

تأثير بنية الفولاذ المتجانسة على مقاومته للاهتراء

د. أحمد محمود سلامة*

(تاريخ الإيداع 4 / 9 / 2011. قُبِلَ للنشر في 1 / 11 / 2011)

□ ملخص □

في هذه الدراسة قمنا باختيار عشرة أنواع من الفولاذ ذات البنى المختلفة، وإجراء تجارب عليها لدراسة تأثير النظام الحراري الذي تتعرض له على تجانس البنية البلورية للفولاذ، ومن ثم تأثير ذلك على مقاومة الاهتراء، وربط هذه الدراسة بتأثير ارتفاع درجة الحرارة في منطقة الاحتكاك للوصول إلى اختيار أفضل أنواع الفولاذ المقاوم للاهتراء في تصنيع الازدواجات الاحتكاكية.

الكلمات المفتاحية: الاحتكاك، الاهتراء، الفولاذ، الأراجاع.

* مدرس - قسم هندسة التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Effect of Heterogeneous Steel Structure on Wear Resistance

Dr. Ahmad Mahmoud Salamah *

(Received 4 / 9 / 2011. Accepted 1 / 11 / 2011)

□ ABSTRACT □

In this study, we have selected ten different types of steel structure, conducting experiments to highlight the effect of the thermal system on the homogeneity of the crystalline steel structure. This research also examines the effect of the rise in temperature in order to select the best types of wear-resistant steel in manufacturing frictional pairs.

Keyword: Friction, Wear, Steel, Tempering.

* Assistant Professor, Department of Design & Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تشكل ظاهرة الاحتكاك حيزاً مهماً في الصناعة، واستثمار الآلات، وعقد الاحتكاك، لهذا فإن أبحاثاً كثيرة درست هذه الظاهرة والمشاكل الناتجة عنها في محاولة لبلوغ الفهم الصحيح، وإعطاء الحلول العملية لهذه المشاكل. رغم ذلك فإن عدداً من المشاكل التي يسببها الاحتكاك لا زالت تثير كثيراً من الجدل حولها، أحدها يتعلق بكيفية تأثير درجة الحرارة الناتجة عن الاحتكاك على بنية الفولاذ وبالتالي على مقاومته للاهتراء.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير درجات حرارة الإرجاع على الاستقرار البنيوي للفولاذ، وبالتالي على مقاومته للاهتراء، ومقارنة هذا التأثير مع تأثير ارتفاع درجات الحرارة نتيجة الاحتكاك؛ وذلك للتوصل إلى اختيار صحيح لأنواع الفولاذ العاملة في ازدواجات احتكاكية مفتوحة تؤدي إلى الاحتكاك المولد للحرارة.

طرائق البحث ومواده:

في التطبيق العملي لتقدير مقاومة الفولاذ للاهتراء جرت العادة الأخذ بعين الاعتبار الخواص الميكانيكية للفولاذ وعدم ربط هذه الخواص مع النظام الحراري الذي من خلاله تم الحصول على الفولاذ [1]، هذا يقود إلى أن خواص الفولاذ يمكن أن تكون متشابهة، مثلاً القساوة تكون واحدة لنوعين من الفولاذ أو نوع واحد، بينما يختلفان في البنية، هذا من الأسباب الرئيسية التي تفرض مقاومة اهتراء مختلفة لنوعين من الفولاذ عند قساوة واحدة. مع العلم أن أكثرية البنى المتجانسة يمكن الحصول عليها عند درجات حرارة واحدة للإرجاع [2].

بهدف دراسة هذه الخصائص تم إجراء تجارب لتقدير مقاومة الاهتراء لأنواع مختلفة من الفولاذ في ظروف الاحتكاك الانزلاقي على جهاز اختبار المواد على الاحتكاك كما في الشكل (1) الموجود في جامعة دمشق ومبدأ عمله هو احتكاك عينة اسطوانية مع قرص احتكاك (حجر جلخ) تحت تأثير حمل P ، (مع العلم أن أنواع الفولاذ المختلفة تم إرجاعها عند درجة حرارة واحدة لكل تجربة) حيث يدور قرص الاحتكاك بسرعة انزلاق V (M/S). تم اعتماد طريقة الفقد الوزني في تقدير مقاومة الاهتراء، وقيس الاهتراء بوزن العينات قبل الاختبار وبعده على ميزان حساس بدقة $0.001G$ نوع (SARTORIUS) وذلك بعد غسل العينة بالكحول وتجفيفها. اعتمدنا طريق الفقد الوزني في حساب شدة الاهتراء ومقاومته. شدة الاهتراء تحسب وفق العلاقة الآتية:

$$I = \Delta W / S \dots (1)$$

حيث إن:

I : معدل شدة الاهتراء g/mm^2 .

