

مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای ورودی بر مشخصه‌های خروجی سطح نشیمنگاه میل لنگ‌های میکروآلیاژی 38MnVS5 در فرآیند سختکاری القایی

مهدی ثقفیان^۱، محمدرضا شبگرد^{۲*}، هادی عیوضی باقری^۳ و بابک سعدی زاده^۴

چکیده

در این پژوهش تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند سختکاری القایی (توان، فاصله کویل تا میل لنگ و زمان القای جریان) بر پارامترهای خروجی (سختی سطح و تغییرات عمق ناحیه‌ی سختکاری شده)، در عملیات سختکاری میل لنگ‌های میکروآلیاژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که با افزایش توان و زمان القای جریان، مقدار سختی سطح بیش‌تر شده و عمق منطقه‌ی سختکاری شده افزایش می‌یابد. هم‌چنین، با افزایش فاصله‌ی بین کویل و میل لنگ، مقدار سختی بدست آمده کاهش می‌یابد. براساس نتایج بدست آمده مشخص شد که در تمامی میل لنگ‌های مورد آزمایش، سختی سطح پینها (نشیمنگاهها) در بخش بالایی آنها، بیش از بخش پایینی آنهاست. به گونه‌ای که این عامل می‌تواند موجب سایش زودرس میل لنگ‌ها شده و عمر آنها را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: توان، زمان القای جریان، سختی سطح، عمق سختی.

1- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران.

2- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

3- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد واحد تبریز.

4- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: mrshabgard@tabrizu.ac.ir.

پیشگفتار

در فرآیند حرارت‌دهی القایی قطعه کاری که می‌بایستی روی بخشی از آن عملیات سختکاری القایی انجام شود، در داخل یک سیم پیچ (الفاگر) قرار می‌گیرد. در این فرآیند، با عبور جریان متناوب با فرکانس زیاد (در محدوده‌ی 2 تا 55 کیلو هرتز) از الفاگر، میدان مغناطیسی پیرامون آن ایجاد شده و باعث ایجاد جریان‌های فوکو در قطعه‌ی یاد شده می‌گردد. این جریان که در سطح قطعه متمرکز می‌شود، به دلیل وجود مقاومت الکتریکی ماده باعث ایجاد حرارت در آن ناحیه می‌شود. به گونه‌ای که هر چه فرکانس جریان بیشتر باشد، عمق نفوذ جریان و ضخامت پوسته‌ی سخت شده کم‌تر خواهد شد [1]. از مزایای روش سختکاری القایی سرعت زیاد فرآیند، تکرار پذیری بالا، افزایش عمر خستگی قطعات و همچنین، قابلیت خودکار شدن آن می‌باشد.

یکی از پیشرفت‌های مهم صنعت فولاد در نیم قرن اخیر، تولید فولادهای میکروآلیاژی با استحکام بالا می‌باشد. فولاد میکرو آلیاژی، فولادی است که ترکیب شیمیایی پایه آن شبیه ترکیب شیمیایی یک فولاد ساختمانی معمولی است که مقادیر جزئی از عناصر میکرو آلیاژی (مانند وانادیوم و تیتانیوم) به آن افزوده شده است. در این فولادها معمولاً مقدار کل عناصر میکرو آلیاژ افزوده شده در حدود چند دهم درصد و یا کم‌تر است [2].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در ارتباط با مطالعه‌ی عوامل موثر در مورد عملیات حرارتی القایی قطعات فولادی انجام گرفته است. کرام و همکاران [3]، کیفیت سطح و لایه‌های زیر سطحی میل لنگ‌های تحت عملیات سخت کاری القایی را مورد مطالعه قرار داده اند، آن‌ها در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که الگوی دقیق تنش‌های پسماند بوجود آمده در سطح، بستگی به دماهای مورد استفاده، عمق سختکاری و نوع عملیات کوئنچ دارد. کوهلی و همکاران [4]، در پژوهش خود شرایط بهینه‌ی عملیات سختکاری القایی فولاد (AISI 1040) را با استفاده از روش‌های آماری مورد مطالعه قرار داده و پارامترهای شدت جریان، فاصله‌ی بین قطعه‌کار و الفاگر و زمان حرارت دهی را موثرترین پارامترهای ورودی بر عمق سختکاری معرفی کرده اند.

هم‌چنین، بر اساس بررسی‌های متالوگرافی مشخص شد که با افزایش دمای آستینیتی کردن میل لنگ، ساختار مارتنزیت متراکم‌تری بدست آمده و سختی سطحی مناطق سختکاری شده افزایش می‌یابد. احمد و همکاران [5]، ویژگی‌های سطح در عملیات سختکاری القایی فولاد (AISI 1045) را مورد مطالعه قرار داده اند. بر اساس گزارش آن‌ها، عمق ناحیه‌ی سختکاری شده‌ی سطح نمونه‌ها مابین 0.8 تا 2.5 میلیمتر متغیر بوده و سختی سطح به مقدار قابل توجهی از سختی لایه‌های پایین‌تر بیشتر است. کاشفی و همکاران [6]، تأثیر پارامترهای ورودی توان، زمان القای جریان و تأثیر ساختار اولیه را بر عمق ناحیه‌ی سختکاری شده‌ی پلوس خودرو از جنس فولاد (AISI 1045) مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهش آن‌ها، ارتباط بین عمق سخت شده‌ی کل و عمق سخت شده‌ی موثر مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که عمق سخت شده‌ی موثر 85٪ عمق سخت شده‌ی کل می‌باشد. هم‌چنین، بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که با ساختار اولیه‌ی ظریف‌تر، می‌توان عمق ناحیه‌ی سختکاری شده را افزایش داد. کریستوفرسون و همکاران [7]، ریز ساختار سطح دو نوع ریزساختار اولیه‌ی (کوئنچ و تمبر شده و نرمالیزه شده) سختکاری شده به روش القایی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در بررسی آن‌ها مشخص شد که پس از انجام فرآیند سختکاری القایی، یک تنش پسماند دو محوره روی سطح نمونه ایجاد می‌شود. این بررسی نشان می‌دهد که به ازای عمق یکسان پوسته، پارامترهای فرآیند سختکاری به روش القایی، وضعیت تنش پسماند قطعات سختکاری شده را به دلیل توزیع‌های متفاوت دما در نمونه‌ها در طول گرمایش، به مقدار زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به کاربرد گسترده‌ی میل‌لنگ در صنایع خودروسازی و نقش خیلی مهم آن در تعیین قیمت و عمر مفید مجموعه‌ی موتور و با ملاحظه‌ی این‌که سختی و مقاومت به سایش تکیه‌گاه یاتاقان‌ها در روی میل لنگ بیش‌ترین تأثیر را در روی عمر میل لنگ دارد، بررسی تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند سختکاری القایی بر سختی سطح میل لنگ‌های میکروآلیاژی که در شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز تولید می‌شوند، به عنوان

یک پروژه مهم پژوهشی در دستور کار این واحد صنعتی قرار گرفت. لذا، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر مهم‌ترین پارامترهای ورودی فرآیند ساختاری القایی (توان، فاصله کویل تا میل لنگ و زمان القای جریان) بر سختی سطح و عمق سختکاری شده در ناحیه‌ی سختکاری شده (نشیمنگاه محل یاتاقان‌ها در روی میل لنگ) می‌باشد. همچنین، انجام تست‌ها در شرایط واقعی بر روی میل لنگ‌های مورد استفاده در موتور (به جای نمونه‌های آزمایشگاهی) از مزایای دیگر این پژوهش می‌باشد.

