

Research Paper

The Effect of Two-Step Austempering Temperature and Copper Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of ADI

Mehdi Ghorbani Jamal Abadi¹, Amir Abedi¹, Soroush Parvizi¹, Mina Safa², Saloumeh Mesgari Abbasi³, Gholamreza Khalaj^{3*}

1- Materials Engineering Department, Faculty of Materials Engineering and Interdisciplinary Sciences, Shahid Rajaee Teacher Training University (SRTTU), Tehran, 16785-136, Iran

2- Department of Physics, Sav.C., Islamic Azad University, Saveh, Iran

3- Department of Materials Engineering, Sav.C., Islamic Azad University, Saveh, Iran

Received: 2025/07/29

Accepted: 2025/09/09

Use your device to scan and read the article online

**Keywords:**

Austempered ductile iron; ausferrite; austempering; two-step austempering; tensile strength; copper addition

Abstract

Introduction: This study investigated the influence of copper addition and two-step austempering temperature on the microstructure, phase fractions, and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI).

Methods: Two alloys, one without copper and one containing 1.5 wt.% copper, were melted and cast. Samples were austenitized at 900°C for 90 minutes, quenched to 260°C, and held for 5 minutes. They were subsequently austempered at either 350°C or 400°C for 120 minutes and then air-cooled to room temperature. Characterization was performed using tensile testing, hardness measurements, optical metallography, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD).

Findings: Tensile and hardness test results indicated that increasing the two-step austempering temperature decreased yield strength, ultimate tensile strength, elongation, hardness, and retained austenite content. The addition of copper enhanced all measured mechanical properties compared to the copper-free samples.

Citation: Ghorbani Jamal Abadi Mehdi, Abedi Amir, Parvizi Soroush, Safa Mina, Mesgari Abbasi Saloumeh, Khalaj Gholamreza. The Effect of Two-Step Austempering Temperature and Copper Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of ADI. Journal of New Materials; 2025 15(58):73-83

*Corresponding author: Gholamreza Khalaj

Address: Department of Materials Engineering, Sav.C., Islamic Azad University, Saveh, Iran

Email: gh.khalaj@srbiau.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71905/jnm.2025.1213461>

Extended Abstract

Introduction:

Austempered ductile iron (ADI) is a type of ductile iron with spheroidal graphite produced through an isothermal heat treatment process. It exhibits competitive mechanical properties compared to conventional cast irons, cast steels, and wrought steels. Studies on the microstructure of ADI using different austempering temperatures and holding times have shown that increasing the austempering temperature or prolonging the holding time results in coarser and thicker acicular ferrite. As an alternative to single-step austempering, two-step austempering has been proposed to refine the ausferritic microstructure and enhance the mechanical properties of ADI. Copper-alloyed ADI can effectively reduce costs, and previous studies have shown that copper can improve the plasticity and toughness of ADI without significantly compromising strength.

Findings and Discussion

No discernible changes in the morphology or size of the graphite nodules are observed with increasing copper content. This suggests that the graphite nodules are not affected by the copper addition, and therefore, variations in mechanical properties are not attributable to changes in the graphite. Optical micrographs reveal a fine, acicular ferrite microstructure within a lower ausferrite matrix at the lower austempering temperature. At higher two-step austempering temperatures, the ausferrite matrix becomes coarser with thicker and wider ferrite plates. Studies on the mechanical properties of two-step austempered ADI have reported that hardness, yield strength, and tensile strength decrease with increasing second-stage austempering temperature. The mechanical properties of ADI are influenced by three factors: the fraction of carbon-saturated austenite, the carbon content in the stable austenite, and the morphology of the acicular ferrite. Since the nucleation rate of ferrite is controlled by the degree of supercooling, more ferrite plates nucleate in high-energy regions under high supercooling conditions. Furthermore, the carbon percentage in austenite primarily depends on the diffusion rate of carbon atoms, which is enhanced by the higher austempering temperature. Therefore, the two-step austempering process is proposed to produce fine

acicular ferrite and more stable austenite with higher carbon content in the ADI matrix to improve mechanical properties.

Conclusion

1. The microstructure of two-step austempered copper-alloyed ADI consists of two distinct ferrite morphologies and retained austenite. Bulky ferrite and acicular ferrite are essentially the same in morphology but have different thicknesses and distributions resulting from the two-step austempering process. With increasing copper content, the retained austenite increases, the austenite layer thickens, and the size and amount of blocky austenite increase.
2. As the second-stage austempering temperature increases, the bulky ferrite coarsens, and the austenite content and its carbon content decrease. Carbides begin to precipitate, and when the second-stage austempering temperature reaches 400°C, the austenite completely decomposes.
3. With increasing second-stage austempering temperature, the ultimate tensile strength, yield strength, elongation, and hardness decrease. This is a combined result of the reduction in austenite content and its carbon content, coarsening of bulky ferrite, and carbide precipitation. Tensile strength and yield strength increase significantly with the addition of copper, while elongation and hardness change only slightly.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design experiments and perform: Mehdi Ghorbani Jamal Abadi, Amir Abedi, Soroush Parvizi, Mina Safa, Saloumeh Mesgari Abbasi, Gholamreza Khalaj

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

تاثیر دمای آستمپرینگ دو مرحله‌ای و افزودن عنصر مس بر ریزساختار و خواص مکانیکی چدن ADI

مهدی قربانی جمال آبادی^۱، امیر عابدی^۱، سروش پرویزی^۱، مینا صفا^۲، سالومه مسگری عباسی^۳، غلامرضا خلیج^{۳*}

۱- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مواد و فناوریهای نوین، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- گروه فیزیک، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

۳- گروه مهندسی مواد، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

چکیده

مقدمه: در این تحقیق تاثیر افزودن مس و دمای آستمپرینگ در حالت دو مرحله‌ای بر ریزساختار، مقدار فازها و خواص مکانیکی چدن ADI مورد بررسی قرار گرفت.

روش: ابتدا آلیاژهای بدون محتوای مس و با ۱/۵ درصد مس ذوب و ریخته‌گری شدند. سپس نمونه‌ها در کوره به دمای ۹۰۰°C به مدت ۹۰ دقیقه آستنیت شدند، پس از آستنیت شدن، تا دمای ۲۶۰°C کوئنچ شده و مدت زمان ۵ دقیقه در این دما نگهداری شدند، سپس به دمای آستمپرینگ (۳۵۰ و ۴۰۰°C) منتقل شده و مدت زمان ۱۲۰ دقیقه در این دما نگهداری و پس از پایان زمان آستمپرینگ تا دمای محیط در هوا سرد شدند. مشخصه یابی نمونه‌ها با آزمون کشش، سختی، متالوگرافی نوری، SEM و XRD انجام شد.

