

## دراسة تأثير استخدام الألياف الحديدية على خواص المصبوبات الحرارية

د. زين العابدين رؤوف محمد رافع      د. فراس فيصل عبد الحميد الحمداني      عبير عبد القادر صالح الراوي  
قسم الهندسة المدنية/جامعة بغداد

### الخلاصة

تد في هذا البحث دراسة الخواص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية وعلى ضوء نتائج التجارب ظهر أنه بارتفاع درجة الحرارة من ٧٠٠ الى ٩٠٠ °م تزداد نسبة المسامية الظاهرية للمصبوبات الحرارية وتقل الكثافة الكلية . وهذا يحدث بسبب تفكك الروابط الهيدرووليكية للسمنت الالوميني . اما عند ارتفاع درجة الحرارة الى أعلى من ٩٠٠ °م، يبدأ تكوين الروابط السيراميكية الناتجة عن التفاعلات السالبة بين السمنت الالوميني والركام البوكسايتي، عندئذ تقل نسبة المسامية وتزداد الكثافة الكلية للمصبوبات الحرارية.

تساهم الالياف الحديدية بشكل ايجابي في انخفاض نسبة المسامية وزيادة الكثافة الكلية للمصبوبات الحرارية ويزداد التأثير الايجابي للالياف الحديدية في المصبوبات الحرارية بزيادة محتوى الالياف لحين الوصول الى نسبة الياف 1.5% حجماً. اما فيما يخص مقاومة المصبوبات الحرارية المسلحة للتشظية، فقد اتسمت جميع نماذج المصبوبات الحرارية المسلحة بمقاومتها للتشظية في جميع درجات الحرارة ولمختلف نسب التسليح بالالياف الحديدية.

يزداد تحسن خواص المصبوبات الحرارية المسلحة مع ارتفاع درجة حرارة حرق هذه المصبوبات ولكن لم يذن بالامكان تجاوز درجة الحرارة ١٠٠٠ °م نتيجة لأكسدة الالياف الحديدية المستخدمة عند هذه الدرجة الحرارية.

## EFFECT OF STEEL FIBERS ON REFRACTORY CASTABLES

Abeer Abdul Kader AL-Rawi      Dr. Zain AL-Abdeen Raouf      Dr. Firas Faisal AL-Hamdani  
Civil Engineering, University of  
Baghdad.

### ABSTRACT

Reinforcement of refractory castables with steel fibers improves their strength for cracking and spalling and expands the service life.

The results show that raising the temperature from 700°C to 900°C causes an increase in porosity and decrease in bulk density for refractory castables. This happens because of decomposition of the hydraulic bond of alumina cement.

When the temperature is raised higher than 900°C , ceramic bond is formed as a result of solid reaction between alumina cement and bauxite aggregate. This leads to reduction of the porosity and increase in the bulk density. Steel fibers are affected positively in reducing the porosity and increasing the bulk density for refractory castables. This positive effect increases with increase in the fibers content up to 1.5%.

All castable samples have good spalling resistances at all temperatures for different percentage of steel fibers.

Improvement of reinforced refractory castables increases with rising temperature of firing, but it was not possible to raise the temperature above 1000°C because of the oxidation of the steel fibers.

## كلمات الدلالة

المصبوبات الحرارية، الألياف الحديدية، ركام البوكسائيت، السمنت الألوميني، معايير التصدع، الموصولية الحرارية

## المقدمة

تتكون المصبوبات الحرارية من ركام حراري متدرج مع مادة رابطة لها القدرة على اعطاء كتلة صلبة قبل الحرق وبعده حتى درجات حرارة عالية. وتكون المصبوبات الحرارية، بحالتها الجافة، مشتملة على مواد حرارية مختلفة الاحجام ترتبط مع بعضها بروابط هيدروليكية بعد اضافة الماء اليها ثم ترتبط بروابط سيراميكية عند تعرضها الى درجات حرارة عالية. وهذا ما يجعلها ذات خصائص مقاومة للحرارة (Walker, 1961), (Glassgold, 1982), (Robson, 1978).

