إجراءات متطورة لتخفيض استهلاك الفولاذ الإنشائي وتكاليف الإنتاج والتلوث في مصانع الدرفلة في القطر العربي السوري

د. فـــــؤاد عـــــازر*
د. ســـــيمون عبيـــــد**

❑ ملخص ❑

يتناول هذا البحث دراسة العوامل المؤثرة في إنتاج قضبان وأسلاك فولاذية عالية الجودة من منطلق تحقيق الاقتصادية والأمان للمنشآت. وقد تم تطوير مخطط معمل الدرفلة على الساخن بحيث تتم عمليات المعالجة الحرارية للقضبان خلال الإنتاج، بالإضافة إلى إمكانيات استخدام سرعات درفلة عالية وإنتاج القضبان على شكل لفافات أو ربطات وفقاً لأقطارها. وإن نظام التسقية المقترح يوفر تبريد سطح القضبان بسرعة عالية جداً قبل مرورها فوق ناقل التبريد الطبيعي والبطيء، مما يؤدي إلى تحويل بنيتها الميتالورجية ويكسبها الخصائص الميكانيكية المطلوبة في التصاميم الحديثة. وقد بينت المقارنة الاقتصادية التي تم إجراؤها بين هذه الطريقة والطرائق التقليدية المستخدمة في إنتاج قضبان فولاذية عالية المتانة الميزات الاقتصادية والتشغيلية الممتازة للقضبان المنتجة بطريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة.

ونظراً لأن هذه الطريقة تتطلب مياه تبريد ذات نوعية جيدة وبتدفق كافٍ، فقد قمنا بتطوير نظام معالجة المياه على أساس مفهوم انعدام تصريف المياه الفائضة والتلوث. إذ تتم المعالجة الملائمة لحمل كميات المياه، المتوفرة في معمل الدرفلة، لإعادة استخدامها على النحو الأمثل في دارات التبريد بهدف تخفيض استهلاك مياه التعويض وحماية البيئة من التلوث الناجم عن المياه الفائضة / مياه التفريغ من هذه الدارات.

وإن تطبيق هذه الإجراءات المتطورة في معامل الدرفلة في القطر واستخدام القضبان الفولاذية العالية الجودة في التصاميم الإنشائية والصناعية، فضلاً عن تطوير نظم معالجة المياه على النحو المبين في هذا البحث، يعدّ اسهاماً في تنمية القاعدة الاقتصادية وحماية البيئة في القطر العربي السوري.

* الدكتور فؤاد عازر أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق – دمشق – سورية
** الدكتور سيمون عبيد أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق – دمشق – سورية

يعد الفولاذ من المتطلبات الرئيسية في مشاريع الإنشاء والتطوير في القطر، وبخاصة القضبان والأسلاك والصفائح التي تشكل الجزء الأكبر من إنتاج مصانع الفولاذ.

يدرس هذا البحث العوامل المؤثرة في تحسين الخصائص الميكانيكية للقضبان والأسلاك الفولاذية المستخدمة في أعمال الإنشاءات العامة والصناعات الهندسية في القطر. كما يبحث في تطوير الأساليب الإنتاجية التي يمكن تطبيقها في معامل الدرفلة بهدف الحصول على منتجات عالية الجودة، وبالتالي تخفيض كميات الفولاذ الإنشائي المستهلكة في هذه الإنشاءات والصناعات فضلاً عن تخفيض استهلاك مياه التبريد اللازمة لعمليات الدرفلة وتأثير ذلك على كلفة المنتج وتلوث البيئة.

ويتطلب تحقيق هذه الأهداف إنتاج قضبان وأسلاك ذات نوعية أفضل من حيث المتانة ودقة الأبعاد وخلوها من الشقوق الداخلية والترسبات. وقد ترتب على هذا التطوير تصميم خطوط الدرفلة من منطلق تحسين الخواص الميتالورجية للمنتجات، وإنتاج القضبان بالأبعاد المطلوبة ضمن حدود دقة عالية، هذا بالإضافة إلى ضرورة الاهتمام على نحو أكبر بتدريب العناصر التي ستقوم بتشغيل مثل هذه الخطوط الإنتاجية المتطورة.

كما يتطلب تطوير نظم معالجة المياه على أساس توفير مياه تبريد ذات نوعية جيدة وملائمة لعمليات الدرفلة السريعة، والاستفادة المثلى من مجمل كميات المياه المتوفرة بهدف تخفيض استهلاك المياه والحد من تلوث البيئة.

متطلبات الإنشاءات الحديثة:

ازدادت في السنوات الأخيرة، على نحو كبير، الكميات المستخدمة من القضبان والأسلاك الفولاذية. لذلك اتجهت متطلبات الإنشاءات نحو استخدام قضبان وأسلاك ذات خواص وجودة عالية بحيث تحقق في الإنشاءات والصناعات الهندسية هدفين رئيسين: الاقتصادية والأمان.

1. الاقتصادية Economy: ليكون استخدام القضبان والأسلاك اقتصادياً، يجب أن تتوفر فيها الخواص التالية:

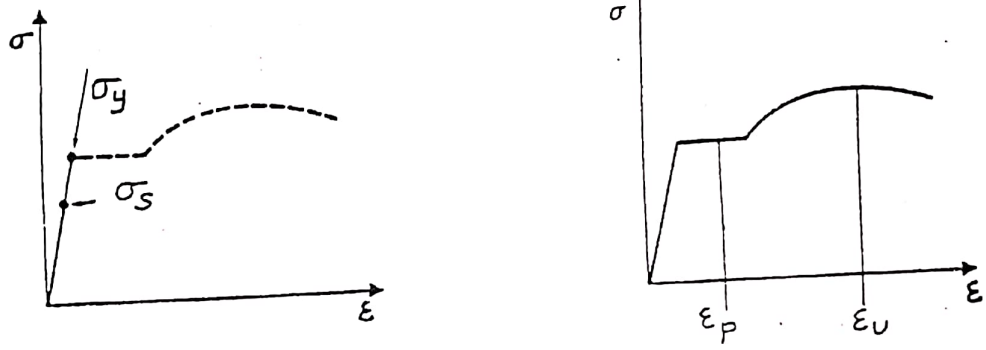
أ. متانة خضوع عالية (Yield strength): عندما يكون إجهاد الخضوع المضمون للمعدن عالياً فإن كمية القضبان والأسلاك اللازمة لتصميم معين تنخفض، مما يؤدي إلى انخفاض تكاليف الإنشاء والأعمال الأخرى المساندة له. إن إجهاد الخضوع الأكثر استخداماً لقضبان الفولاذ هو بحدود $\sigma y = 400$ Mpa، في حين بدأت تظهر متطلبات جديدة بالحاجة إلى قضبان ذات خضوع Mpa (500 ~ 600).

ب. قابلية لحام جيدة (Weldability): تتطلب الأعمال الإنشائية، علاوة على شرط المتانة العالية، تنفيذ عمليات وصل القضبان ببعضها البعض. لذلك تعد قابلية اللحام خاصية هامة في توصيف القضبان والأسلاك. ولكي تتوفر قابلية لحام جيدة وسهلة، يجب أن تكون نسبة الكربون في الفولاذ منخفضة إلى أقل من 0.25%.

ج. قابليـــــة جيـــــدة للثـــــني (Bendability): وهـي خاصيـة هامة أيضاً، إذ يجـب أن تتوفـر في القضبان والأسلاك المستخدمة في الإنشاءات قابلية جيدة للثني حتى في حالـــة درجـــات الحـــرارة المنخفضة (C° -20)، ممـا يعـزز إمكانيـة الحصـول علـى التصميـم الأمثـــل للإنشـــاءات وبالتـــالي تخفيض تكاليف التنفيذ.

2. **الأمان Safety:**

تصمم الإنشاءات الخرسانية المسـلحة عـادة بالاعتمـاد علـى مفهـوم الإجهـاد (Stress concept). أي بافتراض أن الأحمـال الـتي تظهـر خـلال الاستثمار تسبب انفعـالات مرنـة فقـط في فـولاذ التسـليح. وفي هـذه الحالة، يعبر عن أمـان التصميـم أو الإنشـاء بنسبة الإجهـاد (Stress ratio) وهـي نسـبة إجهـاد الخضـوع σy إلى الإجهـاد العملي (Service stress) σs كمـا هـو مبين في الشكل (a-1).