مواد و روش انجام آزمایش‌ها
میل لنگ‌های مورد آزمایش در این پژوهش از نوع میل لنگ‌های چهار نشیمنگاهی میکروآلیاژی (38MnVS5) می‌باشند که در موتورهای دیزلی بکار می‌روند. جدول 1 آنالیز کوانتومتری از میل لنگ‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.
در این آزمایش‌ها زمان القای جریان، توان ورودی و فاصله بین کویل و میل لنگ به عنوان متغیرهای ورودی مستقل در نظر گرفته شدند، به گونه‌ای که زمان القای جریان در چهار سطح، توان ورودی و فاصله بین کویل و میل لنگ¹ هر کدام در سه سطح انتخاب شده‌اند. بدین ترتیب، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های کامل²، 36 عدد قطعه کار نمونه آماده گردید و برای این منظور 9 عدد میل لنگ که هر کدام دارای چهار نشیمنگاه یاتاقان خارج از مرکز می‌باشند، بکار گرفته شد. جدول 2 پارامترهای ورودی جهت انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، شکل شماتیک میل لنگ همراه با پین‌ها (نشیمنگاهها) مورد نظر در شکل 1 نشان داده شده است.

میل لنگ‌های مورد آزمایش در این پژوهش از نوع میل لنگ‌های چهار نشیمنگاهی میکروآلیاژی (38MnVS5) می‌باشند که در موتورهای دیزلی بکار می‌روند. جدول 1 آنالیز کوانتومتری از میل لنگ‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.
در این آزمایش‌ها زمان القای جریان، توان ورودی و فاصله بین کویل و میل لنگ به عنوان متغیرهای ورودی مستقل در نظر گرفته شدند، به گونه‌ای که زمان القای جریان در چهار سطح، توان ورودی و فاصله بین کویل و میل لنگ¹ هر کدام در سه سطح انتخاب شده‌اند. بدین ترتیب، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌های کامل²، 36 عدد قطعه کار نمونه آماده گردید و برای این منظور 9 عدد میل لنگ که هر کدام دارای چهار نشیمنگاه یاتاقان خارج از مرکز می‌باشند، بکار گرفته شد. جدول 2 پارامترهای ورودی جهت انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، شکل شماتیک میل لنگ همراه با پین‌ها (نشیمنگاهها) مورد نظر در شکل 1 نشان داده شده است.
ابتدا تمامی میل لنگ‌ها به وسیله‌ی ماشین مخصوص ساختاری القایی (-Type: PU90-43-130- Alfing) موجود در خط میل لنگ شرکت موتور سازان مورد عملیات سختکاری قرار گرفتند. به دلیل اتحنا دار بودن سطح پین‌ها، جهت اندازه‌گیری سختی سطح پین‌ها از دستگاه سختی سنج پرتابل (Equo Tip)

بمنظور بررسی متالورژیکی سطح مقطع قطعه کارهای سختکاری شده، نمونه‌ها پس از مانیت‌گیری، سمباده زنی شده و پولیش زده شدند. جهت مشاهده سطح مقطع قطعات به وسیله‌ی دستگاه میکروسکوپ نوری (Olympus-PMG3) و میکروسکوپ الکترونی (Cam Scan mv2300)، نمونه‌های پولیش شده با محلول الکل و اسید نیتریک اچ شده و بلافاصله شسته شده و به وسیله‌ی جریان هوای گرم، خشک گردیدند.

$$Q=R.I^2.t \quad (1)$$

شکل‌های 3 و 4 تأثیر مقدار توان مصرفی و زمان القای جریان³ (I.H.T) بر سختی سطح قطعات سختکاری شده را نشان می‌دهند. همان گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار سختی سطح پین‌های سختکاری شده (نشیمنگاهها) با افزایش توان افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله را این گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش مقدار توان ورودی، جریان‌های گردابی شدیدتری در سطح قطعه ایجاد می‌شود به گونه‌ای که با افزایش شدت این جریان‌ها، بر اساس رابطه‌ی (1) حرارت بیش‌تری در سطح میل لنگ القا می‌شود.

³ - Induction heating Time

¹ - Gap

² - full factorial

گرم کردن القایی، مکانیسم تشکیل آستنیت شبیه مکانیزم استحاله‌ی ماتنزیتی می‌باشد. لذا، در حالت گرمایش با سرعت زیاد، در ساختار بدست آمده، دانسیته‌ی بالایی از معایب کریستالی نظیر نابجایی‌ها و جاهای خالی ایجاد می‌شود که در هنگام عملیات کوئنچ به عنوان محل‌های جوانه زنی ماتنزیت عمل می‌کنند. لذا، با افزایش توان ورودی و در نتیجه، افزایش سرعت گرمایش، در هنگام کوئنچ در سطح قطعه‌کار فاز ماتنزیت با ساختار ظریف‌تری بوجود می‌آید که باعث افزایش سختی آن می‌شود [8] و در نتیجه همزمان با افزایش توان ورودی، مقدار سختی سطح بیش‌تر می‌شود.

بر اساس شکل‌های 3 و 4 همزمان با افزایش زمان القای جریان مقدار سختی سطح افزایش می‌یابد. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان توضیح داد که با افزایش زمان القای جریان تا یک حد مناسب، سطح قطعه کار مدت زمان بیش‌تری در معرض جریان‌های گردابی قرار گرفته، دمای سطح قطعه افزایش یافته و سطح میل لنگ مدت زمان کافی برای رسیدن به دمای آستینیتی در اختیار خواهد داشت، در حالی‌که در زمان‌های پایین‌تر، دمای فاز آستنیت تشکیل شده پایین‌تر است. این امر سبب می‌شود که پس از عملیات کوئنچ، مقدار سختی در این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌هایی که مدت زمان کافی در معرض جریان القایی قرار گرفته اند پایین‌تر باشد.

تأثیر فاصله‌ی کوپل تا میل لنگ بر مقدار سختی سطح مقطع قطعات سخت‌کاری شده

شکل‌های 5 و 6 تأثیر فاصله‌ی بین کوپل تا پین را بر سختی سطح پین‌ها نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله بین کوپل تا پین‌ها، مقدار سختی سطح کاهش می‌یابد. علت این مسئله را بدین صورت می‌توان توضیح داد که افزایش فاصله‌ی بین کوپل و میل‌لنگ، باعث پراکندگی میدان مغناطیسی و کاهش شدت جریان‌های گردابی القای در سطح قطعه کار می‌گردد که این مسئله باعث کاهش گرمای تولید شده و در نتیجه، کاهش دمای سطح می‌شود [9]، لذا در عملیات کوئنچ، مقدار سختی در سطح کاهش می‌یابد.

