالة التراكبات الكربونية بانتظام؛ حيث تؤدي نقاط التلامس السيئة إلى تركيز الإجهاد وكسر العمود عند منطقة التثبيت.
- **التحكم في ضغط الكباسات:** ضبط ضغط التثبيت الهيدروليكي للفكوك لمنع سحق القطب الجرافيتي وفي نفس الوقت منع انزلاقه أثناء الصهر.
- **ضبط نظام رفع وتنزيل الأقطاب (Mast & Hydraulics):** التأكد من خلو حركة الأذرع الرأسية من الاهتزازات المفاجئة، وضبط سرعة الاستجابة الهيدروليكية لتجنب اصطدام القطب بكتل الخرقة غير المصهورة.
- **استخدام عازل الاهتزازات:** التأكد من سلامة البطانات العازلة لامتصاص الصدمات الميكانيكية الناتجة عن القوس الكهربائي المتذبذب.

## كيف يمكن تحليل أسباب كسر عمود قطب الجرافيت داخل الفرن من خلال شكل سطح الكسر؟

تحليل مظهر سطح الكسر (Fractography) لعمود الجرافيت فور وقوع الحادث هو الأداة الأدق لمعرفة ما إذا كان السبب ميكانيكياً، حرارياً، كهربائياً، أو ناتجاً عن عيوب في عملية الربط والتجميع.

### 1. الكسر الميكانيكي الناتج عن الانحناء (Bending / Transverse Fracture)

- الشكل المورفولوجي:
  - o سطح مستوي ومفرد ويمتد عرضياً عبر مقطع القطب.
  - o يظهر على أحد جانبي المحيط ما يشبه "الثفة" أو نتوءاً حاداً (Compression Lip)، بينما يبدأ الجانب المقابل بسطح أملس نسبياً يمثل نقطة بدء الشق تحت إجهاد الشد (Tensile Origin).
- السبب المرجح:
  - o سقوط كتل خردة ثقيلة (Scrap Cave-in) واصطدامها بالعمود أثناء الهبوط في مرحلة الصهر الأولى.
  - o حركة جانبية ميكانيكية مفاجئة أو اهتزاز عنيف في ذراع حامل القطب (Mast vibration).
  - o محاولة القطب الحفر داخل مادة غير موصلة (مثل كتل الجير أو الخبث المتصلب) دون توليد قوس، مما يسبب ضغطاً هيدروليكيًا هابطاً يؤدي لانحناء العمود وكسره.

### 2. الكسر عند منطقة الوصلة (Joint Fracture Patterns)

- انفصال الحلمة عند خط التلامس العرضي (Sheared Nipple):
  - o الشكل: انقطاع الحلمة بالكامل من المنتصف أو قرب بدايتها، مع بقاء أسنان التجويف (Socket) سليمة نسبياً، وقد يظهر السطح خشناً ومحبباً.
  - o السبب: عزم ربط ضعيف ترك فراغاً بين وجهي القطبين، مما حوّل كل أحمال الانحناء الميكانيكية إلى جسم الحلمة وحدها بدلاً من توزيعها على جدار القطب الخارجي.
- انشطار جدار التجويف طولياً (Socket Splitting / Longitudinal Crack):
  - o الشكل: تشقق رأسي أو طولي يمتد من نهاية القطب الخارجي إلى داخل التجويف، مع سقوط أجزاء تشبه الشرائح.
  - o السبب: الإفراط الزائد في عزم الربط (Over-torquing) مع التمدد الحراري للحلمة أثناء التشغيل، مما ولد إجهادات شد دائرية (Hoop Stresses) فاقت مقاومة الجرافيت في جدار القطب.

### 3. الكسر الكهربائي / الاحتراقي (Arcing & Oxidation Breakage)

الشكل المورفولوجي:

- - o سطح غير منتظم، متآكل، ومستدير الحواف (Burned/Eroded surface).
  - o وجود طبقات سوداء متقشرة أو لمعان شبيه بالزجاج، مع تلف واحترق أسنان القلاووظ وتحولها إلى شكل مخروطي متآكل.
- السبب المرجح:

- o ارتخاء ميكانيكي في الوصلة (Loose Joint)؛ حيث ينشأ قوس كهربائي داخلي (Micro-arc) بين أسنان الحلمة والتجويف بسبب رداءة التلامس الكهربائي.
- o يؤدي هذا القوس إلى تسامي الجرافيت وذوبانه الموضعي حتى تتهار الوصلة بالكامل تحت وزن العمود السفلي.