(a) (b)

الشكل (1): مفاهيم الأمان

ولكـن الأبحـاث الحديثـة قـد توصلـت إلى نتيجة هامة، وهي أن الحسابات والتصـاميم الـتي تعتمـد علـى مفهـوم الإجهـادات في الإنشاءات الخرسانية المسلحة ليست كافية، إذ تحدث في بعض الحالات انفعـالات لدنـة (دائمة) موضعية يجـب أن يتحملهـا المعـدن بـدون أن ينهـار (مثـلاً في عمليـات الـدك Tamping). لذلـك يعـبر عـن أمـان الإنشـاء، في مثـل هـذه الظـروف، بنسـبة الإنفعـال (Strain ratio) وهـي نسـبة الانفعال المتجانس المنتظـم ε_U إلى الانفعـال الموضعي اللـدن ε_P كمـا هـو مبـين في الشكل (b-1).

وقـد بـدأ في الفـترة الأخـيرة تطبيـق هـذه الطريقة في التصميم في بعض الدول المتقدمة صناعيـاً، حيـث تتطلـب اسـتخدام قضبـان وأسلاك من معادن مطلية (Ductile) ذات استطالة منتظمة مضمونـة (Guaranteed uniform elongation).

وثمة سعة أمان هامة أخرى يجـب أن تتوفـر في فولاذ التسليح، وهي عدم فقدان المطيلية بعـد إعـادة الثـني (Rebending). وهـــذا

يستوجب استخدام فولاذ ذي خاصية جيدة لإعادة الثني.

وينتج مما ذكر أعلاه أن الفولاذ الإنشائي في الإنشاءات الحديثة يجب أن يحقق الخواص التالية:

1- متانة خضوع عالية

2- قابلية لحام جيدة

3- قابلية جيدة للثني وإعادة الثني

4- مطيلية جيدة

أساليب إنتاج القضبان والأسلاك عالية الجودة:

تعتمد أساليب الإنتاج التقليدية على إحدى الطريقتين التاليتين لتحسين جودة القضبان والأسلاك الفولاذية المستخدمة في الإنشاءات والصناعات الهندسية وزيادة قيمة إجهاد الخضوع σy:

1. زيادة نسبة العناصر السبائكية (V وNb) مع الحفاظ على نسبة منخفضة من الكربون والمنغنيز للحصول على قابلية لحام جيدة أي إنتاج فولاذ ذي نسبة عناصر سبائكية منخفضة.
2. إخضاع القضبان والأسلاك المدرفلة على الساخن لعمليات التشكيل على البارد (تصلد انفعالي).

ويمكن بهذه الطريقة إنتاج قضبان ذات متانة عالية وقابلية لحام جيدة من فولاذ منخفض نسبة الكربون والمنغنيز.

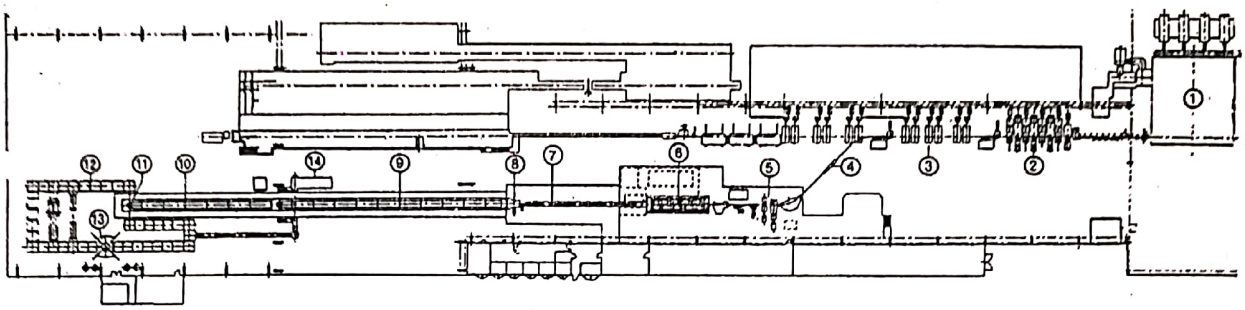
إلا أن استخدام أي من هاتين الطريقتين لزيادة قيمة إجهاد الخضوع في القضبان الفولاذية قد أدى إلى ارتفاع كبير في تكاليف الإنتاج.

وهذا ما حدى على تطوير طريقة حديثة تعتمد على مبدأ إجراء المعالجة الحرارية خلال عمليات الدرفلة (In - Line heat treatment). وسنوضح في الفقرات اللاحقة بعمل الميزات التصميمية والتكنولوجية والاقتصادية التي يمكن أن يحققها استخدام هذه الطريقة في معامل درفلة القضبان على الساخن.

مخطط معمل الدرفلة وخصائص أدائه Rolling mill layout:

قبل توضيح آلية عمل تقانة المعالجة الحرارية للقضبان خلال عمليات الدرفلة على الساخن، نرى من الضروري إعطاء وصف لمكونات خط درفلة حديث وخصائص أدائه، وتبيان أمكنة توضع تجهيزات المعالجة الحرارية في خط الإنتاج.

يبين الشكل (2) مخططاً لمعمل درفلة مرن قادر على إنتاج القضبان والمقاطع عبر فرش تبريد عادي بحيث تجمع المنتجات على شكل ربطات (Bundles) وبأطوال محددة (6, 9, 12, 16) متراً. ويمكنه كذلك إنتاج القضبان بأقطار (من 5.5 إلى 16 ملم) على شكل لفافات (Coils). وفي هذه الحالة، يبين الشكل (2) أنه يتم تحويل القضيب، بعد خروجه من مجموعة آلات الدرفلة المتوسطة (3)، للمرور عبر آلات الدرفلة قبل الإنهاء (5) إلى وحدة الإنهاء (6).



1. فرن التسخين
2. خط التخشين
3. خط الدرفلة المتوسط
4. نظام تحكم بدرجة الحرارة
5. خط الدرفلة قبل الإنهاء
6. وحدة الإنهاء
7. نظام التسقية
8. جهاز تشكيل الحلقات
9. ناقل التبريد الطبيعي
10. تبريد قسري بالهواء
11. محطة تشكيل اللفافات
12. حاملات اللفافات
13. محطة تجميع وربط اللفافات
14. جهاز تفريغ اللفافات

الشكل (2): مخطط معمل درفلة على الساخن

ويمر القضيب المدرفل بعدئذ عبر نظام التسقية (Quenching) بالتبريد السريع (7) الذي تحدث فيه عملية المعالجة الحرارية الأولية. ومن ثم ينتقل عبر جهاز تشكيل الحلقات (8) إلى ناقل التبريد الطبيعي (9)، ومنه إلى محطة تشكيل اللفافات (11). وتنقل اللفافات، التي يمكن أن يصل وزنها إلى (2.5) طن، بوساطة الحاملات (12) إلى محطة التجميع والربط (13) ومنها إلى المستودعات عن طريق جهاز تفريغ اللفافات (14).

ولكي تحقق معامل الدرفلة متطلبات التصاميم الحديثة من القضبان والأسلاك، وذلك من حيث النوعية والأقطار والأطوال وتوفير المنافسة الاقتصادية، فإنه يجب أن تتوافر فيها الخصائص التالية:

- عامل استخدام مرتفع High utilization factor.
- استهلاك الطاقة أقل ما يمكن.
- إنتاجية عالية وتكاليف إنتاج منخفضة.
- أن تكون المنتجات مطابقة للمواصفات المعتمدة وبخاصة ما يتعلق منها بالنوعية والتسامحات.
- أن تستلزم أقل عدد ممكن من القوى العاملة.
- إمكانية الانتقال من نوع إنتاج إلى نوع آخر بسرعة وبسهولة.