تأثیر مقدار توان ورودی بر مقدار سختی سطح و عمق ناحیه‌ی سخت‌کاری شده

شکل‌های 7 و 8 تأثیر مقدار توان مصرفی بر سختی سطح مقطع قطعات سخت‌کاری شده را نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار سختی سطح مقطع میل‌لنگ های سخت‌کاری شده در جهت شعاع پین‌ها روندی نزولی دارد. دلیل این مسئله را بدین صورت می‌توان بیان کرد که به دلیل استفاده از جریان متناوب برای انجام عملیات سخت‌کاری القایی، همواره اثر پوسته‌ای در نتیجه‌ی تجمع جریان‌های گردابی در لایه‌ی سطحی قطعه‌کار واقع در درون کوپل بوجود می‌آید که به موجب اثر پوسته‌ای تقریباً 86٪ توان اعمالی در لایه‌ی سطحی قطعه کار متمرکز می‌شود [10]، این امر به دلیل ایجاد گرمای بیش‌تر در سطح میل لنگ و لبه‌های نزدیک به سطح سبب تغییر ساختار نهایی به ساختار ماتنزیتی می‌شود، ولی با افزایش فاصله از سطح قطعه کار، از مقدار فاز ماتنزیت بوجود آمده کاسته می‌شود و در نتیجه، مقدار سختی کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به اینکه سرعت گرمایش در لبه‌ی قطعه کار بیش‌تر از بخش‌های داخلی است، لذا با افزایش فاصله از سطح، امکان افزایش اندازه‌ی دانه‌های آستنیت وجود دارد، این مسئله باعث می‌شود که فاز ماتنزیت از آستنیت اولیه با دانه‌های درشت‌تری بوجود آید و نسبت به ماتنزیتی که در لبه‌ی قطعه کار از دانه‌های ریزتر آستنیت تشکیل می‌شود، سختی کم‌تری داشته باشد. شکل‌های 9 و 11 (تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نوری) ساختار ماتنزیتی بدست آمده در سطح نمونه و کاهش فاز ماتنزیتی با افزایش فاصله از لبه‌ی سخت‌کاری شده را نشان می‌دهد.

هم‌چنین، شکل‌های 7 و 8 تأثیر مقدار توان ورودی بر عمق ناحیه‌ی سخت‌کاری شده را مختلف نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش توان عمق ناحیه‌ی سخت‌کاری شده افزایش می‌یابد. علت این امر را این‌گونه می‌توان توضیح داد که با توجه به قانون انتقال حرارت فوریه (رابطه 2)، هر چه دمای سطح قطعه در اثر افزایش توان بیش‌تر شود، مقدار گرمایی که به داخل قطعه نفوذ می‌کند، بیش‌تر می‌شود [9].

$$q = -\lambda \text{grad}(T) \quad (2)$$

سختکاری شده، فاصله‌ی بین کوپل و میل‌لنگ را نمی‌توان خیلی کم در نظر گرفت، زیرا در حین دوران میل‌لنگ احتمال برخورد میل‌لنگ با کوپل وجود دارد که باعث ایجاد اتصال کوتاه شده و منجر به آسیب دیدن القاگر و در نتیجه باعث ایجاد وقفه در عملیات تولید می‌شود.

شکل‌های 15 و 16 مقادیر سختی سطحی در دو سمت بالا و پایین پین‌ها (نشیمنگاهها) را نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار سختی سطح در قسمت بالای پین، بیش‌تر از قسمت پایین است، دلیل اختلاف سختی در این دو ناحیه در تفاوت سرعت کوئنچ این دو منطقه می‌باشد. با توجه به اینکه میل‌لنگ در حال دوران وارد مایع کوئنچ می‌شود، این امر سبب می‌شود که سرعت حرکت خطی قسمت بالای نشیمنگاه در داخل مایع کوئنچ بیش از قسمت پایینی آن باشد و در نتیجه عملیات کوئنچ در بخش بیرونی پین سریع‌تر رخ داده و باعث افزایش سختی در این سطح نسبت به سطح قسمت داخلی نشیمنگاه می‌شود. عامل دیگر موثر در پایین‌تر بودن مقدار سختی در سمت داخلی پین‌ها، وجود وب‌ها در دو سمت این ناحیه است. هنگامی که میل‌لنگ در حالت دورانی وارد مایع کوئنچ می‌شود، وجود وب‌ها در سمت پایین پین‌ها، نوعی مانع در مقابل جریان مایع کوئنچ در اطراف پین‌ها ایجاد می‌کند، به‌گونه‌ای که مایع کوئنچ نمی‌تواند به صورت مناسب در اطراف این نقاط جریان یابد و در نتیجه، شدت عملیات کوئنچ در این ناحیه کاهش یافته و منجر به کم شدن سختی در این منطقه می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای توان، فاصله‌ی کوپل تا میل‌لنگ و زمان القای جریان بر سختی سطح و تغییرات عمق ناحیه‌ی سختکاری شده در عملیات سختکاری میل‌لنگ‌های میکروآلیاژی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مهم زیر بدست آمد:

۱- در تمامی نمونه‌ها با افزایش توان تنظیمی، سختی سطح و عمق لایه‌ی سخت‌کاری شده افزایش می‌یابد.

که در رابطه‌ی (2)، مقدار گرمای منتقل شده و (T) دمای سطح قطعه می‌باشد. به بیان دیگر، هر چه توان بالاتری بکار برده شود، گرمای تولید شده عمق بیش‌تری را تحت تأثیر قرار خواهد داد که این امر باعث افزایش عمق ناحیه‌ی سختکاری خواهد شد.

تأثیر زمان القای جریان بر عمق ناحیه‌ی سختکاری شده

شکل 11 تأثیر زمان القای جریان (I.H.T) بر عمق ناحیه‌ی سختکاری شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان القای جریان، عمق ناحیه‌ی سختکاری شده افزایش می‌یابد. دلیل این مسئله را بدین صورت می‌توان توضیح داد که با افزایش زمان القای جریان تا یک حد مناسب، فرصت بیش‌تری جهت انتقال حرارت به روش رسانش به عمق میل‌لنگ‌ها بوجود آمده و لایه‌های پایین‌تر نیز تحت تأثیر حرارت ایجاد شده قرار می‌گیرند. با افزایش دما در لایه‌ی پایین‌تر و رسیدن دمای این مناطق به دمای استحاله‌ی آستنیتی، پس از عملیات کوئنچ افزون بر لبه‌ی قطعه کار، لایه‌های نزدیک به سطح نیز دچار تغییر فاز شده و به دلیل ایجاد فاز مارتنزیت در این لایه‌ها، مقدار عمق سختی افزایش می‌یابد. شکل‌های 11 و 12 ساختار متالورژیکی سطح نمونه‌ها را پیش و پس از سختکاری نشان می‌دهد.