لا تستخدم المصبوبات الحرارية للاغراض الانشائية وانما تستخدم كطبقة واقية للغلاف الحديدي لافران الحرق والتسخين وتعتبر مادة استهلاكية لانها تتطلب الاستبدال بعد كل فترة من العمر الخدمي حيث يكون العمر الخدمي للمصبوبات الحرارية قصيراً نسبياً بسبب ميلها الى التشقق والتشطي عند تعرضها الى تغيرات حرارية كبيرة. وللاسباب المذكورة انفاً استخدمت الألياف في تسليح هذه المصبوبات، (ACI, 1983).


منذ عام 1970 بدأت التجارب العملية لاستخدام الألياف الحديدية والألياف الكربون في تسليح المصبوبات الحرارية وذلك لتحسين مقاومة التشطي والتشقق لهذه المصبوبات واطالة العمر الخدمي لها وبالتالي تقليل كلف الصيانة لبطانة الافران الحرارية. وفي عام 1976 استخدمت 181.6 طن من الألياف الحديدية غير القابلة لاصداً في تسليح 6500 طناً من المصبوبات الحرارية التي استعملت في مختلف الصناعات، المصهرات، العمليات البتروكيمياوية وغيرها. ان هذا النمو يدل على ان استخدام الألياف الحديدية في تسليح المصبوبات الحرارية يوازن نسبة الكلفة/الفعالية.

ان تسليح المصبوبات الحرارية اعطى تحسناً لخواصها مثل مقاومة كل من الانثناء، الصدمة الحرارية، التشطي والتشقق. وكذلك أدى تسليح المصبوبات الحرارية الى زيادة العمر الخدمي لهذه المصبوبات (Lankard, 1978), (Havranek, 1983), (Lankard, 1983).

## الجانِب العملي

يهدف البحث الى محاولة تحسين خواص المصبوبات المنتجة محلياً باستخدام السمنت الالوميني المنتج في معمل سمنت الكوفة والركام البوكسايتي المنتج في الشركة العامة لصناعة الحراريات. هذا التحسين يتضمن اضافة نسب مختلفة من الالياف الحديدية الى المصبوبات الحرارية وذلك لزيادة مقاومتها للتشقق والتشظي. ينسجم الجانب العملي في هذا البحث الى مجموعتين، المجموعة الاولى تم فيها دراسة تأثير محتوى الركام البوكسايتي الحراري على الخواص الميكانيكية والحرارية للمصبوبات الحرارية وتم اعتماد نسبة خلط سمنت: ركام (١:١)، التي اعطت افضل النتائج لاستخدامها في أعمال البحث.

اما المجموعة الثانية فقد تم فيها تسليح هذه المصبوبات الحرارية بنسب من الالياف الحديدية من نوع 309 تتراوح بين (0, 0.75, 1.0, 1.5) % حجماً وحرقت هذه المصبوبات المسلحة في درجات حرارة تتراوح بين (700, 800, 900, 1000) °م وذلك لدراسة تأثير درجة حرارة الحرق ومحتوى الالياف الحديدية على خواص المصبوبات الحرارية.

تمتاز الالياف الحديدية المستخدمة في هذا البحث بكونها مصنوعة من الفولاذ الذي لا يصدأ (Stainless steel) بقطر ٠,٠٣٢٥ سم وطول ٢,٥ سم، ذات نهايات منحنية وبالشكل التالي: . يبين الجدولان رقم (1) ورقم (2) خواص السمنت الالوميني الكيميائية والفيزيائية (BS 915, 1972) وبوضح الشكل رقم (1) منحنى حيود الاشعة السينية لهذا السمنت أما الجدولان رقم (3) ورقم (4) فيبينان التحليل الكيميائي وخواص الركام البوكسايتي المستخدم والشكل رقم (2) يوضح منحنى حيود الاشعة السينية للركام المستخدم.

## النتائج

على ضوء نتائج فحص معايير التصدع وفحص مقاومة الانضغاط للمصبوبات الحرارية غير المسلحة، تم اعتبار نسبة خلط سمنت: ركام 1:1 وزناً لاكمال البحث. قُبمت نتائج نسبة الخلط ووجد ان المصبوبات الحرارية الناتجة هي من صنف A (Class A) طبقاً للمواصفة الأمريكية (ASTM C-401, 1990) اذ لم يزد الانكماش الخطي Permanent linear shrinkage عن 1.1% بعد حرق النماذج لمدة 5 ساعات بدرجة حرارة قصوى 1200 °م. الجدول رقم (5) يوضح نتائج فحوص معايير التصدع ومقاومة الانضغاط والانكماش الخطي والمسامية لمختلف نسب الخلط.