وقد أدى ذلك إلى تطوير تصميم آلات الدرفلة وبخاصة وحدة الإنهاء بحيث يمكن الوصول إلى سرعات درفلة عالية تزيد على (100) متر / ثانية في حالة الأقطار (من 5.5 إلى 7) ملم، وإلى سرعات أقل للأقطار الأكبر على نحو يحقق الحفاظ على الإنتاجية التصميمية لخط الإنتاج. كما استلزم ذلك

تطوير الرأس المشكل للحلقات المركب بعد وحدة الإنهاء. وتتضمن إجراءات التطوير:

- استخدام حلقات (أقراص) درفلة من كربيدات التنغستين في وحدة الإنهاء بهدف إطالة العمر الاستثماري للممر، مما يؤدي إلى تخفيض تكاليف الإنتاج.
- تعديل تصميم الرأس المشكل للحلقات بحيث يصبح مائل المحور بالإضافة إلى توجيهه بالاتجاه المناسب لناقل التبريد.

كما يؤدي تطوير نظام توضع آلات الدرفلة عن طريق استخدام النمط الشاقولي / الأفقي (H/V) إلى تخفيض إمكانية حدوث العيوب والأعطال خلال عمليات الدرفلة وبخاصة تشكل العقد (Cobbles) التي تعيق استمرارية عمليات الدرفلة. وهكذا، فإن استخدام هذا النمط من التوضع يهدف إلى زيادة الإنتاجية وتخفيض تكاليف الإنتاج.

وتتلخص سمات معامل الدرفلة المرنة بما يلي:

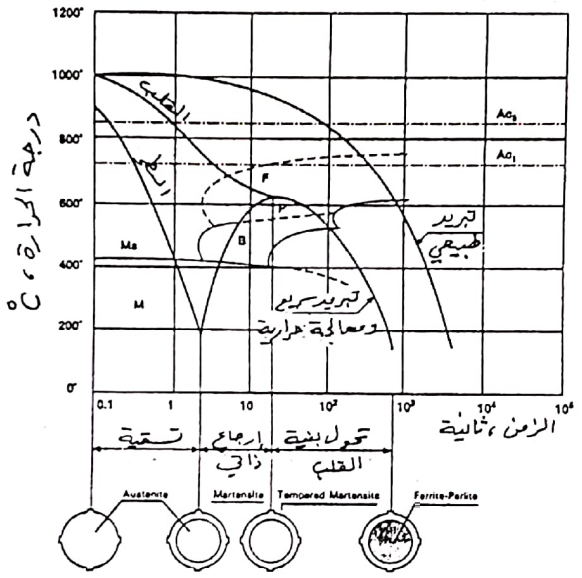
- سرعة تبديل آلات الدرفلة في خطوط الإنتاج.
- قلة الأعطال والتوقفات الناجمة عن تشكل العقد بوجه خاص.
- إمكانية إجراء عمليات الضبط الكاملة خارج خط الإنتاج بهدف الانتقال من منتج معين إلى منتج آخر.
- زمن قصير لتبديل مجاري الدرفلة (Groove cgange).
- أتمتة العمليات الإنتاجية وإمكان رفع المردودية إلى (96%) بدلاً من (90%) المتوفرة في الوقت الحاضر.
- تخفيض الاهتراء من خلال تطوير تصميم عناصر توجيه دخول القضبان وخروجها.
- تقطيع القضبان على النحو الأمثل (Optimization) مما يخفض الهدر في الإنتاج.
- تجليس المقاطع وضبط استوائها في خط الإنتاج.
- أتمتة عمليات الربط والتجميع / (Bundling stacking).
- استخدام سرعات درفلة عالية تزيد على (20) متر / ثانية للأقطار الكبيرة وعلى (100) متر / ثانية للأقطار الصغيرة (أقل من 7 ملم).
- إمكانية استخدام تقنية الشطر الطولاني (Stitting) لزيادة الإنتاجية.

كما توجه الاهتمام بتخفيض تكاليف الإنتاج وتحسين نوعية القضبان نحو تطوير عملية إعادة تسخين الكتل الفولاذية أو العروق (Billets) في فرن التسخين (1) المبين في الشكل (2). وقد أدى ذلك إلى تصميم فرن التسخين ذي الموقد المترجح (Walking hearth) الذي يوفر عدة ميزات إنتاجية واقتصادية. وعلى الرغم من ذلك فإن الاهتمام يتركز الآن في تطوير استخدام العروق الساخنة الواردة مباشرة من آلات الصب المستمر، بدرجة حرارة عالية (500° ~ 600° C)، وإدخالها إلى فرن التسخين. ويتطلب هذا الأمر تصميم المخططات المناسبة لتوجيه هذه العروق نحو الفرن بما فيها النواقل والموجهات وأجهزة المراقبة والتحكم اللازمة لضمان التشغيل المستمر بدون أعطال أو توقفات. وستؤدي هذه الإجراءات بالتأكيد إلى:

- تخفيض استهلاك الطاقة.
- الحصول على تجانس حراري أفضل عبر مقاطع العروق وعلى طولها.
- تخفض كمية الأكاسيد المتشكلة في العروق، مما يؤدي إلى تحسين المردود الإنتاجي (Production yield).
- تخفيض استهلاك مواد بطانة الفرن (Refractories).

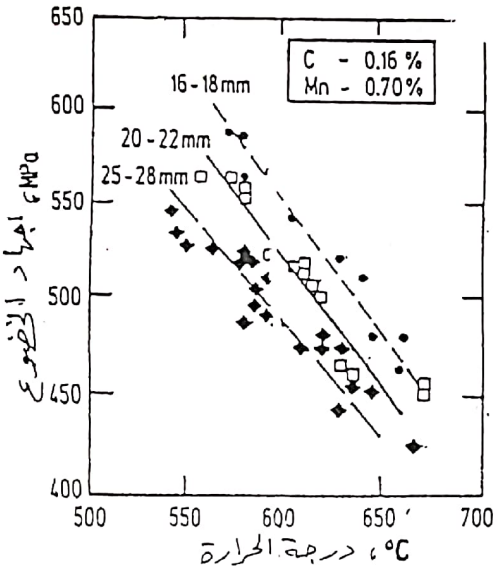
تقانة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة:

يمرر القضيب المدرفل بعد خروجه من وحدة الإنهاء بدرجة حرارة (960°~980° C)، في عناصر نظام التسقية حيث يخضع سطحه لعملية تبريد سريعة وشديدة. وبسبب سرعة التبريد العالية، التي تفوق المعدل الحرج للتحول المارتنزيتي، تتحول، الطبقة السطحية للقضيب إلى بنية مارتنزيتية صلدة، في حين يبقى القلب في حالة اوستنيتية، كما هو مبين في الشكل (3)، ومن ثم تتوقف عملية التبريد عند الحصول على سماكة محددة من المارتنزيت.



الشكل (3): المعالجة الحرارية للقضبان في خط الدرفلة

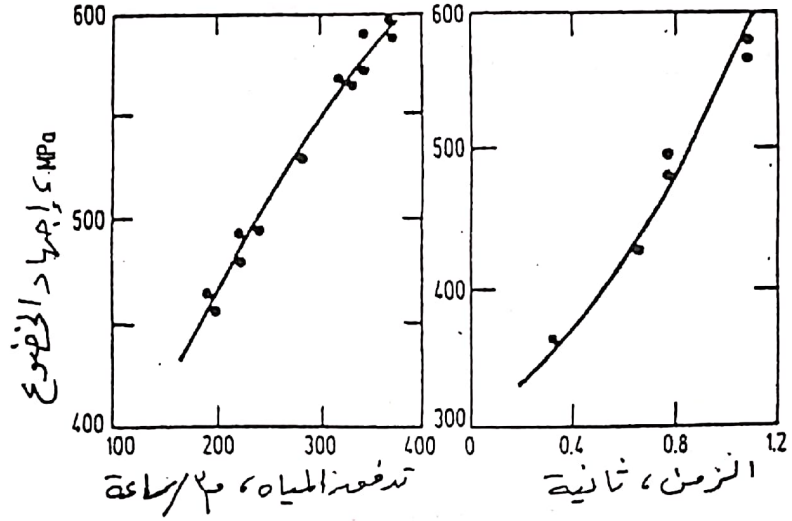
بعد خروج القضيب من عناصر التبريد السريع وتعرضه للهواء، وبسبب التدرج الحراري بين القلب والسطح، تنتقل الحرارة من القلب نحو الطبقة السطحية فترتفع درجة حرارتها وتحدث لها عملية إرجاع (Tempering). وفي أثناء مرور القضيب فوق ناقل التبريد البطيء (1° C/sec تقريباً)، تتحول بنية القلب الأوستنيتية إلى بنية فريتية / برليتية (أو بينيتية)، في حين تتحول الطبقة السطحية إلى مارتنزيت مُرجَع (Tempered martensite). وتنتج من هذه المعالجة الحرارية بنية عالية الجودة للقضيب ذات إجهاد خضوع مرتفع ومطيلية عالية. ويبين الشكل (4) علاقة إجهاد الخضوع بدرجة حرارة الإرجاع لفولاذ ذي تركيب كيميائي معين (0.16% C, 0.7% Mn) ولأقطار مختلفة القضبان.



