

مطالعه تأثیر جهت نورد سرد بر نحوه گسترش بافت مکعبی در ورق‌های مغناطیسی نرم آهن-سیلیسیم با بافت اولیه‌ی گوس

فرزاد خمایی‌زاده (دانشیار)
مجید ملک‌پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی و علم‌مواد، دانشگاه صنعتی شریف

در این تحقیق نحوه‌ی گسترش بافت مکعبی در ورق‌های مغناطیسی نرم Fe-Si حاوی ۳٫۲ درصد وزنی سیلیسیم با بافت اولیه‌ی گوس [۰۰۱]^۰(۱۱۰)، در حین انجام عملیات دو مرحله‌ی نورد سرد و عملیات حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف تحقیق حاضر مطالعه‌ی تأثیر جهت نورد سرد بر گسترش بافت مکعبی از نوع [۰۰۱]^۰(۱۰۰) با دو جهت آسان مغناطیسی است. به این منظور ورق‌های مغناطیسی نرم Fe-Si با بافت اولیه [۰۰۱]^۰(۱۱۰) پس از انجام یک مرحله نورد سرد در امتداد موازی با جهت مغناطیسی آسان ورق، تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند تا جوانه‌های اولیه بافت مکعبی در ورق تشکیل شوند. سپس مرحله‌ی دوم نورد سرد در دو جهت موازی و عمود بر جهت نورد اولیه انجام شد و میزان تحول بافت مکعبی پس از انجام عملیات حرارتی نهایی در هر یک از این دو جهت مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

نتایج حاصل نشان می‌دهند که انجام عملیات نورد سرد مرحله دوم در جهت عمود بر امتداد نورد مرحله اول علاوه بر کاهش میزان نورد مورد نیاز، امکان تهیه‌ی ورق‌های با بافت مکعبی در ضخامت‌های بالاتر را فراهم می‌سازد.

مقدمه

ورق‌های آلیاژی Fe-Si حاوی ۰٫۸ تا ۶٫۵ درصد وزنی سیلیسیم در صنعت الکترونیک، به ویژه در ساخت هسته‌ی ترانسفورماتورها و موتورهای الکتریکی، کاربرد وسیعی دارند. این فولادها ساختار کریستالی مکعبی مرکز‌داری دارند که در آنها شبکه‌ی کریستالی متشکل از تعداد بسیار زیادی مکعب ساختاری است که در کنار هم قرار گرفته‌اند. با توجه به وجود ناهمسانی (انیزوتروپی) مغناطیسی در شبکه‌ی کریستالی آهن و وجود جهات مغناطیسی آسان به موازات اضلاع مکعب ساختاری اولیه، ایجاد بافت^۱ مناسب به منظور کاهش اتلاف مغناطیسی ورق همواره مورد توجه محققین بوده است. به طور کلی این نوع ورق‌های مغناطیسی در دو گروه ورق‌های با بافت جهت‌دار و بدون جهت در دسترس قرار دارند. بافت جهت‌دار مغناطیسی مناسب را، بسته به نوع عملیات مکانیکی و حرارتی و با توجه به جهات آسان مغناطیسی شبکه‌ی آهن، می‌توان به دو صورت مکعبی^۲ یا گوسی^۳ که آن را بافت مکعبی خوابیده روی لبه^۴ نیز می‌نامند، توسعه داد.^[۱]

در ورق‌های دارای بافت گوسی با قرارگیری صفحات (۱۱۰) شبکه آهن به موازات سطح ورق و آرایش در جهت [۱۰۰] یعنی به موازات جهت طولی ورق (یا به عبارت دیگر به موازات جهت عبور شار مغناطیسی در ورق)، ناهمسانی قوی مغناطیسی در جهت طولی ورق ایجاد خواهد

شد، در حالی که در جهت عرضی ورق عبور شار مغناطیسی مستلزم صرف انرژی بیشتری است.