### الإسامية الظاهرية

تم إجراء فحص المسامية الظاهرية للمصبوبات الحرارية المسلحة وغير المسلحة باستخدام نماذج بأبعاد (70×70×70) ملم بعد حرقها بدرجات حرارة (700، 800، 900 و 1000)°م وبموجب المواصفة القياسية الأمريكية ASTM C20.

تزداد مسامية المصبوبات الحرارية بارتفاع درجة حرارة الحرق ضمن المدى 700-900°م وبعدها تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة إلى أعلى من 900°م.

كذلك تنخفض مسامية المصبوبات الحرارية بإضافة الألياف الحديدية وتتراوح نسبة الانخفاض بين 10.7-13.3% عند إضافة نسبة 1% حجماً من الألياف الحديدية إلى المصبوبات الحرارية، وتزداد نسبة الانخفاض لتصل إلى 14.8% عند حرق المصبوبات الحرارية المسلحة بنسبة 1.5% حجماً من الألياف الحديدية في درجة حرارة 1000°م وتختلف هذه النسب باختلاف طريقة الرص المستخدمة. الشكل رقم (3) يوضح العلاقة بين المسامية الظاهرية ودرجة حرارة حرق المصبوبات الحرارية المسلحة.

### الكثافة الكلية (المكورة)

تم إجراء فحص الكثافة الكلية للمصبوبات الحرارية المسلحة وغير المسلحة باستخدام نماذج على شكل مبرازي مستطيلات بأبعاد (230 × 114 × 64) ملم بعد حرقها بدرجات حرارة (700، 800، 900 و 1000)°م مع إبقاء النماذج عند درجة حرارة الحرق القصوى لمدة (5) ساعات وبموجب المواصفة القياسية الأمريكية ASTM C134.

تنخفض كثافة المصبوبات الحرارية بارتفاع درجة حرارة حرقها ضمن المدى 700-900°م. بعد ذلك تزداد كثافتها في درجة حرارة حرق أعلى من 900°م. وتزداد كثافة المصبوبات الحرارية المسلحة بزيادة نسبة الألياف حيث تصل نسبة الزيادة إلى 8% في حالة إضافة نسبة الألياف الحديدية 1.5% حجماً وحرق هذه المصبوبات عند درجة حرارة 1000°م. والشكل رقم (4) يوضح العلاقة بين الكثافة الكلية ودرجة حرارة حرق المصبوبات الحرارية المسلحة.

### التغير الطولي

تم إجراء فحص التغير الطولي للمصبوبات الحرارية المسلحة وغير المسلحة باستخدام نماذج بأبعاد (70×70×70) ملم بموجب المواصفة البريطانية BS.1902 Section 7.6.

تزداد نسبة التقلص في المصبوبات الحرارية بارتفاع درجة حرارة الحرق ويمكن التغلب على هذا التقلص بإضافة نسبة من الألياف الحديدية حيث تنخفض نسبة التقلص في المصبوبات الحرارية المسلحة بزيادة محتوى الألياف، وتتراوح نسبة الانخفاض بين (6.6-21.6)% عند إضافة نسبة 1.5% حجماً من الألياف

الديديية للمصبوبات الحرارية وحرقتها في درجات حرارة 700-1000 °م، الشكل رقم (5) يوضح العلاقة بين درجة حرارة الحرق ونسبة التقلص الطولي في المصبوبات الحرارية المسلحة.