#### 4. الكسر بفعل الصدمة الحرارية (Thermal Shock Spalling)

الشكل المورفولوجي:

- o شقوق متحدة المركز أو تشظي قشري (Spalling) حول المحيط، وأحياناً انفصال قطعة من رأس القطب السفلي على شكل فنجان أو مخروط مقلوب (Cup-and-Cone).
- السبب المرجح:
  - o التدرج الحراري الحاد جداً (Rapid thermal gradient) عند بدء تشغيل القوس على تيار فائق (High Current Inrush) بعد توقف طويل والقطب بارد.
  - o عيب في تصنيع الجرافيت يتعلق بارتفاع معامل التمدد الحراري (CTE) أو ضعف مقاومة المادة للإجهاد الحراري.

#### 5. الكسر الطولي لعمود القطب (Longitudinal Body Cracking)

- الشكل المورفولوجي:
  - o شق رأسي يمتد بطول عمود القطب من الأعلى إلى الأسفل بعيداً عن منطقة السن.
- السبب المرجح:
  - o عدم تجانس توزيع التيار في فكوك التثبيت (Clamp)، أو حدوث شرر كهربائي بين فك التثبيت النحاسي وسطح القطب نتيجة تلوث أو عدم إحكام الضغط.
  - o وجود عيوب بنيوية داخلية ناتجة عن مرحلة البثق أو التقحيم أثناء التصنيع (Internal voids/laminations).

دليل الفحص الميداني السريع

| الإجراء التصحيحي الفوري                                         | الموقع الرئيسي           | مظهر السطح                   |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| مراجعة ترتيب شحن الخردة الثقيلة وضبط هيدروليك الذراع.           | جسم القطب أو أسفل الفك   | مستوي مع نتوء جانبي حاد      |
| معايرة مفاتيح عزم الربط والتأكد من نظافة الأسنان قبل التجميع.   | داخل التجويف وعلى الحلمة | محترق، متآكل، وبه تفحم       |
| خفض عزم الربط للقيمة الاسمية واستخدام حلمات مطابقة للمواصفة.    | منطقة الوصلة الخارجية    | تشقق رأسي في جدار التجويف    |
| رفع القدرة الكهربائية تدريجياً لتقادي الصدمة الحرارية المفاجئة. | مقدمة القطب السفلي       | تشظي مخروطي عند الطرف السفلي |

### كيف يتم توزيع طبقات الخردة داخل فرن القوس الكهربائي لتجنب سقوط الكتل على الأقطاب؟

توزيع شحنة الخردة (Scrap Layering) داخل سلة الشحن (Scrap Bucket) هو خط الدفاع الأول لحماية أقطاب الجرافيت من الانكسار الناتج عن انهيار الكتل الفولاذية (Cave-ins)، فضلاً عن دوره في حماية بطانة الفرن الحرارية واستقرار القوس الكهربائي.

#### التوزيع الطبقي القياسي لسلة الشحن (من القاع إلى القمة)

يتم تعبئة سلة الشحن من الأسفل إلى الأعلى وفق ترتيب هندسي دقيق:

| الترتيب في السلة               | نوع المادة / الخردة                                                             | الوظيفة الهندسية وحماية الأقطاب                                                                                                                                           |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. القاع (Bottom)              | خردة خفيفة إلى متوسطة نظيفة (Light/Turnings/Shredded) مع إضافات الكربون والجير. | تمتص صدمة سقوط الشحنة عند فتح السلة لتحمي قاع الفرن (Hearth)، وتسمح بتكوين مسيح مصهور مبكر (Molten Heel) دون ارتدادات.                                                    |
| 2. الوسط السفلي (Lower-Middle) | الخردة الثقيلة والكتل الضخمة (Heavy Melts, Billets, Skulls, Bundles).           | هذه أخطر طبقة؛ وضعها هنا يضمن هبوطها في المنطقة السفلى من الفرن تحت مستوى حركة الأقطاب أثناء الحفر، لتتغمر تدريجياً في المعدن المصهور بدلاً من السقوط الجانبي على العمود. |
| 3. الوسط العلوي (Upper-Middle) | خردة متوسطة (Medium structural scrap, Plate scrap).                             | تعمل كحشوة داعمة تمنع انزلاق وتدرج الكتل الثقيلة، وتوفر تماسكاً للشحنة أثناء مرحلة بداية الصهر.                                                                           |
| 4. القمة (Top)                 | خردة خفيفة الحجم وسريعة التوصيل (Light, Busheling, Shredded scrap).             | توفر مساراً سهلاً وسلساً للأقطاب للحفر الأولي (Boring-in) دون عوائق صلبة، وتضمن إشعاعاً سريعاً ومستقراً للقوس الكهربائي دون كسر الرأس السفلي.                             |