یافته‌ها: نتایج آزمون‌های استحکام کششی و نتایج سختی سنجی انجام شده بر روی نمونه‌ها بیانگر این است که افزایش دمای آستمپرینگ دو مرحله‌ای باعث کاهش استحکام تسلیم، کششی، ازدیاد طول، سختی و درصد آستنیت می‌شود. با افزایش مس، تمامی خواص نسبت به نمونه بدون مس افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: افزایش ۱/۵ درصد مس در فرآیند آستمپرینگ دو مرحله‌ای برای تولید فریت سوزنی شکل ریز و آستنیت پایدارتر با محتوای کربن بالاتر در زمینه ADI به منظور بهبود خواص مکانیکی پیشنهاد می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه‌های کلیدی:

چدن داکتیل آستمپر شده؛ آسفریت؛
آستمپرینگ؛ آستمپرینگ دو مرحله‌ای؛ استحکام
کششی؛ افزودن مس

* نویسنده مسئول: غلامرضا خلیج

نشانی: گروه مهندسی مواد، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

پست الکترونیکی: gh.khalaj@srbiau.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71905/jnm.2025.1213461>

مقدمه

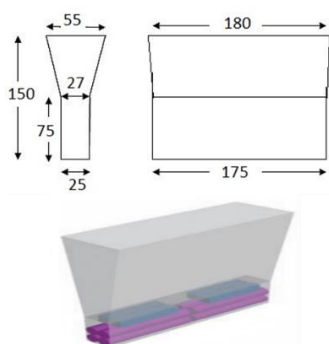
آستمپرینگ اعمال می‌شود تا سرعت نفوذ اتم‌های کربن را تسهیل کند و رشد فریت و آستنیت را از طریق گرم کردن چدن داکتیل با سرعت گرمایش ثابت در همان کوره یا با انتقال به کوره از پیش گرم شده دیگر با دمای بالای آستمپرینگ، افزایش دهد. در مقایسه با ADI تک مرحله‌ای، ADI دو مرحله‌ای دارای صفحات فریتی ریزتر و آستنیت پایدارتر با درصد کربن بیشتر است. همچنین، خواص مکانیکی بهتری در آزمایش‌های مکانیکی مختلف به طور گسترده‌ای به دست آمده است [۲۵-۲۷]. به عنوان مثال، داکر و همکاران [۲۸] نمونه‌های چدن داکتیل آستنیت شده را ابتدا تا دمای پایین ۲۵۰ درجه سانتیگراد کوئنچ کرده و به مدت ۱۰ دقیقه نگه داشتند، سپس کوره را به تدریج با سرعت گرمایش ثابت ۱/۷ درجه بر دقیقه تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد گرم کردند. پس از آن، نمونه‌های چدن داکتیل به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای بالای آستمپرینگ ۳۵۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند.

چدن‌های ADI آلیاژ شده با مس با افزایش استحکام و چقرمگی و افزایش نسبت استحکام به وزن می‌توانند به طور موثری هزینه را کاهش دهد و مطالعات قبلی نشان داده است که مس می‌تواند پلاستیسیته و چقرمگی ADI را بدون کاهش قابل توجه استحکام بهبود بخشد [۲۹ و ۳۰]. بنابراین، در این مطالعه، چدن داکتیل آلیاژ شده با مس به عنوان موضوع تحقیق انتخاب شده و تأثیر دمای مرحله دوم آستمپرینگ بر ریزساختار و خواص مکانیکی ADI بررسی شده است. مکانیزم استحکام‌بخشی فرآیند آستمپرینگ دو مرحله‌ای نیز مورد بحث قرار گرفته است.

۲- روش انجام آزمایش

طراحی و ساخت مدل

مدل مورد استفاده جهت ریخته‌گری نمونه استاندارد Y بلوک با استاندارد ASTM A798/A798 M-03 مطابق شکل ۱ است. قالب‌گیری Y بلوک‌ها با فرآیند قالب‌گیری CO₂ توسط ماسه سیلیسی انجام شد.



شکل ۱- شماتیک مدل مورد استفاده جهت ریخته‌گری

در عملیات ذوب و ریخته‌گری تعداد ۲ عدد Y بلوک تهیه شد. مواد شارژ شده در کوره القایی فرکانس متوسط (ساخت شرکت

چدن داکتیل آستمپر شده (ADI) نوعی چدن با گرافیت کروی است که از طریق فرآیند عملیات حرارتی همدما تولید می‌شود. این چدن در مقایسه با چدن‌های ریخته‌گری مرسوم، فولادهای ریخته‌گری و فولادهای آهن‌گری، خواص مکانیکی رقابتی از خود نشان می‌دهد [۱-۳]. استحکام تسلیم ADI می‌تواند حداقل دو برابر چدن داکتیل ریخته‌گری شده و سه برابر آلومینیوم‌های ریخته‌گری و کار شده باشد، در حالی که کاهش قابل قبولی در داکتیلیته مشاهده می‌شود. اگرچه حداکثر استحکام تسلیم و ازدیاد طول به دست آمده در فولادهای سخت شده بیشتر از ADI است، اما نسبت وزن به واحد استحکام تسلیم ADI به دلیل وجود گرافیت‌های کروی در زمینه، کمتر از فولادهای مختلف است. همچنین، هزینه واحد استحکام تسلیم ADI تنها ۲۰٪ فولادهای ریخته‌گری و تقریباً مشابه فولادهای آهن‌گری و فولادهای عملیات حرارتی شده است [۴۵]. گذشته از این موارد، ADI از چقرمگی عالی و قابلیت ماشین‌کاری خوبی نیز برخوردار است [۶ و ۷]. این خواص مکانیکی استثنایی را می‌توان به ساختار آستنیت-فریتی سوزنی منحصر به فرد آن، که شامل فریت سوزنی و آستنیت اشباع از کربن است، نسبت داد. در دهه‌های گذشته، تحقیقات بسیاری برای بررسی تبدیل فاز و خواص مکانیکی ADI با استفاده از ترکیبات شیمیایی مختلف و پارامترهای مختلف عملیات حرارتی و ایجاد مدل‌های محاسباتی انجام شده است [۸-۱۲]. در بررسی ریزساختار ADI با استفاده از دماها و زمان‌های نگهداری آستمپرینگ مختلف، مشخص شد که با افزایش دمای آستمپرینگ یا طولانی‌تر شدن مدت زمان نگهداری، فریت سوزنی درشت‌تر و ضخیم‌تر می‌شود [۱۳-۱۵]. این پدیده را می‌توان به نفوذ بیشتر اتم‌های کربن از ساختار کریستالی به مناطق آستنیت اطراف نسبت داد. در حالی که با استفاده از دمای آستمپرینگ پایین، به دلیل سرعت گرمایش بیشتر، سوزن‌های فریتی بیشتری در اطراف گرافیت‌های کروی جوانه‌زنی می‌کنند. همواره با افزایش دمای آستمپرینگ یا طولانی‌تر شدن زمان نگهداری، روند کاهشی در استحکام تسلیم، استحکام کششی، سختی و روند افزایشی در چقرمگی ضربه و ازدیاد طول گزارش شده است [۱۶-۲۱].

