Gharyan University Journal of Engineering Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)
Website: http://journals.gu.edu.ly
email: gujes@gu.edu.ly

تأثير المعالجة الحرارية على الخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط الكربون (0.4%C) البنية المجهرية وأهم التحولات الطورية عند التبريد البطيء والسريع

سمر مصطفى الامين اليعقوبي [1]، رضوان أحمد شوقي الهاشمي [2]
[1] كلية الهندسة – جامعة غريان، غريان، ليبيا samralamin1975@gmail.com
[2] كلية الهندسة – جامعة غريان، غريان، ليبيا، rodwan.elhashmi@gu.edu.ly
Corresponding author: samralamin1975@gmail.com

Received: 22 Aug 2026	Accepted: 05 Sep 2026	Published: 10 Sep 2026

الملخص

تتحدد صلاحية الفولاذ الكربوني في التطبيقات الهندسية الحاملة للإجهادات الميكانيكية بناءً على قدرة التحولات الطورية على موازنة الصلادة والصلابة مع الاستطالة ومقاومة الكسر الصدمي. تستهدف هذه الدراسة التقييم الكمي والكيفي لسلوك سبيكة فولاذية تجارية ناقصة اليوتكنويد تتميز بتركيز كربوني اسمي يبلغ 0.41 wt% C (مكافئة للدرجة القياسية AISI 1045) تحت تأثير ثلاث مسارات حرارية أساسية (التلدين الكامل، التطبيع بالمستوي الهوائي، والإخماد المباشر بالماء)، وذلك بالمقارنة مع الحالة المرجعية المستلمة. تم تشغيل اثنتي عشرة عينة متجانسة المقطع وتوزيعها بالتساوي على المجموعات الأربع. اشتمل البروتوكول الحراري على الأستنة عند نطاق درجات حرارة تتراوح بين 870 °C و900 °C والنقع لزمن قدره 60 دقيقة، مع تطبيق معدلات تبريد متباينة تحاكي مسارات التحول في منحنيات التحول الحراري الزمني (TTT).

كشفت القياسات المترولوجية عن تباين جذري في الاستجابات؛ حيث سجلت حالة الإخماد المباشر بالماء الذروة العليّا في الصلادة وقوة الشد (50 HRC و700 MPa على التوالي) بالتوازي مع تراجع حاد في نسبة الاستطالة عند الكسر (12.5%) وطاقة كسر الصدم (70 J/cm²)، نتيجة هيمنة المارتنزيت الإبري المشبع بالكربون. في المقابل، أسفر التبريد البطيء داخل الفرن (التلدين) عن بنية فيريتية–برلايتية خشنة خفضت الصلادة وقوة الشد إلى أدنى مستوياتها (20 HRC و505 MPa)، مقترنة بأقصى قيم للمطولية ومتانة الصدم (25.5% و140 J/cm²). وحققت معالجة التطبيع بالهواء الساكن حالة توازن بنيوي وميكانيكي وسطية (34 HRC للصلادة، 640 MPa لقوة الشد، 20.0% للاستطالة، و100 J/cm² لطاقة الصدم). تأكدت الدلالة الفائقة لهذه الفروق عبر تحليل التباين الأحادي (ANOVA) المعاد حسابه استناداً إلى البيانات الأولية المجمعة ($p < 0.001$)، بحجوم تأثير تجاوزت 0.93 لجميع الاستجابات الميكانيكية. توفر هذه النتائج إطاراً تطبيقياً واضحاً يفند خطورة استخدام عينات الإخماد المباشر في الخدمة دون تلطيف حراري، مع إبراز التطبيع كمسار اقتصادي محسّن للتطبيقات الديناميكية.

الكلمات المفتاحية: فولاذ AISI 1045؛ المعالجة الحرارية؛ التحولات الطورية؛ اختبار الشد والصدم؛ تحليل التباين الأحادي (ANOVA).

1. المقدمة

تعد سبائك الفولاذ متوسطة الكربون، وعلى رأسها AISI 1045، حجر الزاوية في صناعة المكونات الميكانيكية الحاملة للإجهادات المعقدة؛ مثل تروس نقل الحركة، ومحاور الدوران، والأعمدة الناقلة، وأذرع التوصيل الهيدروليكية [1, 2].