تأثیر فاصله‌ی کوپل تا میل‌لنگ بر عمق ناحیه‌ی سختکاری شده

مقایسه‌ی شکل‌های 13 و 14 نشان می‌دهد که با افزایش فاصله‌ی بین کوپل و میل‌لنگ، عمق ناحیه‌ی سختکاری شده کاهش می‌یابد. علت این امر را این‌گونه می‌توان توضیح داد که افزایش فاصله‌ی بین کوپل و میل‌لنگ، به دلیل پراکندگی جریان‌هایی گردابی ایجاد شده و اتلاف گرمای بوجود آمده، گرمای تولید شده در سطح کاهش می‌یابد و در نتیجه‌ی منجر به کاهش عمق نفوذ گرما با استفاده از مکانیزم رسانش به لایه‌های پایین‌تر قطعه کار می‌شود. این مسئله باعث کاهش عمق لایه‌ی متأثر از حرارت فرآیند سختکاری القایی در سطح قطعات می‌شود. گفتنی است جهت بالا بردن عمق لایه‌ی

۵- در تمامی نمونه‌ها، مقدار سختی سطح در سمت خارجی پین ها بیش تر از سمت داخلی پین هاست.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند که از مدیریت و پرسنل محترم بخش فنی و مهندسی شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز جهت همکاری صمیمانه در انجام این پژوهش تقدیر و تشکر نمایند.

منابع

- 1- م. ع. گل‌عذار، عملیات حرارتی و مهندسی سطح، انتشارات ارکان، اصفهان، 1382.
- 2- ا. باباخانی، "بررسی تأثیر دمای پیشگرم، میزان کرنش و نرخ سرد شدن بر اندازه 30MSV6 دانه ی فولاد میکروآلیاژی وانادیوم دار"، دومین همایش مشترک انجمن ریخته گران ایران و انجمن مهندسان متالورژی ایران، 1387
- 3- J. Grum, "Analysis of residual stresses in main crankshaft bearings after induction surface hardening and finish grinding", Faculty of Mechanical Engineering Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 217, Part D, 2002.
- 4- A. Kohli and H. Singh, "Optimizing mean effective case depth of induction hardened parts (rolled condition) using response surface methodology", International Journal on Emerging Technologies, Vol. 1(1), pp. 87-91, 2010.
- 5- T. Ahmad, O. Yousaf, A. Salam and J.Ahmad, "Relationthip Between Case Depth and Hardness in an Induction Hardened Medium Carbon Steel" Journal of Pakistan

۲- در سطح ثابتی از توان، با افزایش زمان القای جریان، سختی سطح و عمق لایه‌ی سخت‌کاری شده افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش فاصله‌ی بین کوپل و میل‌لنگ، عمق لایه سخت‌کاری شده کاهش می‌یابد.

۴- فاز مارتنزیت تشکیل شده متأثر از مقدار پارامترهای ورودی بوده و با افزایش فاصله از سطح، از مقدار فاز مارتنزیت کاسته شده و بر مقدار فریت و پرلیت افزوده می‌شود.

Institute of Chemical Engineers, Vol. XXXVII, 2009.

6- م. کاشفی، م. ر. ثانی، ک. زرگریان، "عوامل مؤثر بر عمق سخت شده در سخت کاری القایی پلوس خودرو"، دهمین گنکره انجمن مهندسی متالورژی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، 1385.

7- H. Kristoffersen and P. Vomacka, "Influence of process parameters for induction hardening on residual stresses", Materials and Design, 22, pp. 637-644, 2001.

8- ع. هرندی، ح. رضوی و م. عباسی، "بررسی پارامترهای فرآیند سخت‌کاری القایی بر عمر خستگی توشن بار"، دومین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و جامعه ریخته گران ایران، 1387.

9- V. Rudnev, "coil copper electromagnetic edge effect", Heat treating process, Professor Induction Series, Inductoheat Group, 2007.

10- M. Melander, "Theoretical and experimental study of stationary and progressive induction hardening". Journal of Heat Treating, Vol. 4(2), pp.145-166, 1985.

پیوست‌ها

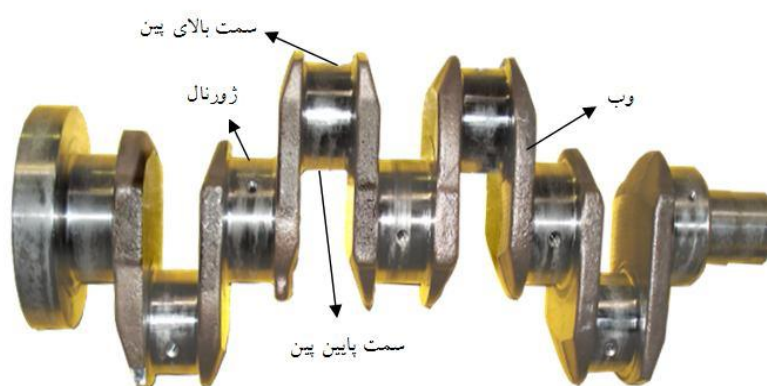
جدول 1- آنالیز شیمیایی از نمونه‌های مورد آزمایش

عنصر	C	Si	P	Mo	Ni	Al	Cu	V	Cr	Mn	Fe	S	Ti
درصد	0,365	0,562	0,007	0,008	0,096	0,019	0,112	0,1	0,148	1,392	97,23	0,054	0,002

وزنی

جدول 2- پارامترهای ورودی جهت انجام آزمایش‌ها.

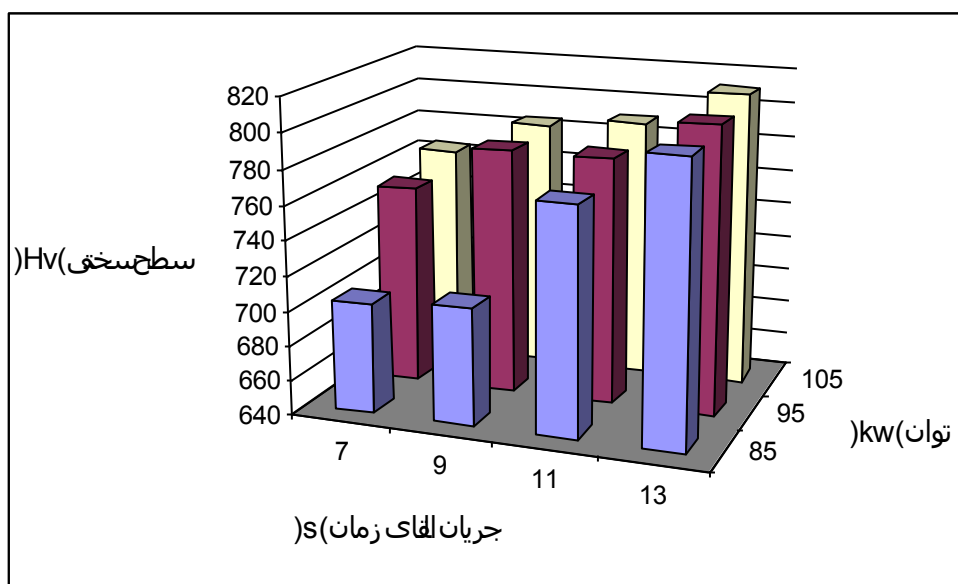
متغییر	توان (kW)	زمان القای جریان (S)	فاصله بین کویل و میل لنگ (mm)	فرکانس (KHz)	دمای مایع کویچ (°C)
سطوح آزمایش‌ها	105.95.85	13.11.9.7	5,5, 5,7, 1	7,8	27