به عنوان جایگزینی برای آستمپرینگ تک مرحله‌ای، آستمپرینگ دو مرحله‌ای برای اصلاح ریزساختار آستنیت-فریتی و بهبود خواص مکانیکی ADI پیشنهاد شده است [۲۲-۲۴]. در فرآیند آستمپرینگ دو مرحله‌ای، چدن داکتیل کاملاً آستنیت شده تا دمای پایین (اما همچنان بالاتر از دمای تشکیل مارتنزیت)، کوئنچ می‌شود. به دلیل شرایط فوق تبرید، جوانه‌زنی صفحات فریتی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. پس از آن، دمای بالای

جدول ۲- شرایط ترکیب شیمیایی و دمای عملیات حرارتی آستمپرینگ و نامگذاری نمونه ها

دمای آستمپر (°C)	مراحل آستمپر	مس (درصد)	کد نمونه
350	2	0	0-2-350
400	2	0	0-2-400
350	2	1.5	1.5-2-350
400	2	1.5	1.5-2-400

آماده سازی نمونه ها

جهت آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایش های خواص مکانیکی کشش و ضربه، ابتدا قسمت بالایی Y بلوک (یعنی قسمت ۷ شکل) که محل تجمع آخال ها و حفرات انقباضی است، جدا شده و سپس از قسمت تحتانی هر Y بلوک، نمونه های ضربه و کشش برشکاری گردیده و نمونه ها آماده شدند. نمونه های کشش به صورت دمیلی شکل با طول سنجه ۴۷ و قطر ۹ میلی متر و مطابق استاندارد ASTM A798/A798 M-03 آماده سازی شدند. آزمون کشش با دستگاه Instron ۸۵۲۰ با ظرفیت ۲۰ تن انجام شد. نرخ کرنش برابر با ۱ mm/min تنظیم گردید. جهت بررسی ریز ساختار، نمونه متالوگرافی از راهگاه Y بلوک ها پس از جداسازی و آماده سازی سطح نمونه تهیه شد. پس از آماده سازی، نمونه های متالوگرافی با محلول اچ نایتال ۲ درصد اچ شدند. بررسی ساختار با میکروسکوپ نوری Olympus ۱۰۰۰ psp صورت گرفت.

مطالعه فازها با آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) در دستگاه Philips Analytical با توان 30 mA، 40 kV و جنس آند مس با زاویه اسکن 2θ از ۰-۱۲۰ درجه انجام شد. برای اندازه گیری درصد آستنیت با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، می توان از روش تحلیل شدت پیک های پراش مربوط به آستنیت و فازهای دیگر استفاده کرد. این روش بر اساس این واقعیت استوار است که شدت پیک های پراش با مقدار فاز متناسب است. با اندازه گیری مساحت پیک ها یا ارتفاع آن ها برای فازهای مارتنزیت یا فریت و مقایسه ی آن ها، می توان درصد حجمی آستنیت را تخمین زد. مطالعه ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) HR SEM FEI QUANTA 450 مجهز به دتکتور EDS شرکت Broker صورت پذیرفت.

آزمون سختی سنجی به روش برینل توسط دستگاه مدل KOOPA و مطابق استاندارد Astm E18 انجام گردید. مقدار بار اعمالی در این تست ۱۸۷/۵ Kg و فرورونده ساچمه ای به قطر ۲/۵ mm استفاده شد. از هر نمونه ۳ بار آزمون سختی گرفته شده و میانگین این نتایج در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریز ساختار

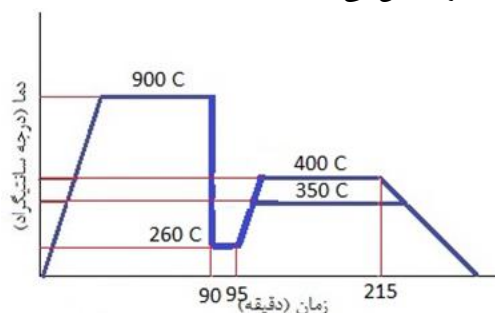
کوره سازی دماوند شامل ۵۰٪ قراضه آهن، ۴۰٪ قراضه چدن نشکن و ۱۰٪ محتوی فروآلیاژ بود. آنالیز فروآلیاژهای مورد استفاده Fe-Si با Si ۵۰٪ و Fe-Mn با ۶۵Mn٪ بود. عملیات ذوب در دمای ۱۴۸۰°C و عملیات کروی سازی به وسیله Fe-Si-Mg حاوی ۲۵٪ Mg و ۷۵٪ Fe-Si به صورت فرآیند ساندویچی درون پاتیل انجام شد، پس از آماده سازی ذوب، با توجه به محاسبه میزان ذوب و همچنین اتلاف بسیار جزئی، مقدار مس مورد نیاز به میزان ۱/۵ Kg وزن شده به مذاب افزوده شد. جهت مشخص نمودن دقیق ترکیب عناصر آلیاژی در مذاب، یک نمونه پولکی شکل تهیه و ترکیب شیمیایی دقیق عناصر آلیاژی موجود در دستگاه کوانتومتری تعیین شد، در جدول ۱ ترکیب شیمیایی دقیق آلیاژ مورد آزمایش آورده شده است. پس از انجام تست کوانتومتری مشخص گردید که میزان مس جذب شده در مذاب ۱/۴۲٪ می باشد که ۰/۸٪ عنصر مس تلف شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون کوانتومتری

عنصر	Fe	C	Si	Mn
مقدار (٪)	۹۱/۸	۳/۱۴	۳/۰۴	۰/۲۹۳
عنصر	Cu	S	P	Mg
مقدار (٪)	۱/۴۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵

عملیات حرارتی آستمپر کردن دو مرحله ای

نمونه ها پس از آستنیت سازی در کوره حمام نمک با ترکیب شیمیایی NaCl در دمای ۹۰۰°C به مدت زمان ۹۰ min بلافاصله در دمای ۲۶۰°C کوئنچ شده و مدت زمان ۵ min در این دما نگهداری شدند و سپس به کوره حمام نمک مذاب (شامل $\text{KNO}_3 - \text{NaNO}_3$ با ترکیب ۵۰-۵۰) در دماهای ۳۵۰°C و ۴۰۰°C منتقل شده و در زمان ۱۲۰ دقیقه در این دما نگه داری شدند و سپس تا دمای محیط کوئنچ شدند (شکل ۲). کوئنچ نمودن در دماهای پایین جهت تسریع فرآیند جوانه زنی هسته های اولیه فاز آسفریت می باشد تا افزایش جوانه زنی به رشد کمک نموده و تمامی ساختار آسفریتی ریزتری به وجود آید. جدول ۲ شرایط ترکیب شیمیایی و دمای عملیات حرارتی آستمپرینگ و نامگذاری نمونه ها را نمایش می دهد.



شکل ۲- عملیات حرارتی آستمپر کردن دو مرحله ای

آن در دماهای پایین‌تر کمک می‌کند. در حالت ریخته‌گری (بدون عملیات حرارتی) باعث کاهش درصد فریت و افزایش درصد پرلیت می‌شود.

نتایج مطالعات انجام شده بر روی ساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده و تحلیل آن در نرم‌افزار آنالیز تصویر Image J در جدول ۳ آمده است. مس عنصر پایدار کننده آستنیت است و به پایدار ماندن

جدول ۳- نتایج متالوگرافی Y بلوک ریخته‌گری شده

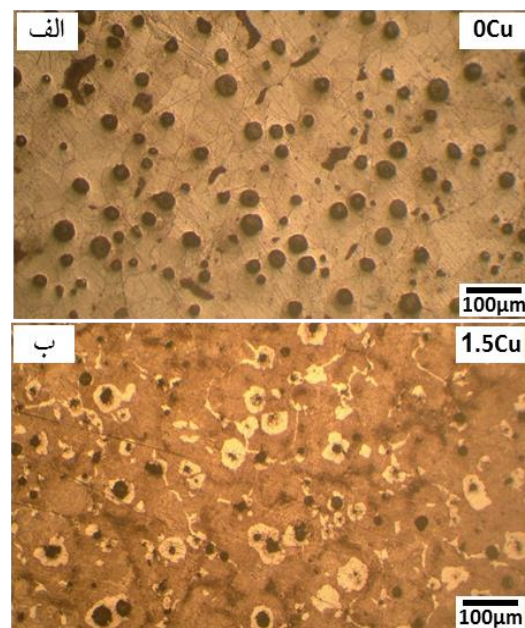
ساختار	پارامتر	نوع آلیاژ	
		%0 Cu	%1.5 Cu
گرافیت کروی	Nodule Size	mm ۶-۳	mm ۶-۳
	Nodule Count	۲۶۰	۲۶۰
زمینه	فریت (%)	۹۲	۱۵
	پرلیت (%)	۸	۸۵

جوانه‌زنی فریت انجام و کامل می‌شود در دمای (۲۶۰ °C) مرحله اول آستمپرینگ، جوانه‌زنی فریت از نظر ترمودینامیکی ظرف چند دقیقه بسیار سریع انجام شده که پس از این مرحله نمونه در دمای حمام نمک مذاب مرحله دوم فرصت متحول شدن به ریزساختارهای مورد نظر پیدا می‌کند. حسن استفاده از حمام نمک مذاب در مرحله اول و دوم فرآیند آستمپرینگ، در هم‌دما شدن نمونه‌های انتقال یافته از دمای آستنیت به آن محیط می‌باشد که باعث کوتاه‌تر شدن سیکل عملیات حرارتی می‌شود. تصاویری ریزساختاری به دست آمده از فرآیندهای آستمپرینگ یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در شکل ۴ آمده است.

با توجه به تصاویر متالوگرافی نوری، همان‌طور که مشاهده می‌شود در دمای پایین آستمپرینگ ریزساختار تیغه‌های فریتی حاصل شده بسیار ریز می‌باشد و زمینه آسفریتی حاصله، از نوع آسفریت پایینی هستند. در دماهای بالاتر آستمپرینگ دو مرحله‌ای زمینه آسفریت از نوع بالایی و خشن بوده و تیغه‌های فریت درشت و پهن می‌باشند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

دو نوع مورفولوژی فریت متفاوت قابل تشخیص است. فریت مشخص شده با خطچین زرد شامل لایه‌های فریت ریز و موازی است. فاصله بین لایه‌های فریت کم است. هیچ آستنیت بلوکی بین لایه‌های فریت توزیع نشده است. این نوع فریت، فریت سوزنی نامیده می‌شود. فریت مشخص شده با فلش‌های قرمز، مورفولوژی فریت دیگری است. ضخامت لایه‌های فریت و فاصله بین لایه‌های فریت بسیار بیشتر از فریت‌های سوزنی است. آستنیت‌های باقیمانده بلوکی بین فریت‌های درشت توزیع شده‌اند. برای تمایز این فریت‌ها با مورفولوژی متفاوت، آنها فریت‌های دسته‌ای نامیده می‌شوند. در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد، تفاوت مورفولوژی واضح است. هنگامی که دمای مرحله دوم به ۴۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد، مورفولوژی فریت مبهم می‌شود و آستنیت‌های بلوکی، ناپدید می‌شوند. مرزهای فریت‌ها قابل تشخیص نیستند.

در شکل ۳ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های ریخته‌گری شده آورده شده است.