### معايير التصدع

تم ايجاد قيم معايير التصدع للمصبوبات الحرارية بأتباع طريقة التحميل النقطي وحسب المواصفة القياسية الامريكية ASTM C133 بأستخدام نماذج بأبعاد (٢٣٠×١١٤×٦٤) ملم بعد حرقتها بدرجات حرارة (٧٠٠، ٨٠٠، ٩٠٠ و ١٠٠٠) °م مع ابقاء النماذج لمدة ٥ ساعات عند درجة الحرارة القصوى. ينخفض معايير التصدع للمصبوبات الحرارية بارتفاع درجة حرارة الحرق بين 700-٩٠٠ °م وبعدها يزداد عدد درجات حرارة اعلى من 900 °م، كما يزداد معايير التصدع عند تسليح المصبوبات الحرارية بنسبة 1% حجماً من الالياف الحديدية وتتراوح نسبة الزيادة بين (8-82)% وترتفع هذه النسبة لتصل الى 150% عند اضافة نسبة الياف حديدية 1.5% حجماً، وتتنخفض نسبة الزيادة في معايير التصدع للمصبوبات الحرارية المسلحة بنسب مختلفة من الالياف الحديدية عند ارتفاع درجة الحرارة الى 1000 °م وذلك بسبب اكسدة هذه الالياف وتكسرها والشكل رقم (6) يبين العلاقة بين درجة حرارة الحرق ومعايير التصدع للمصبوبات الحرارية المسلحة.

### مقاومة الانضغاط

تم ايجاد قيم مقاومة الانضغاط للمصبوبات الحرارية بموجب المواصفة القياسية البريطانية BS. 1902 Section 4.3 بأستخدام نماذج بأبعاد (٧٠×٧٠×٧٠) ملم. تنخفض مقاومة انضغاط المصبوبات الحرارية بارتفاع درجة حرارة الحرق الى 900 °م، ثم تبدأ بالزيادة في درجات حرارة اعلى من ذلك، كما تزداد مقاومة انضغاط المصبوبات الحرارية المسلحة بزيادة محتوى الالياف اعتماداً على نسبة الفجوات فيها وتتراوح نسبة الزيادة بين (٦-٢٣,٦)% عند اضافة نسبة 0.75% حجماً من الالياف الحديدية الى المصبوبات الحرارية بينما تتراوح نسبة الزيادة بين (11.2-27)% عند اضافة نسبة 1% حجماً وحرقت هذه المصبوبات في درجات حرارة 700-1000 °م بينما تنخفض نسبة الزيادة في حالة اضافة الياف حديدية بنسبة 1.5% حيث تتراوح نسبة الزيادة في مقاومة انضغاط المصبوبات الحرارية بين (12-١١)%. والشكل رقم (7) يوضح العلاقة بين درجة حرارة الحرق ومقاومة انضغاط المصبوبات الحرارية المسلحة.

### الموصلية الحرارية

تم قياس الموصلية الحرارية بأستخدام نماذج بشكل متوازي مستطيلات وبأبعاد (٢٠٠ × ١٠٠ × ٥٠) ملم

باستخدام جهاز قياس الموصلية الحرارية نوع TC-41. تتخفض الموصلية الحرارية للمصبوبات مع ارتفاع درجة حرارة الحرق الى 900 °م ثم تبدأ بالزيادة في درجات حرارة اعلى من ذلك. وتزداد الموصلية الحرارية للمصبوبات الحرارية المسلحة مع زيادة محتوى الألياف حيث تزداد الموصلية الحرارية بنسبة 46% عند اضافة 1% حجماً من الألياف الحديدية وترتفع نسبة الزيادة لتصل الى 52% عند اضافة نسبة 1.5% حجماً من الألياف الحديدية الى المصبوبات الحرارية ودرجتها في درجة حرارة 1000 °م. والشكل رقم (8) يبين العلاقة بين درجة حرارة الحرق والموصلية الحرارية للمصبوبات الحرارية المسلحة.

### مناومة التشظية

تم اجراء هذا الفحص بموجب المواصفة القياسية البريطانية BS 1902 Section 7.6 باستخدام نماذج بابعاد (200 × 100 × 50) ملم. اتسمت نماذج المصبوبات الحرارية المسلحة بمقاومتها الجيدة ضد التشظي حيث لم تعاني تكسراً او تقشراً عند تعرضها الى 20 دورة من التسخين والتبريد حسب المواصفات اعلاه. تزداد مقاومة المصبوبات الحرارية ضد التشظي مع زيادة محتوى الألياف، حيث تتخفض مقاومة انضغاط المصبوبات الحرارية غير المسلحة بنسبة تتراوح بين (67-78)% بعد تعريضها الى 20 دورة من التسخين والتبريد في حين تراوحت نسبة الانخفاض في مقاومة انضغاط المصبوبات المسلحة بنسبة 1.5% حجماً من الألياف الحديدية، بين (40-55)% عند حرق هذه المصبوبات في درجات حرارة 700-1000 °م والشكل رقم (9) يوضح ذلك.