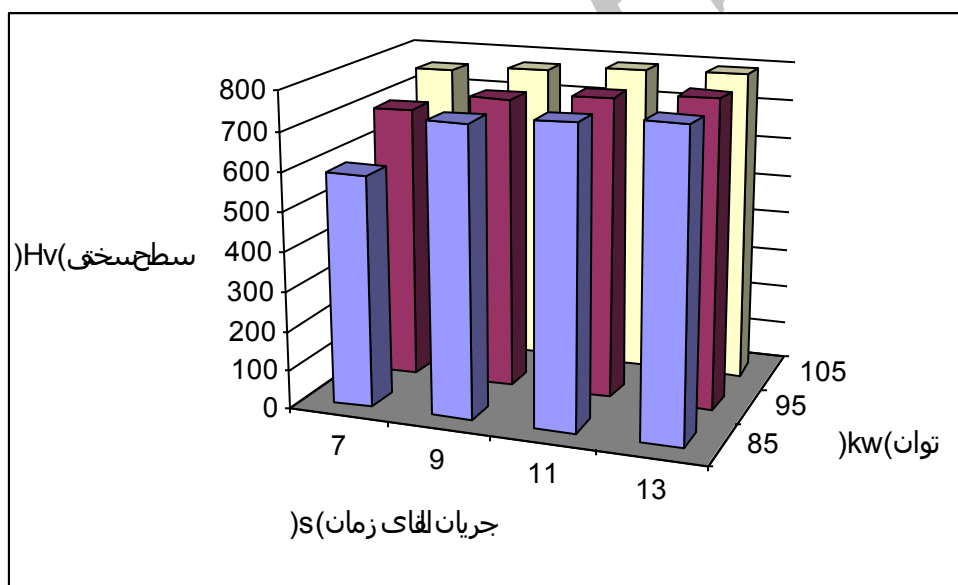
شکل 1- تصویر شماتیک میل لنگ مورد استفاده.



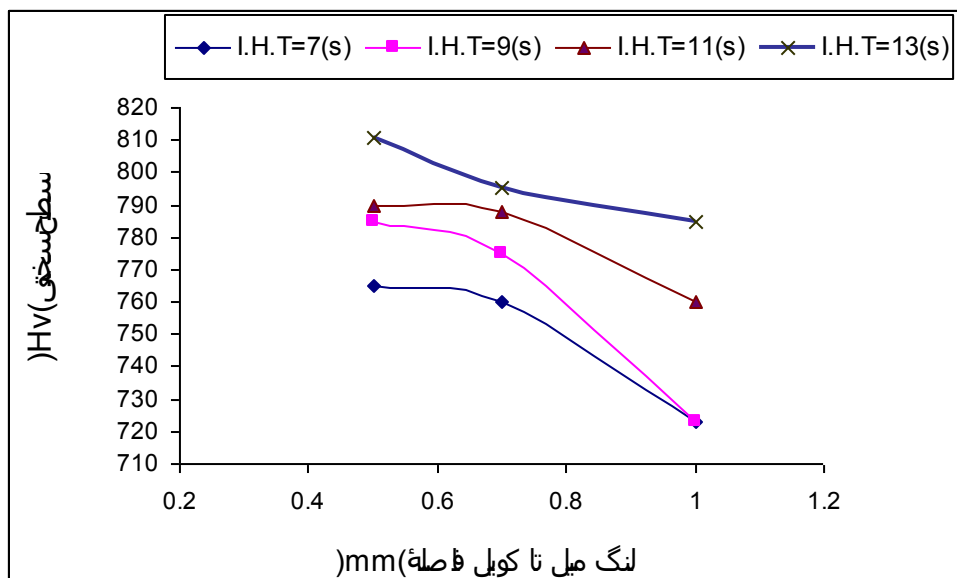
شکل 2- پروفیل لایه‌ی سخت‌کاری شده.



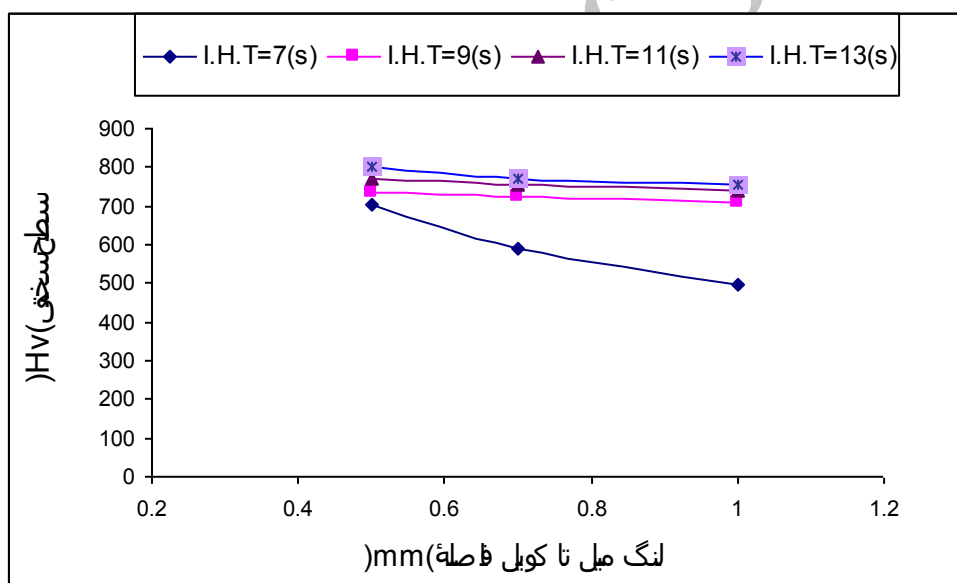
شکل 3- تأثیر توان و زمان القای جریان بر روی سختی سطح. (فاصله‌ی کوپل تا میل لنگ = 0,5 میلی‌متر)



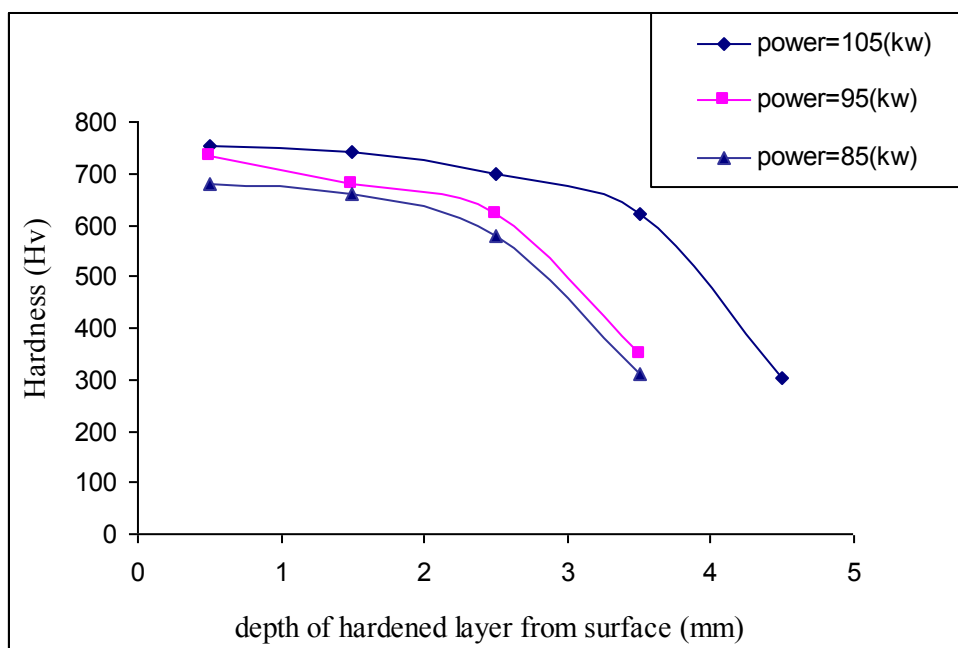
شکل 4- تأثیر توان و زمان القای جریان بر روی سختی سطح. (فاصله‌ی کوپل تا میل لنگ = 0,7 میلی‌متر)