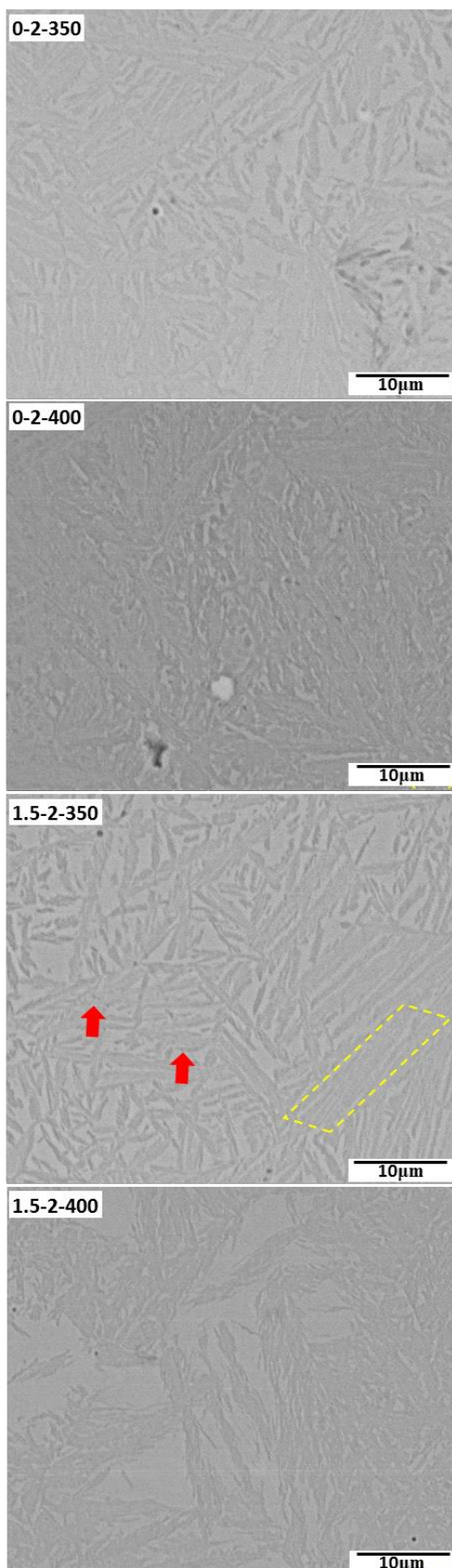


شکل ۳- ریز ساختار نمونه چدن نشکن ریخته‌گری شده Y بلوک. (الف) بدون مس ب) با ۱/۵٪ مس

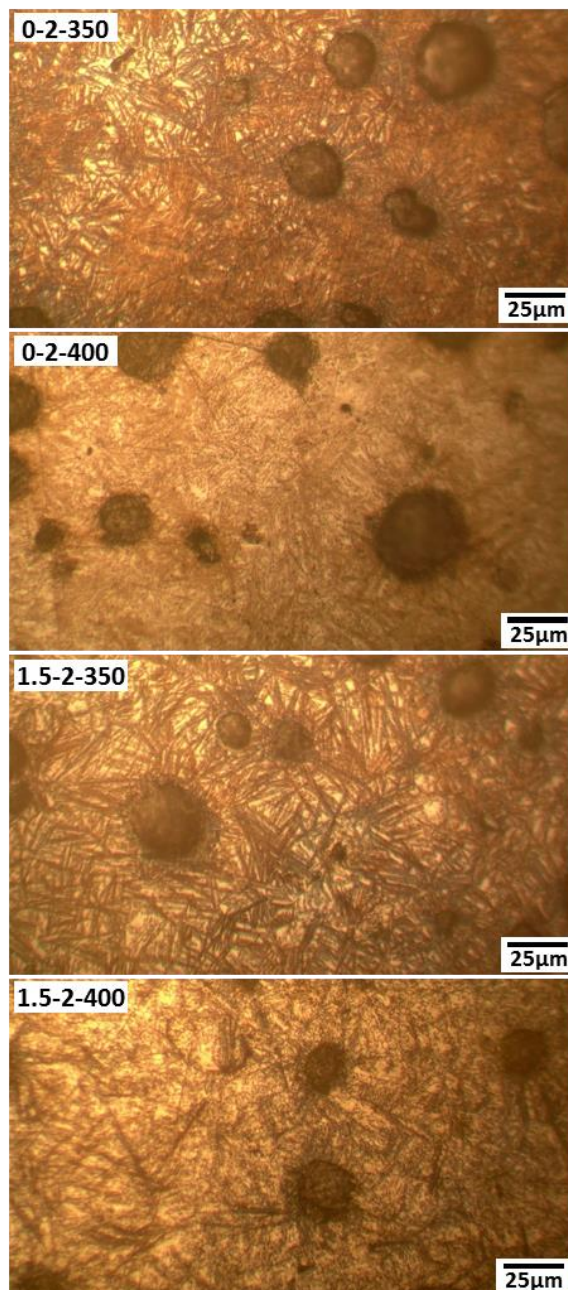
در شکل ۳، با افزایش محتوای مس، هیچ تغییر آشکاری در مورفولوژی و اندازه کره‌های گرافیت مشاهده نمی‌شود. این نشان می‌دهد که کره‌های گرافیت تحت تأثیر مس قرار نمی‌گیرند و تغییر خواص مکانیکی نیز به کره‌های گرافیت مربوط نمی‌شود. در مرحله آستمپرینگ، نمونه پس از آستنیت کامل باید تا دمای آستمپرینگ کوئنچ گردد، لذا حمام نمک مذاب مناسب‌ترین محیط جهت این عمل می‌باشد. در سیکل آستمپرینگ یک مرحله‌ای نمونه از دمای آستنیت مستقیماً در حمام نمک آستمپرینگ کوئنچ می‌گردد ولی در سیکل آستمپرینگ دو مرحله‌ای نمونه از دمای آستنیت به حمام نمک دمای پایین‌تر آستمپرینگ کوئنچ گردیده و بعد از مدت زمان معینی به دمای آستمپرینگ منتقل می‌گردد، حسن فرآیند آستمپرینگ دو مرحله‌ای این است که در فرآیند آستمپرینگ دو مرحله‌ای به‌وسیله فوق تبرید حاصل شده

۳-۲- پراش اشعه X

همان‌طور که از نتایج پراش اشعه X در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، مقدار آستنیت باقی‌مانده زمینه در سیکل دو مرحله‌ای همواره با افزایش دما کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی مس اختلاف ۱ درصدی آستنیت با نمونه‌های بدون مس دارند.



