

تحلیل و بررسی اثر دمای آستنیته کردن بر تغییرات ابعادی چدن نشکن

آستمپر

محمود نیلی احمدآبادی

دانشیار گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مهرداد زری نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مجید بهمنی

عضو هیات علمی مرکز تحقیقات مهندسی جهادسازندگی

(تاریخ دریافت ۷۸/۱/۲۹، تاریخ تصویب ۷۹/۷/۹)

چکیده

از آنجائیکه انجام عملیات ماشینکاری قطعات حساس ساخته شده از چدن نشکن آستمپر (ADI) امری پرهزینه و زمان‌بر است لذا کنترل تغییرات ابعادی این نوع قطعات جهت کاهش هزینه ماشینکاری از اهمیت بسزائی برخوردار است. در پژوهش حاضر ضمن بررسی تاثیر دمای آستنیته کردن بر تغییرات ابعادی چدن نشکن آلیاژی Ni-Cu-Mn، سعی شده است علت این تغییرات ابعادی با توجه به اجزاء متشکله چدن نشکن توضیح داده شود. بدین منظور نمونه های استوانه‌ای شکل با ساختار ریختگی فریتی - پرلیتی تهیه و در دماهای ۸۷۰، ۹۰۰ و ۹۲۰ °C آستنیته و سپس در دمای ۳۱۵ °C آستمپر شدند. از میکروسکوپ الکترونی، نوری مجهز به آنالیز تصویری و پراش اشعه X برای توجیه و علت تغییرات ابعادی استفاده شد. نتایج حاصله نشان می دهد که با افزایش دمای آستنیته ابعاد چدن نشکن افزایش یافته که این افزایش ناشی از افزایش حجم زمینه (بدون گرافیت) و حجم حفرات اطراف گرافیت می باشد.

واژه های کلیدی: تغییرات ابعادی، آستمپرینگ، چدن نشکن، بینایت

مقدمه

به خوبی مشخص شده است که میزان تغییر ابعاد نسبی حاصل در اثر عملیات حرارتی آستمپرینگ در این چدن‌ها از صفر تا ۵٪ درصد متغیر است [۱]. گزارش شده است که مقدار این تغییرات ابعادی به ریزساختار اولیه و نیز ریزساختار حاصل از آستمپرینگ بستگی دارد [۲]. بر این اساس متغیرهای عملیات حرارتی از جمله دما و زمان آستنیته کردن و آستمپرینگ و نیز متغیرهای ریزساختاری از جمله درصد حجمی فازهای اولیه در زمینه چدن نشکن و تعداد گرافیت در واحد سطح بر این پدیده تاثیر می گذارند. اثر ریزساختار اولیه بر پدیده تغییر ابعادی چدن نشکن غیرآلیاژی توسط تعدادی از محققین گزارش شده است [۳ و ۴]، اما در مورد علت آن توضیحی ارائه نشده است. تعداد دیگری از محققین نیز در مورد تاثیر دمای آستنیته کردن بر میزان تغییر ابعادی گزارشهای متضادی را عنوان کرده اند [۵ و ۶]. از آنجاکه برای دستیابی به کنترل ابعادی قطعات حساس در حین فرایند تولید باید متغیرهای پیش گفته را کنترل

در سالهای اخیر چدن نشکن آستمپر (ADI) بدلیل دارا بودن خواص مکانیکی مناسب بویژه استحکام کششی و مقاومت به سایش زیاد همراه با چقرمگی و استحکام خستگی مطلوب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به خواص مکانیکی مطلوب، ADI جهت کاربردهای صنعتی وسیعی از جمله چرخدنده و میل لنگ خودروها مورد استفاده قرار گرفته است. در ۱۰ سال اخیر مطالعات زیادی بر روی این دسته از مواد انجام شده است ولی پدیده تغییر ابعادی ناشی از تحول بینیتی در چدنهای نشکن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بررسی این پدیده از جهت صنعتی و علمی هر دو حائز اهمیت است. مطالعه چنین پدیده‌ای نه تنها معیارهایی را برای پیش بینی و کنترل تغییرات ابعاد قطعات حساس ساخته شده از چدنهای نشکن آستمپر شده در فرایند تولید بدست می دهد بلکه فرصتی را برای شناخت بهتر تحول بینیتی در چدنهای نشکن از جنبه‌ای دیگر فراهم می آورد. تاکنون

شده و سپس ابعاد آنها (طول و قطر) با دستگاه اندازه گیری پروفیل با دقت ۱ میکرون اندازه گیری شد. نمونه های مذکور سپس تحت عملیات حرارتی استمپرینگ قرار گرفتند. در شکل (۱) سیکل های مختلف فرایند استمپرینگ انجام شده بر روی نمونه ها دیده می شود. نتایج تحقیقات قبلی نشان می دهد که خواص مکانیکی بهینه در چدن نشکن آلیاژی Ni-Cu-Mn در مدت زمان استمپرینگ حدود ۱۲۰ دقیقه حاصل می شود [۷]. لذا نمونه های متعددی با ریزساختارهای یکسان (دو نمونه برای هر یک از سیکلهای عملیات حرارتی) پس از ۹۰ دقیقه آستنیت شدن در دماهای ۸۷۰، ۹۰۰، ۹۲۰ °C در درجه حرارت ۳۱۵ °C به مدت ۱۲۰ دقیقه استمپر گردیدند. عملیات آستنیت و استمپرینگ در کوره های حمام نمک با اتمسفر حفاظتی گاز آرگون انجام شد. پس از اتمام زمان استمپرینگ نمونه ها در هوا تا دمای محیط سرد شدند. ابعاد همه نمونه ها پس از انجام عملیات حرارتی مجدداً به دقت اندازه گیری شد. از میکروسکوپ نوری به منظور بررسی های ریزساختاری و از میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) برای بررسی فصل مشترک زمینه و گرافیت استفاده گردید. برای دستیابی به معیار کمی از ریزساختارهای حاصل از استمپرینگ چدن نشکن، جهت تعیین کسر حجمی آستنیت باقیمانده و کربن محتوی آن از پراش اشعه X استفاده شد. آزمایشهای پراش اشعه X با استفاده از اشعه تکفام CuK_{α} با 40 keV ، 40 mA و دیفراکتومتر Phillips با دستگاه ثبات برای پویش محدود زاویه ای از ۴۰ درجه تا ۹۰ درجه استفاده شد که جزئیات مربوطه در مرجع [۸] ارائه شده است.