الشكل (4): العلاقة بين إجهاد الخضوع ودرجة حرارة الإرجاع

وبفضل مرونة هذه الطريقة من المعالجة الحرارية فإنه يمكن، في حالة تركيب كيميائي معين للفولاذ، الحصول على قيم مختلفة لإجهاد الخضوع عن طريق تغيير معدلات التبريد في نظام التسقية. فمثلاً يتضح من الشكل (4) أنه يمكن الحصول على مراتب الفولاذ (IVS وIIIS حسب موصفات DIN) باستخدام تركيب كيميائي واحد (0.16% C, 0.7% Mn) لجميع الأقطار.

كما يبين الشكل (4) أنه توجد، لتركيب كيميائي معين وقطر محدد، علاقة جلية بين الخواص الميكانيكية ودرجة حرارة الإرجاع. وأن هذه العلاقة هي المبدأ الرئيسي في عملية التحكم بطريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة. إذ يكفي لتحقيق خواص ميكانيكية معينة، الحفاظ على درجة حرارة الإرجاع ضمن مجال محدد. ومن الواضح أن العاملين المؤثرين في التحكم بهذه الطريقة هما: طول نظام التسقية ومعدل تدفق مياه التبريد اللذين يمكن التحكم بهما بسهولة خلال عملية الدرفلة. ويبين الشكل (5) التأثير الكبير لهذين العاملين على إجهاد خضوع القضبان المدرفلة. وتتحدد فعالية تطبيق التحكم بهذه الطريقة من خلال الخبرات العملية بحيث لا تزيد الانحرافات عن القيم المطلوبة لإجهاد الخضوع عن نسب محدودة جداً.

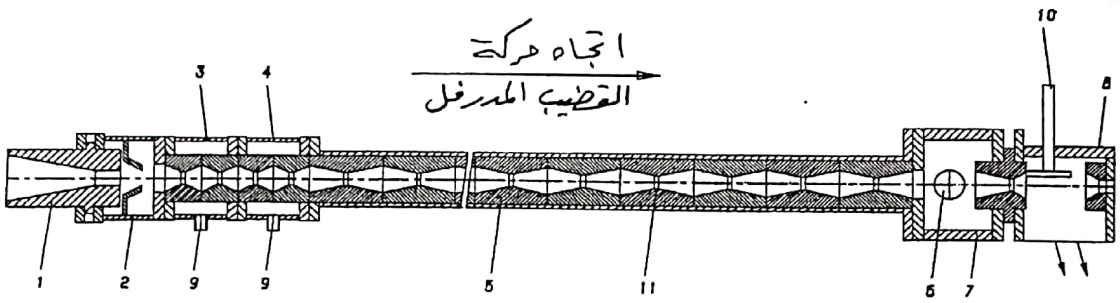


الشكل (5): التحكم بعملية المعالجة الحرارية في خط الدرفلة

فعلى سبيل المثال، قد تم قياس الانحراف في إجهاد الخضوع في معمل درفلة ينتج نحو 300) (000 طن سنوياً فتبين أن الانحراف القياسي، عن قيمة إجهاد الخضوع المتوسطة (480 MPa)، هو أقل من (30 MPa) متضمناً التغيرات في التركيب الكيميائي.

ويبين الشكل (6) مخططاً لأحد العناصر في نظام تبريد سريع (تسقية) متطور، ويشتمل على السمات التالية:

- حجيرة ذات فوهات لدخول مياه التبريد.
- عنصر تسقية مكون من مجموعة أنابيب فنتوري (فوهات متقاربة / متباعدة).
- ضغط خلفي لإبطال تدفق المياه الواردة بالاتجاه نفسه لحركة القضيب المدرفل.
- حواجز هوائية لإزالة المياه المتبقية على سطح القضيب.



1- قمع الدخول

2- حجيرة إزالة المياه من الأنبوب بالهواء المضغوط

3+4- حجيرة فوهات المياه

5- أنبوب وسيط

6- مخرج المياه

7- حجيرة الضغط الخلفي

8- حجيرة إزالة المياه عن القضيب

9- تغذية المياه تحت الضغط

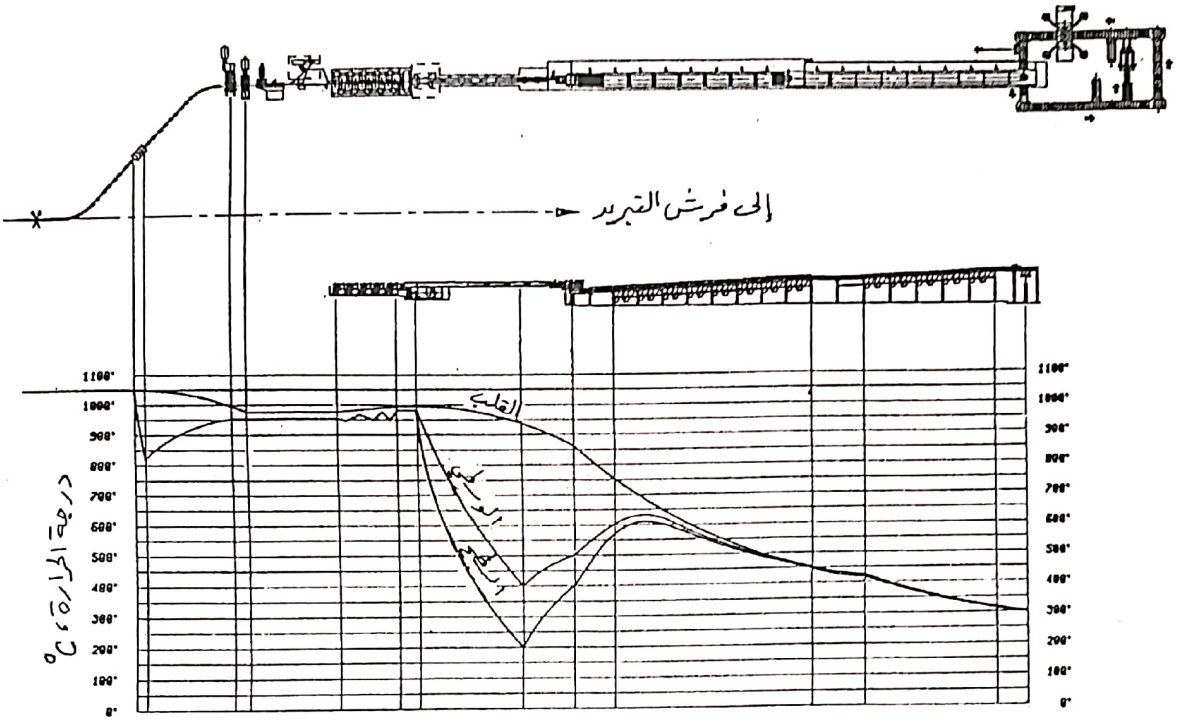
10- هواء مضغوط لإزالة المياه عن القضيب

11- أنبوب فانتوري

الشكل (6): مخطط عنصر في نظام التسقية

وتجهز العناصر بوسائل تثبيت بسيطة لتوفير إمكانيات الاستبدال السريع عند تغيير برنامج الدرفلة. وقد تمت دراسة تناسب الأبعاد الهندسية لأنابيب الفانتوري على اعظم سرعات تبريد لسطح القضبان المنتجة، فتبين أن استخدام أنابيب فانتوري ذات نسبة تباعد / تقارب تساوي (2) تقريباً على طول فوهة يساوي تقريباً ضعفي القطر الصغير، يؤدي إلى معدلات تبريد عالية جداً لسطح القضيب، كما هو واضح في الشكل (3)، وذلك بسبب الجريان العالي الاضطراب الذي يوفره هذا التصميم مما يمكّن من تحقيق إزالة مستمرة لطبقة البخار الرقيقة المتشكلة على سطح القضيب. ويمكن اختيار المجموعات الملائمة من عناصر التبريد، التي يجب تركيبها في خط مستمر، وفقاً لأقطار القضبان المدرفلة وسرعات الإنتاج للحصول على درجة الحرارة النهائية المطلوبة. وتتم بين كل عمليتين متتاليتين إزالة المياه المتبقية داخل العناصر عن طريق حقن الهواء المضغوط في الحجيرة الأولية (2) المبينة في الشكل (6). ويقوم نظام تحكم مركزي متطور ببرمجة عمليات تغذية المياه إلى كل عنصر من عناصر نظام التسقية عن طريق مجموعة من الصمامات الآلية.