ΔW : الضياع في الوزن g .

S : مساحة سطح الاهتراء mm^2 .

بينما مقاومة الاهتراء تم حسابها كقيمة عكسية لمقدار الفقد الوزني $1/\Delta W$ أي واحدتها $1/g$.

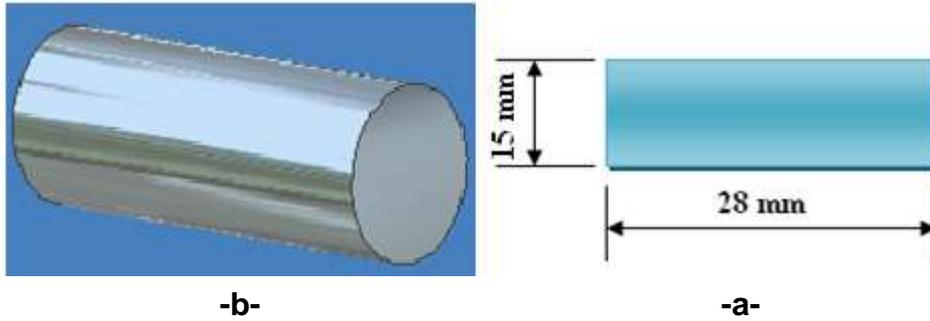


-b-

-a-

الشكل (1) جهاز الاختبار. -a- منظر عام للجهاز. -b- مخطط اختبار الاهتراء

تم تجهيز العينات وفق الأبعاد المطلوبة فكانت بقطر (15 mm) وبطول (28 mm) كما هو موضح بالشكل (2).



-b-

-a-

الشكل (2) -a- أبعاد عينة الاختبار. -b- منظور عينة الاختبار

أجرينا خمس تجارب حسب درجات حرارة الإرجاع المستخدمة ($500-100^{\circ}\text{C}$) في الحصول على أنواع الفولاذ فكانت بارامترات كل تجربة واحدة لكل أنواع الفولاذ، والمتغير الوحيد هو نوع الفولاذ لمعرفة مقاومة الاهتراء للأنواع المختلفة، والجدول (1) يبين بارامترات التجربة لأنواع الفولاذ.

الجدول (1) بارامترات التجربة لأنواع الفولاذ

زمن الاختبار min	الحمل Kg	سرعة الانزلاق m/sec	مساحة سطح العينة mm ²
15	10	1	176.714

قبل البدء في إجراء التجارب أجرينا تحليلاً طيفياً لأنواع الفولاذ المختلفة على جهاز التحليل الطيفي في مخبر المعادن في جامعة تشرين لمعرفة تركيبها الكيميائي ومن ثم الحصول على اسمها العالمي وفق برنامج Key To Metals Steel 2008 [3]. يوضح الجدول (2) تسمية أنواع الفولاذ إضافة إلى تركيبها الكيميائي.

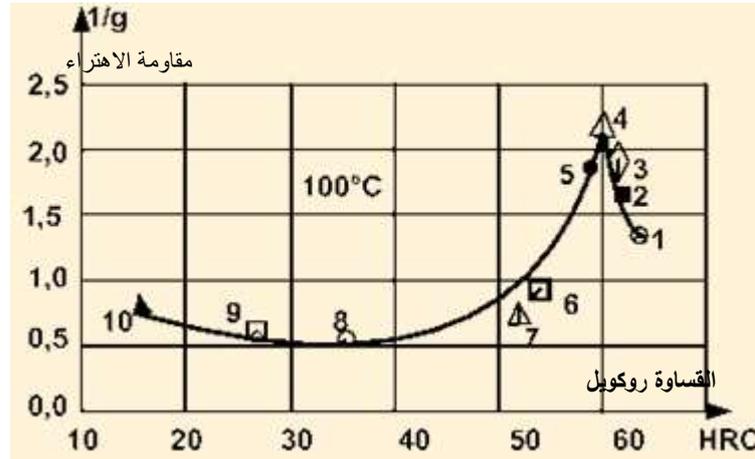
الجدول (2) تسمية أنواع الفولاذ وتركيبها الكيميائي

