فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي: تحليل شامل ومراجعة علمية

الملخص:

يعتبر فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي من أحدث التقنيات في مجال البناء والتشييد، حيث يوفر حماية متقدمة لقضبان التسليح من التآكل، مما يزيد من عمر الخدمة الهيكلية بشكل كبير. في هذه المقالة، سنقوم بتحليل شامل لفوائد هذا النوع من الفولاذ واستخداماته المختلفة، مع تقديم مراجع علمية تدعم هذه المعلومات.

الكلمات المفتاحية:

الإيبوكسي، الفولاذ المطلي، الجمعية الأمريكية لدراسة جودة المواد ASTM،

ISO، فولاذ الCRS.

مقدمة:

ما هو فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي؟

هو عبارة عن حديد التسليح المستخدم في البناء والذي تم تغطيته بطبقة من مادة الإيبوكسي. تعمل هذه الطبقة كحاجز فعال يمنع وصول الأكسجين والرطوبة إلى سطح الفولاذ فيحمي الفولاذ من التآكل والصدأ، مما يطيل من عمره الافتراضي ويحسن من أداء الهيكل الخرساني بشكل عام. [1]

الشكل (١) الفولاذ المطلي بالايبوكسي

ما هي مادة الايبوكسي :

هي مادة كيميائية تتكون من مركبين أساسيين هما الأساس (resin) والمصلب(hardener) عند تفاعل هذين المادتين تنتج مادة متينة وقوية ومقاومة للتدرج، وتتميز بمقاومتها للاحتكاك، وشدة التصاقها، وتكوينها لطبقة عازلة عندما تجف.

وتستخدم عادة في إصلاح الكسور والشقوق المختلفة، ولصق المواد ببعضها. يمكن تطبيق مادة الايبوكسي على الكثير من الأسطح، كالسيراميك، والبلاستيك، والخشب، والمطاط، والزجاج، والبيتون، والمعادن. [1]

استخدامات فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

- **البنية التحتية :**يستخدم على نطاق واسع في مشاريع البنية التحتية مثل الجسور والأرصفة وأنفاق المشاة، حيث يتعرض الفولاذ لظروف بيئية قاسية.
- **البناء السكني والتجاري :**يستخدم في المباني السكنية والتجارية، خاصة في المناطق الساحلية أو المناطق ذات الرطوبة العالية.
- **هياكل البحار :**يستخدم في بناء الهياكل البحرية مثل الأرصفة البحرية وأحواض السفن، حيث يتعرض الفولاذ لتأثير الأملاح والتآكل البيولوجي.
- **المشاريع الصناعية :**يستخدم في المشاريع الصناعية التي تتطلب بيئة عمل نظيفة وخالية من التآكل. [2]

فوائد استخدام فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

يؤمن استخدام الفولاذ المطلي بالايبوكسي مايلي[4-3-2]:

- **مقاومة عالية للتآكل:** تعتبر الميزة الأساسية لهذا النوع من الفولاذ هي مقاومته العالية للتآكل، مما يجعله مثاليًا للاستخدام في البيئات العدوانية مثل التربة المالحة أو المناطق ذات الرطوبة العالية.
- **زيادة عمر الخدمة الهيكلية:** بفضل مقاومته للتآكل، يزيد فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي من عمر الخدمة الهيكلية بشكل كبير، مما يقلل من تكاليف الصيانة والإصلاح على المدى الطويل.
- **زيادة متانة الهيكل:** يحسن من قوة التصاق الحديد بالخرسانة، مما يزيد من متانة الهيكل وقدرته على تحمل الأحمال.
- **مقاومة التآكل من الكلوريدات:** يحمي الحديد من التآكل الناتج عن تعرضه لأملاح الكلوريد، وهي مشكلة شائعة في المناطق الساحلية أو حيث تستخدم مواد بناء تحتوي على الكلوريدات.
- **تحسين قوة الالتصاق :**على الرغم من وجود طبقة عازلة، فإن فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي يتميز بقوة التصاق عالية بالخرسانة، مما يضمن تماسكًا جيدًا بين المكونات الهيكلية.
- **صديق للبيئة :**لا يحتوي فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي على أي مواد ضارة، مما يجعله خيارًا صديقًا للبيئة.
- **تسهيل عملية البناء :**يتميز هذا النوع من الفولاذ بسطح أملس يسهل التعامل معه، مما يسرع من عملية البناء ويقلل من الفاقد.