كما يوضح الشكل (7) مخطط توضع نظام التسقية في خط الدرفلة فضلاً عن منحنيات تغيرات درجة الحرارة خلال مراحل المعالجة الحرارية بأكملها.

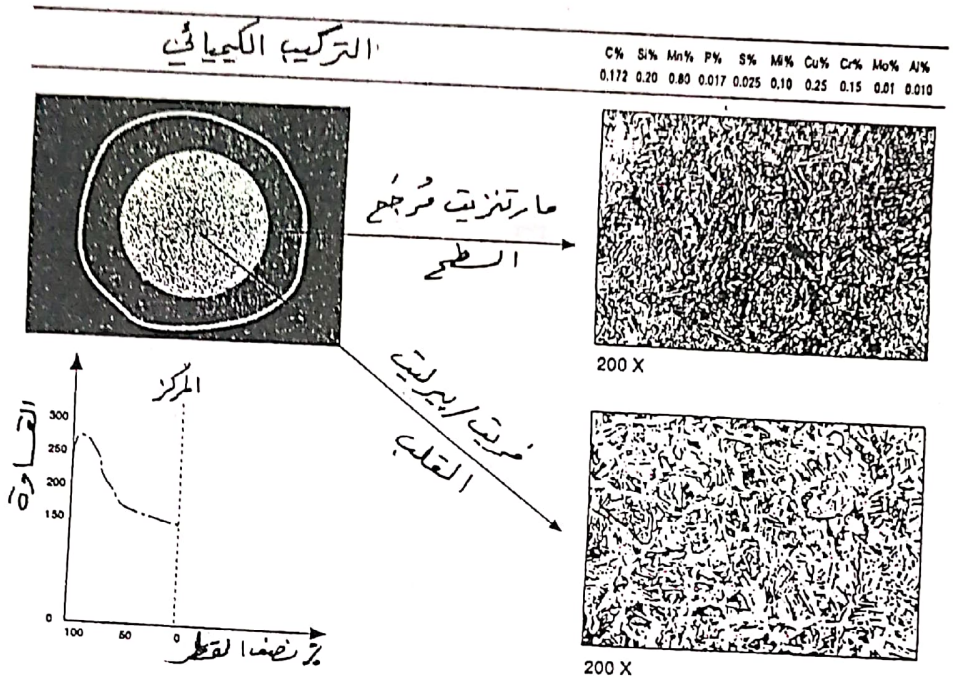


الشكل (7): مراحل خط التبريد ومنحنيات تغيرات درجة الحرارة

وقد تم تحديد درجة حرارة القضيب عند دخوله إلى وحدة الإنهاء بحدود (940°~980° C)، وذلك بسبب عملية الدرفلة السريعة. وبعد اخضاع القضيب لعملية التسقية بالتبريد الأولي السريع التي تم شرحها سابقاً يدخل في جهاز تشكيل الحلقات بدرجة حرارة غير متجانسة عبر مقطعه ليخرج منه بدرجة حرارة وسطية نحو (650° C). ويتم التبريد الطبيعي بعدئذ في القسم الأول من ناقل التبريد، حيث تحدق عملية إرجاع الطبقة السطحية. ومن ثم يتم تبريد القضيب في القسم الثاني من الناقل باستخدام مراوح سحب الهواء.

وقد أدى ذلك إلى الحصول على خواص ميكانيكية عالية للفولاذ: إجهاد الخضوع بحدود (500-600 Mpa) واستطالة نسبية (26%-28%).

كما يبين الشكل (8) تغيرات القساوة (Hardness) عبر مقطع القضبان المعالجة حرارياً في خط الدرفلة، بالإضافة إلى البنية المجهرية لكل من الطبقة السطحية والقلب.



الشكل (8): تغير القساوة عبر مقطع القضبان المعالجة حرارياً وبنيتها المجهرية

وتجدر الإشارة إلى أن تطبيق عملية المعالجة الحرارية من خلال عمليات الدرفلة على الساخن تتطلب شروطاً معينة أهمها:

- توفر تدفق كاف لمياه التبريد.
- توفر المكان الملائم لتركيب نظام التسقية في خط الدرفلة.
- تحقيق إمكانية التبديل السريع لعناصر التبريد وفقاً لمتطلبات الإنتاج.

وقد تم تحقيق هذه الشروط عن طريق تعديل تصميم نظام التبريد وتطويره، إذ أمكن تخفيض معدل تدفق مياه التبريد اللازمة بحدود (50%-60%)، وتصغير الحيز اللازم له في خط الدرفلة بالإضافة إلى إمكانية تبديله خلال فترة قصيرة (3-5) دقائق.

المقارنة الاقتصادية بين طريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة والطرائق الأخرى:

على الرغم من أن خواص القضبان المعالجة بهذه الطريقة هي أفضل من تلك الخواص الناتجة من استخدام طرائق المعالجة الأخرى، فإننا سنعتبر هنا بأن القضبان المصنعة بطريقة الاضافات السبائكية (Microalloys) أو بالتصلد الانفعالي (Strain hardening) هي ذات خواص ميكانيكية مقبولة. لذلك، ستقتصر المقارنة بين هذه الطرائق على الناحية الاقتصادية فقط.

إن عملية التصلد الانفعالي هي أكثر كلفة من كل ممن عمليتي المعالجة الحرارية في خط الدرفلة واستخدام المواد السبائكية في إنتاج الفولاذ.

وقد تم إجراء دراسة مقارنة على أربعة مصانع فولاذ متقاربة التصميم فيما يتعلق بالإنتاجية والنوعية، إذ تنتج جميعها فولاذاً سبائكياً منخفض النسبة قبل تطبيق طريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة على الساخن. وتستخدم هذه المصانع أفران صهر كهربائية لإنتاج العروق في آلات الصب المستمر من الخردة فقط. كما أن إنتاجها السنوي هو بحدود (180000) طن من القضبان بأقطار (40-80) ملم ذات إجهاد خضوع (400-500 Mpa).

وقد تضمنت الدراسة مقارنة تكاليف الإنتاج في في حالة إنتاج فولاذ سبائكي منخفض النسبة بتلك التكاليف في حالة إنتاج فولاذ منخفض الكربون باستخدام طريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة، وذلك بعد أخذ العوامل التالية في الحسبان:

- العناصر السبائكية المضافة.
- أنواع قضبان الفولاذ المنتجة.
- تكاليف تشغيل خط الدرفلة.
- العوامل الأخرى المؤثرة في عمليات الصهر.

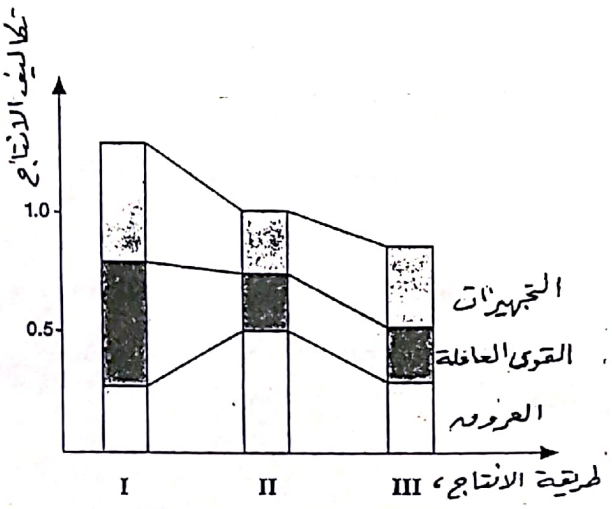
فتبين من نتائج المقارنة حدوث وفر ذي شأن عند استخدام طريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة. كما تم حساب مقدار الوفر الناتج من تطبيق هذ الطريقة في معملين آخرين: أحدهما في ألمانيا والأخر في الولايات المتحدة الأمريكية.