### المصادر

- Robson, T.D., (1978), "Refractory Concretes: Past, Present and Future" ACI Publication SP-57 (Refractory Concretes), pp. 1-10.
- Glassgold, I.L., (1982), "Repairing Monolithic Refractory Failures" ACI Publication SP-74 (Monolithic Refractory), pp. (141-152).
- Walker, H., (1961), "Modern Refractory Practice" Harbison- Walker Refractories company, Pittsburgh, Pennsylvania. Fourth edition, pp. (163, 227, 270).
- ACI committee 547, (1983), "Report Refractory Concrete".
- Lankard, D. R. (1978), "Steel Fiber Reinforced Refractory Concrete" ACI Publication SP- 57 (Refractory Concrete), pp. (241-263).
- Havranek, P.H., (1983), "Recent Development in Abrasion and Explosion- Resistant Castables" Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 62, No. 2, pp. 234.



Lankard, D.R. and Lease, D.H., (1982), "Highly Reinforced Precast Monolithic Refractories," American Ceram. Soc. Bull. Vol. 61, No. 7, pp. 728.

British Standard institute BS 915; Part 2: September (1972), "Specification for High Alumina Cement".

American Society for Testing and Materials C 401-89,(1990), "Standard Classification of Castable Refractories", Annual Book of ASTM Standard Vol. 15.10, pp. 98.

## الجدول رقم (1) التحليل الكيميائي للسمنت الالوميني

حدود المواصفة البريطانية BS 915 <sup>[8]</sup>	المحتوى %	الأكاسيد
32 حد أدنى	39.61	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	41.42	CaO
	16.2	SiO <sub>2</sub>
	1.29	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	1.57	MgO
	0.95	SO <sub>3</sub>
$1.3 \geq \frac{Al_2O_3}{CaO} \geq 0.85$	0.956	$\frac{Al_2O_3}{CaO}$
	0.32	L.O.I

## الجدول رقم (2) الفحوص الفيزيائية للسمنت الالوميني

حدود المواصفة البريطانية BS 915 <sup>[8]</sup>	نتائج الفحص	الخواص
225 حد أدنى	325	- النعومة Blaine م <sup>2</sup> /كغم
	دقيقة: ساعة	- زمن التماسك
2 ساعة ≥ زمن التماسك الابتدائي ≥ 6 ساعة	0:30	* الابتدائي
2 ساعة بعد التماسك الابتدائي	1:45	* النهائي
		- مقاومة الانضغاط (ميكاباسكال)
42 حد أدنى	17	* بعمر يوم واحد
49 حد أدنى	20	* بعمر ثلاثة ايام



الجدول رقم (3) التحليل الكيميائي للركام البوكسايتي

المحتوى %	الأكاسيد
67.64	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
26.32	SiO <sub>2</sub>
0.65	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O
2.05	CaO
1.06	MgO
1.39	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

الجدول رقم (4) خواص الركام البوكسايتي

تقرير ACI <sup>[4]</sup>	النسب العابرة %	قياس المنخل (ملم)
	100	4.75
	87.3	2.36
	64.2	1.18
	46.6	600 مايكرومتر
المتبقي على هذا المنخل 75%	24.5	150 مايكرومتر
العابر من هذا المنخل 10-15%	12.8	150 مايكرومتر
	2.49	الوزن النوعي

جدول رقم (5) نتائج الفحوص الميكانيكية والحرارية للمصبوبات الحرارية غير المسلحة ولسب

سمنت: ركام مختلفة

نسبة السمنت: الركام وزناً	معايير التصدع ميكاباسكال	مقاومة الانضغاط ميكاباسكال	المسامية %	الانكماش الخطي %
1:1	5	13	20	1.1
2:1	3	9	25	1.05
3:1	2	7	28	0.985