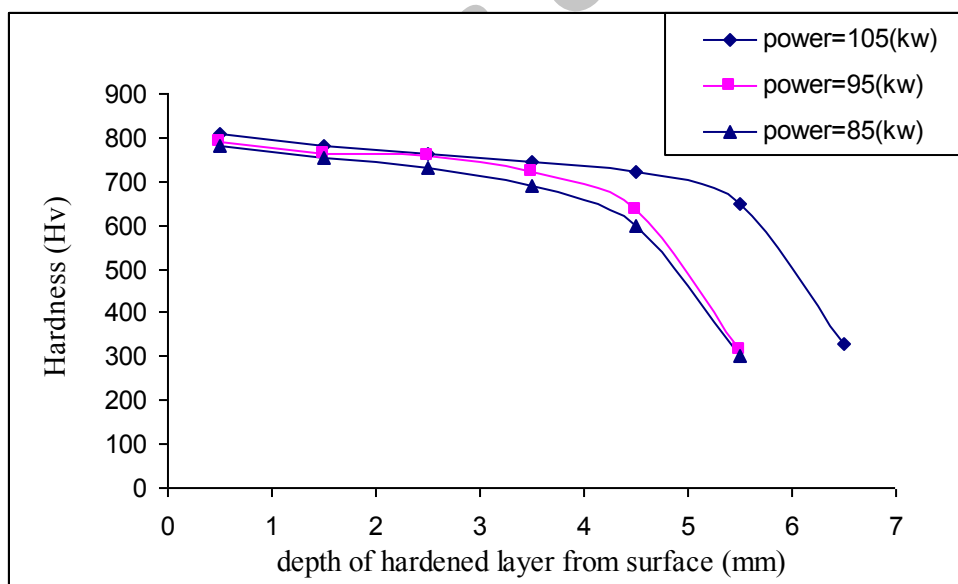
شکل 5- تأثیر فاصله‌ی بین کوپل و میل لنگ بر روی سختی سطح (توان ورودی=105 کیلو وات)



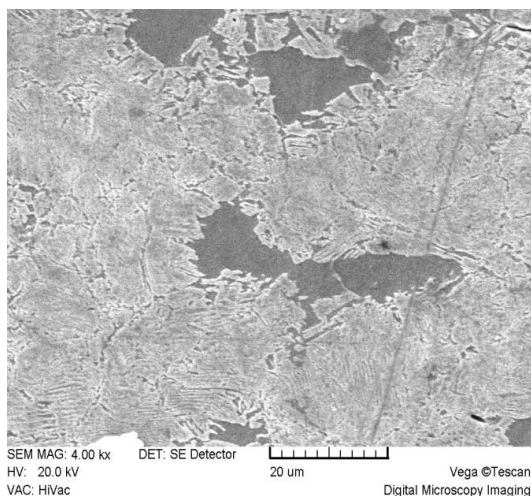
شکل 6- تأثیر فاصله‌ی بین کوپل و میل لنگ بر روی سختی سطح (توان ورودی=85 کیلو وات)



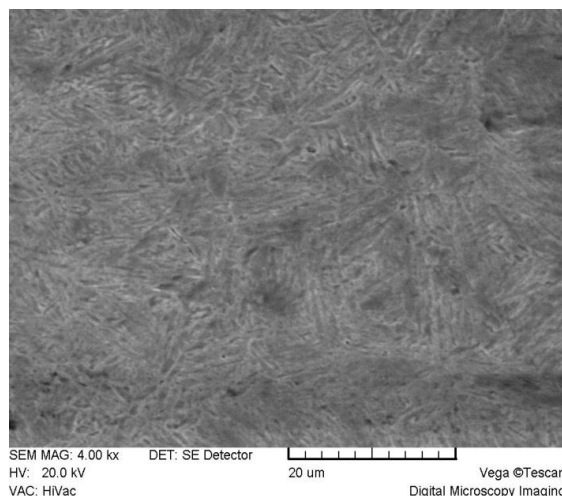
شکل 2- توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونه های سخت کاری شده در توان های ورودی متفاوت (فاصله ی کویل تا میل لنگ=0,7 میلیمتر، زمان القای جریان=9 ثانیه)



شکل 3- توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونه های سخت کاری شده در توان های ورودی متفاوت (فاصله ی کویل تا میل لنگ=0,5 میلیمتر، زمان القای جریان=13 ثانیه)

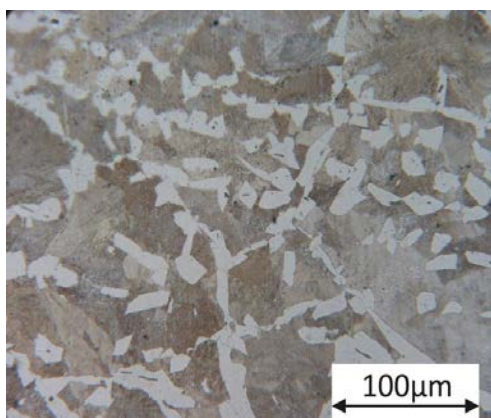


(ب)

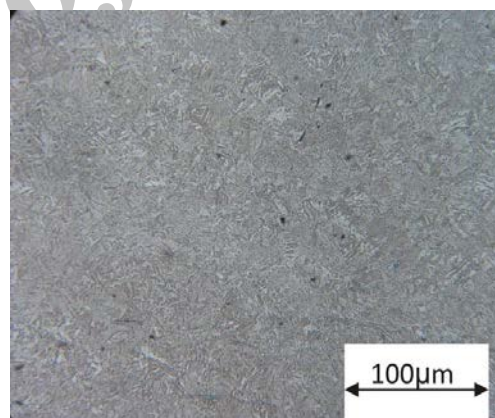


(الف)

شکل 4- تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) با بزرگنمایی 0444X از نمونه آزمایشی الف) لبه‌ی سخت‌کاری شده (مارتنزیتی) ب) پایین تر از لبه‌ی سخت‌کاری شده (فاصله‌ی کویل تا میل لنگ=0,5 میلیمتر، زمان القای جریان=13 ثانیه، توان ورودی=105 کیلو وات)