ينتج المعمل الموجود في ألمانيا قضباناً فولاذية حسب العيارية (DIN 488)، من نوع (III) ذات إجهاد خضوع (420 Mpa) ومن نوع (IV) ذات إجهاد خضوع (500 Mpa)، وبإنتاجية قدرها (000 100) طن سنوياً. وقد صمم هذا المعمل في البداية على أساس استخدام العناصر السبائكية، ثم قام بتركيب نظام المعالجة الحرارية فتبين أن الوفر الصافي الناجم عن تركيب هذا النظام هو بحدود (27) مارك ألماني لكل طن منتج، أي 2) (000 700 مارك سنوياً، مما يؤدي إلى استرداد قيمة التجهيزات المضافة إلى المعمل خلال (15) شهراً فقط.

وأما في حالة المعمل الموجود في الولايات المتحدة الأمريكية، فإنه ينتج قضباناً فولاذية حسب العيارية (ASTM 615 - grade 60)، المشابهة للعيارية (DIN 488)، بطاقة إنتاجية سنوية 100) (000 طن أيضاً. وقد تبين أن الوفر الصافي الناتج من استخدام نظام المعالجة الحرارية يعادل تقريباً (25) مارك لكل طن منتج.

ويبين الشكل (9) جدول مقارنةعامة للتكاليف الإنتاجية بين الطرائق الثلاث المستخدمة لإنتاج الفولاذ العالي المتانة، حيث تظهر بوضوح الميزات الاقتصادية والتشغيلية لطريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة.

	طريقة الانتاج	الخصائص الميكانيكية	
		المطيلية	قابلية اللحام
I	التصلد الانفعالي	رديئة	جيدة
II	اضافة العناصر السبائكية	جيدة	مقبولة
III	المعالجة الحرارية في خط الدرفلة	ممتازة	ممتازة



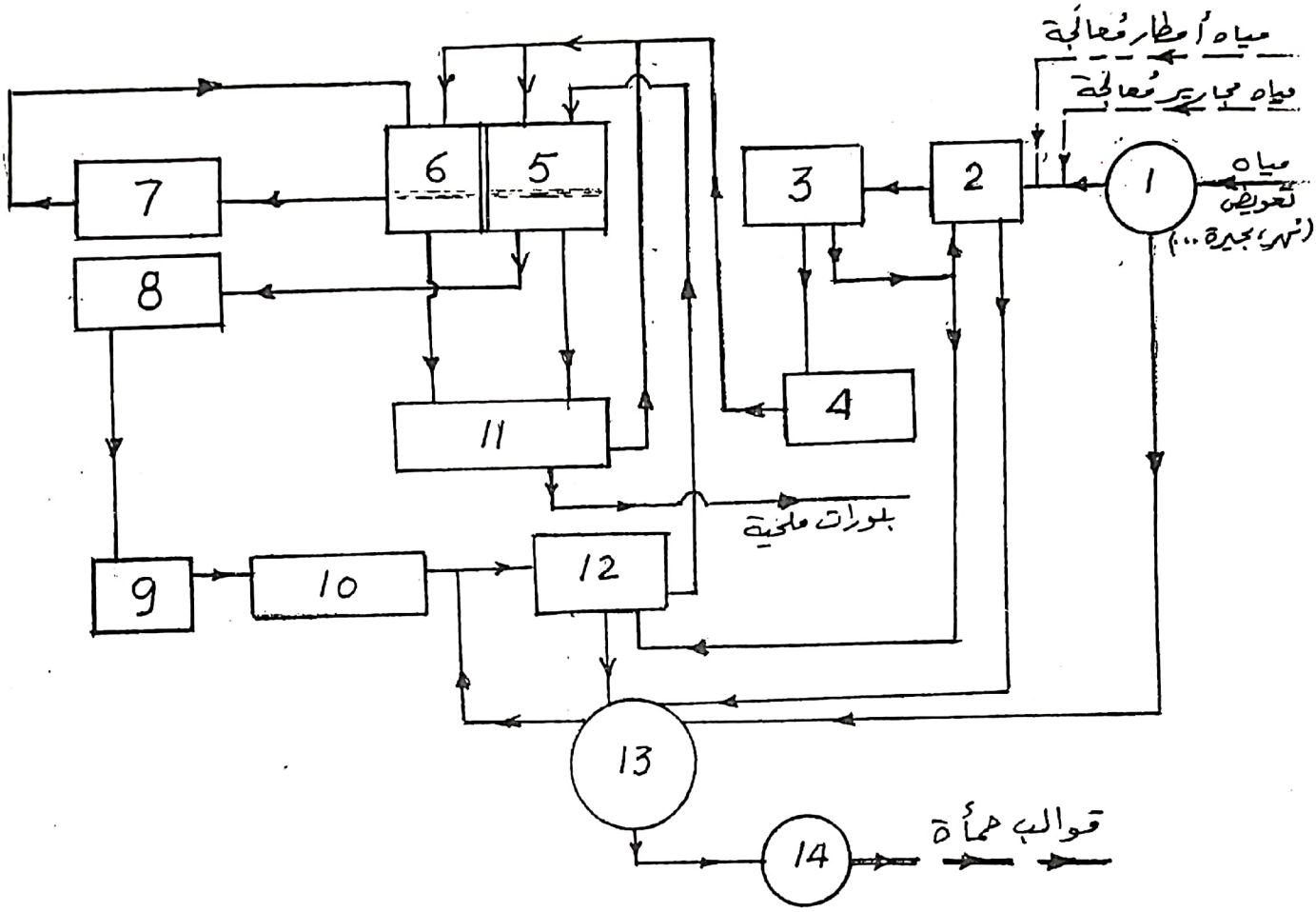
الشكل (9): المقارنة الاقتصادية بين طرائق الإنتاج

معالجة مياه التبريد في معامل الدرفلة:

تعد صناعة الفولاذ واحدة من الصناعات الأكثر استهلاكاً للمياه من ناحية، والأكثر تلويثاً للبيئة من ناحية ثانية. إذ يحتاج إنتاج طن واحد من الفولاذ في مجمع متكامل إلى استخدام ما بين 120 و220 متراً مكعباً من المياه الجارية ضمن دارات للتبريد، وذلك تبعاً لنوعية الوحدات الإنتاجية التي يتكون منها هذا المجمع ومدى الاستفادة من إعادة تدوير مياه التبريد فيما بينها. وتستخدم وحدات الدرفلة على الساخن نحو 30% من الكمية الاجمالية لهذه المياه. كما تحتوي المياه الناتجة من دارات تبريد هذه الوحدات على عدة مواد ملوثة للبيئة مثل القشور والجسيمات الصلبة والمركبة الحمضية والأكاسيد المعدنية والزيوت وغيرها من المركبات المنحلة، فضلاً عن ارتفاع درجة حرارتها إلى نحو 45° C.