اگر جهت‌گیری کریستال‌ها به نحوی تغییر یابد که سطح مکعب ساختاری آهن کاملاً به موازات سطح ورق قرار بگیرد، بافتی حاصل می‌شود که نه فقط در جهت طولی بلکه در جهت عرضی (عمود بر جهت نورد) ورق نیز دارای نفوذپذیری بالایی است. چنین ورق‌هایی در ساخت ترانسفورماتورهایی که در هسته‌ی آنها از لایه‌های E یا I شکل استفاده می‌شود کاربرد زیادی دارند. همچنین این نوع ورق‌ها برای استفاده در هسته‌ی مغناطیسی موتورهای الکتریکی، که در آنها میدان مغناطیسی به صورت چرخشی تغییر جهت می‌دهد، نیز مطلوب است. در حقیقت با توجه به بهبود خواص مغناطیسی این گونه ورق‌ها، اندازه، وزن و هزینه‌ی تولید دستگاه‌های ساخته شده از این مواد کاهش می‌یابد.^[۲] این جهت‌گیری که بافت مکعبی نامیده می‌شود و دارای اندیس میلر [۱۰۰]^۰(۱۰۰) است دارای دو جهت آسان مغناطیسی در جهات موازی و عمود بر جهت طولی نورد است. روش‌های متفاوتی برای تولید ورق‌های با بافت مکعبی توسط شرکت‌ها و محققین کشورهای مختلف ارائه شده که در ادامه بر مهم‌ترین آن‌ها مروری خواهیم داشت: ۱. نورد سرد چند مرحله‌ی شمش جهت‌دار در شرکت جنرال الکتریک^۵: در این روش شمش با کریستال‌های ستونی در جهت

[۱] به روش‌هایی خاص تولید می‌شود و سپس با کنترل دقیق نورد و عملیات تبلور مجدد، به فولاد سیلیسیم‌دار با بافت مکعبی تبدیل می‌شود.

۲. عملیات چندمرحله‌ی نورد گرم و سرد با استفاده از انرژی سطحی در شرکت وکیوم اشملتز: در این روش پس از انجام نورد گرم بر آلیاژ ریختگی، یک یا چند مرحله کار سرد بر روی آن انجام می‌شود. این تکنولوژی به علت هزینه بالای تولید آن فقط در مراکز دانشگاهی چندین کشور، از قبیل آلمان، ژاپن و آمریکا، انجام نمی‌شود. [۳]

۳. نورد متقاطع^۷ و استفاده از رسوبات AIN توسط شرکت نیون استیل [۴]: در این روش در فولاد سیلیسیم‌دار با ۰/۴-۰/۱-۰/۰ درصد آلومینیوم، طی عملیات نورد دومرحله‌ی در جهت عمود نسبت به یکدیگر، و نیز عملیات حرارتی ساختار نسبتاً قوی مکعبی ایجاد می‌شود. [۵،۲]

۴. انجماد سریع^۸: در این روش با استفاده‌ی سریع از نوردهای خنک‌کننده‌ی ویژه ضمن سرد شدن مذاب، ساختار مکعبی آن در حین انجماد گسترش می‌یابد. این فرایند نیازی به نورد سرد و آنیل نهایی ندارد ولی با توجه به هزینه‌ی بالا تاکنون کاربرد عمومی نیافته است. [۶]

۵. استفاده از دمای مناسب برای نورد گرم: در این فرایند انتخاب دمای مناسب برای نورد گرم عامل اصلی برای رسیدن به بافت مکعبی است. این فرایند به جهت‌گیری مکعبی در دانه‌ها در مرحله‌ی تبلور مجدد، و تغییر فرم تحت شرایط ویژه در نورد گرم می‌انجامد. [۶]

۶. استفاده از ورق‌های با بافت گوسی برای رسیدن به ساختار مکعبی: در این روش با استفاده از فرایند دو مرحله‌ی یا تک‌مرحله‌ی نورد و آنیل، بافت مکعبی در ورق گسترش می‌یابد. در فرایند اخیر چرخش اتفاقی دانه‌های با بافت گوسی [۱] [۱۱۰] — ضمن مراحل نورد، و در صورت ذخیره‌ی انرژی کافی در ورق — موجب ایجاد جوانه‌هایی با بافت مکعبی می‌شود که در عملیات حرارتی نهایی رشد مبالغه آمیز همین جوانه‌ها منجر به گسترش بافت مکعبی در ساختار ورق خواهد شد. رشد مبالغه آمیز دانه‌های با بافت (۱۰۰) ناشی از انرژی سطحی پایین‌تر این بافت نسبت به دیگر آرایش‌های موجود است. به همین دلیل به‌منظور تقویت هرچه بیشتر این امتیاز باید با کاهش ضخامت ورق توسط عملیات نورد، سطح ورق را افزایش داد تا دانه‌های با بافت مکعبی با استفاده از مزیت انرژی سطحی پایین‌تر، رشد فراگیر خود را با حذف دیگر آرایش‌های موجود انجام دهند. [۷،۸] در صورتی که ضخامت ورق به اندازه‌ی کافی کاهش نیافته باشد جوانه‌های با بافت گوسی، که در حین چرخش کریستال‌ها در فرایند نورد به‌صورت اتفاقی ایجاد می‌شوند، با استفاده از مزیت