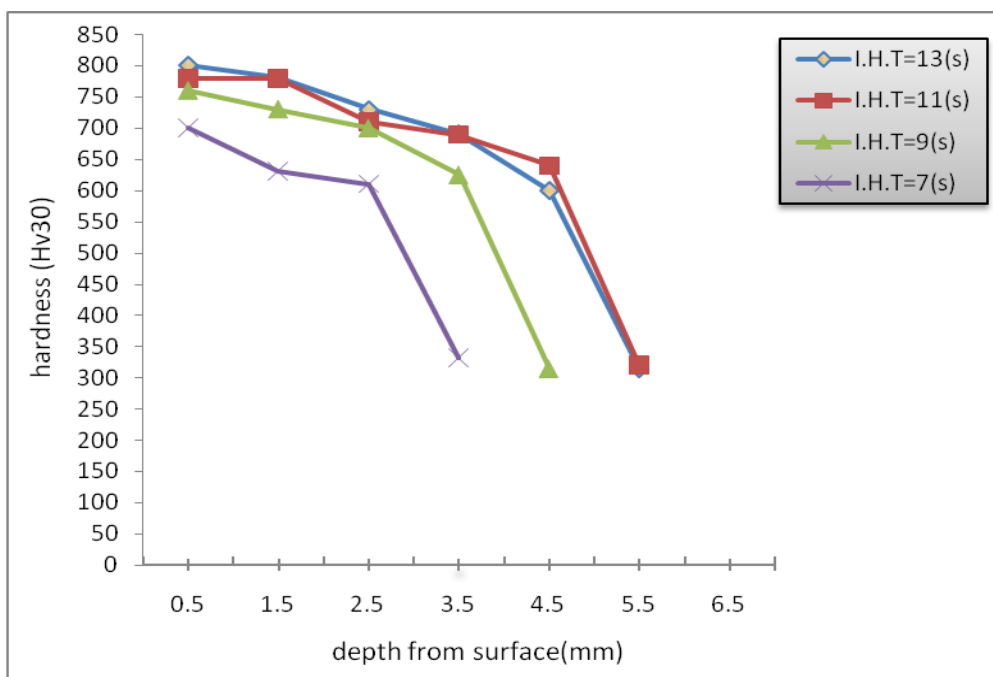


(ب)

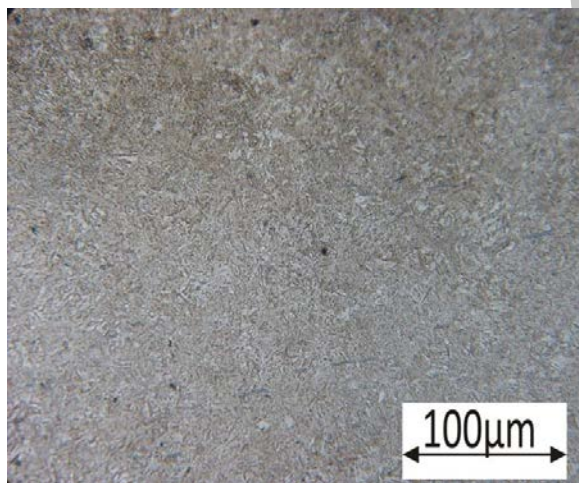


(الف)

شکل 04- تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 044X از نمونه آزمایشی الف) لبه‌ی سخت‌کاری شده (مارتنزیتی) ب) ساختار نمونه‌ها قبل از عملیات سختکاری القایی (ساختار فریتی - پرلیتی) (فاصله‌ی کویل تا میل لنگ=0,5 میلیمتر، زمان القای جریان=13 ثانیه، توان ورودی=105 کیلو وات)



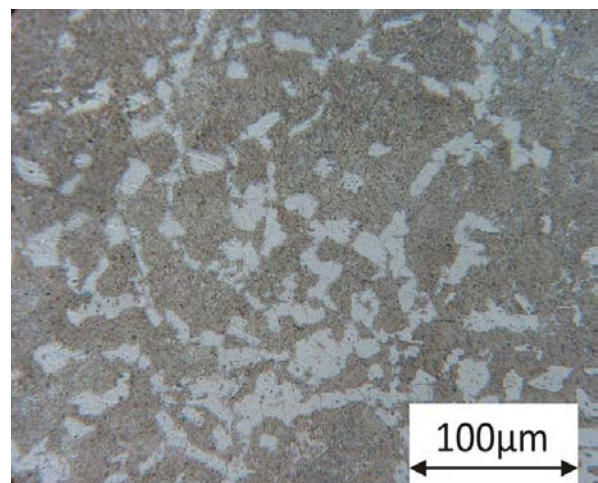
شکل 00- توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونه‌های سخت کاری شده در زمانهای القای جریان تفاوت (فاصله‌ی کوپل تا میل لنگ=0,5 میلی‌متر، توان ورودی=85 کیلو وات)



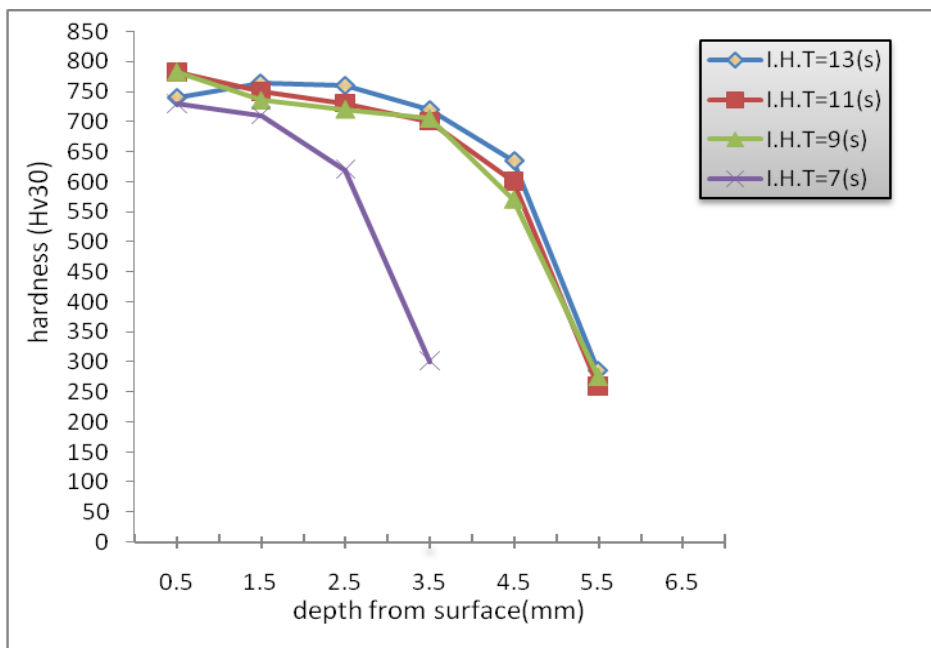
(الف)

(ب)