مميزات فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

* **عمر افتراضي أطول:** يحمي الحديد من التآكل وبالتالي يطيل من عمره الافتراضي.
* **متانة عالية:** يزيد من قوة التصاق الحديد بالخرسانة ويحسن من متانة الهيكل.
* **مقاومة عالية للتآكل:** يحمي الحديد من مختلف أنواع التآكل.
* **لا يحتاج لصيانة دورية:** يقلل من الحاجة إلى صيانة وإصلاحات.
* **صديق للبيئة:** لا يسبب أي أضرار بيئية. [5]

عيوب فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

* **تكلفة أعلى:** عادة ما يكون أغلى من حديد التسليح العادي.
* **تتطلب مهارة في التركيب:** يجب تركيبه بطريقة صحيحة للحصول على أفضل النتائج. [5]

متى يستخدم فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي؟

يستخدم في العديد من التطبيقات، بما في ذلك:

* **البناء في المناطق الساحلية:** حيث يكون خطر التآكل بسبب أملاح الكلوريد مرتفعًا.
* **البناء في المناطق الرطبة:** حيث تكون الرطوبة العالية تسبب التآكل.
* **البناء في البيئات العدوانية:** حيث توجد مواد كيميائية قد تتسبب في تآكل الحديد.
* **البناء في الهياكل الخرسانية المعرضة للأضرار الميكانيكية:** حيث يحمي الحديد من التلف. [6]

نصائح هامة عند استخدام فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

* يجب اختيار نوع الإيبوكسي المناسب للتطبيق المراد.
* يجب التأكد من أن طبقة الإيبوكسي متجانسة وخالية من أي عيوب.
* يجب اتباع تعليمات الشركة المصنعة لتركيب الحديد.
* يجب الحفاظ على الحديد مغطى بالإيبوكسي حتى وقت الاستخدام. [7]

التقارير الفنية والمواصفات القياسية لفولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

لتحديد التقارير الفنية والمواصفات القياسية المناسبة لفولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي، من الضروري مراعاة عدة عوامل، منها:

* **الدولة أو المنطقة:** تختلف المعايير والمواصفات من دولة إلى أخرى.

* **نوع المشروع:** تختلف المتطلبات بين مشاريع البنية التحتية، والبناء السكني، والهياكل البحرية.

* **ظروف البيئة:** تؤثر الظروف المناخية وطبيعة التربة على اختيار المواصفات.

* **جودة الإيبوكسي:** تختلف أنواع الإيبوكسي في سمك الطبقة ومقاومتها للتآكل.

أهم المعايير والمواصفات العالمية:

على الرغم من الاختلافات المحلية، هناك بعض المعايير العالمية التي تشملها معظم المواصفات القياسية لفولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

* **ASTM A767:** هذا المعيار الأمريكي يغطي المواصفات الفنية لحديد التسليح الصلب المطلي بالإيبوكسي المستخدم في الخرسانة المسلحة. [8]

* **BS EN 10244:** هذا المعيار الأوروبي يحدد المتطلبات الفنية لحديد التسليح الصلب المطلي بالإيبوكسي. [8]

* **ISO 14759:** هذا المعيار الدولي يحدد طريقة الاختبار لتحديد سمك الطلاء العضوي على حديد التسليح. [8]

ما الذي تتضمنه هذه المعايير؟

تغطي هذه المعايير عادةً المواصفات التالية:

* **التركيب الكيميائي للفولاذ:** يحدد نوع الفولاذ المستخدم كأساس للطلاء.