#### قواعد التشغيل الميداني لتفادي الانهيارات (Cave-ins)

تفريغ السلة في مركز الفرن: التأكد من محاذاة سلة الشحن تماماً مع مركز الفرن قبل الفتح لتجنب تكويم الخردة بزاوية مائلة تضغط جانبياً على مسار هبوط الأعمدة.

- **تجنب وضع الكتل المستطيلة رأسياً:** يجب منع تحميل الكتل الطويلة (مثل أطراف عروق الصلب أو القضبان الطويلة) بوضع رأسي؛ لأنها تقف كأعمدة غير مستقرة تسقط فجأة باتجاه الأقطاب بمجرد ذوبان محيطها.
- **توزيع المواد العازلة (Lime & Dolomite):** وضع الجير ودولوميت الحماية في الثلث السفلي من السلة وليس في الأعلى، حيث إن وجود كتل الجير الكبيرة على السطح يسبب فشل القوس في الاشتعال، مما يدفع نظام التحكم الهيدروليكي للضغط على القطب لأسفل حتى ينكسر ميكانيكياً.
- **برنامج الطاقة أثناء مرحلة الحفر (Boring Profile):** استخدام تيار كهربائي بجهد منخفض نسبياً وتردد نبضات متحكم به في الدقائق الأولى حتى تخترق الأقطاب الطبقة السطحية وتستقر في عمق الفرن قبل رفع القدرة الكهربائية للحد الأقصى.

### ما هي الاختبارات والفحوصات العملية والظاهرية المطلوبة عند استلام شحنات أقطاب الجرافيت في المصنع؟

تتقسم إجراءات فحص شحنات أقطاب الجرافيت وحملات التوصيل عند استلامها في المصنع إلى ثلاثة مسارات رئيسية: الفحص الظاهري والميكانيكي، والتحقق البُعدي والهندسي، والاختبارات العملية والفيزيائية.

#### 1. الفحص الظاهري والميكانيكي (Visual Inspection)

**سلامة السطح الخارجي:** خلو جسم القطب من الشقوق الطولية أو العرضية، والتشطي (Spalling)، أو التجاويف الهوائية البارزة (Pits).

- **حالة أسنان الحملات والتجويف (Threads & Sockets):** فحص دقيق لخلو سن القلاووظ من التآكل، أو التكسر، أو الارتفاع الناتجة عن اصطدامات الشحن، والتأكد من وجود أغشية الحماية البلاستيكية أو الكرتونية المقواة على النهايات.
- **النظافة:** التأكد من جفاف الأقطاب تماماً وخلوها من الرطوبة، والزيوت، والأتربة العالقة داخل التجاويف الملونة.

#### 2. التحقق البُعدي والهندسي (Dimensional Inspection)

تُقاس الأبعاد ومطابقتها للتفاوتات المسموح بها (Tolerances) وفقاً للمعايير القياسية (مثل IEC 60239 أو ASTM):

| المعيار المطلوب                                                                         | أداة القياس                                 | البند المفحوص                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| ضمن حدود التفاوت المسموح (عادة +/- 2-1.5 mm للقطر).                                     | شريط قياس دقيق ومحدد أقطار (Caliper/Tape)   | القطر الخارجي والطول                        |
| ألا يتجاوز الانحناء 0.3%-0.5% من الطول الكلي للعمود لتجنب إجهادات الانحناء عند التجميع. | مسطرة حديدية ومجسات قياس الخلوص             | الاستقامة والانحناء / Straightness) (Camber |
| دخول قالب الاختبار بالكامل وسلاسته دون أي انحسار أو تخلخل زائد.                         | قوالب القياس المعيارية (Go) / (No-Go Gauges | أبعاد التجويف والسن (Pitch & Depth)         |
| تعامد تام لوجه القطب لضمان تلامس                                                        | زاوية قياس دقيقة 90°*                       | تعامد النهايات (End-face)                   |

| المعيار المطلوب                | أداة القياس | البند المفحوص |
|--------------------------------|-------------|---------------|
| الوجهين بنسبة 100% دون فراغات. |             | (Squareness)  |