شکل ۵- میکروساختار SEM چندین در حالت‌های متفاوت آستمپرینگ و درصدهای مختلف مس

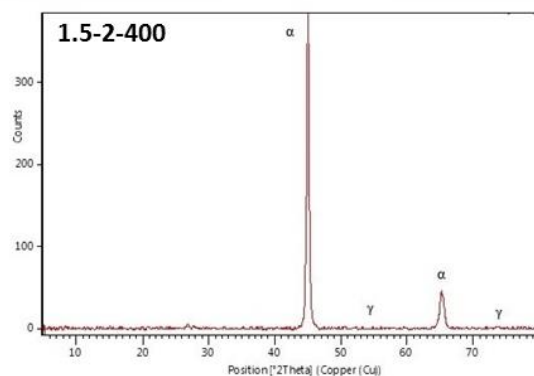
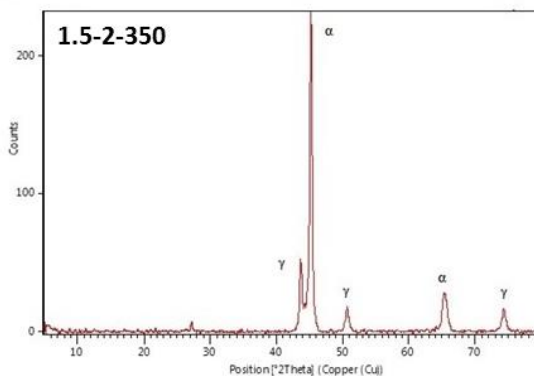
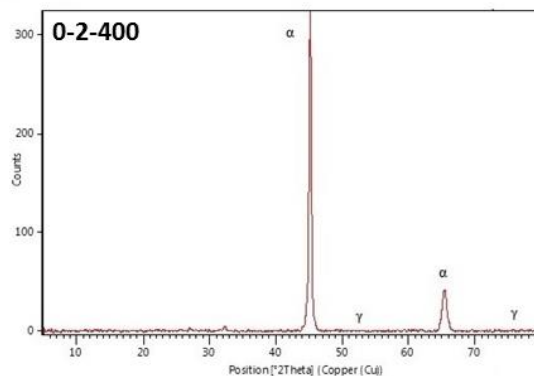
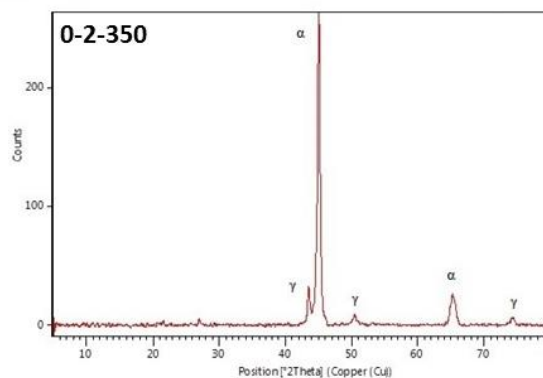
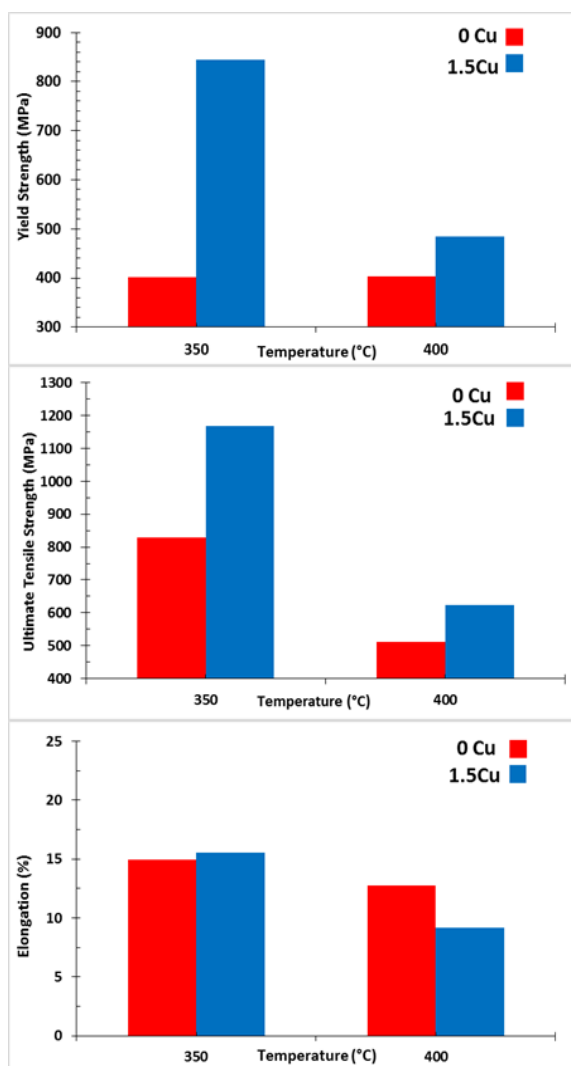


شکل ۴- ریزساختار نمونه چندین در حالت‌های متفاوت آستمپرینگ و درصدهای مختلف مس

آستمپرینگ تحت شرایط آستمپرینگ دو مرحله‌ای و درصد مس مختلف که در جدول ۴ و شکل ۷ آورده است.

جدول ۴- نتایج به دست آمده از آزمایش کشش و سختی
سنجی و تعیین درصد فاز با اشعه ایکس

کد نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدیاد طول (%)	سختی فریت آستنیت (HV)	سختی فریت آستنیت (%)	درصد آستنیت (%)
0-2-350	401	830	14.95	241	81	19
0-2-400	403	512	12.75	257	90	10
1.5-2-350	844	1168	15.56	290	80	20
1.5-2-400	485	624	9.17	271	91	9



شکل ۶- الگو پراش اشعه X چدن در دماهای متفاوت آستمپرینگ و درصدهای مختلف مس

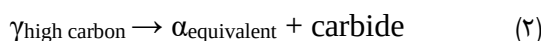
۳-۳- بررسی خواص مکانیکی

نتایج به دست آمده از آزمایش کشش و سختی سنجی و تعیین درصد فاز با اشعه ایکس هر یک از نمونه‌ها در دماهای مختلف

درشت‌تر و خشن‌تر می‌شود و مقدار سختی کاهش می‌یابد. نشان داده شده است که سختی چدن‌های نشکن آستمپر شده با گذشت زمان ثابت بوده و به زمان آستمپرینگ بستگی ندارد، و فقط تابع دمای آستمپر کردن می‌باشد [۳۳]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش درجه حرارت فرآیند آستمپر کردن، به خاطر رسوب یافتن آسفريت درشت‌تر در ساختار زمینه، سختی کاهش یافته است.