نمود لذا تاثیر هر یک به تنهایی و توأمان بایستی مدنظر قرار گیرد و به دقت بررسی شود. پژوهش حاضر بخشی از یک پژوهش گسترده در خصوص بررسی پارامترهای موثر بر تغییرات ابعادی چدن نشکن در طول فرایند استمپرینگ به همراه توجیه علل آن می باشد. در این مقاله ضمن بررسی اثر دمای آستنیت کردن بر تغییرات ابعادی چدن نشکن آلیاژی Ni-Cu-Mn سعی شده است تا برای اولین بار (براساس اطلاع مولفین)، دلایل این تغییرات مورد بررسی قرار گیرند.

روش تحقیق

چدن نشکن آلیاژی با ترکیب ارائه شده در جدول (۱) پس از عملیات تلقیح مذاب با روش غوطه وری با فروسیلیکو منیزیم ۵/۵ درصد بمنظور کروی کردن گرافیت ها و بدنبال آن جوانه زائی با فروسیلیسیم ۷۵ درصد و ریخته گری مذاب آلیاژ با دمای ۱۴۲۰ درجه سانتی گراد در Y بلوک هائی مطابق با استاندارد ۸۵۷-۹۰ ASTM صورت گرفت. همه نمونه های آزمایش از نیمه پایینی Y بلوک ها تهیه شدند. نمونه هایی که به منظور اندازه گیری تغییرات ابعاد در نظر گرفته شدند استوانه هایی با قطر ۲۵mm و طول ۱۰۰mm بودند. ریزساختار نمونه ها به صورت ریختگی با درصد پرلیت مشخص شده در جدول (۱) معرفی شده است. از آنالیز تصویری برای تعیین درصد فریت، پرلیت، گرافیت و همچنین برای بررسی مورفولوژی و تعداد گرافیت ها در واحد سطح نمونه ها استفاده گردید. سطح جانبی و دو سر نمونه های استوانه ای مورد آزمایش قبل از عملیات حرارتی استمپرینگ به دقت سنگ زده

جدول ۱: درصد وزنی ترکیب شیمیایی و ریزساختار چدن نشکن آلیاژی ریختگی

C	Si	Mn	Ni	Cu	تعداد گرافیتها در mm^2	درصد کروییت	درصد حجمی گرافیت	درصد حجمی پرلیت در زمینه
۲/۵۵	۲/۶۴	۰/۵۱	۰/۵۰	۰/۴۹	۹۸-۱۱۰	۹۰	۱۰/۵	۸۵

دمای استمپرینگ از مقایسه تصاویر میکروسکوپی شکل (۲) مشهود است.

شکل (۳) نمودار مربوط به میزان تغییر ابعاد نسبی چدن نشکن آلیاژی مورد مطالعه پس از استمپرینگ در دماهای ۳۱۵ °C و ۳۷۵ °C که در دماهای مختلف آستنیت شده اند را نشان می دهد. به خوبی دیده می شود که افزایش دمای آستنیت سبب افزایش میزان رشد ابعادی چدن نشکن می گردد و میزان رشد ابعادی حاصل در دمای استمپرینگ بالاتر کمتر است. اثر دمای

نتایج و بحث

در شکل (۲) ریزساختار چدن نشکن استمپر شده در دماهای ۳۱۵ °C و ۳۷۵ °C که در دمای ۹۰۰ °C آستنیت شده است نمایش داده شده است. این ریزساختار برای زمان استمپرینگ بهینه ۱۲۰ دقیقه می باشد. وجود ساختار دوگانه فریت بینیتی + آستنیت باقیمانده (مناطق تیره + مناطق روشن) در زمینه به خوبی دیده می شود. افزایش درجه سوزنی شدن^۱ ریزساختار با کاهش

آستمپرینگ در مرجع [۸] تشریح شده است لذا در اینجا تنها به توجیه چگونگی اثر گذاری دمای آستنیت شدن پرداخته می شود. از آنجا که مشخص شده است که سهم تنش های حرارتی ناشی از سریع سرد کردن تا دمای تحول ایزو ترم در مقایسه با سهم دگرگونی های فازی حین آستمپرینگ، در تغییرات ابعادی بسیار کمتر است لذا اختلاف تغییرات ابعادی پدید آمده در اثر تغییر دمای آستنیت را باید به تغییر کسر حجمی اجزاء ریزساختارهای حاصل از آستمپرینگ ربط داد.

در جدول (۲) تغییرات کسر حجمی و کربن محتوی آستنیت باقیمانده با زمان آستمپرینگ در صورت استفاده از دماهای آستنیت مختلف و دمای آستمپرینگ 315°C ارائه شده است. این دو پارامتر معیاری از تغییر کسر حجمی اجزاء ریزساختارها با دمای آستنیت می باشند. به خوبی روشن است که با افزایش زمان تحول ایزو ترم به دلیل گسترش تغییر حالت بینیتی در بخش بیشتری از ریزساختار و افزایش غلظت کربن آستنیت و در نتیجه پایداری بیشتر آن تا دمای محیط، کسر حجمی این فاز و کربن محتوی آن افزایش می یابد و در زمان 120 دقیقه که خواص مکانیکی بهینه برای این آلیاژ حاصل می گردد به حداکثر خود نزدیک می شوند. استفاده از دمای آستنیت بالاتر سبب دستیابی به کسر حجمی و درصد کربن بیشتری از آستنیت باقیمانده شده است.