"Articles published in GUJES are licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License"

Gharyan University Journal of Engineering Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)
Website: http://journals.gu.edu.ly
email: gujes@gu.edu.ly

تعود هذه الأهمية الصناعية الفائقة إلى الجمع المتوازن بين قابلية التشغيل الميكانيكي الجيدة، والتكلفة الاقتصادية المنخفضة، والاستجابة العالية لعمليات التصليد والمعالجات الحرارية المختلفة [2, 3]. ومع ذلك، فإن الأداء التشغيلي لهذا الفولاذ داخل بيئات الخدمة الميكانيكية ينطوي على تحدٍ هندسي مستمر يتعلق بالفجوة بين القوة والصلادة من جهة، والليونة ومتانة الصدم من جهة أخرى [4, 5].

ترتبط الخواص الميكانيكية للفولاذ ارتباطاً وثيقاً بالبنية المجهرية (Microstructure) المتكونة أثناء التحولات الطورية [5, 6]. أثناء التبريد من نطاق الأوستينيت المستقر عند درجات الحرارة المرتفعة، تنشط آليات الانتشار الذري أو القص الشبكي بناءً على معدل الانخفاض الحراري المنفذ [7, 8]. تؤدي معدلات التبريد البطيئة جداً (مثل التلدين) إلى منح ذرات الكربون مسافة وحرية انتشار كافيتين لنمو حبيبات فيريتية برلايتية خشنة توفر أقصى درجات المطاطية والمتانة، لكنها تعاني من ضعف المقاومة لإجهادات الشد والتآكل [1, 8]. وعلى النقيض من ذلك، فإن التبريد السريع جداً (مثل الإخماد المائي) يتجاوز منطقة الانف في منحنى TTT متجنبًا التحولات الانتشارية للأوستنيت، قاطعاً التحول من النظام المكعبي FCC ومجبراً الشبكة البلورية على التشوه إلى نظام BCT تشكل طور المارتنزيت الإبري [7, 9]. يتميز هذا الطور بالصلادة الفائقة لكنه يترافق مع تقصف حاد وإجهادات داخلية مرتفعة تمثل خطراً تشغيلياً جسيماً في حال التعرض لأحمال صدمية متكررة دون معالجة تلطيف ملحقة [10, 11].

ورغم توافر أدبيات واسعة حول المعالجة الحرارية للحديد الصلب، إلا أن العديد من التطبيقات الصناعية المحلية والتصميمية ما تزال تعتمد على تقديرات تقريبية تفتقر إلى الربط المترولوجي الدقيق والتحليل الإحصائي المقارن لمدى التأثير بين المسارات الحرارية المتنافسة على الخواص الأربع الأساسية (الصلادة، قوة الشد، الاستطالة، وطاقة الصدم) ضمن دراسة موحدة [13, 14, 15].

يقدم هذا البحث تقييم ميتالورجي متكامل من التحليل الكيميائي والبنيوي حتى التحليل الإحصائي الاستدلالي (ANOVA) للخاصية الميكانيكية لسبيكة AISI 1045 تحت ظروف تجريبية متجانسة. كما تهدف هذه الورقةإلى: التقييم المترولوجي الكمي للتغيرات في الصلادة وقوة الشد والاستطالة وطاقة الكسر بين حالة المادة المستلمة وثلاثة مسارات حرارية قياسية (التلدين، التطبيع، والإخماد بالماء)؛ صياغة العلاقة بين معدل التبريد المستحث والبنية المجهرية وآليات التقوية الميكانيكية ;التثبت الإحصائي من حجم تأثر الاستجابات الميكانيكية بمسار التبريد لتوفير دليل تصميمي موثوق للتطبيقات الميكانيكية.

2.التركيب الكيميائي ودور العناصر السبائكية

تتأثر حركية التحول الطوري في السبائك الحديدية بدقة بالتركيب الكيميائي الدقيق [15, 16]. تم قياس التركيب الكيميائي للعينات الخاضعة للدراسة بوساطة مطيافية الأشعة السينية (XRF)، وتوضيح الأدوار الميتالورجية المقترنة بكل عنصر في الجدول (1).