Composition (%)Chemical											
1	U10										
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Al	V	Ti
	0.150	0.30	0.60	0.025	0.0250			0.03	0.02	0.05	0.03
2	X155CrvMo121										
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr					
	0.440	0.250	0.650	0.035	0.035						
3	X75wcrv1841										
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V Ti			
	0.70	0.45	0.400	0.030	0.030	3.80	0.60	1.10			
4	95Ch18										
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	V
	0.170	0.350	0.40	0.0250	0.0250			0.03		0.03	0.050
5	C32D2										
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo Cr	Nb	Al	Ti	V
	0.324	0.50	11.50	0.06	0.030		0.50				
6	Ck45										
Fe	C	Si	Mn	P	S	N	Al	Ti	V		
	0.970	0.150	0.290	0.0250	0.0250	0.0070					
7	45Ch										
Fe	C	P	Mn	Si	Cr	Mo	S	V			
	-1.6000 1.5000	0.030 0	-0.4500 0.1500	-0.4000 0.1000	11.5	0.6000- 0.8000	0.0300	0.900- 1.1000			
8	C98DP										
Fe	C	Mn	P	S	Cr	Mo	Si	Al		Cu	
	0.78	-0.65000 0.5000	0.0200	0.025 0	0.1200	0.0300	0.150	0.0100		0.1200	
9	Rst 34-2										
Fe	C	Mn	P	S	Cr	Si	Al			Cu	
	0.420	0.650	0.025	0.035	0.500	0.40				0.300	
10	G13L110										
Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
	0.130	0.10	0.412	0.040	0.040	0.101	0.0111	0.024	0.020	0.007	0.123

تم في هذا البحث استخدام القساوة كمييار للنوعية كما تم تقدير مقاومة الاهتراء كقيمة عكسية للفقد الوزني $1/g$ ، حيث تمت مقارنة مقاومة الاهتراء لصفوف بنيوية مختلفة للفولاذ وعلاقتها بالقساوة التي حصلت عند درجات حرارة إرجاع واحدة. من المعروف أنه عند زيادة القساوة، فإن المستوى العام لمقاومة الاهتراء يزداد [4]. تم تحضير 15 عينة من كل نوع من الفولاذ وفق الأبعاد المذكورة أعلاه، قسمناها إلى خمس مجموعات كل مجموعة ثلاث، وبعد ذلك تم إرجاع كل مجموعة عند درجة حرارة مختلفة تراوحت بين $(100-500^\circ\text{C})$ درجة، بعدها أخذت قساوة العينات.

النتائج والمناقشة

تم اختيار عشرة أنواع من الفولاذ تمثل جميع البنى البلورية لإجراء التجارب عليها. وتم تحديد تركيبها من العناصر السبائكية بواسطة جهاز التحليل الطيفي للمعادن كما هو موضح بالجدول (2). من أجل السهولة في تحليل نتائج تجريب كل نوع من أنواع الفولاذ المختارة للتجارب تم إعطاء رقم متسلسل لكل نوع من أنواع الفولاذ وفق درجة مقاومته للاهتراء عند درجة حرارة إرجاع منخفضة (100°C) وتم رسم العلاقة بين القساوة ومقاومة الاهتراء الشكل (3).