این موضوع را می توان یکی از عوامل اختلاف تغییرات ابعادی در اثر تغییر دمای آستنیت دانست چرا که حجم ویژه فازهای مختلف موجود در زمینه چدن نشکن آستمپر شده با یکدیگر اندکی تفاوت دارد. از طرف دیگر تغییر در دمای آستنیت حجم واقعی فاز گرافیت پس از آستمپرینگ را تغییر می دهد و بدین گونه نیز بر تغییرات حجمی آلیاژ حین آستمپرینگ اثر می گذارد. به طور خلاصه باید گفت که افزایش دمای آستنیت موارد زیر را باعث می شود:

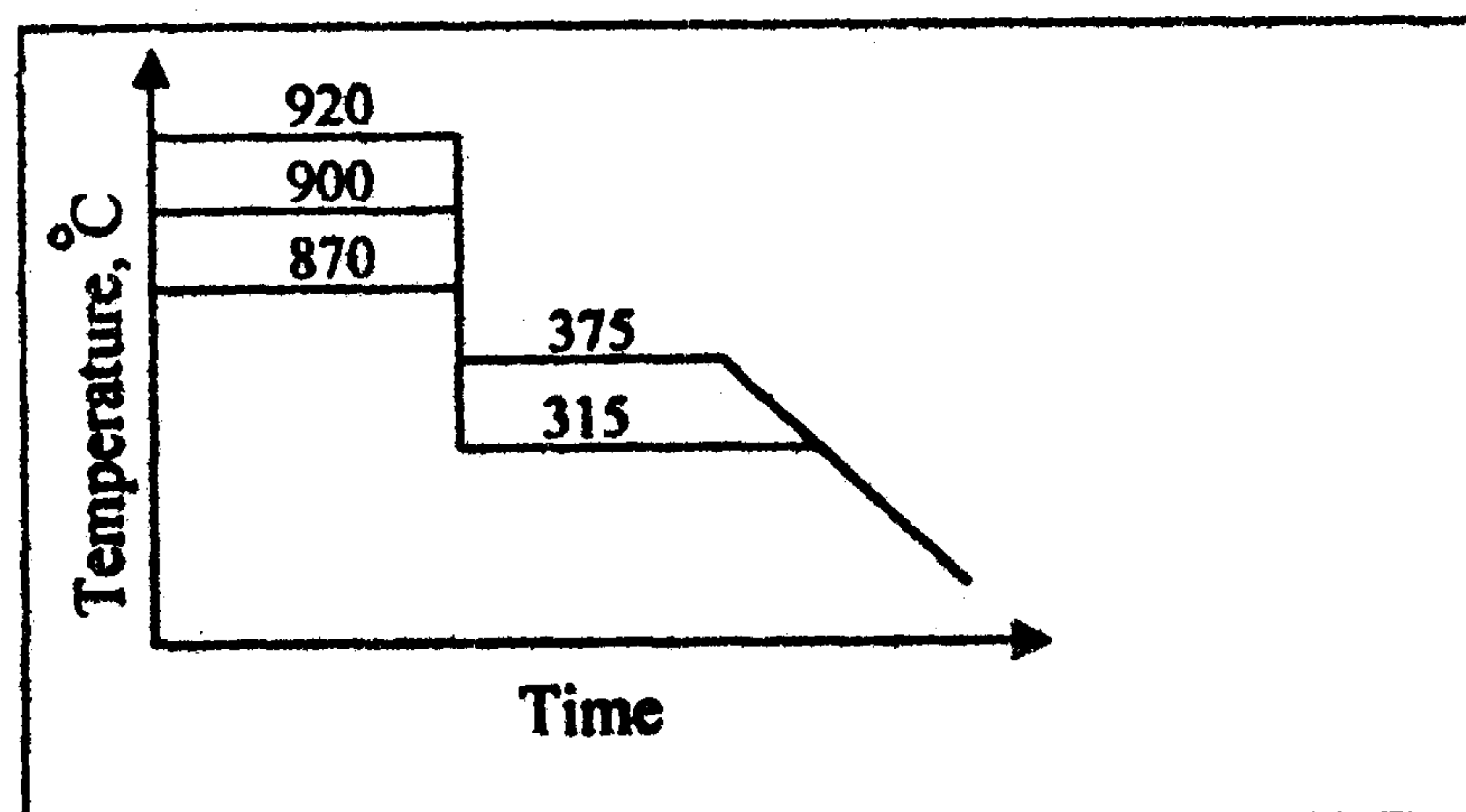
الف - C_{γ} را افزایش می دهد [۹،۲]. مقدار محاسبه شده آن برای سه دمای آستنیت 870 و 900 و 920°C به ترتیب برابر 0.70 ، 0.78 و 0.83 می باشد (جدول ۳).

ب - حداکثر کسر حجمی آستنیت باقیمانده و کربن محتوی آن افزایش می یابد (جدول ۳ و ۲).