* **سمك طبقة الإيبوكسي:** يحدد السمك المطلوب لضمان الحماية الكافية.

* **الخصائص الميكانيكية للفولاذ:** مثل قوة الشد والانحناء.

* **الالتصاق بين الفولاذ والإيبوكسي:** يحدد قوة الالتصاق المطلوبة.

* **مقاومة التآكل:** تحدد قدرة الطلاء على مقاومة العوامل البيئية المختلفة.

* **طرق الفحص والاختبار:** تحدد الطرق المستخدمة للتأكد من مطابقة المنتج للمواصفات. [9]

فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي يعتبر حلًا ممتازًا لتحسين عمر الهياكل الخرسانية ومقاومتها للتآكل. ومع ذلك، يجب اختيار نوع الإيبوكسي المناسب وتطبيق الطلاء بشكل صحيح لضمان أقصى قدر من الحماية، كما يجب مراعاة الظروف البيئية التي سيعرض لها الفولاذ لتجنب أي مشاكل مستقبلية.

قمنا بإرفاق جدول معايير لأنواع مصنفة لمادة الإيبوكسي وفق تصنيف الجمعية الأمريكية لدراسة جودة المواد ASTM :

CCS Epoxies for ASTM C 881, Types I, II, III, IV, V, VI and VII, Grades 1,2 and 3

CCS Epoxy Adhesive Cross Reference Chart for ASTM C881 Types

Type*	Use	Grade 1	Grade 2	Grade 3
I	Non-load Hard-hard	CCS IR Grout Std, Hi Ambient, Lo Viscosity, Slump Pumping, Hi Temp, Hi Ambient Temp, Underwater	CCS Bonder Liquid LWL and SWL	CCS Bonder Paste LWL and SWL
II	Non-load Fresh-hard	CCS Grout IR Low Exotherm	Bonder Liquid LWL and SWL	Bonder Paste LWL and SWL
III	Skid resist. mtl. to hard	CCS Bonder Patch, Nosing, Slurry	Binder, Bridge Deck	Lo Mod Bonder Paste
IV	Load Hard-hard	CCS IR Grout Std, Hi Ambient, Lo Viscosity, Slump Pumping, Hi Temp, Hi Ambient Temp, Underwater	Bonder Liquid LWL and SWL	Bonder Paste LWL and SWL
V	Load Fresh-Hard	CCS IR Grout Std, Hi Ambient, Lo Viscosity, Slump Pumping, Hi Temp, Hi Ambient Temp, Underwater	Bonder Liquid LWL and SWL	Bonder Paste LWL and SWL
VI	Load Segmental precast	N/A	N/A	Dowel/Rebar/Grout SWL and LWL
VII	Non-load Segmental precast	N/A	N/A	Dowel/Rebar/Grout SWL and LWL

ASTM C881 Type Definitions

Type I — For use in non-load bearing applications for bonding hardened concrete to hardened concrete and other materials, and as a binder in epoxy mortars or epoxy c

Type II — For use in non-load bearing applications for bonding freshly mixed concrete to hardened concrete (new concrete overlays to existing concrete).

Type III — For use in bonding skid resistant materials to hardened concrete, and as a binder in epoxy mortars or epoxy concretes used on traffic bearing surfaces (or surfaces subject to thermal or mechanical movements).

Type IV — For use in load-bearing applications for bonding hardened concrete to hardened concrete and other materials and as a binder for epoxy mortars and concretes. This structural load bearing category is considered to be a technical equivalent to **AASHTO M 235.**

Type V — For use in load-bearing applications for bonding freshly mixed concrete to hardened concrete.

Type VI — For bonding and sealing segmental precast elements with internal tendons and for span-by-span erection when temporary post tensioning is applied

Type VII — For use as a non-stress carrying sealer for segmental precast elements when temporary post tension is not applied as in span-by-span erection.