الشكل (3) تأثير درجة حرارة إرجاع الفولاذ على مقاومته للاهتراء

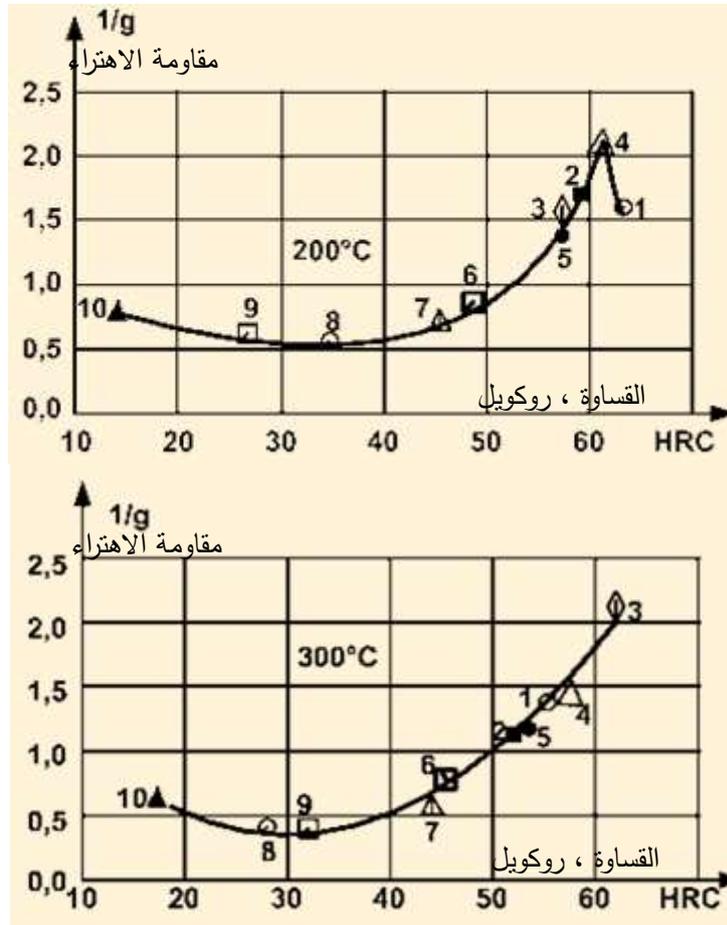
1-U10, 2-X155CrVMo121, 3-R10, 4-95Ch18, 5-C32D2, 6-Ck45

7-45Ch, 8-C98DP, 9-Rst34-2, 10-110G13L

من الشكل (3) نلاحظ أن زيادة القساوة حتى (60HRC) عند درجة حرارة إرجاع (100°C) ، يؤثر بشكل ايجابي على مقاومة الاهتراء. ومن ثم تتخفف مقاومة الاهتراء انخفاضاً حاداً بالرغم من أن القساوة تزداد بمقدار 3-4 (HRC) ومقاومة الاهتراء العظمى عند درجة حرارة الإرجاع هذه يملكها الفولاذ المارتنسيطي 95Ch18 ، بينما يملك الفولاذ المارتنسيطي المتبقي $Rst34-2$ والفولاذ الأوستنيتي 110G13L عند درجة حرارة الإرجاع هذه مقاومة اهتراء منخفضة جداً بالنسبة للفولاذ المارتنسيطي 95Ch18 والبرليتي $C32D2$.

والتسخين التالي عند درجات حرارة مرتفعة سمح بمتابعة وضع الفولاذ على منحنى علاقة مقاومة الاهتراء بالقساوة. إن شكل العلاقة السابقة عند درجة حرارة إرجاع (200°C) لا يتغير، لكن توضع أنواع الفولاذ على المنحنى يتغير الشكل (4)، حيث يتم الحفاظ على مقاومة منخفضة للفولاذ في منطقة الاهتراء الهش. كما تتخفف مقاومة الاهتراء للفولاذ الكريبيدي $R18$ ولكن مجموعة كبيرة من الفولاذ تبقى على المستوى السابق من مقاومة الاهتراء.

وعند درجة حرارة إرجاع (300°C) يتغير الشكل الأولي للعلاقة كما في الشكل (4) إذ إن الفولاذ الكريبيدي R18 له المركز الأول بمقاومة الاهتراء، وأنواع الفولاذ U10, X155CrVMo121, 95Ch18, C32D2 عند درجة حرارة الإرجاع هذه تملك تقريبا مقاومة اهتراء واحدة عند تقارب قساوته، بينما نوعا الفولاذ C98DP, Rst34-2 تبادلان الأماكن بالقساوة لكن مستوى مقاومتها للاهتراء لم يتغير.