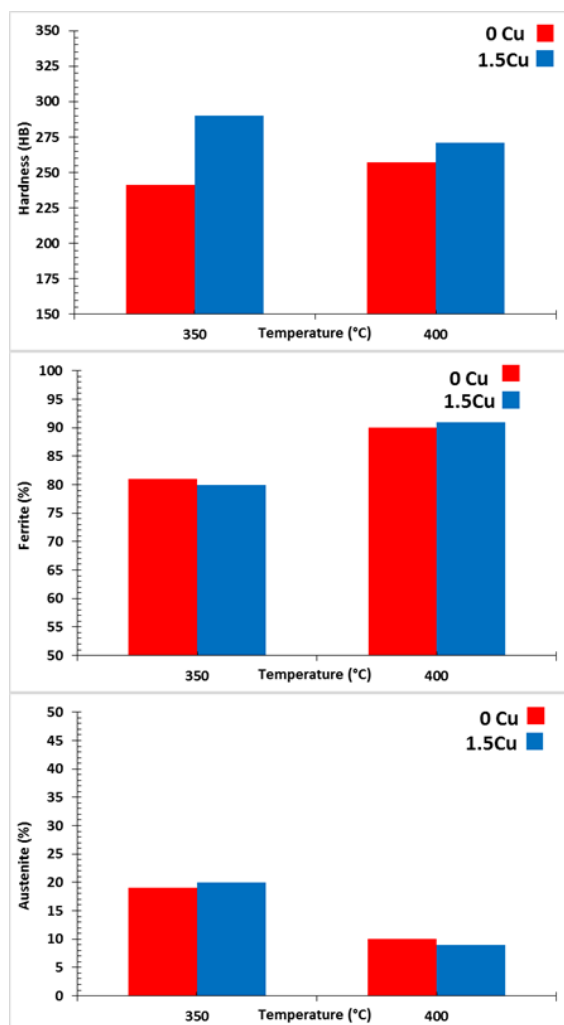
مکانیسم تأثیر مس بر ریزساختار و خواص مکانیکی ADI را می‌توان به دو جنبه تقسیم کرد. از یک طرف، مس در آستنیت و فریت حل می‌شود و باعث استحکام‌بخشی محلول جامد می‌شود. حداکثر حلالیت مس در آستنیت ۲/۵٪ در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد است که در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد به حدود ۱۰٪ افزایش می‌یابد. در فریت، مس در دماهای پایین حلالیت تا حدود ۳۵٪ نشان می‌دهد. مس همچنین از طریق سخت شدن رسوبی، در صورتی که غلظت آن بیش از ۰.۷۵٪ در فولاد باشد، استحکام را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، مس حلالیت کربن را در آستنیت کاهش می‌دهد و به آستنیت باقیمانده پایدارتر کمک می‌کند [۳۴]. در فرآیند آستمپرینگ مرحله دوم، افزایش نفوذ کربن دلیل اصلی تغییر محتوای آستنیت و محتوای کربن آن است. جوانه‌زنی فریت دسته‌ای بر اندازه آستنیت بلوکی و فاصله نفوذ کربن تأثیر می‌گذارد. این عوامل در کنار هم بر خواص مکانیکی ADI آلیاژ شده با مس و تحت عملیات دو مرحله‌ای تأثیر می‌گذارند. آستمپرینگ مرحله دوم نقش مهمی در بهبود محتوای آستنیت و خواص مکانیکی ایفا می‌کند که تأثیر زیادی بر پلاستیسیته و چقرمگی ADI دارد.

مرحله آستمپرینگ را می‌توان از نظر زمان نگهداری به دو مرحله جداگانه و پیوسته تقسیم کرد. در مرحله اول، آستنیت ناپایدار به فریت سوزنی و آستنیت اشباع از کربن تبدیل می‌شود (معادله (۱)). با این حال، آستنیت اشباع از کربن به فریت تعادلی و کاربید، که بینیتی است، تجزیه می‌شود (معادله (۲)). از تشکیل بینیت باید در تولید ADI جلوگیری شود زیرا ساختار بینیتی باعث کاهش قابل توجه خواص مکانیکی ADI می‌شود.



(γ = Austenite, α = Acicular Ferrite)

خواص مکانیکی ADI تحت تأثیر سه عامل زیر قرار دارد: کسر آستنیت اشباع از کربن، محتوای کربن در آستنیت پایدار و مورفولوژی فریت سوزنی. از آنجایی که سرعت جوانه‌زنی فریت توسط درجه فوق تبرید کنترل می‌شود، صفحات فریتی بیشتری در مناطق پرانرژی تحت شرایط فوق تبرید بالا جوانه‌زنی می‌کنند. علاوه بر این، درصد کربن در آستنیت عمده‌تاً به سرعت نفوذ اتم‌های کربن بستگی دارد که توسط دمای بالای آستمپرینگ افزایش می‌یابد. بنابراین، فرآیند



شکل ۷- تغییرات خواص مکانیکی و درصد فاز با مقدار مس و دمای آستمپرینگ

با بررسی خواص مکانیکی آستمپرینگ دو مرحله‌ای، گزارش شده است که سختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی آستمپرینگ دو مرحله‌ای با افزایش دمای آستمپرینگ دوم کاهش می‌یابد [۲۹ و ۳۱]. این امر به دلیل تشکیل آستنیت اشباع از کربن بیشتر در زمینه به دلیل سرعت نفوذ بالای اتم‌های کربن و عملکرد بهتر به دلیل فریت و آستنیت ریزتر در زمینه بود [۳۲]. با این حال، یانگ و همکاران [۳۱] دریافتند که داکتیلیته آستمپرینگ دو مرحله‌ای کمتر از آستمپرینگ تک مرحله‌ای است و در دمای بالای آستمپرینگ، بیشتر کاهش می‌یابد. بر اساس رابطه کلی بین استحکام کششی و داکتیلیته، داکتیلیته با افزایش استحکام کششی کاهش می‌یابد. همچنین، ممکن است که ساختار کاربردی آلیاژی در زمینه آستمپرینگ دو مرحله‌ای هنگام استفاده از دمای بالای آستمپرینگ دوم رسوب کند. وجود ذرات یا جزایر کاربید اثرات منفی بر داکتیلیته آستمپرینگ دارد.

مشاهده می‌شود که در ریزساختارهای به دست آمده تحت دماهای پایین آستمپرینگ مقدار سختی بالا بوده و به ترتیب که دمای فرآیند آستمپرینگ افزایش می‌یابد ساختار آسفريتی

نتیجه ترکیبی از کاهش محتوای آستنیت و محتوای کربن آن، درشت شدن فریت دسته‌ای و رسوب کاربید است. استحکام کششی و استحکام تسلیم با افزودن مس به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، اما ازدیاد طول و سختی تغییر کمی می‌کنند.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

انجام آزمایش‌ها: مهدی قربانی جمال آبادی؛
تحلیل داده‌ها و نتایج: مهدی قربانی جمال آبادی، امیر عابدی،
سروش پرویزی، مینا صفا، سالومه مسگری عباسی
نگارش نهایی: مهدی قربانی جمال آبادی، غلامرضا خلج

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

آستمپرینگ دو مرحله‌ای برای تولید فریت سوزنی شکل ریز و آستنیت پایدارتر با محتوای کربن بالاتر در زمینه ADI به منظور بهبود خواص مکانیکی پیشنهاد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

۱- ریزساختار ADI آلیاژ شده با مس و تحت عملیات آستمپرینگ دو مرحله‌ای شامل دو مورفولوژی متفاوت فریت و آستنیت باقیمانده است. فریت‌های دسته‌ای و فریت‌های سوزنی اساساً از نظر مورفولوژی یکسان هستند، اما ضخامت‌ها و توزیع‌های متفاوتی دارند که ناشی از فرآیند آستمپرینگ دو مرحله‌ای است. با افزایش مس، آستنیت باقیمانده افزایش می‌یابد، لایه آستنیت ضخیم‌تر می‌شود و اندازه و مقدار آستنیت بلوکی افزایش می‌یابد.