### 3. الاختبارات المعملية والفيزيائية (Physical & Material Testing)

تؤخذ عينات ممثلة للشحنة (عادة عينة من كل دفعة إنتاجية أو لوت شحن) لفحص الخصائص الحرارية والكهربائية والميكانيكية:

#### المقاومة الكهربائية النوعية (Specific Electrical Resistivity):

- الطريقة: قياس المقاومة على مقطع القطب باستخدام جسر كيلفن (Four-point probe / Kelvin Bridge) وفق ASTM C 611.
  - الهدف: التأكد من عدم تجاوز القيمة الاسمية لمنع ارتفاع الحرارة الزائد داخل العمود.
  - الكثافة الظاهرية (Bulk Density):
    - الطريقة: الوزن الدقيق وقسمته على الحجم المحسوب هندسياً أو بطريقة الغمر طبقاً لـ ASTM C 559.
    - الهدف: التأكد من الكثافة المدمجة لأقطاب UHP وحملاتها
  - مقاومة الانثناء (Flexural Strength / Modulus of Rupture - MOR):
    - الطريقة: اختبار الانحناء ثلاثي النقاط (Three-point bending test) وفق ASTM C 651
    - الهدف: التأكد من تحمل إجهادات الشد والانحناء الميكانيكية للقطب و الحزمة.
  - معامل التمدد الحراري (Coefficient of Thermal Expansion - CTE):
    - الطريقة: جهاز التمدد الحراري (Dilatometer) من درجات الحرارة العادية حتى C 1000
    - الهدف: قياس استقرار المادة ضد الصدمات الحرارية
  - نسبة الرماد (Ash Content):
    - الهدف: فحص نقاء الجرافيت عبر الحرق المعمل الكمال؛ حيث يجب ألا تتجاوز نسبة الشوائب والرماد 0.2-0.3 %
    - إجراءات المطابقة الإدارية والتوثيق
  - شهادة الجودة (Mill Test Certificate - MTC): مطابقة أرقام اللوت (Heat/Batch Numbers) المحفورة على الأقطاب مع الشهادة الصادرة من الشركة المصنعة.
  - حساب الانحراف المعياري: مقارنة نتائج العينات بالحدود الدنيا والقصى المتفق عليها في عقد التوريد لتقرير قبول الشحنة أو رفضها أو فرض خصومات فنية طبقاً لمعدل انحراف المقاومة أو الكثافة.
- كيف يتم حساب معدل استهلاك أقطاب الجرافيت الكيلوجرام لكل طن صلب مصهور في أفران القوس الكهربائي؟

$$\text{Consumption (kg/t)} = \{W_{\text{electrodes (kg)}}\} / \text{liquid steel (t)}$$

يُحسب معدل الاستهلاك النوعي لأقطاب الجرافيت (Specific Electrode Consumption) بوحدة **كجم قطب لكل طن سائل مصهور (kg/t)** بقسمة إجمالي وزن الجرافيت المستهلك على إجمالي كمية الصلب السائل الجيد الناتج خلال فترة تشغيلية محددة (وردية، شهر، أو حملة صهر كاملة).

**تعتمد المصانع إحدى طريقتين لحساب كمية الجرافيت المستهلكة:**

**طريقة الجرد والمخزون (Inventory Method):**

$$w_t = (N_a \times w_p) + \Delta w + w_b$$

N عدد الأقطاب الجديدة التي تم ربطها وتغذيتها للأفران.

Wp الوزن الاسمي للقطب مع حلمته (من واقع شهادة الوزن).