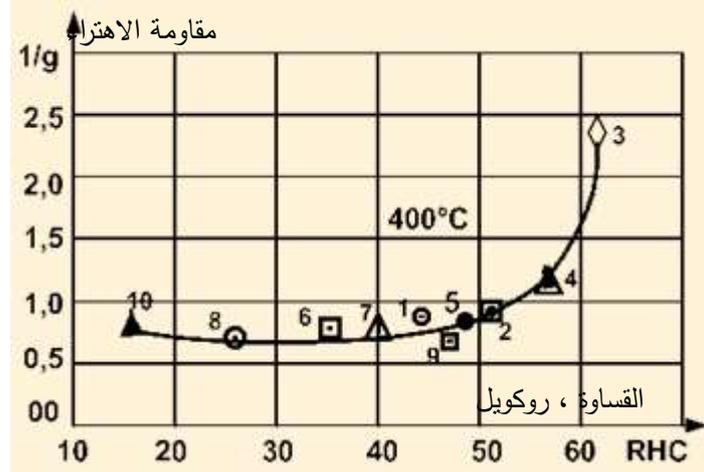


الشكل (4) تأثير درجة حرارة إرجاع الفولاذ على مقاومته للاهتراء

1- U10, 2- X155CrVMo121, 3- R10, 4- 95Ch18, 5- C32D2, 6- Ck45

7- 45Ch, 8- C98DP, 9- Rst34-2, 10- 110G13L

عند درجة حرارة إرجاع (400°C) تتغير العلاقة الأولى بشكل ملحوظ باستثناء نوعي الفولاذ R18, X155CrVMo121، بقية أنواع الفولاذ الأخرى تملك مقاومة اهتراء واحدة تقريباً الشكل (5) بالرغم من إن القساوة تغيرت ضمن المجال (16-50HRC). إن انخفاض مقاومة الاهتراء في منطقة ارتفاع القساوة وعند قساوة 60HRC على هذا المنحني لا يوجد.

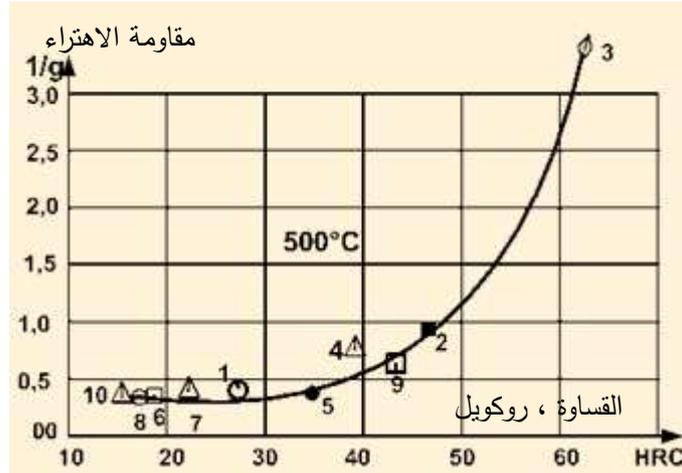


الشكل (5) تأثير درجات حرارة الإرجاع العالية على مقاومة الفولاذ للاهتراء

1- U10, 2- X155CrVMo121, 3- R10, 4- 95Ch18, 5- C32D2, 6- Ck45
7- 45Ch, 8- C98DP, 9- Rst34-2, 10- 110G13L

عند درجة حرارة الإرجاع (500°C) الشكل (6) لا يتغير توزيع أنواع الفولاذ حسب مقاومتها للاهتراء بشكل كبير والحاصلة عليها عند درجة حرارة إرجاع (400°C)، في المركز الأول ثلاثة أنواع من الفولاذ R18, X155CrVMo121, 95Ch18، والأخرى تبادلت المراكز على المنحني مع تغير القساوة، لكن هذا انعكس بشكل طفيف على مقاومتها للاهتراء. نلاحظ أن قساوة الفولاذ المارتنسيطي المتبقي 2-Rst34 تزيد بشكل كبير لكن مقاومته للاهتراء تبقى منخفضة.

إن عملية إرجاع أنواع الفولاذ التي تتم عند درجات حرارة (400-500°C) تقسم جميع أنواع الفولاذ حسب مقاومتها للاهتراء إلى مجموعتين: R18 - القساوة و مقاومة الاهتراء لهذا النوع من الفولاذ ازدادت، وبقيّة أنواع الفولاذ الأخرى التي تملك مقاومة اهتراء واحدة وقساوة مختلفة بشكل محسوس من (48HRC - 15) الشكل (6).