ASTM C881 Grade Definitions

Grade 1 — Low Viscosity

Grade 2 — Medium Viscosity

Grade 3 — Non-Sag Viscosity

الشكل (2-1) تصنيف الإيبوكسي وفق نظام ASTM [10]

C881/C881M – 20

TABLE 1 Physical Requirements of Bonding Systems

Property	Type						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Viscosity, Pa·s [P]:							
Grade 1, max	2.0 [20]	2.0 [20]	2.0 [20]	2.0 [20]	2.0 [20]	. . .	. . .
Grade 2, min	2.0 [20]	2.0 [20]	2.0 [20]	2.0 [20]	2.0 [20]	. . .	. . .
Grade 2, max	10 [100]	10 [100]	10 [100]	10 [100]	10 [100]	. . .	. . .
Consistency, mm [in.]:							
Grade 3, max	6.0 [¼]	6.0 [¼]	6.0 [¼]	6.0 [¼]	6.0 [¼]	6.0 [¼]	6.0 [¼]
Gel Time, minutes, min	30[A]	30	30	30[A]	30	30	30
Bond Strength, min, MPa [psi]:							
Hardened Concrete to Hardened Concrete:							
2 days (moist cure)	7.0 [1000]	. . .	. . .	7.0 [1000]	. . .	7.0 [1000]	. . .
14 days (moist cure)	10.0 [1500]	. . .	10.0 [1500]	10.0 [1500]	. . .	. . .	7.0 [1000]
Freshly Mixed Concrete to Hardened Concrete:							
14 days	. . .	10.0 [1500]	. . .	. . .	10.0 [1500]	. . .	. . .
Absorption, 24 h, max, %	1	1	1	1	1	. . .	. . .
Heat Deflection Temperature, min, °C [°F]:							
7 days	. . .	. . .	. . .	50 [120]	50 [120]	. . .	. . .
14 days	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	50 [120]	50 [120]
Thermal Compatibility	. . .	. . .	passes test	. . .	. . .	. . .	. . .
Linear coefficient of shrinkage on cure, max	0.005	0.005	. . .	0.005	0.005	. . .	. . .
Compressive Yield Strength, min, MPa [psi]:							
24 h	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	14.0 [2000]	. . .
36 h	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	7.0 [1000]
48 h	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	40.0 [6000]	. . .
72 h	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	14.0 [2000]
7 days	55.0 [8000]	35.0 [5000]	. . .	70.0 [10 000]	55.0 [8000]	. . .	. . .
Compressive Modulus, MPa [psi]:							
min	1000 [150 000]	600 [90 000]	. . .	1400 [200 000]	1000 [150 000]	. . .	. . .
max	. . .	. . .	896 [130 000]	. . .	. . .	. . .	. . .
Tensile Strength, 7 days min, MPa [psi][B]	35.0 [5000]	14.0 [2000]	. . .	50.0 [7000]	40.0 [6000]	. . .	. . .
Elongation at Break, %, min[B]	1	1	30	1	1	. . .	. . .
Contact Strength, MPa [psi], min							
2 days	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	7.0 [1000]	. . .
14 days	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	7.0 [1000]

[A] Minimum gel time of 5 min when automated proportioning, mixing, and dispensing equipment are used.
[B] Not required for Viscosity Grade 3 Systems.

iTeh Standards (https://standards.iteh.ai) Document Preview
ASTM C881/C881M-20

الشكل (3) تجارب الشد والضغط ومقاومة العنصر المطلي [10]