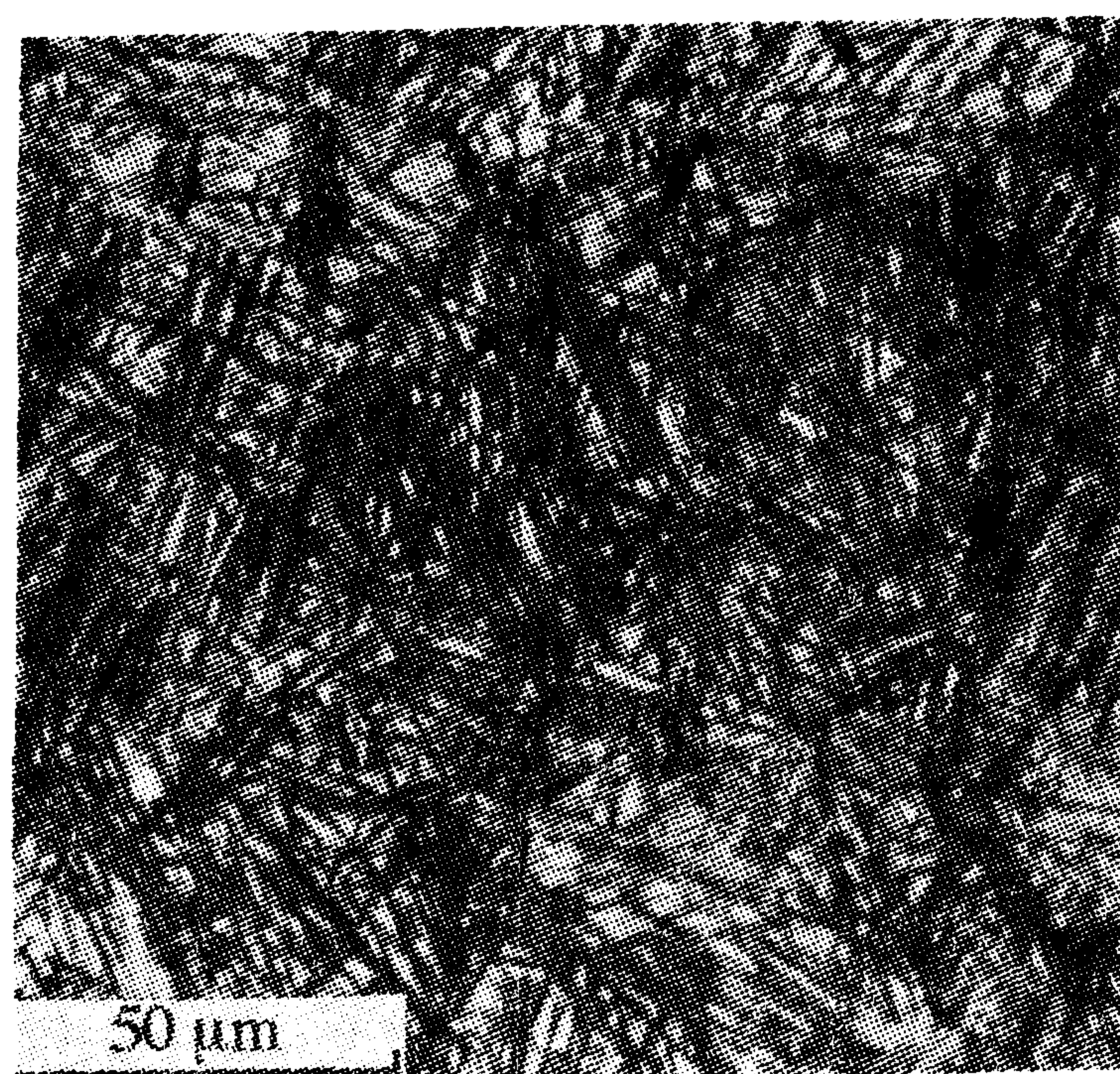
پ - کسر حجمی کاربیدها افزایش می یابد [۹،۲]. با توجه به مقادیر C_{γ} و C_{γ} و X'_{γ} و در نظر گرفتن $C_{\alpha} = 0.1$ ، مقدار کربن متبلور شده به شکل کاربید در ریزساختار ADI برای دماهای آستنیت مختلف با استفاده از رابطه زیر [۸] قابل تخمین است:

$$C_{\gamma}^{\circ} = C_{\gamma} X'_{\gamma} + C_{\alpha} X'_{\alpha} + C_{car.}$$

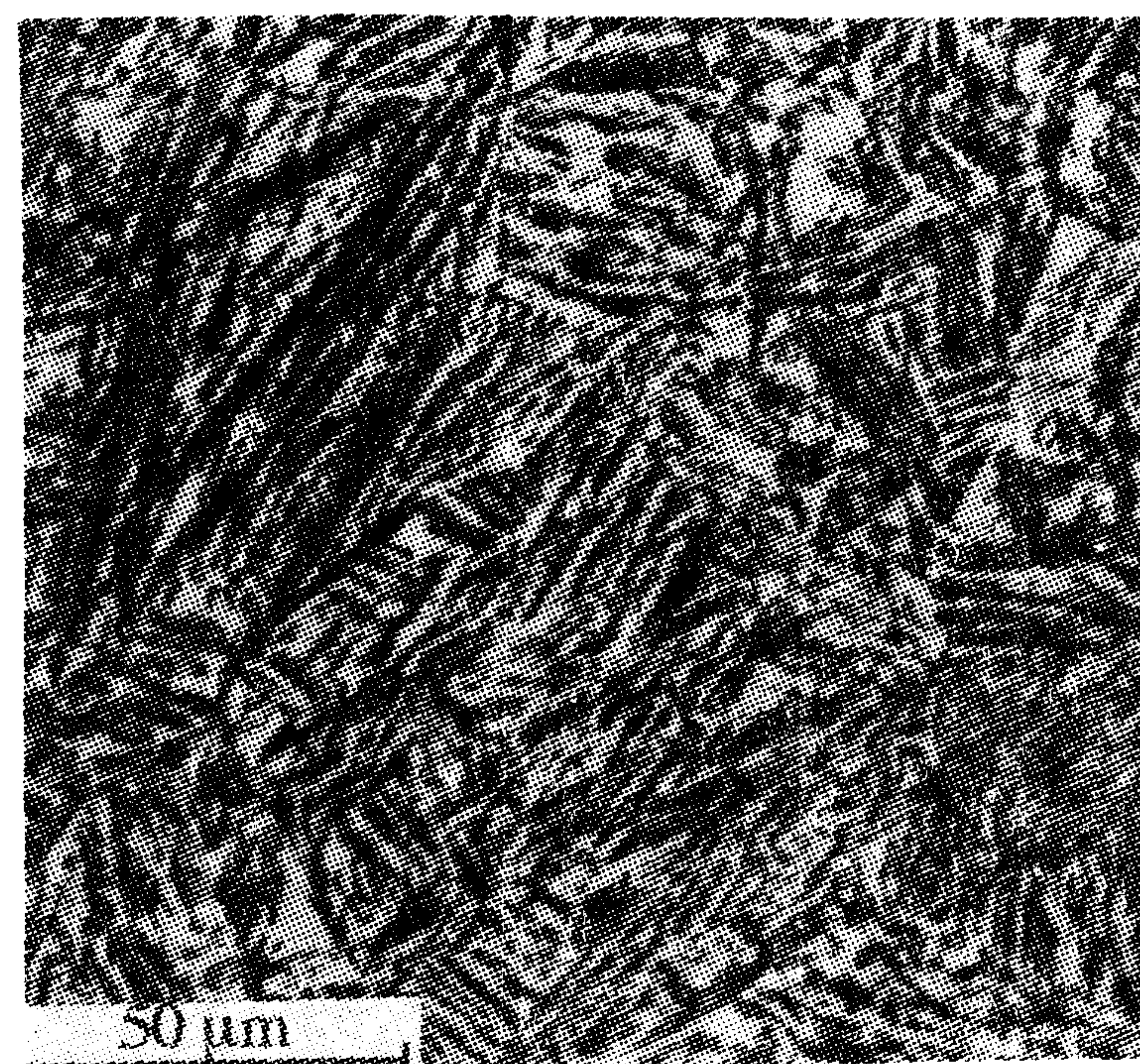
(۱)



شکل ۱: نمایش نمادین عملیات حرارتی آستمپرینگ در تحقیق حاضر.