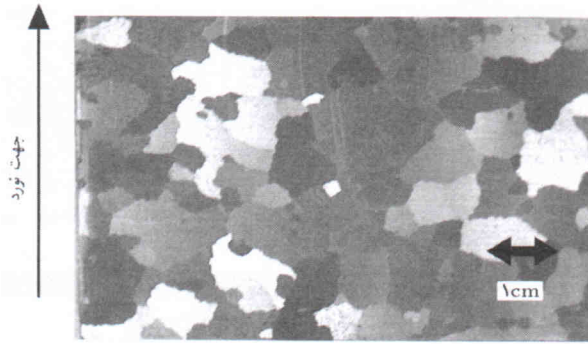
انرژی حجمی پایین‌تر نسبت به تمامی دیگر آرایش‌های موجود رشد مبالغه آمیز یافته و گسترش بافت مکعبی را مختل می‌کنند. به همین دلیل تولید ورق‌های با بافت مکعبی به این روش به دلیل نیاز به میزان بالایی از عملیات نورد و لزوم رسیدن به ضخامت‌های بسیار نازک که استفاده از ورق را غیر عملی می‌سازد تاکنون تنها در مقیاس آزمایشگاهی مقدور بوده است. بهبود شرایط تولید ورق با بافت مکعبی قوی از نظر انرژی مورد نیاز نورد و همچنین دست‌یابی به ضخامت‌های بیشتر از اهداف اصلی این تحقیق شمرده می‌شوند.

روش تحقیق

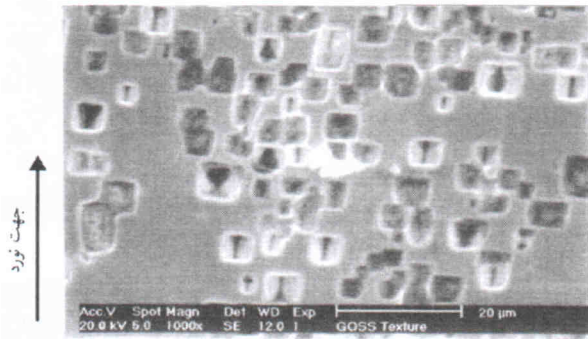
ورق‌های اولیه مورد استفاده در این تحقیق ورق‌های صنعتی Fe-%Si (۳/۲٪ وزنی سیلیسیم) با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر بوده‌اند که ساختاری با بافت گوسی دارند. سطح این ورق‌ها با لایه‌ی یکنواختی از عایق الکتریکی پوشیده شده است که باید قبل از هرگونه عملیاتی این پوشش عایق به‌روش شیمیایی حذف شود. برای حذف این پوشش، نمونه‌ها در محلول H₂O (۳۵ میلی‌متر)، HCl (۶۰ میلی‌متر)، HF (۴۰٪، ۵ میلی‌متر) در دمایی حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۷ دقیقه غوطه‌ور شدند تا پوشش‌شان به‌طور کامل حذف شود.

جهت مطالعه‌ی ساختاری، نمونه‌ها با محلولی شامل H₂O₂ (۸۰ میلی‌متر)، H₂O (۱۵ میلی‌متر)، HF (۵ میلی‌متر) به مدت یک تا دو دقیقه به‌صورت غوطه‌وری پرداخت، و با محلولی شامل H₂O₂ (۸۰ میلی‌متر)، H₂O (۵ میلی‌متر)، HF (۱۵ میلی‌متر) به مدت ۶۰-۳۰ ثانیه حکاکی شده‌اند.

نورد سرد توسط دستگاهی آزمایشگاهی به قطر ۲۵ میلی‌متر انجام گرفت. سرعت نورد دو متر در دقیقه انتخاب شده است. نمونه‌های آزمایشی نورد سرد از نمونه‌های تجاری در جهت موازی با جهت نورد اولیه تهیه شدند. ابعاد نمونه‌های آزمایشی قبل از اولین نورد سرد ۳۰×۱۵ میلی‌متر بوده است. تمامی نمونه‌ها در مرحله‌ی اول تحت نورد سرد قرار گرفتند تا چرخش کریستال‌ها به گونه‌ی مناسب برای ایجاد جوانه‌هایی با بافت مکعبی صورت پذیرد. سپس نمونه‌ها به مدت دو دقیقه تحت عملیات حرارتی آنیل میانی در ۱۰۰±۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در محیط، خنک شدند. عملیات حرارتی در کوره‌های حفاظت شده در محیط هیدروژن با خلوص ۹۹/۹ درصد انجام گرفت. قبل از ورود هیدروژن به محفظه‌ی تحت حرارت، محفظه سه‌بار با ایجاد خلاء و ورود گاز آرگون شسته شد تا از عدم وجود اکسیژن در محیط که علاوه بر مستلای اکسایش، خطر انفجار نیز دارد اطمینان حاصل شود. در مرحله‌ی دوم نورد سرد تعدادی از نمونه‌ها در همان جهت اولیه‌ی نورد و تعدادی دیگر نیز در جهت عمود بر جهت اولیه‌ی نورد تحت عملیات مجدد نورد سرد قرار گرفتند. چرخش دانه‌ها