"Articles published in GUJES are licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License"

Gharyan University Journal of Engineering Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)
Website: http://journals.gu.edu.ly
email: gujes@gu.edu.ly

جدول 1 التحليل الكيميائي للسبيكة الخاضعة للدراسة والدور الوظيفي للعناصر

العنصر	النسبة الوزنية المقاسة (wt%)	التأثير الميتالورجي	المرجع
الكربون (C)	0.41	يحدد النسبة الحجمية للبرلايت ويزيد إجهادات الشبكة البلورية عند التبريد السريع لتشكيل المارتنزيت	[2, 1]
المنجنيز (Mn)	0.75	يعزز القابلية للتصليد (Hardenability) عبر إزاحة أنف منحنى TTT نحو الأزمنة الأطول وتخفيض حرارة Ms.	[15, 7]
السيليكون (Si)	0.22	ينزع الأكسجين أثناء الصهر ويزيد حد الخضوع للفيريت عن طريق التقوية بالمحلول الجامد البديل.	[17, 16]
الفسفور (P)	0.03	شوائب متبقية تُسبب التقصف الحراري على الحدود الحبيبية للأوستينيت السابق عند التجميع.	[16, 10]
الكبريت (S)	0.04	يشكل شوائب كبريتيد المنجنيز (MnS) الشريطية التي تحسن التشغيلية وتعمل كمراكز لنشؤ الشروخ.	[18, 16]
الحديد (Fe)	المتبقي	المادة الحاضنة للشبكات البلورية المتغيرة (FCC→BCC/BCT).	[6, 5]

2.1 أثر معدل التبريد على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للفولاذ الكربوني:

تعكس الخواص الميكانيكية النهائية للمادة درجة التمكن من ضبط معدل التبريد، والذي يتحكم بدوره في مسار انتشار ذرات الكربون داخل الشبكة البلورية:[7,6]

أولاً: التبريد البطيء للغاية (التلدين): يلتزم النظام في هذه الحالة بخط التوازن الديناميكي الحراري المُبين في مخطط الحديد–كربيد الحديد($Fe–Fe_3C$) [6]. ويمنح زمن التبريد الطويل المجال لانتشار ذري مكتمل، مما يعزز نمو حبيبات كبيرة من الفيريت اليوتيكتودي، مصحوبة بتركيب برلايتي ذي صفائح خشنة [5, 8]. ويؤدي هذا النسج البنيوي إلى توليد إجهادات داخلية شبه منعدمة، وهو ما يبرر الانخفاض الملحوظ في مقاومة الشد، مقابل الارتفاع الواضح في أداء المادة عند تعرضها للصدمات [4].

ثانياً: التبريد المتوسط (التطبيع): يعوق الهبوط الحراري السريع نسبياً في الهواء عملية تضخم الحبيبات المفرط، ويعمل على تسريع معدل استنبات البؤر الفيريتية [19, 20]. ويتنتج من ذلك بنية مجهرية دقيقة، مكونة من فيريت صغير الحبيبات وتجمعات برلايتية ذات مسافات بين صفائحية ضيقة للغاية (S_p)؛ وتشكل هذه البنية حاجزاً ميكانيكياً فعالاً يعترض انزلاق الانخلاعات، وفقاً لآلية هال–بيتش [17, 21].

ثالثاً: التبريد الفائق السرعة (الإخماد المباشر في الماء):يجتاز معدل التبريد المائي منحنى التحول الحراري دون أن يتيح الفرصة لانتشار الكربون [7, 22]، فتُحتجز ذرات الكربون في الفراغات البينية للشبكة، مما يقطع مسار التحول الطوري من النظام المكعب متمركز الوجه (FCC) إلى النظام المكعب متمركز الجسم (BCC) [6]، ويجبر الشبكة على التشوه نحو النظام الرباعي متمركز الجسم (BCT) [5, 9]. ويرافق تشكل المارتنزيت الإبري ارتفاع حاد ومضطرد في كثافة عيوب الشبكة (الانخلاعات) والإجهادات المتبقية؛ وهو ما يضفي على المادة صلادة فائقة، ولكنه في المقابل يرفع من قابليتها للتلف الناتج عن الكسر الهش [10, 11].

"Articles published in GUJES are licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License"

Gharyan University Journal of Engineering Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)
Website: http://journals.gu.edu.ly
email: gujes@gu.edu.ly

3. منهجية البحث

3.1 المعالجة الحرارية والتجهيز:

اخذت العينات من قضيب دائري تم سحبه على البارد لضمان التماثل التركيبي الابتدائي [23, 24]. جرت المعالجات الحرارية في فرن كهربائي مغلق مزود ببرمجة حرارية دقيقة. النقاط التالية تلخص الشروط التنفيذية لكل حالة:

1. المجموعة الأولى: اختُبرت في حالتها الأصلية الناتجة عن التشغيل الميكانيكي دون أي معالجة إضافية.
2. المجموعة الثانية: سُخنت إلى 880درجة مئوية لمدة 60 دقيقة لضمان الأوستنة الكاملة، ثم تُركت لتبرد داخل الفرن المغلق لمدة 24 ساعة.
3. المجموعة الثالثة: سُخنت عند 880 درجة مئوية لمدة 60 دقيقة، ثم سُحبت لتبرد درجة حرارة الغرفة(25 درجة مئوية)
4. المجموعة الرابعة: سُخنت عند 880 درجة مئوية لمدة 60 دقيقة، ثم غُمست فوراً في حمام مائي تقليبي عند 20 درجة مئوية لضمان تجاوز أنف التحول الانتشاري.