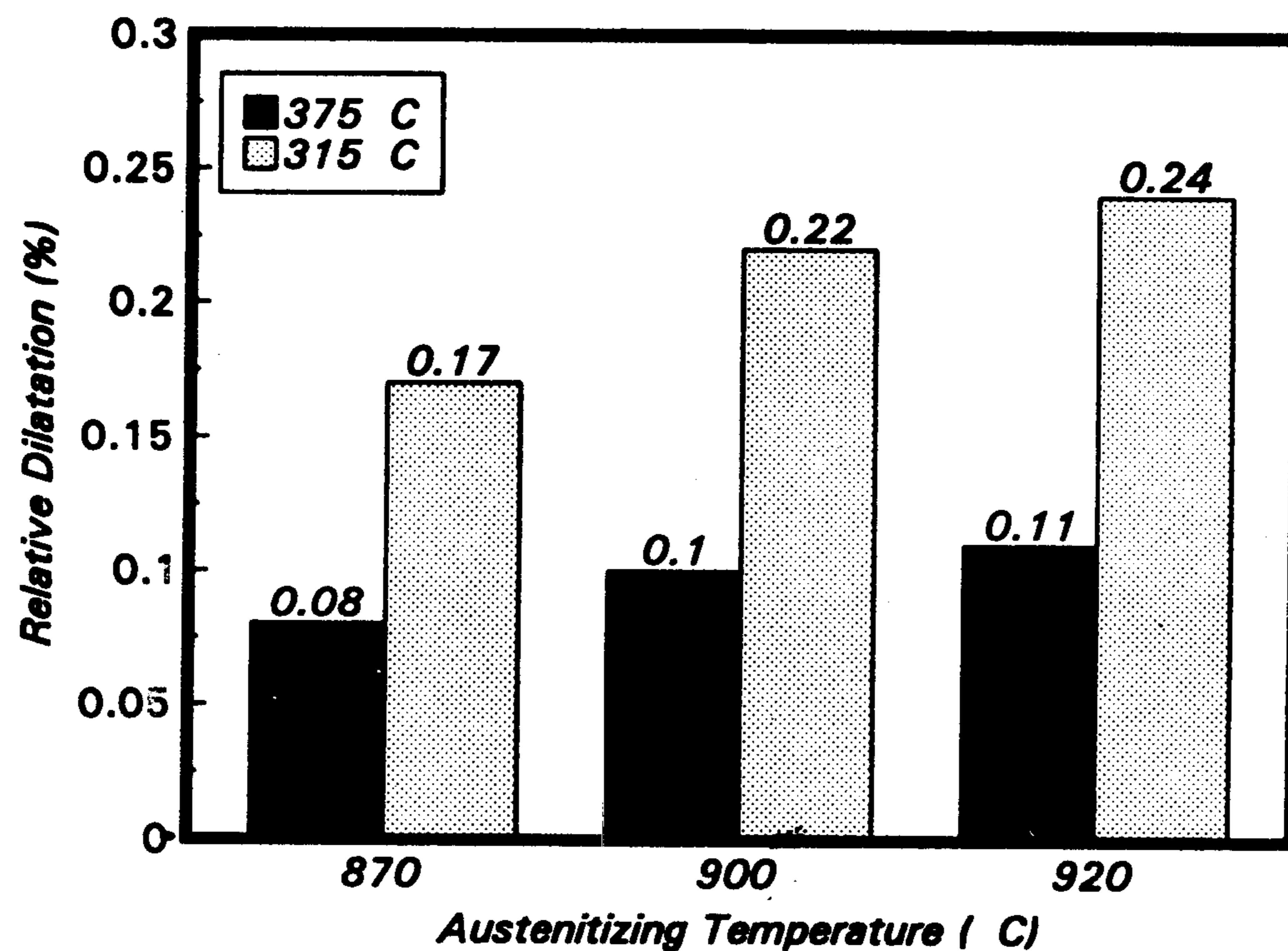


الف - در دمای 315°C درجه سانتی گراد.



ب - در دمای 375°C درجه سانتی گراد.

شکل ۲: ریزساختار چدن نشکن آستمپر شده.



شکل ۳: مقایسه میزان تغییرات ابعادی نسبی در دمای آستمپرینگ ۳۱۵ و ۳۷۵ درجه سانتی گراد برای دماهای مختلف آستنیتیه شده.

جدول ۲: تغییرات کسر حجمی و کربن محتوی آستنیت با زمان آستمپرینگ در صورت استفاده از دماهای آستنیتیه مختلف و دمای آستمپرینگ ۳۱۵ °C

T _γ (°C)	t _A (mine)	۳۰		۶۰		۹۰		۱۲۰	
		C _γ	X _γ	C _γ	X _γ	C _γ	X _γ	C _γ	X _γ
۹۲۰	۳۱۵	-	-	۱/۸۶	۰/۲۵۱	۱/۹۲	۰/۲۴۰	۲/۰۱	۰/۲۶۱
۹۰۰	۳۱۵	۱/۷۴	۰/۱۸۱	۱/۸۲	۰/۲۱۱	۱/۸۸	۰/۲۰۱	۱/۸۹	۰/۲۳۲
۸۷۰	۳۱۵	۱/۸۰	۰/۱۷۴	۱/۸۰	۰/۲۰	۱/۸۷	۰/۱۹۶	۱/۸۷	۰/۱۶۸

آستمپرینگ، دماهای آستنیتیه مختلف می‌باشد. جزئیات توزیع کربن در فازهای زمینه و گرافیت در جدول (۳) ارائه شده است. از رابطه زیر جهت محاسبه مقدار کربن تبلور یافته بصورت گرافیت استفاده شده است.