ونظراً إلى الاهتمام العالمي المتزايد بمشكلات الطاقة والمياه وحماية البيئة، فإن موضوع توفير مياه التبريد ومعالجتها وإعادة استخدامها قد اكتسبت في السنوات الأخيرة أهمية حيوية في مجال صناعة الفولاذ من مختل فالنواحي الاستثمارية والاقتصادية والبيئية. إذ تستلزم هذه الصناعة، من وجهة النظر الاستثمارية، إجراء معالجة نوعية وفعالة لمياه التبريد بهدف ضمان أعظم عمر استخدام ممكن للتجهيزات وتوفير التبادل الحراري الفعال اللازم بخاصة لعمليات الدرفلة السريعة والمعالجات الحرارية المرافقة لها للحصول على فولاذ عالي الجودة، وذلك من خلال تفادي تراكم الترسبات ضمن دارات مياه التبريد وتجهيزاتها. وأما من وجهة النظر الاقتصادية، فإنه يجب تصميم نظم معالجة المياه وتبريدها من منطلق تخفيض استهلاك مياه التعويض، الناجم عن التبخر والتسرب والتفريغ في الدارات المختلفة، إلى أدنى حد ممكن من خلال إعادة تدوير أعظم كمية ممكنة من المياه المستخدمة في التبريد، وذلك بعد معالجتها على النحو الملائم للإستثمار. كما يجب أن يأخذ هذا التصميم في الاعتبار شروط حماية البيئة من الملوثات التي تحملها مياه التفريغ Blowdown ومياه الفائض من التجهيزات المختلفة. وبالتالي، إيجاد سبل المعالجة الكفيلة بتخفيض نسب تركيز هذه الملوثات إلى الحدود المسموح بها عالمياً بهدف استخدامها لأغراض الري، أو إعادة استخدامها كمياه تعويض مما يوفر الحل الأمثل والمباشر لمشكلات الحفاظ على المياه وحماية البيئة بآن معاً.

إن نظام معالجة مياه التبريد الذي تم تطويره لوحدات الدرفلة السريعة المنوه عنها سابقاً في هذا البحث، على النحو المقترح في الشكل (10)، يحقق الاعتبارات الاستثمارية والاقتصادية والبيئية المذكورة أعلاه من خلال توفير الاستفادة المثلى من مجمل كميات المياه الناتجة من هذه الوحدات ومن المصادر الأخرى المتاحة في معمل الدرفلة. لذلك يعد هذا النظام تطبيقاً عملياً وفعالاً لمفهوم انعدام تصريف المياه الفائضة والتلوث (Zero effluent / pollution discharge).



1. جهاز ترويق
2. مجموعة مرشحات ضغطية
3. خزان المياه المرشحة
4. وحدة تطرية / إزالة القلوية
5. أبراج التبريد المباشر
6. أبراج التبريد غير المباشر
7. دارات التبريد غير المباشر
8. دارات التبريد المباشر
9. حوض فصل ثقالي
10. حوض ترسيب
11. ودة تناضح عكسي وبَلْوَرة
12. مجموعة مرشحات ضغطية
13. جهاز تكثيف الحمأة (Thickener)
14. مرشح بالتخلية (Vacuum)

الشكل (10): نظام متطور لمعالجة مياه التبريد في معمل الدرفلة

من الواضح أن استخدام هذا النظام المتكامل يؤدي إلى استهلاك أقل كمية ممكنة من مياه التعويض الواردة من المصادر الطبيعية (الأنهار والبحيرات وغيرها)، وذلك بسبب ما يتضمنه من

تطوير في مبدأ المعالجة للاستفادة من إعادة استخدام مجمل كميات المياه الصناعية الناتجة من وحدات الدرفلة ومياه التفريغ من أحواض أبراج التبريد، فضلاً عن المياه الناتجة من محطات معالجة مياه المجارير والأمطار المركبة في المعمل.

كما تجدر الإشارة إلى أن العوادم الوحيدة الناتجة من محطة المعالجة هذه، تتكون فقط من قوالب الحمأة (Sludgr cake)، التي يمكن التخلص منها بسهولة أو دراسة إمكانية استخدامها في بعض الأعمال المدنية مثل أعمال الطرق وما شابهها، بالإضافة إلى البلورات المحلية التي يمكن استخدامها لأغراض صناعية مختلفة. علماً بأن الحسابات التصميمية الأولية قد بينت أن كمية كل من قوالب الحمأة والبلورات الملحية هي بحدود (1-1.5 Kg) لكل طن فولاذ مدرفل تبعاً لفعالية تجهيزات المعالجة المستخدمة.

كما توفر وحدات المعالجة المختلفة المبينة في الشكل (10) إمكانية الحصول على النوعية الجيدة للمياه اللازمة للتبريد في وحدات الدرفلة ونظام المعالجة المرافق لها. يتم ضخ مياه التعويض من أقرب مأخذ مياه طبيعي إلى جهاز الترويق (Clarifier) حيث تضاف إليها، تبعاً لخواصها ومحتوياتها، المواد الكيميائية المناسبة لعمليات الخلط والترويب (Coagulation) والاندماج (Flocculation) والترسيب بهدف إزالة معظم الجسيمات الصلبة والشوائب ومعايرة الرقم الهيدروجيني PH بحدود (7-8). ثم تضخ المياه بعد الترويق إلى مجموعة من المرشحات الضغطية حيث تمر عبر طبقات متدرجة الكثافة إلى رمل السيليكا المتوفر في القطر أو الانتراسيت أو كليهما معاً، بحيث تكون الطبقات الأكثر كثافة في أسفل المرشحات للحفاظ على التوضع النسبي للطبقات بعد عمليات الغسيل الخلفي (Backwashing). كما يفضل تغذية مياه تعويض من أعلى المرشحات لتوفير تغلغل منتظم وفعال للجسيمات المعلقة لينخفض تركيزها إلى نحو 5)-10 ppm).

يستخدم جزء بسيط من المياه المرشحة لعمليات الغسيل الخلفي لمجمل المرشحات المركبة في المعمل، في حين يعالج الجزء المتبقي في وحدة تطرية / إزالة القلوية قبل تغذيته كمياه تعويض إلى مجموعات أبراج التبريد المباشر وغير المباشر. ويفضل عادة تصميم أبراج التبريد على أساس دورات تركيزعالية نسبياً (3-4) لتخفيض استهلاك مياه التعويض وتكاليف المعالجة. وتستكمل عمليات المعالجة بإضافة المواد الكيميائية اللازمة للحد من التآكل وتشكل القشور ومنع نمو الكائنات العضوية المجهرية، وذلك في عدة مواضع مختارة من الدارات المختلفة وبخاصة عند أبراج التبريد. وتتم إضافة هذه المواد عن طريق وحدات المعايرة المناسبة تبعاً لنتائج تحليل المياه الذي يجب إجراؤه دورياً، على الأقل مرة في اليوم، أو يفضل استخدام نظام مراقبة مستمرة لتوفير المعطيات اللازمة للتحكم المبرمج الأمثل بوحدات المعالجة والمعايرة بهدف الحفاظ على النوعية المطلوبة في دارات المياه المختلفة وتخفيض تكاليف الاستثمار.

تتكون المياه الملوثة التي يجب معالجتها لإعادة استخدامها في استخدامها في دارات التبريد من: المياه الصناعية الناتجة من دارات التبريد المباشر ومياه التفريغ من أحواض أبراج التبريد. تخرج المياه من دارات التبريد المباشر لخط الدرفلة محملة عادة بنسبة عالية من القشور (أكثر من 1000 ppm) والزيوت (20 ppm)، لذلك يتم تمريرها إلى حوض فصل ثقالي حيث تترسب الجسيمات المعلقة الخشنة. ثم تضخ المياه إلى حوض ترسيب طولاني، ذي شكل وأبعاد مناسبة، حيث يترسب الجزء الأكبر من الجسيمات الناعمة بعد زمن احتجاز نحو (30) دقيقة، في حين تتم إزالة نسبة كبيرة من الزيوت عن

طريق جهاز استخلاص / كشط الزيت (Oil skimmer). ويجهز الحوض بوسائل كشط الجسيمات المترسبة ورفعها من الحوض ليصار إلى نقلها واستخدامها كخردة. ومن ثم تضخ المياه الناتجة من حوض الترسيب عبر مجموعة من المرشحات الضغطية إلى أبراج التبريد.

أما مياه التفريغ من أحواض أبراج التبريد فإنها تحتوي عادة على مركبات مختلفة من الأكاسيد المعدنية وموانع التآكل والجسيمات المعلقة والمنحلة. لذلك يجب تصميم وحدة معالجة هذه المياه على نحو يضمن إنتاج النوعية الملائمة من المياه لإعادة استخدامها في دارات التبريد. ويمكن تخفيض محتواها من الجسيمات المعلقة عن طريق استخدام مرشحات أنبوبية دقيقة، فضلاً عن تركيب مرشحات تفرعية (Side - stream filter) عبر أحواض أبراج التبريد. ثم تعالج هذه المياه إما بطرائق الاختزال الكيميائي أو بالتناضح العكسي (Reverse osmosis) بالإضافة إلى البَلْوَرة. وقد انتشر في الفترة الأخيرة استخدام طريقة التناضح العكسي والبَلْوَرة بسبب فعاليتها العالية، إذ يمكن أن يصل معامل استعادة المياه إلى أكثر من (96%)، فضلاً عن إنتاجها لمياه ذات نوعية جيدة يمكن إعادتها إلى أبراج التبريد غير المباشر.