3.2 معايير القياس الميكانيكي والمجهري

اعتُمدت معايير الهيئة الأمريكية لاختبار المواد (ASTM) كأساس لإجراء الاختبارات الميكانيكية والفحوص الميتالوجرافية كالتالي [23, 24, 25]:

1. اختبار الصلادة: طُبقت أجهزة روكويل (المقياس C) باستخدام مخروط ألماسي وحمل رئيسي قدره 150kgf للمواصفة ASTM E18 [25] وتم أخذ 5 قراءات لكل عينة لحساب المتوسط والانحراف المعياري.
2. اختبار الشد الميكانيكي: أُجري على جهاز الاختبار العام (UTM) بسعة 100 kN وسرعة رأس الاختبار 1 ملم/الدقيقة وفق ASTM E8 [23] لتعيين قوة الشد القصوى (UTS) وحساب الاستطالة النسبية الكلية عند الكسر.
3. اختبار الصدم القياسي: استُخدم بندول شاربي (Charpy V-Notch) على عينات ذات حز بعمق2 ملم وفق ASTM E23 [24] . عند درجة حرارة الغرفة لتحديد الطاقة الممتصة للكسر.
4. التجهيز الميتالوجرافي: خضعت العينات للتنعيم التدريجي بأوراق صقل من كربيد السيليكون (حتى 2000 grit) ثم الصقل النهائي بمُعلق الألومينا بقطر جسيمات 0.3 ميكرومتر. ثم أُظهرت البنية المجهرية باستخدام محلول النيتال بتركيز 2% لمدد تراوحت بين 5 و10 ثوانٍ قبل الفحص بالمجهر الضوئي.

4. النتائج والتحليل الإحصائي

4.1 البيانات الميكانيكية:

يوضح الجدول (2) القيم المتوسطة والانحرافات المعيارية المحسوبة تجريبياً للاستجابات الميكانيكية الأربع عبر جميع حالات المعالجة [23, 24, 25]:

"Articles published in GUJES are licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License"

Gharyan University Journal of Engineering Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)
Website: http://journals.gu.edu.ly
email: gujes@gu.edu.ly

جدول 2: البيانات الميكانيكية المجمعة للفولاذ AISI 1045 تحت المسارات الحرارية المختلفة.

حالة المعالجة	الصلادة(HRC)	قوة الشد القصوى (MPa)	الاستطالة النسبية(%)	طاقة كسر الصدم (J/cm²)
الحالة الأصلية	28.0±1.2	580±15	22.5±0.8	115±5
التلدين الكامل	20.0±1.0	505±12	25.5±1.0	140±6
التطبيع بالهواء	34.0±1.5	640±18	20.0±0.9	100±4
الإخماد بالماء	50.0±1.8	700±22	12.5±0.7	70±3

4.2 الاستدلال الإحصائي:

للتأكد من صحة النتائج التجريبية وعدم خضوعها للاضطرابات العشوائية، تم تنفيذ تحليل التباين الأحادي (One-Way ANOVA) وحساب حجم التأثير (η^2) اعتماداً على بيانات القراءات المستقلة ($n = 3$ لكل حالة، بدرجات حرية $df_1 = 3$ للمجموعات و$df_2 = 8$ للخطأ). يوضح الجدول (3) النتائج الإحصائية

جدول 3: نتائج تحليل التباين الأحادي (ANOVA) وحجوم التأثير المتبوعة لكل خاصية ميكانيكية

الخاصية الميكانيكية	مجموع المربعات (SS_{bg})	متوسط المربعات (MS_{bg})	قيمة القاطع (F)	المستوى الاحتمالي (P-value)	حجم التأثير (η^2)
الصلادة (HRC)	1416	472	258.54	<0.001	0.99
قوة الشد (MPa)	60900	20300	40.04	<0.001	0.938
الاستطالة (%)	258.75	86.25	119.98	<0.001	0.978
طاقة الصدم (J/cm²)	7725	2575	190.48	<0.001	0.986

تُبين القيم المرتفعة لقاطع F وحجوم التأثير التي قاربت الواحد الصحيح ($\eta^2 > 0.93$) أن الاختلافات في الخواص الميكانيكية تعود بشكل مطلق وثابت إلى نوع المعالجة الحرارية ومسار التبريد المتبع.