شکل ۲. دانه‌بندی ماده‌ی اولیه بزرگ‌نمایی، X۵۰.



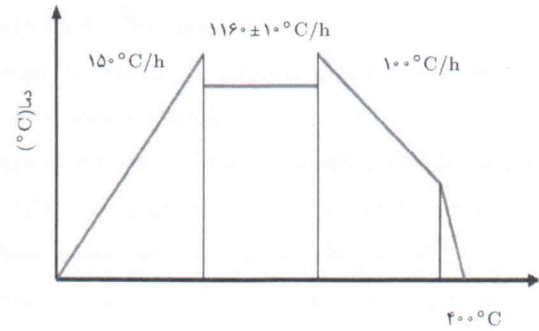
شکل ۳. ساختار ورق اولیه با بافت گوسی، بزرگ‌نمایی، X۱۰۰۰.

الف) نورد سرد اولیه

در این مرحله ورق‌ها به میزان ۳٪، ۵۵٪، ۶۸٪ و ۷۷٪ در جهت اولیه‌ی نورد کار سرد شدند که ساختارهای حاصله از آن در شکل ۴ آمده است. تصاویر ریزساختاری و مطالعات پراکنش اشعه X نشانگر آن است که در میزان کار سرد پایین (تا حدود ۳٪)، تغییری در ساختار کریستالی ورق حاصل نشده و بافت ورق در همان حالت گوسی باقی می‌ماند ولی با افزایش میزان کار سرد کریستال‌ها چرخش کرده و بافت گوسی به سمت تشکیل بافتی نزدیک به بافت [۱۱۲] (۱۱۱) متمایل می‌شود. ادامه‌ی نورد سرد تا مقادیر بالاتر از حدود ۸٪ می‌تواند منجر به ایجاد چرخش اضافی کریستالی حول محور <۱۱۰> و ایجاد ساختار پایداری با بافت <۱۱۰> {۱۱۱} شود. [۷]

ب) آنیل میانی

ورق‌ها پس از نورد اولیه آنیل شدند. پیش‌تر گفتیم که زمان، دما و سرعت سرد شدن در آنیل میانی تأثیر مشخصی بر کیفیت مغناطیسی محصول نهایی دارد. گرچه تغییر بافت برای مقادیر اندک میزان نورد سرد اولیه خیلی محسوس نیست، از ۶۸٪ نورد سرد به بالا، پس از انجام آنیل میانی ایجاد بافت قوی از نوع [۰۰۱] (۱۲۰) مشاهده شده است. تصاویر پراش حاصل از این بافت^۹ و مقایسه آن با نتایج پیش‌بینی شده برای بافت [۰۰۱] (۱۲۰) که توسط نرم‌افزار ODF محاسبه شده است در شکل ۵ ملاحظه می‌شوند.



شکل ۱. شمای عملیات حرارتی ثانویه نمونه‌ها.

و ذخیره شدن انرژی در این مرحله باید منجر به ایجاد تعداد کافی جوانه با بافت مکعبی شود. همین جوانه‌ها در مرحله‌ی آنیل نهایی با رشد خود منجر به حذف دانه‌های دارای بافت‌های متفاوت شده و در نهایت موفقیت در این امر متضمن ایجاد بافت قوی نهایی مکعبی است. در انتها نمونه‌ها که در $1160 \pm 10^\circ\text{C}$ تحت عملیات آنیل نهایی قرار گرفتند، به مدت شش ساعت تحت هیدروژن خالص (۹۹/۹۹۹) پس عملیات حرارتی شده و به‌طور کنترل شده خنک شدند (شکل ۱). پس از رسیدن دمای کوره به 400°C درجه سانتی‌گراد دمش گاز هیدروژن قطع و نمونه‌ها تا دمای محیط در کوره سرد و سپس از کوره خارج شدند. بافت‌های حاصل از هر مرحله به روش پراکنش اشعه X مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی نمونه‌ی اولیه که به‌روش طیف‌سنجی نشری جرقه‌یی تعیین شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود. چنان‌که مشاهده می‌شود ورق‌های مورد استفاده در این تحقیق، به‌ویژه از نظر کربن، فسفر، گوگرد و دیگر ناخالصی‌ها، از خلوص بالایی برخوردار بوده‌اند. ساختار نمونه‌های اولیه به‌کمک میکروسکوپ نوری و همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده است که نتایج حاصله در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. با توجه به شکل ۲ دانه‌بندی ورق اولیه از یک میلی‌متر تا چند سانتی‌متر است و بافت گوسی با مشاهده‌ی لبه‌ی مکعب‌ها در امتداد جهت نورد ورق در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