فرق أطوال وأوزان الأعمدة المركبة في الفرن بين بداية ونهاية الفترة.  $\Delta w$

أوزان القطع المكسورة التي فُقدت داخل الفرن دون صهر منتظم.  $w_b$

**طريقة القياس الميداني المباشر (Length Measurement Method):**

$$W_{\text{consumed}} = \Delta L \times (\pi \cdot D^2 \times \rho) / 4$$

Delta L مقدار هبوط وتآكل القطب المقاس

D قطر القطب الاسمي

$\rho$  الكثافة الظاهرية للجرافيت حوالى 1.68-1.72 g/cm<sup>3</sup>

### **البيانات القياسية للاستهلاك عالياً (Benchmarks)**

فرن القوس الحديث (UHP 600-UHP) Modern UHP EAF معدل الاستهلاك من 1 إلى 1.6 (KG/t)

فرن القوس التقليدي (RP/HP less Diameters) Standard AC EAF معدل الاستهلاك من 1.8 – 2.8 (KG/t)

فرن القوس بتيار مستمر (UHP) DC Single-Electrode معدل استهلاك اقل من 0.8 إلى 1.2 (KG/t)

فرن معالجة المغرفة (HP/UHP) Ladle Furnace - LF معدل الاستهلاك من 0.25 إلى 0.45 (KG/t)

## تفكيك آليات الاستهلاك (Distribution of Loss)

يتوزع استهلاك القطب الإجمالي عادةً إلى ثلاثة مكونات رئيسية:

**استهلاك القمة السفلية (Tip Consumption):** يمثل نحو 35% - 45%؛ وينتج عن التسامي الكربوني المباشر بتأثير درجات حرارة القوس العالية وتدفق التيار الكهربائي.

**الأكسدة الجانبية للسطح (Sidewall Oxidation):** تمثل نحو 40% - 55%؛ وتحدث على طول جسم القطب الساخن المكشوف للأكسجين داخل جو الفرن عند درجات حرارة تزيد عن  $500^{\circ}\text{C}$ .

**الكسر والفقد الميكانيكي (Breakage & Butt Losses):** يمثل عادةً 5% - 10% في ظروف التشغيل المنضبطة، ويرتفع بحدّة في حال سوء توزيع الخرّدة أو رداءة عزم الربط.

## العوامل التشغيلية المتحكمّة في خفض الاستهلاك

**نظام التبريد بالرّش المائي (Water Spray Rings):** تركيب حلقات رش مائي أسفل فكوك التثبيت مباشرة لتبريد جسم القطب يخفض درجة حرارة سطحه ويقلل الأكسدة الجانبية بنسبة تصل إلى 15% - 20%.

**زمن فتح القوس (Power-On Time):** تقليل زمن الصهر الصافي لكل صبة يقلل من وقت تعرض الجرافيت للحرارة والتآكل الكيميائي.

**كفاءة غطاء الفرن وحقق الأكسجين:** إحكام منافذ دخول الهواء غير المرغوب به (Air Ingress) وضبط مسارات حوائق الأكسجين (Oxygen Lances) بعيداً عن محيط الأعمدة الثلاثة مباشرة لمنع النحر الموضعي للجرافيت.

معدل الاستهلاك المعتاد بوحدة كجم/طن يعني: كم كيلوجراماً من قطب الجرافيت يتآكل ويفقد لإنتاج طن واحد من الفولاذ السائل الجيد.

تتفاوت هذه الأرقام بحسب التكنولوجيا المستخدمة وظروف التشغيل:

### 1. فرن القوس الحديث الفائق (Modern UHP AC EAF): من 1 إلى 1.6 (kg/t)

- ماذا يعني هذا الرقم؟ لصهر صبة وزنها 100 طن صلب، يستهلك الفرن من أعمدته الثلاثة مجتمعة ما بين 100 إلى 160 كجم جرافيت.
- لماذا هو منخفض نسبياً؟
  - o سرعة صهر فائقة وزمن تشغيل قصير للتيار (Power-on time أقل من 35-40 دقيقة)، مما يقلل فترة بقاء الجرافيت في جو الفرن الحارق.
  - o استخدام حلقات تبريد مائي متطورة (Spray Cooling Rings) ترش رذاذاً يخفض أكسدة السطح الخارجي.
  - o جودة الفحم الإبري (Needle Coke) في أقطاب UHP التي تمنح كثافة عالية ومقاومة كهربائية منخفضة تقلل من الفقد الحراري.

### 2. فرن القوس التقليدي (Standard AC EAF): من 1.8 إلى 2.8 (kg/t)

ماذا يعني هذا الرقم؟ استهلاك أعلى ملحوظ؛ نفس الصبة (100 طن) قد تستهلك حتى 280 كجم من الجرافيت.