۲- با افزایش دمای آستمپرینگ مرحله دوم، فریت‌های دسته‌ای درشت‌تر می‌شوند، محتوای آستنیت و محتوای کربن آن کاهش می‌یابد. کاربیدها شروع به رسوب می‌کنند و هنگامی که دمای آستمپرینگ مرحله دوم به ۴۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد، آستنیت‌ها به طور کامل تجزیه می‌شوند.

۳- با افزایش دمای آستمپرینگ مرحله دوم، استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم، ازدیاد طول و سختی کاهش می‌یابد. این

6. References

1. Keough, J. "Austempered Ductile Iron (ADI) – A Green Alternative for India." AFS Transactions (2011).
2. Vidyarthi, G., and K. Singh. "Thin Wall Austempered Ductile Iron: A Best Replaceable Material to Steel and Aluminum." International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (2014): 465–73.
3. Bialobrzeski, A., and J. Pezda. "Testing of Heating and Cooling Process of ADI Cast Iron with Use of ATND Method." Archives of Foundry Engineering 8 (2014): 11–14.
4. Mandal, S., and A. Maity. "Austempered Ductile Iron Material for the Design of Agriculture Machinery." Mechanical Engineering 60 (2013): 16140–45.
5. Zhang, L., and L. Chen. "A Review on Biomedical Titanium Alloys: Recent Progress and Prospect." Advanced Engineering Materials 21 (2019).
6. Zhang, J., N. Zhang, M. Zhang, L. Lu, D. Zeng, and Q. Song. "Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron with Different Strength and Grades." Materials Letters 119 (2014): 47–50.
7. Filho, A., B. Souza, and C. Santos. "The Influence of Austempering Conditions on the Machinability of a Ductile Iron." Materials and Manufacturing Processes 31, no. 14 (2016).
8. Boccardo, A., P. Dardati, D. Celentano, and L. Godoy. "Austempering Heat Treatment of Ductile Iron: Computational Simulation and Experimental Validation." Finite Elements in Analysis and Design 134 (2017): 82–91.
9. Kim, Y., H. Shin, H. Park, and J. Lim. "Investigations into Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) in Accordance with Austempering Temperature." Materials Letters 62, no. 3 (2008): 357–60.
10. Hsu, C., and K. Lin. "A Study on Microstructure and Toughness of Copper Alloyed and Austempered Ductile Irons." Materials Science and Engineering A 528, no. 18 (2011): 5706–12.
11. Abdullah, B., S. Alias, A. Jaffar, A. Abd Rashid, and A. Ramli. "Mechanical Properties and Microstructure Analysis of 0.5% Niobium Alloyed Ductile Iron Under Austempered Process in Salt Bath Treatment." In 2012 International Conference on Mechanical and Electrical Technology, 610–14. 2010.
12. Thomson, R., J. James, and D. Putman. "Modelling Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron." Materials Science and Technology 16, no. 11–12 (2000): 1412–19.
13. Larumbe, L., E. Delgado, M. Alvarez-Vera, and P. Villanueva. "Forming Process Using Austempered Ductile Iron (ADI) in an Automotive

- Pitman Arm." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 91 (2017): 569–75.
14. Kim, Y., B. Cheon, and J. Lee. "Technical Review: Austempered Ductile Cast Iron." *Journal of the Korean Foundry Society* 8, no. 1 (1988).
 15. Hedge, A., S. Sharma, and M. Shankar. "Machinability and Related Properties of Austempered Ductile Iron: A Review." *Journal of Mechanical Engineering Science* 12, no. 4 (2018): 4180–90.
 16. Benam, A. "Effect of Alloying Elements on Austempered Ductile Iron (ADI) Properties and Its Process: Review." *China Foundry* 12, no. 1 (2015): 54–70.
 17. Olawale, J., and K. Oluwasegun. "Austempered Ductile Iron (ADI): A Review." *Materials Performance and Characterization* 5, no. 1 (2016): 289–311.
 18. Samaddar, S., T. Das, A. Chowdhury, and M. Singh. "Manufacturing of Engineering Components with Austempered Ductile Iron – A Review." *Materials Today: Proceedings* 5, no. 11 (2018): 25615–24.
 19. Basso, A., and J. Sikora. "Review on Production Processes and Mechanical Properties of Dual Phase Austempered Ductile Iron." *International Journal of Metalcasting* 6, no. 1 (2012): 7–14.
 20. Delia, M., M. Alaalam, and M. Grech. "Effect of Austenitizing Conditions on the Impact Properties of an Alloyed Austempered Ductile Iron of Initially Ferritic Matrix Structure." *Journal of Materials Engineering and Performance* 7, no. 2 (1998): 265–72.
 21. Gorny, M., G. Angella, E. Tyralla, M. Kawalec, S. Paz, and A. Kmita. "Role of Austenitization Temperature on Structure Homogeneity and Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron." *Metals and Materials International* (2019): 1–10.
 22. Wilk-Kolodziejczyk, D., K. Regulski, T. Gietka, G. Gumienny, and K. Jaskowiec. "The Selection of Heat Treatment Parameters to Obtain Austempered Ductile Iron with Required Impact Strength." *Journal of Materials Engineering and Performance* 2, no. 11 (2018): 5865–78.
 23. Cheng, H., H. Fu, S. Ma, J. Lin, and Y. Lei. "Effects of Austenitizing Process on Microstructures and Properties of Carbide Austempered Ductile Iron." *Materials Research Express* 6, no. 1 (2019).
 24. Gietka, T., T. Szykowny, and S. Dymski. "The Influence of Saturation of Cast Iron Austenite with Carbon on the Ausferrite Transformation." *Archives of Foundry Engineering* 7, no. 3 (2007): 241–46.