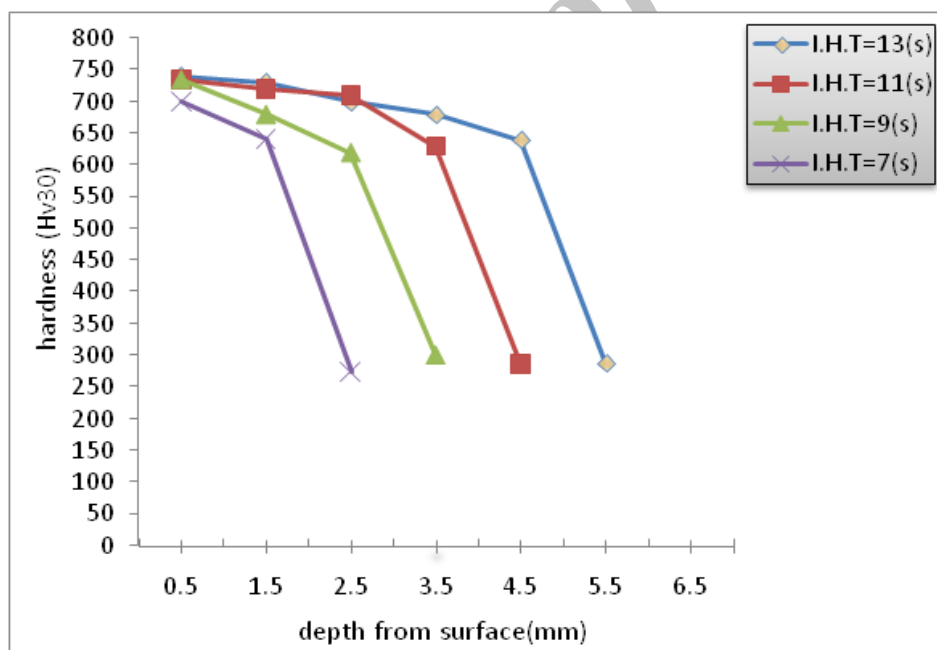
شکل 02- تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 044X از نمونه آزمایشی الف) ساختار نمونه‌ها پیش از عملیات سختکاری القایی



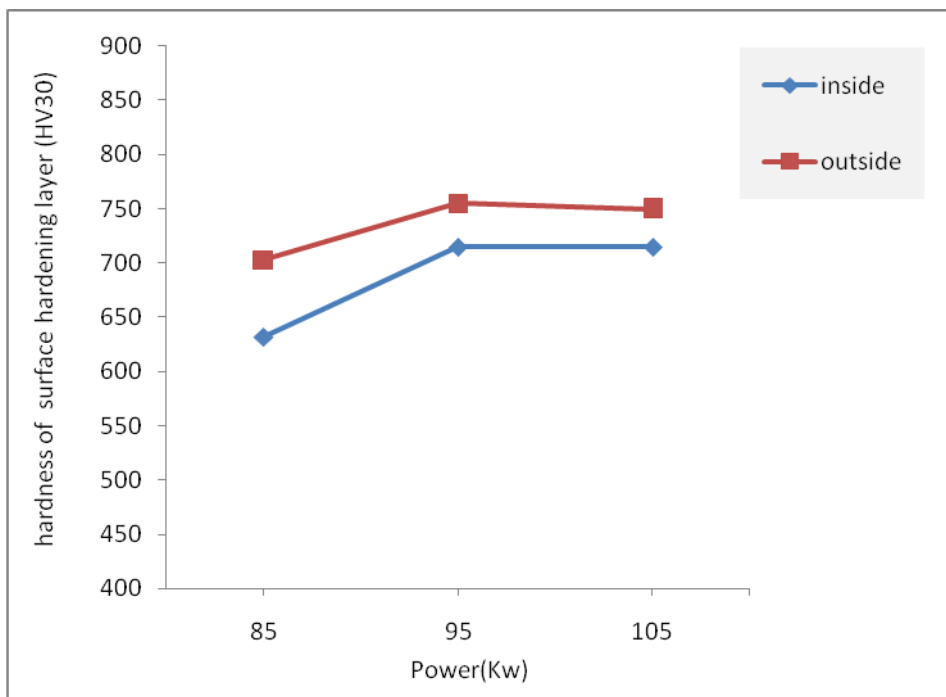
(ساختار فریتی - پرلیتی) (ب) پس از عملیات سخت کاری القایی (ساختار مارتنزیتی) (فاصله‌ی کوپل تا میل لنگ=1 میلی‌متر، زمان القای جریان=13 ثانیه، توان ورودی=85 کیلو وات)



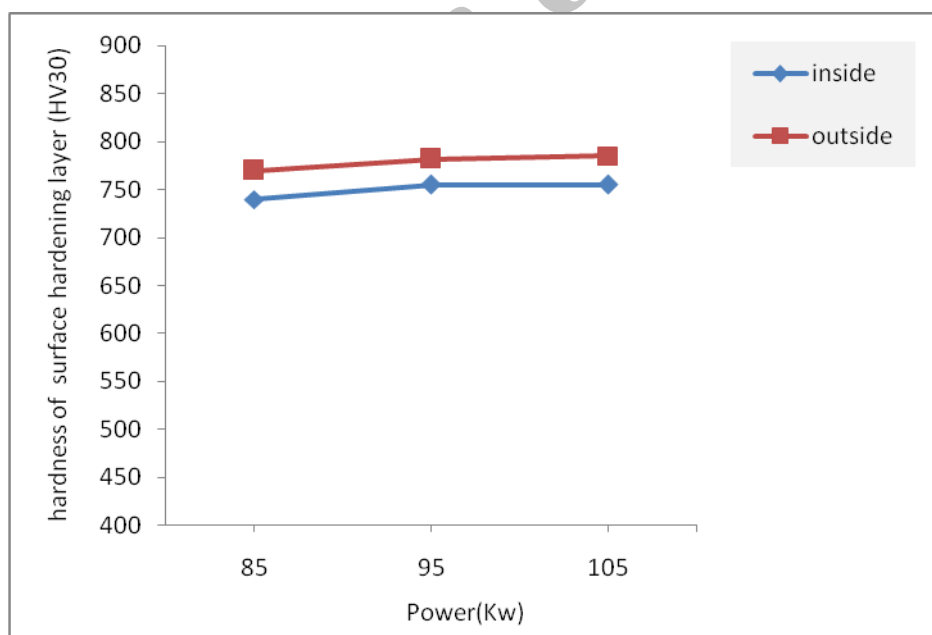
شکل 01- توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونه‌های سخت‌کاری شده (فاصله‌ی کوئل تا میل لنگ=0,5 میلی‌متر، توان ورودی=95 کیلو وات)



شکل 00- توزیع مقدار سختی در سطح مقطع نمونه‌های سخت‌کاری شده (فاصله‌ی کوئل تا میل لنگ=0,7 میلی‌متر، توان ورودی=95 کیلو وات)



شکل 00- مقادیر سختی سطحی در دو سمت بالا و پایین پین ها (فاصله‌ی کوپل تا میل لنگ=0,5 میلیمتر، زمان القای جریان=7 ثانیه)



شکل 01- مقادیر سختی سطحی در دو سمت بالا و پایین پین ها (فاصله‌ی کوپل تا میل لنگ=0,5 میلیمتر، زمان القای جریان=11 ثانیه)