• أسباب الارتفاع:

- o محولات طاقة أصغر حجماً تؤدي إلى إطالة زمن الصهر (قد يتجاوز 60-80 دقيقة لكل صبة)، مما يترك الأقطاب عرضة للأكسدة الجانبية لفترة أطول.
- o غياب أنظمة التبريد بالرش المائي أو عدم إحكام فتحات سقف الفرن، مما يدخل هواءً غنياً بالأكسجين يزيد التآكل.
- o استخدام أقطاب من رتبة RP أو HP ذات كثافة تيار أقل ومسامية أعلى مقارنة بـ UHP.

3. فرن القوس بالتيار المستمر (DC Single-Electrode EAF): من 0.8 الى 1.2 (كجم/طن)

ماذا يعني هذا الرقم؟ أدنى معدل استهلاك لأفران صهر الخرقة بالكامل.

• أسباب الانخفاض:

- o يعتمد على قطب مركزي واحد ضخم بدلاً من ثلاثة أقطاب؛ هذا يقلل المساحة السطحية الإجمالية المعرضة للهواء الساخن والأكسدة بنسبة تزيد عن 30%.
- o مسار التيار المستمر يتجه من القطب كمهبط (Cathode) إلى قاع الفرن كمصعد (Anode)، مما يوجه الطاقة بدقة نحو المصهور ويقلل نحر جسم القطب.

4. فرن معالجة وتكرير المغرفة (Ladle Furnace - LF): من 0.25 الى 0.45 (كجم/طن)

ماذا يعني هذا الرقم؟ استهلاك ضئيل جداً مقارنة بأفران الصهر الرئيسية.

• أسباب الانخفاض الكبير:

- o فرن المغرفة لا يصهر خرقة صلبة بل يستقبل مصهوراً سائلاً جاهزاً، وتتحصر وظيفته في التسخين الطفيف وضبط السبائك (Secondary Metallurgy).
- o الأقطاب تعمل في بيئة خبث رغوي خاملة ومغلقة نسبياً، مع توليد قوس كهربائي قصير منغمس داخل طبقة الخبث (Submerged Arc)، مما يحمي الجرافيت تماماً من أكسجين الجو ومن الاصطدامات الميكانيكية.

معادلة حسابية تطبيقية

إذا أنتج المصنع في شهر ما \$40,000 طن صلب سائل، وكان الاستهلاك المسجل للأقطاب 52 طن اقطاب المعدل =  $40 / 52 = 1.3$  كجم/طن

**تقييم النتيجة:** يقع هذا المصنع في النطاق الممتاز لأفران الـ UHP الحديثة، وأي زيادة تتجاوز 1.6 كجم/طن تدل فوراً على وجود مشكلة تشغيلية (مثل طول وقت الصب، تسريب هواء من سقف الفرن، تكسر ميكانيكي متكرر، أو رداءة جودة الجرافيت المورد).

تخفيض استهلاك أقطاب الجرافيت يعتمد مباشرة على تقليل آليتين رئيسيتين: الأكسدة الجانبية للسطح (التي تلتهم نحو 50% من وزن القطب) والتآكل القوسي والفقد الميكانيكي.

1. التحكم في الأكسدة الجانبية وتبريد الأعمدة

ضبط حلقات الرش المائي (Spray Cooling Rings):

- o التأكد من تركيب حلقات الرش أسفل فكوك التثبيت مباشرة وتوجيه رذاذ الماء المخروطي بالتساوي حول محيط القطب.
- o رش رذاذ دقيق (Water Mist) كافٍ لخفض حرارة سطح الجرافيت تحت عتبة الأكسدة السريعة 500 درجة مئوية دون وصول ماء سائل إلى حمام الصهر تجنباً لمخاطر الانفجار.
- o هذا الإجراء وحده يخفض استهلاك الجرافيت بنسبة تتراوح بين 10% و 18%.
- **إحكام غلق فتحات سقف الفرن (Electrode Ports):**
  - o صيانة الحلقات المانعة للتسرب (Sealing Rings) حول فتحات دخول الأقطاب في السقف لمنع "تأثير المدخنة" (Chimney Effect) الذي يسحب الهواء الخارجي الغني بالأكسجين حول الأعمدة المتوهجة.