كيف تؤثر الظروف البيئية على هذا النوع من الفولاذ؟

- **الرطوبة:**
  - **تأثير إيجابي:** الإيبوكسي يقاوم الرطوبة بشكل ممتاز، مما يحمي الفولاذ من التآكل الناجم عن تفاعل الماء مع الحديد.
  - **تأثير سلبي:** في حالة تلف طبقة الإيبوكسي، يمكن للرطوبة أن تتسرب إلى الفولاذ وتبدأ عملية التآكل.
- **درجة الحرارة:**
  - **تأثير إيجابي:** الإيبوكسي عادة ما يكون مقاومًا لدرجات الحرارة العالية والمنخفضة، مما يجعله مناسبًا للاستخدام في مجموعة واسعة من الظروف المناخية.
  - **تأثير سلبي:** قد تؤثر التغيرات الشديدة في درجة الحرارة على المدى الطويل على تماسك طبقة الإيبوكسي وتقلل من فعاليتها.
- **الأشعة فوق البنفسجية:**
  - **تأثير سلبي :**قد يؤدي التعرض المستمر لأشعة الشمس فوق البنفسجية إلى تدهور طبقة الإيبوكسي وتقليل قدرتها على الحماية.
- **المواد الكيميائية:**
  - **تأثير سلبي:** يمكن أن تتفاعل بعض المواد الكيميائية القوية، مثل الأحماض والقلويات، مع الإيبوكسي وتؤدي إلى تلفها.
- **التآكل الكهربائي:**
  - **تأثير سلبي :**في بعض الحالات، قد يتعرض الفولاذ المطلي بالإيبوكسي للتآكل الكهربائي، خاصة إذا كان متصلاً بأنواع أخرى من المعادن في بيئة رطبة.-12-11] 13]

نقاط القوة والضعف في فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي:

النقطة	الشرح
نقاط القوة	
مقاومة التآكل العالية	يحمي الفولاذ من الصدأ والتآكل الناتج عن الرطوبة والأكسجين.
عمر افتراضي طويل	يزيد من عمر الهيكل ويقلل من تكاليف الصيانة على المدى الطويل.
مقاومة جيدة لدرجات الحرارة العالية	مناسب للاستخدام في مجموعة واسعة من الظروف المناخية.
نقاط الضعف	
حساسية للتلف الميكانيكي	قد تتلف طبقة الإيبوكسي نتيجة الشقوق الكبيرة
حساسية لبعض المواد الكيميائية	قد تتفاعل مع بعض المواد الكيميائية القوية.
تكلفة أعلى من الفولاذ العادي	بسبب عملية الطلاء الإضافية.

جدول (1) مقارنة نقاط القوة والضعف [10]

مقارنة بين حديد التسليح المطلي بالإيبوكسي وبين الحديد المقاوم للتآكل CRS :

*الحديد المقاوم للتآكل CRS: عبارة عن صفائح فولاذية مدرفلة على البارد مصنوعة من الصلب الإنشائي الكربوني العادي.

ستتم المقارنة وفقا لمعايير نوعية توضع الغرض التشغيلي للعنصر.

نوع المقارنة:	**الفولاذ المطلي بالايبوكسي**	**الحديد المقاوم للتآكل CRS :**
1.تكنولوجيا مقاومة التآكل:	يتم عمل طلاء إيبوكسي على القضبان عن طريق الرش الكهروستاتيكي لمسحوق إيبوكسي مرتبط بالانصهار	يتم إجراء تركيب كيميائي لقضبان التسليح بحيث تكتسب خاصية مقاومة التآكل الكامنة.
2. التحكم في عملية التصنيع:	صعب التحكم وذلك لأنه يحتاج إلى بعض الإجراءات وفقاً لـ . BIS (نظم معلومات الأعمال)	من السهل التحكم فيه لأنه يعتمد على تركيبة القطعة الأم
3. احتمالية الضرر:	يوجد طبقة بسماكة بين ٠,١ إلى ٠,٣ مم على السطح الخارجي لحديد التسليح وهي قابلة للتلف، ويعتمد الأداء على العيوب الموجودة في الطلاء.	خاصية متأصلة في حديد التسليح نفسه، ولا يوجد إمكانية للتلف.
4. قوة ربط حديد التسليح:	إن قوة الربط أقل ب٢٠٪ من قوة الربط في القضبان التقليدية وذلك بسبب الطلاء .	لا يوجد تأثير على قوة الربط.
5. ثني القضبان:	يوجد احتمالية لانفصال الطلاء أثناء ثنيها وحنيها.	يتم التعامل مع ثني هذه القضبان كما التعامل مع القضبان العادية.
6. لحام القضبان:	لا ينصح باللحام مع هذه القضبان لأن ذلك يؤدي إلى تلف الطلاء أثناء اللحام.	لا يوجد توصيات خاصة في التعامل مع لحام هذه القضبان.
7.قوة الحماية:	لا يوجد تحديد لمدى الحماية التي يوفرها الطلاء ، ولكن يمكن لأدنى عطل في الطلاء أن يؤدي إلى تآكل خاصة في ظل البيئات القاسية.	إن معدل التآكل أقل بنسبة ٢٥ % مقارنة بالتسليح التقليدي.
8. التكاليف:	تعد تكلفة إنتاج هذا النوع من القضبان أعلى بكثير من كلفة إنتاج قضبان التسليح العادي وذلك بسبب الطلاء وبسبب قوة الالتصاق الأقل. [12-8-7]	إن تكلفة هذا النوع هو أعلى مقارنة بحديد التسليح التقليدي.