$$C_G = C_t - C_\gamma \quad (2)$$

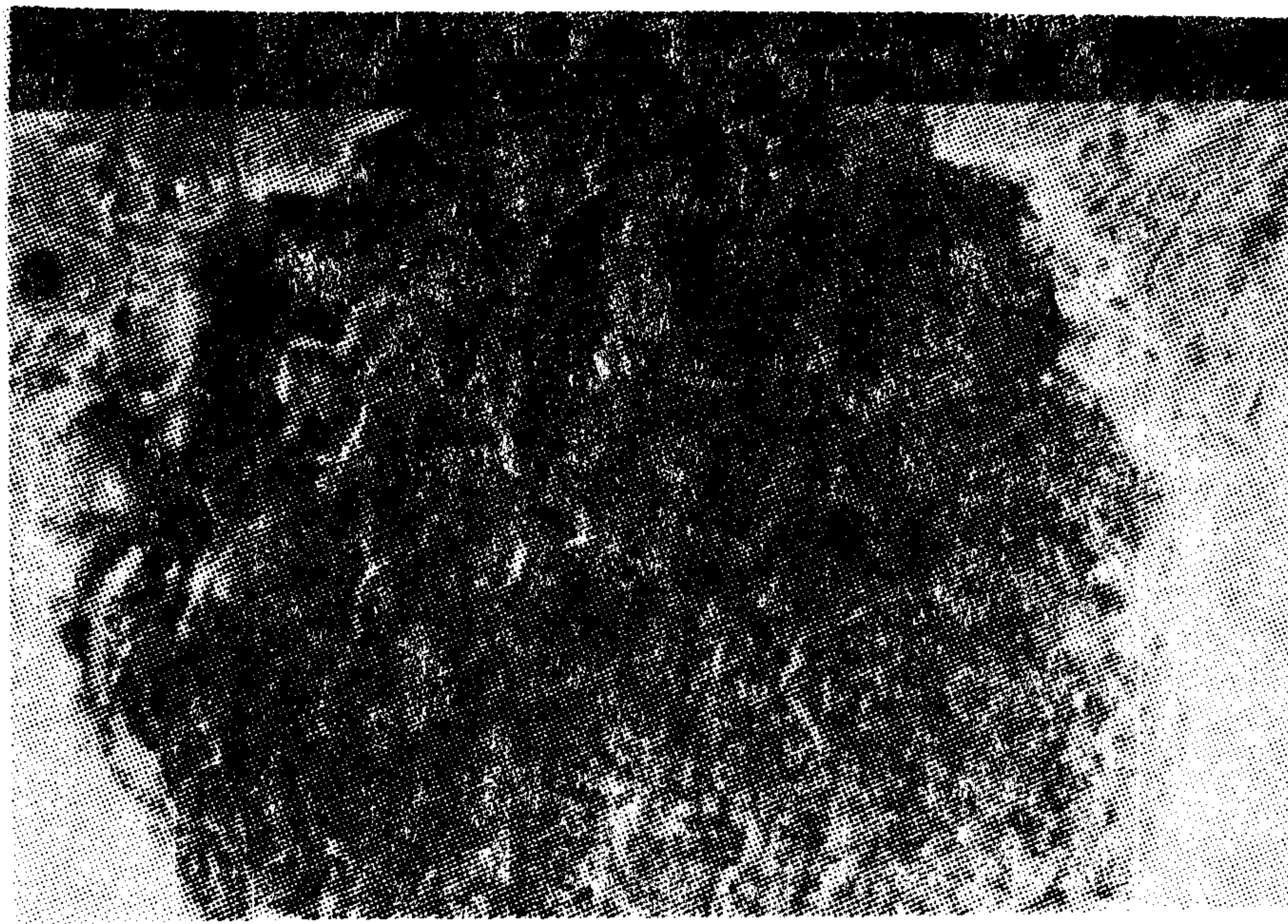
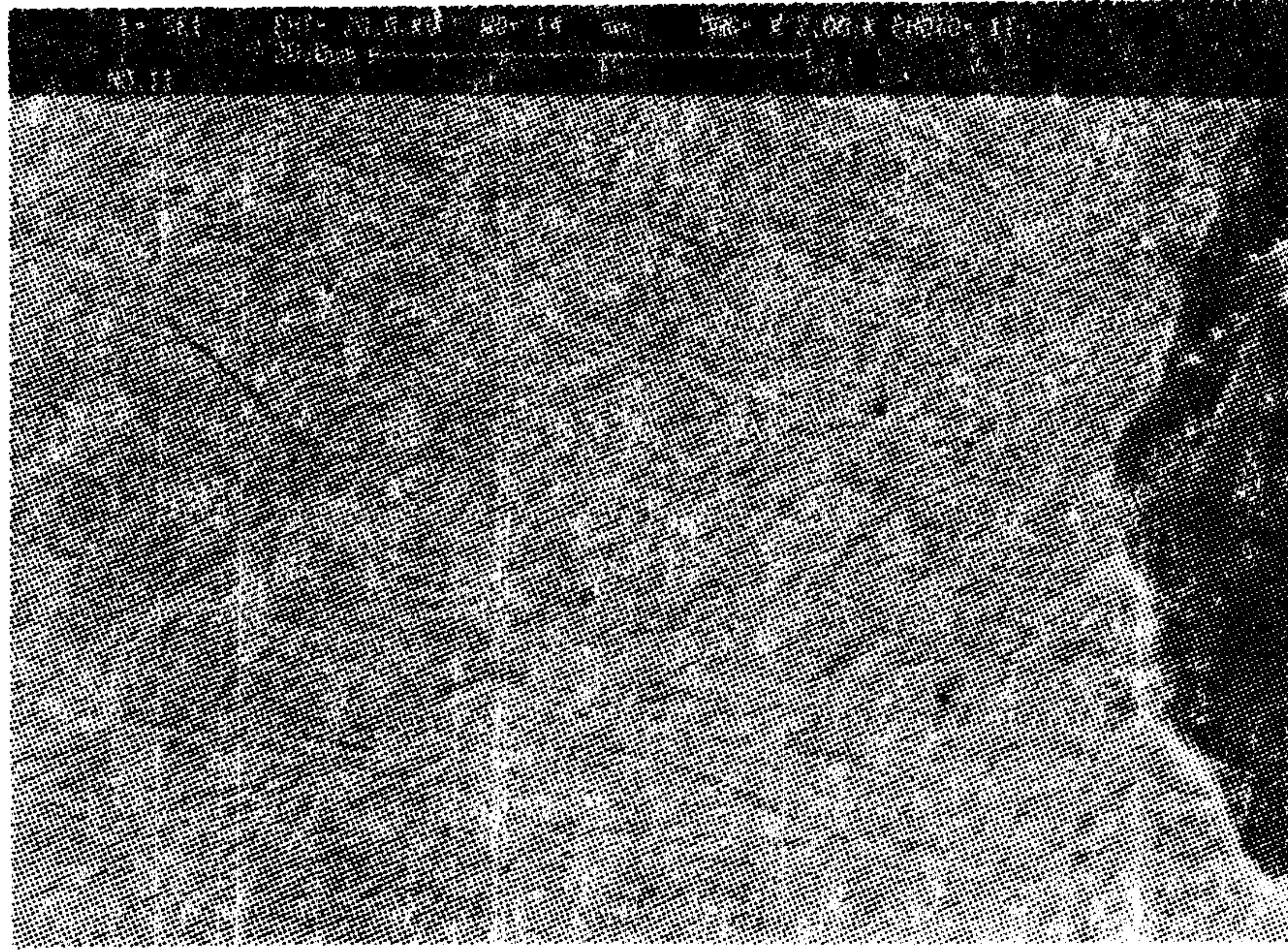
C_G درصد وزنی کربن تبلور یافته بصورت گرافیت در ADI و C_t و C_γ به ترتیب درصد وزنی کربن چدن نشکن و درصد وزنی کربن محلول در زمینه در دمای آستنیتیه می‌باشد.