الشكل (6) تأثير درجات حرارة الإرجاع العالية على مقاومة الفولاذ للاهتراء

1- U10, 2- X155CrVMo121, 3- R10, 4- 95Ch18, 5- C32D2, 6- Ck45
7- 45Ch, 8- C98DP, 9- Rst34-2, 10- 110G13L

إذا استثنينا الفولاذ الكريبيدي R18 فإن جميع أنواع الفولاذ الأخرى (برليتي - مارتنسيطي - أوستنيتي - مارتنسيطي متبقي) عملياً عند قساوة مختلفة ضمن المجال (48HRC - 15) كان لها مقاومة اهتراء واحدة تقريباً، بينما

مقاومة الاهتراء للفولاذ $X155CrVMo121$ أعلى من بقية أنواع الفولاذ بمرتبتين تقريباً. هذا التحليل يوضح الموارد الحقيقية لمقاومة اهتراء أنواع الفولاذ ولجميع الصفوف البنيوية والمتانة البنيوية في ظروف التأثير الحراري. خلال تعرض منطقة الاحتكاك لارتفاع كبير في درجة الحرارة يفضل استخدام أنواع الفولاذ المقساء بطريقة الكرينة نوع $R18$ نلاحظ أن مقاومة الاهتراء للفولاذ الأوستنيتي $110G13L$ في درجات حرارة الإرجاع جميعها ثابتة، وهذا يعود إلى أن بنية الأولية لا تتغير. بينما الفولاذ المارتنسيطي المتبقي $Rst34-2$ مقاومته للاهتراء عملياً تبقى ثابتة بالرغم من تغير بنيته الأولية باتجاه زيادة القساوة كما في الشكلين (5،6).

يملك كل من الفولاذ البرليني $U10, C32D2$ والفولاذ المارتنسيطي $95Ch18$ مقاومة للاهتراء عظمى عند درجات حرارة الإرجاع المنخفضة، وعند التسخين إلى درجات حرارة أعلى يغيران وضعيتهما على المخطط في مجال مقاومة الاهتراء المنخفضة، وذلك بسبب انخفاض القساوة الأولية. والانخفاض الحاد في قيمة القساوة ومقاومة الاهتراء للفولاذ البرليني $U10$ لا تسمح باستخدامه كفولاذ مقاوم للاهتراء في ظروف التأثير الحراري. يقع الفولاذ $X155CrVMo121$ في المجال الثاني لمقاومة الاهتراء، وعند درجة حرارة تسخين عالية تنخفض قساوته من (62HRC) عند درجة حرارة إرجاع ($100C^\circ$) إلى (48HRC) عند درجة حرارة إرجاع ($500C^\circ$)، كما إن مقاومته للاهتراء خلال ذلك تنخفض تقريباً بـ 1,5 مرة.

الفولاذ المارتنسيطي المتبقي $Rst34-2$ يظهر أنه لا يقترب من الفولاذ الكريبيدي في جميع درجات حرارة الإرجاع لأنه كان دائماً يملك مقاومة اهتراء منخفضة.

يمكننا استخدام نتائج التحليل كأساس في اختيار أنواع الفولاذ المقاوم للاهتراء مع الأخذ بعين الاعتبار مقاومته الحرارية، وقوى التحميل الخارجي في حالة وجود حبيبات حاكة وفي ظروف التأثير الحراري. يظهر الاستقرار البنيوي بشكل مباشر عند إجراء التجارب على الاهتراء وهذا يؤكد بانخفاض سرعة الاهتراء الأولية خلال اجرائها.

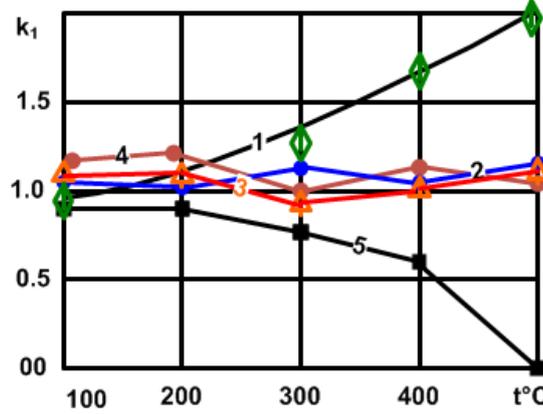
بعد إجراء تجربة لمدة (15 دقيقة) دون توقف كان الفولاذ الكريبيدي $R18$ يملك مقاومة اهتراء عالية بينما انخفضت مقاومة الاهتراء الأولية للفولاذ البرليني $C32D2$ خمس مرات، والفرق كان حوالي مرتين. على أساس هذه المعطيات نستنتج الآتي:

إن وحدة العمليات التي تؤدي إلى عدم الاستقرار البنيوي للفولاذ وبالتالي انخفاض مقاومته للاهتراء لها علاقة وثيقة بالتأثيرات الحرارية، وإن عدم الاستقرار البنيوي للفولاذ في منطقة الاحتكاك يماثل عدم الاستقرار البنيوي للفولاذ المعرض للإرجاع في فرن. إن المؤشرات الكمية لعدم الاستقرار البنيوي وقيمته المؤثرة على مقاومة الاهتراء في الوقت الراهن غير موجودة. من أجل هذا الهدف سندخل مفهوم عامل الاستقرار البنيوي k ، ونحدد عاملين:

k_1 - عامل الاستقرار البنيوي عند التسخين في فرن، وهو يعبر عن النسبة بين قساوة الفولاذ في حالة الإرجاع وقساوته دون إرجاع، وهو يصف الاستقرار البنيوي للفولاذ عند الإرجاع في مجال درجات الحرارة ($100-500C^\circ$)
 k_2 - عامل الاستقرار البنيوي عند التسخين في عملية احتكاك، ويحدد استقرار مقاومة الاهتراء. ويحسب كنسبة مقاومة الفولاذ للاهتراء بعد التجربة خلال زمن محدد على مقاومته للاهتراء بعد تجربة مدتها (3 دقائق)، و بالتالي يصف تغير مقاومة الاهتراء التي يسببها ارتفاع الحرارة الناتج عن الاحتكاك.

كل نوع من أنواع الفولاذ يملك صفاً بنيوياً خاصاً به، وبالتالي استقراراً بنيوياً مختلفاً في مجال درجات حرارة الإرجاع (100- 500°C)، يبين الشكل (7) هذا الاختلاف عند درجات الحرارة العالية للإرجاع، نلاحظ في هذه الحالة أن طابع تغير العامل k_1 يعتمد بشكل كبير على نوع الفولاذ (صف الفولاذ).

عند تقدير الاستقرار البنيوي للفولاذ من الضروري حساب دور الطور الكريبي في البنية المارتنسيكية. كقاعدة الكريبات مقاومة للصلب وذات ثبات عالٍ لتأثير درجات الحرارة والانتشار، وتملك قساوة عالية، إذ إنَّ الطور الكريبي يبدي مقاومة كبيرة لتأثير جزيئة الحبيبة الحاكة، وأكثر من ذلك، في كثير من الحالات، قساوته أعلى من قساوة الحبيبة الحاكة. [4]



الشكل (7) تأثير درجة حرارة التطرية على عامل الاستقرار البنيوي k_1

1-مارتنسيكي معتق. 2- كربيدي. 3-مارتنسيكي. 4- أوستنيتي. 5- برليتي

من أجل أنواع الفولاذ المارتنسيكي المتبقي عند زيادة درجة حرارة الإرجاع فإن العامل k_1 يزداد بمرتين تقريباً عند درجة حرارة (500°C) ويزيد عن القيمة التي توافق درجة حرارة إرجاع (100°C).

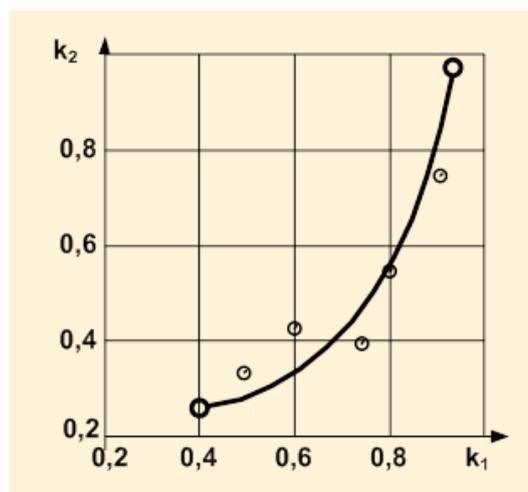
عند زيادة حرارة الإرجاع لأنواع الفولاذ الأوستنيتي، المارتنسيكي، الكريبي، فإن استقرارها البنيوي يبدو جيداً، بينما الفولاذ البرليتي الصف يملك مقاومة منخفضة للحرارة، وزيادة درجة حرارة الإرجاع حتى (500°C) لأنواع فولاذ هذا الصف يؤدي إلى التخفيض المضاعف للعامل k_1 ، وبالتالي إلى تغيير عامل الاستقرار البنيوي في ظروف الإرجاع لفولاذ جميع أنواع الصفوف. يمكن التمييز بين ثلاث مجموعات:

- أنواع فولاذ يزداد عامل استقرارها البنيوي k_1 عند زيادة درجة حرارة الإرجاع (مارتنسيكي متبقي).
- أنواع فولاذ يتناقص عامل استقرارها البنيوي k_1 عند زيادة درجة حرارة الإرجاع (برليتي).
- أنواع فولاذ لا يتغير عامل استقرارها البنيوي k_1 (أوستنيت، كربيدي، مارتنسيكي).