وقد بينت الدراسات التي أجريت في عدة معامل درفلة على الساخن أن معدل استهلاك مياه التعويض اللازمة عند استخدام دارات التبريد التقليدية هو بحدود m^3 (2-3) لكل طن فولاذ مدرفل. في حين أن معالجة مياه التفريغ وإعادة استخدامها قد بينت وفراً في معدل استهلاك مياه التعويض من المصادر الطبيعية يصل إلى (30%). ويمكن أن يصل هذا الوفر إلى أكثر من (35%) في حال إعادة استخدام المياه الناتجة من محطة معالجة المجارير في المعمل بالإضافة إلى معالجة مياه الأمطار وبخاصة في المناطق ذات الهطول الغزيرة نسبياً. وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن استرداد الكلفة التأسيسية الإضافية اللازمة، في حالة إعادة استخدام مجمل كميات المياه وانعدام تصريف أي مياه فائضة، خلاخ فترة لا تتجاوز (24) شهراً. وذلك فضلاً عما يحققه نظام معالجة المياه المبين في الشكل (10) من الحفاظ على مخزون المياه الطبيعية وحمايتها من مجمل المواد والمركبات الملوثة، وهذا ما لا يمكن تقديره بثمن.

وأخيراً تجدر الإشارة إلى أن الدراسات الأولية لمجمع الزارة، المقترح إنشاؤه في القطر العربي السوري بطاقة إنتاجية سنوية (000 700) طن من القضبان والمقاطع المختلفة، قد تضمنت معظم الإجراءات والتعديلات المتطورة المقترحة في هذا البحث في مجال المعالجة الحرارية في خط الدرفلة وتوفير مياه التبريد اللازمة. كما تم تصميم معمل الدرفلة بأكمله على نحو يرتفع فيه عن سطح الأرض بمقدار (5) أمتار تقريباً مما يوفر ميزات كبيرة للحركة والصيانة وتوزع الأنظمة المساعدة وتجهيزاتها. فقد حقق هذا التصميم إمكانية وضع خزانات الزيوت والتجهيزات الكهربائية المختلفة فضلاً عن ورشة إصلاح الآلات وتحضير اسطوانات الدرفلة في الحيز الأرضي المتوفر تحت خطوط الإنتاج. وهذا ما يحقق الاستثمار الأمثل للمساحات المتوفرة ويجعل تشغيل التجهيزات وصيانتها أكثر سهولة وانتظاماً مما سيؤدي بالتأكيد إلى زيادة المردودية الإنتاجية والأمان في المعمل. وعلاوة على ذلك، فقد تضمنت الدراسة الأولية أنظمة المراقبة المستمرة والتحكم والأتمتة الإنتاجية والإدارية وبرامج التدريب والصيانة وفقاً لأعلى المستويات الفنية.

الاستنتاجات:

يتضح مما ورد في هذا البحث أن من مصلحة منتجي الفولاذ، وبخاصة القضبان والأسلاك،

أن يتم الإنتاج في خطوط درفلة ذات إنتاجية عالية وسرعات درفلة مرتفعة، وذلك على شكل لفافات للأقطار حتى (16) ملم وعلى شكل ربطات للأقطار الأكبر. كما تبين أن استخدام القضبان والأسلاك الفولاذية عالية الجودة في الإنشاءات والصناعات الهندسية هو هدف يطمح إلى تحقيقه المصممون والمستثمرون على حدّ سواء. ومن الواضح أن طريقة المعالجة المقترحة توفر إمكانية تحقيق ذلك، إذ تبين أن إجراء المعالجة الحرارية للقضبان والأسلاك في خط الدرفلة تكسبها خصائص ميكانيكية وميتالوروجية ممتازة، بالإضافة إلى انخفاض تكاليف إنتاجها، بالمقارنة مع الطرائق التقليدية الأخرى. وسيؤدي ذلك إلى تخفيض استهلاك الفولاذ اللازم للمنشآت فضلاً عن تخفيض تكاليف الإنشاء والتنفيذ مما سينعكس من غير ريب على التكلفة العامة لهذه المنشآت مع الحفاظ على أمانها.

كما أن تطوير مفهوم معالجة مياه التبريد على أساس الاستفادة المثلى من مجمل كميات المياه المستخدمة في المعمل بالإضافة إلى تحسين القدرة التبريدية للدارات وبخاصة نظام التسقية سيؤدي إلى تخفيض استهلاك المياه الطبيعية وحماية البيئة من التلوث مما يوفر حلاً عملياً لمشكلتي الحفاظ على المياه والحد من التلوث البيئي.

ولذلك، فإن قيام منتجي الفولاذ في القطر العربي السوري بإنتاج القضبان والأسلاك الفولاذية بطريقة المعالجة الحرارية في خط الدرفلة، وكذلك مكاتب الدراسات الهندسية باستخدام هذه الأنواع في تصاميمهم واعتماد مبدأ انعدام تصريف المياه الفائضة والتلوث في تصميم محطات معالجة المياه، يعد اسهاماً هاماً في تطوير القاعدة الاقتصادية في القطر.

❑ ABSTRACT ❑

This article deals with the factors related to the production of high quality steel wires and rods in order to ensure the economy and safety of structures and plants. A hot rolling mill layout was developed to achieve an in-line heat treatment process of the wire rods, together with the facilities to use high rolling speeds and to produce wire rods in coils or bundles according to their diameters. The developed quenching system provides extremely high cooling speeds for the wire rods surface, before passing over a natural and slow cooling conveyor. This arrangement will transform their metallurgical structure as to acquire the mechanical properties required in modern designs. An economic comparison of this method with classical methods used in the production of high strength steel wire rods has clearly shown the excellent economic and operational advantages of those produced by in-line heat treatment technology.

Due to the fact that this technology requires good quality cooling water in sufficient flow rate, a water treatment system was developed on the basis of "Zero effluent/pollution discharge" concept. In this concept, whole quantities of waste water in the rolling mill are properly treated for optimum reuse in cooling circuits, in order to minimize make-up water consumption and to prevent environment pollution by effluent/blow-down discharged from these circuits. The application of these innovations in rolling mill plants in Syria, and the use of high quality steel wire rods in structural and industrial designs, in addition to develop the water treatment systems as outlined in this article, will constitutes an important contribution to the economic development and the environment protection in Syria.

المراجع

1. Augusti, A. "Flexible Finishing Systems in Rolling Mills", Steel Times International (September 1992).
2. Betz, "Handbook of Industrial Water Conditioning", Betz Laboratories Inc., 7th Ed. (1976).
3. Brauer, H. "Further Development of 3-Roll Blocks", Metallugrical Plant & Technology (MPT), 4 (1992).
4. Budd, Dr. and Kruse, M. "New Development of Wire Rod Rolling Technology for High Alloyed Materials", SMS Technical Report (1992).
5. Feldmann, U. "Controlled Cooling of Rolled Materials", Iron & Steel Engineer (January 1980).
6. Jalil, A. A. "Modern Technology for Rolling and Processing of Steel Wire Rods", Morgan Construction Co. Technical Bulletin (1991).
7. Nilles, P. "Production of High Quality Rebars", MTP, 1 (1990).
8. Nobrega, M. A. and Borato, F. "World Fastest Rood and Bar Mill", Morgan Construction Co. Technical Bulletin (1991).
9. Polukhin, P. and Fedosov, N. "Rolling Mill Practice", Moscow (1982).
10. Tselikov, A. and Zyurin, V. "Rolling Mill Practice", Moscow (1988).
11. أبو جهجاه، جميل "المعادن: خواصها – اختباراتها – معالجتها الحرارية"، جامعة دمشق (1981).
12. سوفوروف، أ. "تشكيل المعادن بالضغط"، موسكو (1978).
13. عازر، فؤاد "تشكيل المعادن"، جامعة دمشق (1993).