- **ضبط مسارات حوافن الأكسجين (Oxygen Burners & Lances):**
  - o ضبط زوايا حوافن الأكسجين وجدران الفرن بحيث لا يرتد تيار الغاز النفثات مباشرة نحو أعمدة الجرافيت؛ ارتداد الأكسجين الساخن يسبب نحرأ جانبياً حاداً للجرافيت (Washboarding / Pencil formation).
- 2. **تقليل زمن التعرض للحرارة (Power-on & Tap-to-Tap Time)**

- **ضغط زمن توصيل التيار (Power-on Time):** كل دقيقة إضافية يقضيها القطب متوهجاً تزيد من فقد الكتلة بالأكسدة والتسامي؛ لذا فإن تحسين معدل الصهر ورفع كفاءة حقن الطاقة الكيميائية يخفضان زمن الصبة، وبالتالي ينخفض الاستهلاك النوعي ( $\text{kg/t}$ ) تلقائياً.
- **تقليل أوقات التوقف والانتظار (Delays):** خروج الأقطاب وهي متوهجة في الهواء الطلق أثناء الانتظار أو تأخر الصب يسبب أكسدة سطحية مكثفة. يجب تخفيض الطاقة أو إبقاء الأعمدة داخل بيئة الفرن الخاملة نسبياً قدر الإمكان عند التوقيفات القصيرة.
- 3. **تعزيز تطبيق الخبث الرغوي (Foamy Slag Practice)**

- **غمر القوس الكهربائي بالكامل:** يُحقن مسحوق الكربون مع الأكسجين لتكوين رغوة غنية بفقااعات غاز أول أكسيد الكربون CO تغطي القوس الكهربائي والتلث السفلي من الأقطاب.
- **الفائدة المباشرة:**
  - o احتجاز الإشعاع الحراري داخل المصهور بدلاً من ارتداده للأقطاب وجدران الفرن.
  - o عزل أطراف الأقطاب السفلية عن ملامسة الهواء، مما يحد من تآكل الحواف وتطاير الكربون.
- 4. **ضبط المعايير الكهربائية للمحول (Arc Regulation)**

### التشغيل بنظام الجهد العالي والتيار المنخفض (Long Arc Operation):

- o استهلاك قمة القطب يتناسب طردياً مع مربع شدة التيار  $2I$
- o تفضيل نقاط التشغيل ذات الجهد الأعلى والتيار الأقل (High Voltage / Lower Current) ينقل نفس القدرة الكهربائية الصاهرة مع تقليل الحمل الحراري والتسامي عند رأس القطب.
- **معايرة حساسية المنظم الهيدروليكي (Electrode Regulator Tuning):**
  - o ضبط استجابة محركات رفع وتنزيل الأذرع لتكون فائقة السرعة عند تذبذب القوس؛ التباطؤ يجعل القطب يغطس داخل حمام الصلب (Dipping)، مما يؤدي لامتناس الفولاذ للكربون وتآكل القطب بمعدل سريع.
- 5. **الانضباط الميكانيكي أثناء الشحن والتجميع**

- الالتزام الصارم بتوزيع شحنة الخرقة: وضع الكتل الثقيلة في الوسط السفلي والخرقة الخفيفة بالأعلى لمنع انهيار الخرقة على العمود (Cave-ins) الذي يسبب الكسر المفاجئ.
- معايرة مفاتيح عزم ربط الحلمات (Torque Wrenches): ربط الأقطاب بالعزم الاسمي الموصى به ونظافة السن لمنع الارتخاء المولد لشعر كهربى ميكروى (Micro-arcing) يحرق الوصلات، ومنع الشد المفرط المسبب لانتشار الأجسام.

#### مصفوفة الأثر التشغيلى المتوقع

| نسبة التوفير المتوقعة فى الاستهلاك | الآلية المستهدفة              | الإجراء التشغيلى                        |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|
| 10 - 15%                           | خفض الأكسدة الجانبية          | صيانة وتفعيل رشاشات تبريد المياه        |
| 6 - 10%                            | حماية القوس وتقليل الإشعاع    | تطبيق خبث رغوى كثيف ومستمر              |
| 4 - 7%                             | تقليل زمن الأكسدة الكلى       | تقليل زمن الصبة (Tap-to-Tap) بـ 5 دقائق |
| 5 - 12%                            | القضاء على الكسور الميكانيكية | ضبط عزم الربط وتفادي انهيارات الخرقة    |