به منظور بررسی علل تغییرات ابعادی در چدن نشکن ناشی از تغییر دمای آستنیتیه باتوجه به اطلاعات ارائه شده، نخست به محاسبه حجم اشغال شده توسط زمینه چدن نشکن (بدون در نظر گرفتن گرافیت) آستمپر شده در دمای ۳۱۵ °C پرداخته می‌شود. حجم زمینه را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

ت - حجم واقعی فاز گرافیت کاهش می‌یابد چرا که با افزایش حد حلالیت کربن در آستنیت در دمای آستنیتیه کردن بالاتر کربن بیشتری از فاز گرافیت به زمینه نفوذ کرده و حجم واقعی فاز گرافیت کمتر می‌شود.

ث - کسر حجمی حفرات پیرامون گرافیت ها افزایش می‌یابد. بدیهی است از آنجا که وجود چنین حفراتی در اطراف همه گرافیت های موجود در ریزساختار مشخص شده است، مجموع کسر حجمی آنها، سهمی را در تغییرات حجمی خواهد داشت ، (شکل ۴).

باتوجه به موارد فوق محاسبه حجمی از ریزساختار زمینه چدن نشکن آستمپر شده، در دمای ۳۱۵ °C به مدت ۱۲۰ دقیقه، با دماهای آستنیتیه ۸۷۰، ۹۰۰ و ۹۲۰ °C صورت گرفته است که در این روش محاسبه براساس تخمین مقدار کربن متبلور شده به صورت کاربرد و محاسبه مقدار کربن موجود بصورت گرافیت پس از



شکل ۴: مقایسه حفرات نامنظم بوجود آمده در نمونه های آستمبر شده با استفاده از دماهای آستنیته C - ۹۲°، C - ۹۰°، C - ۸۷° - a.

استفاده از دمای آستنیت به بالاتر بیشتر از دماهای آستنیت پائین تر می باشد که دلیل آن وجود جرم بیشتر در زمینه (کربن بیشتر در زمینه) و اثرات حجمی ناشی از آن می باشد.

از طرف دیگر با معلوم بودن C_G و محاسبه تعداد سلولهای واحد ساختمانی گرافیت (N_G) برای 1000 gr چدن نشکن با توجه به وجود ۴ اتم کربن در هر Unit Cell گرافیت با شبکه هگزاگونال با حجم سلول واحد $U_G = 35/191 (\text{Å})^3$ ، در جدول (۵) حجم گرافیت در حالت های مختلف محاسبه شده است. حجم کل ADI با توجه به موارد فوق از رابطه زیر محاسبه شده و در جدول (۵) ثبت شده است:

$$V_{ADI} = V_{matrix} + N_G U_G + V_{voids} \quad (6)$$

نتایج نشان می دهد که جمع جبری حجم زمینه و گرافیت ها و حفره های پیرامون آن در ADI حاصل از دمای آستنیت بالاتر بیشتر شده است یعنی افزایش حجم بیشتر زمینه در اثر استفاده از دمای آستنیت بالاتر بعلاوه افزایش حجم حفرات و تخلخل های حاصل بیشتر، بر کاهش حجم واقعی گرافیت که در دمای آستنیت رخ می دهد، غلبه یافته است.

نتیجه گیری

با استفاده از نتایج آزمایشها و محاسبه های صورت گرفته مشخص گردید که:

۱- با افزایش دمای آستنیت کردن حجم چدن نشکن آستمبر افزایش می یابد.

$$V_{matrix} = N_\gamma U_\gamma + N_{Car} \cdot U_{Car} + N_\alpha U_\alpha \quad (3)$$

تعداد سلولهای واحد یک فاز از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$N_x = \frac{A_x}{n_x} \quad (4)$$

حجم سلول واحد هریک از فازها براساس پارامتر شبکه آنها محاسبه شده است. پارامتر شبکه آستنیت از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۱]:

$$a_\gamma (\text{Å}) = 3/54 + 0/044 C\% - 0/0019 Si\% \quad (5)$$

درصد کربن فریت ۰/۱ درصد [۱۰] و پارامتر شبکه آن برابر A° ۲/۸۶۶ [۱۰، ۱۱] و کریستال کاربید نیز سمانیت در نظر گرفته شد. با استفاده از روابط فوق در جدول (۴) حجم زمینه ADI برای سه دمای آستنیت مختلف به ازاء 1000 gr چدن نشکن محاسبه شده است. به خوبی روشن است که افزایش دمای آستنیت در محدوده آزمایش شده سبب افزایش درصد وزنی آستنیت باقیمانده و افزایش اندکی C_γ در ریزساختار ADI حاصل از آستمبرینگ در دمای 315°C شده است. این امر به دلیل شرکت کردن مقدار بیشتری کربن در تغییر حالت بینیتی است. نتایج آزمایشهای یاد شده نشان داده که افزایش دمای آستنیت منجر به زیاد شدن کسر حجمی کاربیدها نیز میشود که افزایش اندکی در سختی ADI را بدنبال خواهد داشت. اما محاسبات براساس اندازه گیریهای اشعه X و یا محاسبه C_γ با استفاده از رابطه Wada [۱۲] می باشد. جدول (۴) همچنین نشان می دهد حجم زمینه ADI حاصل از

جدول ۳: توزیع کربن شرکت کننده در تحول بینیتی در اجزاء ریزساختاری ADI.