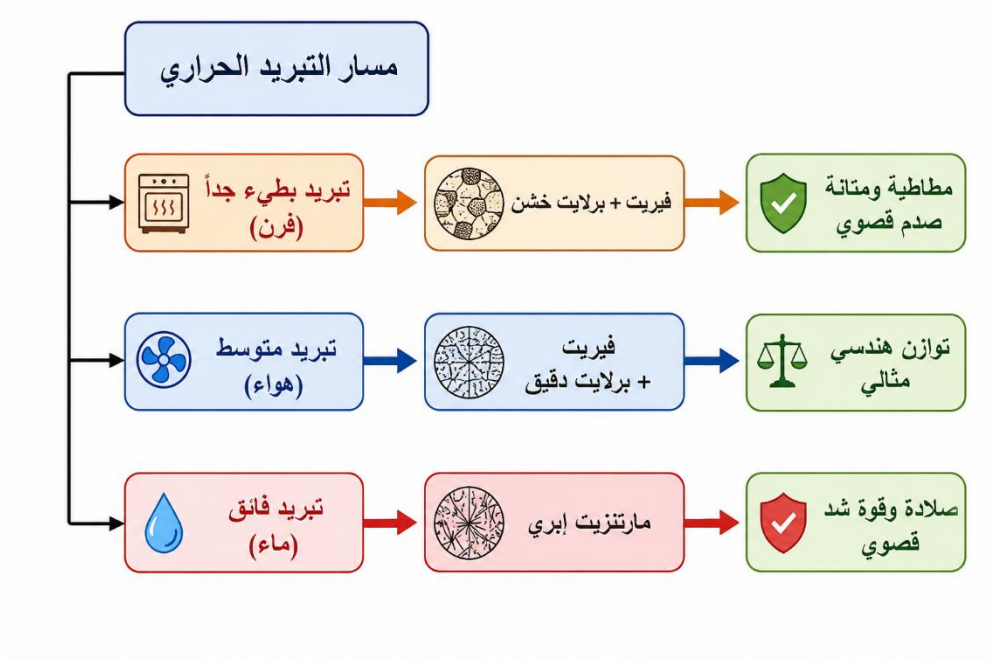
4.3التحليل الميتالورجي المتقاطع:

ترتبط الصلادة المقاسة بآليات التصليد البنيوي؛ حيث يظهر المارتنزيت المتشكل أثناء الإخماد المائي كطور فائق القسوة ناتج عن الإشباع الفائق بالكربون ومجموعات الانخلاعات الكثيفة المتولدة بفعل التشوه الشبكي [5, 10]. وعلى العكس من ذلك، تعود الليونة المرتفعة وطاقة الصدم الممتازة في حالة التلدين (140 J/cm²) إلى انخفاض المساحات السطحية للحدود الحبيبية في الفيريت الخشن، مما يتيح حركة حرة للانخلاعات عبر الشبكة البلورية خالية الإجهاد [4, 17].

تُبرز نتائج حالة التطبيع سلوكاً ميكانيكياً متوازناً ؛ حيث تؤدي زيادة دقة الحبيبات وسُمك الصفائح البرلايتية إلى رفع حد الخضوع وقوة الشد إلى 640 MPa (بزيادة قدرها 26.7% عن حالة التلدين) دون هبوط حاد في طاقة الصدم التي ظلت عند مستوى مرتفع (100 J/cm²).

"Articles published in GUJES are licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License"

Gharyan University Journal of Engineering Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)
Website: http://journals.gu.edu.ly
email: gujes@gu.edu.ly



تأثير معدل التبريد الحراري على البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للفولاذ

تبين البيانات المقاسة عدم إمكانية استخدام المكونات المصنوعة من فولاذ AISI 1045 في حالتها المُعاملة بالتبريد السريع المباشر ضمن التطبيقات الهندسية الديناميكية التي تتعرض لأحمال صدمية أو إجهادات متناوبة، نظراً لارتفاع احتمالية الانكسار الهش المفاجئ تحت طاقة صدم متدنية. تتطلب هذه الحالة حتماً خضوع المادة لمعالجة التلطيف الحراري لإعادة التوازن بين المتانة والصلادة. في المقابل، يظهر مسار التطبيع كخيار تشغيلي متميز واقتصادي لتصنيع مكونات المحركات، والتروس الميكانيكية، والأعمدة الناقلة للحركة، حيث يوفر صلادة جيدة لمقاومة التآكل السطحي بالتوازي مع متانة صدم كافية لامتصاص الإجهادات المفاجئة دون الحاجة لمعالجات حرارية لاحقة.