لذلك يمكن القول إنه وفق عامل الاستقرار البنيوي في ظروف الاهتراء يمكن تقسيم أنواع الفولاذ جميعها إلى:

- ممتن: يزداد استقراره البنيوي بارتفاع درجة الحرارة.
- غير ممتن: ينخفض استقراره البنيوي بارتفاع درجة الحرارة.
- مستقر: لا يتغير استقراره البنيوي بارتفاع درجة الحرارة.

يوجد ارتباط محدد بين العاملين k_1 ، k_2 فعند زيادة قيمة العامل k_1 فإن العامل k_2 يزداد؛ هذا يعني: عند زيادة الاستقرار البنيوي فإن مقاومة الاهتراء لهذا الفولاذ تزداد شكل (8).

الشكل (8) العلاقة بين العاملين K_1, K_2

الاستنتاجات والتوصيات

1. إن الارتباط الموجود بين العاملين k_1 ، k_2 يسمح بإثبات انه عند زيادة زمن الاهتراء نتيجة الحرارة المتولدة عن الاحتكاك تزداد الحرارة الحجمية للجسمين المتلامسين، هذا يعني حدوث عمليات مماثلة لعمليات الإرجاع في الفرن.
2. المعطيات التي تم الحصول عليها تسمح بإعادة النظر وتدقيق الاعتبارات الموجودة لاختيار أنواع الفولاذ المقاوم للاهتراء والمطبقة في الآليات ومنها الاهتراء بوجود حبيبات حاكة.
3. أن أنواع الفولاذ المقاوم للحرارة عُدَّت سابقا أنها الأفضل في الإنتاج القالبى (السباكة) لذلك استخدمت بشكل واسع في تشكيل المعادن في الحالة الساخنة، وبناء على هذا عُدَّ أن أفضل فولاذ مقاوم للاهتراء هو الاوستنيت $110G13L$. إن تحليل الخواص الميكانيكية لأنواع الفولاذ المختلفة الصفوف البنوية، والارتباط فيما بينها، ومقاومتها للاهتراء دلت على خطأ هذه الاعتبارات.
4. إن أفضل نوع فولاذٍ وفق مقاومة الاهتراء الأولية، مع حساب التأثير الحراري الممكن، تبيَّن أنه الفولاذ الكريبيدي الصف $R18$ ، أما الفولاذ البرليني $C32D2$ وبوجود طاقة مختزنة عالية يملك مقاومة اهتراء أولية مرتفعة، لكن مع وجود التأثير الحراري فإنه تتخضع مقاومته للاهتراء بشدة مقارنة مع الفولاذ الكريبيدي الصف $R18$.
5. هذه المعطيات تسمح باستنتاج أنه من الضروري اعتبار خواص الفولاذ كالمقاومة الحرارية، والقساوة أنها من أهم مميزات مقاومة الاهتراء.
6. مما تقدم لا ينصح باستخدام الفولاذ البرليني الصف في الأوساط التي تعمل في ظروف حرارية مرتفعة، وبوجود اهتراء عن طريق الحبيبات الحاكة، لأن عامل استقرارها البنوي حتى في درجات الحرارة المنخفضة دائما أقل من الواحد $k_1 < 1$.
7. في المستقبل من الضروري وضع أنظمة محددة للمعطيات التجريبية من أجل الدقة في المعايير المقاسة لتصنيف أنواع الفولاذ وفق مقاومتها للاهتراء، أي استخدام صف (المواد المقاومة للاهتراء).

المراجع

- 1- BLAU, P. J. “*Friction Science and Technology*. CRC Press-2009, 420P.
- 2- GNECCO, E. M. *Fundamentals of Friction and Wear*. ISBN-2007, 714p.
- 3- Key to Metals Steel, 1999-2008 The World’s Most Comprehensive Steel Database. p. 456.
- 4- СОРОКИН Г. М. *Взаимосвязь износостойкости и механических свойств стали*. Вестник машиностроения. N11, 1990, С. 9-13.