جدول (٢)

مقارنة بين الحديد المطلي بالإيبوكسي والحديد المقاوم للتآكلCRS [12-11-10]

الخاتمة

يمثل فولاذ التسليح المطلي بالإيبوكسي تقدمًا كبيرًا في مجال البناء والتشييد، حيث يوفر حماية متقدمة لقضبان التسليح ويضمن عمر خدمة طويل للهياكل، مع استمرار التطور التكنولوجي، من المتوقع أن يزداد استخدام هذا النوع من الفولاذ في مختلف المشاريع الهندسية لكن يبقى الاختيارالأمثل هو الذي يحقق أقصى متانة وجودة وتناسق اقتصادي دائماً.

المراجع المستخدمة:

[1] Forster, A. M., & Forster, A. M. (**2015**). Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: state of the art and standards applicability.

[2] Wang, X., Cao, Q., Tang, F., Pan, H., Chen, X., & Lin, Z. (**2023**). Mechanical properties and corrosion behavior of dual-filler-epoxy-coated steel rebar under a corrosive environment. *Coatings*, *13*(3), 604.

[3] Paiva, J. M. F. D., Mayer, S., & Rezende, M. C. **(2006**). Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites. *Materials Research*, *9*, 83-90.

[4] Yoon Park, S., & Jong Choi, W. (**2021**). Review of material test standardization status for the material qualification of laminated thermosetting composite structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *40*(5-6), 235-258.

[5] Yan, L., Deng, W., Wang, N., Xue, X., Hua, J., & Chen, Z. (**2022**). Anti-corrosion reinforcements using coating technologies—A review. *Polymers*, *14*(21), 4782.

[6] Ou, B., Wang, Y., & Lu, Y. (**2021**). A review on fundamentals and strategy of epoxy-resin-based anticorrosive coating materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, *60*(6), 601-625.

[7] Pérez-Claros, E., & Andrawes, B. (**2023**). Concrete Bridge Deck Reinforced with Textured and Nontextured Epoxy-Coated Bars. *Journal of Bridge Engineering*, *28*(6), 04023023.

[8] Ateş, E. (**2009**). Optimization of compression strength by granulometry and change of binder rates in epoxy and polyester resin concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *28*(2), 235-246.

[9] Chopra, I., Ola, S. K., Dhayal, V., & Shekhawat, D. S. (**2022**). Recent advances in epoxy coatings for corrosion protection of steel: Experimental and modelling approach-A review. *Materials Today: Proceedings*, *62*, 1658-1663.

[10] © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

[11] Pfeifer, D. W., Landgren, R., & Krauss, P. (**1993**). Performance of epoxy-coated rebars: a review of CRSI research studies. *Transportation Research Circular: Epoxy-Coated Reinforcement in Highway Structures*, (403), 57-65.

[12] Manning, D. G. (**1996**). Corrosion performance of epoxy-coated reinforcing steel: North American experience. *Construction and Building Materials*, *10*(5), 349-365.

[13] Zemajtis, J. (**1996**). *Epoxy-coated reinforcement: a historical performance review* (No. VTRC 97-IR1). Virginia Transportation Research Council (VTRC).