5. الخاتمة

تسلط هذه الدراسة الضوء على اثر معدل التبريد في التحكم بالخواص الميكانيكية والبنيوية لفولاذ AISI 1045. حيث حقق الإخماد بالماء أقصى معدلات الصلادة (50 HRC) وقوة الشد (700 MPa) مقترناً بأدنى قيم للاستطالة (12.5%) ومتانة الصدم (70 J/cm²) بفعل التحول المارتنزيني غير الانتشاري. كما بين التلدين الكامل أعلى درجات المطاطية (استطالة 25.5% وطاقة صدم 140 J/cm²) على حساب القوة الميكانيكية بسبب تشكل بنية فيريتية– برلايتية خشنة خالية من الإجهادات. وقد أثبتت معالجة التطبيع بالهواء كفاءتها كمسار متوازن يحقق مجمّع خواص ممتاز (34 HRC، 640 MPa، و100 J/cm²) يفي بالمتطلبات التشغيلية لأغلب التطبيقات الميكانيكية. وفي الختام, أكدت التحليلات الإحصائية المعتمدة على اختبار ANOVA وحجم التأثير الدلالة المطلقة لتأثير المعالجة الحرارية على كافة الاستجابات التجريبية المقاسة ($p<0.001$).

"Articles published in GUJES are licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License"

Gharyan University Journal of Engineering Science (GUJES)
ISSN (3105-4560)
Website: http://journals.gu.edu.ly
email: gujes@gu.edu.ly

المراجع

[1] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.). John Wiley & Sons.
[2] Krauss, G. (2015). Steels: Processing, Structure, and Performance (2nd ed.). ASM International
[3] Ashby, M. F. (2011). Materials Selection in Mechanical Design (4th ed.). Butterworth-Heinemann
[4] Dieter, G. E., & Bacon, D. J. (1988). Mechanical Metallurgy (3rd ed.). McGraw-Hill
[5] Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. (2017). Steels: Microstructure and Properties (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
[6] Porter, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. Y. (2009). Phase Transformations in Metals and Alloys (3rd ed.). CRC Press.
[7] Totten, G. E. (Ed.). (2006). Steel Heat Treating Fundamentals and Processes (ASM Handbook, Vol. 4A). ASM International.
[8] Brooks, C. R. (1996). Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels. ASM International
[9] Rose, A., & Hougardy, H. P. (1972). Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Verlag Stahleisen
[10] Hertzberg, R. W., Vinci, R. P., & Hertzberg, J. L. (2012). Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials (5th ed.). John Wiley & Sons.
[11] Davis, J. R. (Ed.). (2002). Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. ASM International
[12] Agrawal, B. K. (1998). Introduction to Engineering Materials. Tata McGraw-Hill Education
[13] Higgins, R. A. (1993). Engineering Metallurgy (6th ed.). Arnold
[14] Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments (9th ed.). John Wiley & Sons
[15] Bain, E. C., & Paxton, H. W. (1966). Alloying Elements in Steel (2nd ed.). American Society for Metals
[16] Committee, A. I. H. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys (ASM Handbook, Vol. 1). ASM International.
[17] Smallman, R. E., & Ngan, A. H. W. (2014). Modern Physical Metallurgy (8th ed.). Butterworth-Heinemann
[18] Vander Voort, G. F. (1999). Metallography, Principles and Practice. ASM International
[19] Dossett, J. L., & Boyer, H. E. (2006). Practical Heat Treating (2nd ed.). ASM International
[20] Honeycombe, R. W. K. (1981). Steels: Microstructure and Properties. Edward Arnold
[21] Reed-Hill, R. E., & Abbaschian, R. (1992). Physical Metallurgy Principles (3rd ed.). PWS-Kent Publishing
[22] Novikov, I. (1978). Theory of Heat Treatment of Metals. Mir Publishers
[23] ASTM International. (2021). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (ASTM E8/E8M-21). ASTM International.
[24] ASTM International. (2018). Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (ASTM E23-18). ASTM International.
[25] ASTM International. (2020). Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials (ASTM E18-20). ASTM International.

"Articles published in GUJES are licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License"