$T_\gamma (^\circ \text{C})$	$C_\gamma (\text{wt}\%)$	$C_\gamma (\text{wt}\%)$	X_γ	$C_\gamma X_\gamma (\text{wt}\%)$	$C_{car} (\text{wt}\%)$ $C_\alpha = 0.1$	$C_G (\text{wt}\%)$
۹۲۰	۰/۸۳	۱/۹۳	۰/۲۳۴	۰/۴۵	۰/۳۲	۲/۷۲
۹۰۰	۰/۷۸	۱/۸۹	۰/۲۱۶	۰/۴۱	۰/۳۱	۲/۷۷
۸۷۰	۰/۷۰	۱/۸۷	۰/۱۷۸	۰/۳۳۵	۰/۳۰۵	۲/۸۵

جدول ۴: محاسبه حجمی زمینه ADI حاصل از دمای آستمبرینگ 315°C برای دماهای آستنیت مختلف.

$T_\gamma (^\circ \text{C})$	N_γ *10E-23	U_γ (Å°) ³	N_{car} *10E-23	U_{car} (Å°) ³	N_α *10E-23	U_α (Å°) ³	حجم زمینه (cm^3)
۹۲۰	۶/۲۵۵	۴۷/۷۴۹	۰/۴۰۱	۱۵۵/۱۷۴	۳۷/۰۹۲	۲۳/۵۶۲	۱۲۳/۴۹
۹۰۰	۵/۵۲۳	۴۷/۶۷۰	۰/۳۸۶	۱۵۵/۱۷۴	۳۸/۰۳۲	۲۳/۵۶۲	۱۲۳/۳۵
۸۷۰	۴/۷۶۴	۴۷/۶۲۰	۰/۳۸۲	۱۵۵/۱۷۴	۴۰/۱۸۸	۲۳/۵۶۲	۱۲۳/۳۰

جدول ۵: محاسبه حجمی گرافیت و ADI در صورت استفاده از دماهای آستنیت مختلف.

T_γ (°C)	حجم زمینه (cm ³)	N_G *10E-23	U_G (Å ³)	حجم گرافیت (cm ³)	حجم تخمینی حفرات (cm ³)	حجم ADI (cm ³)
۹۲۰	۱۲۳/۴۳	۳/۴۰۸	۳۵/۱۹۱	۱۲/۰۰	۲/۶	۱۳۸/۰
۹۰۰	۱۲۳/۳۵	۳/۴۷۰	۳۵/۱۹۱	۱۲/۲۱	۲/۳	۱۳۷/۸۶
۸۷۰	۱۲/۳۰	۳/۵۷۱	۳۵/۱۹۱	۱۲/۵۶	۱/۸	۱۳۷/۶۶

- ۲ - با افزایش دمای آستنیت کردن حجم حفرات اطراف گرافیتها افزایش می یابد.
- ۳ - افزایش حجم چدن نشکن عمدتاً ناشی از افزایش حجم زمینه (بدون گرافیت) و افزایش حجم حفرات اطراف گرافیتها می باشد.
- معرفی نمادها**
- T : درجه حرارت
- C_γ : درصد وزنی کربن در آستنیت باقیمانده
- C_γ° : درصد وزنی کربن در آستنیت
- t : مدت زمان
- X_γ : کسر حجمی آستنیت باقیمانده
- X'_γ : کسر وزنی آستنیت باقیمانده
- C_α : درصد وزنی کربن در فریت
- $C_{car.}$: درصد وزنی کربن در کاربید
- C_G : درصد وزنی کربن در گرافیت
- C_I : درصد وزنی کربن در چدن نشکن
- V_{matrix} : حجم زمینه ADI بدون گرافیت
- N_x : تعداد سلولهای واحد (Unit Cell) هر فاز در جرم مشخص
- U_x : حجم سلول هر فاز
- γ : فاز آستنیت
- Car. : فاز کاربید
- α : فاز فریت
- A : آستمپرینگ
- N_x : تعداد سلولهای واحد
- A_x : تعداد اتمهای هم نوع موجود در فاز
- n_x : تعداد اتمهای هم نوع موجود در سلول واحد

مراجع

- 1 - Voigt, R. C. (1989). *Cast metals*. Vol. 2, P. 71.
- 2 - Grech, M. and Young, J. M. (1990). *MST*. Vol. 6, P. 415.
- 3 - Nilson, K. Svenska Giuteri Foreningen. (1979). *IVF, BCIRA Translation T*. P. 1615.
- 4 - Morgan, H. L. (1987). *British Foundryman*. Vol. 80, P. 98.
- 5 - Hornung, K. Ph.D Thesis. (1983). Technical University of Munich, Germany.
- 6 - Lincoln, J. A. (1984). *Proc. 1st int. Conf. ADI*. Chicago, P. 167.
- ۷ - نیلی احمدآبادی، م.، حاجی بهرامی، ح. و اوصیاء، م. نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۱، شماره ۲، آذرماه (۱۳۷۷).
- ۸ - زری نژاد، م. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۷۶).
- 9 - Rouns, T. N. and Rundman, K. B. (1987). *AFS trans*. Vol. 95, P. 851.
- 10 - Dymski, S. and Zykomny, S. (1996). *MST*. Vol. 12, P. 385.
- 11 - Takahashi, T., Kurihara, S. and Abe, T. (1996). *Met. Mater. Trans. A*. Vol. 27, P. 1591.
- 12 - Darwish, N. and Elliot, R. (1993). *MST*. Vol. 9, P. 586.
- 13 - Gundlach, R. and Janowak. (1986). *Proc. 2nd int. conf. ADI*. Ann Arbor, P. 291.