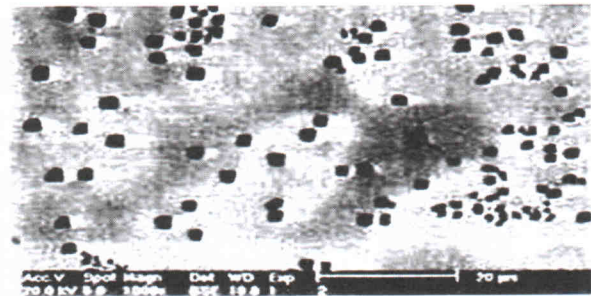
جدول ۱. ترکیب شیمیایی ورق اولیه.

%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni
۰٫۰۰۴۷	۳٫۲۴۷	۰٫۰۰۰۴	۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۱۴
%Cr	%Mo	%Cu	%Al	%Sn	%Fe
۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۱۸	۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۰۸	Rem

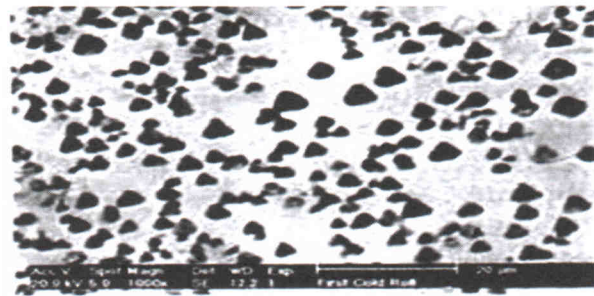
ج) نورد ثانویه و آنیل نهایی

ورق‌ها پس از آنیل میانی در جهت‌های موازی و عمود بر جهت اولیه نورد مجدداً تحت نورد سرد قرار گرفتند.

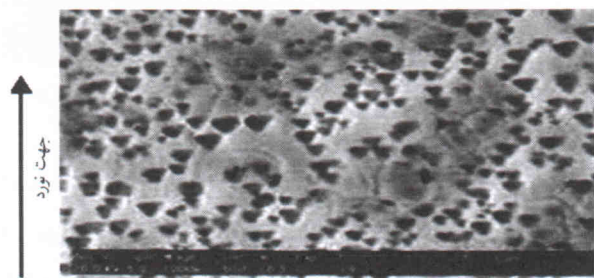
نورد ثانویه در جهت اولیه نورد و آنیل نهایی: با افزایش میزان نورد اولیه، انرژی بیشتری برای تغییر ضخامت در مرحله‌ی دوم نورد مورد نیاز است. به‌منظور ایجاد ساختار قوی مکعبی با حداقل انرژی لازم باید ترکیب مناسبی از میزان کار سرد در هر دو مرحله نورد داشت. در نمونه‌هایی که در مرحله‌ی اول تا ۵۵٪ نورد سرد (ضخامت ۰٫۱۳۵ میلی‌متر)، و سپس در مرحله‌ی دوم تا ۳۰٪ نورد شده‌اند پس از آنیل نهایی هنوز ساختار مکعبی کاملاً تکامل نیافته و اکثر سطح توسط دانه‌های با صفحات (۱۱۰) بر روی سطح ورق پوشانیده شده است (شکل ۶). در حقیقت ضخامت ورق بیش از اندازه‌ی است که مزیت انرژی سطحی دانه‌های با بافت (۱۰۰) بتواند موجب غلبه‌ی آن‌ها بر دانه‌های با بافت گوسی (۱۱۰) شود. در نمونه‌هایی که طی مرحله‌ی اول تا ۶۸٪ نورد سرد شده‌اند (ضخامت ۰٫۰۹ میلی‌متر)، پس از ۳۰٪ نورد، در مرحله‌ی دوم (ضخامت ۰٫۰۶۵ میلی‌متر) و آنیل نهایی یک ساختار مکعبی نسبتاً قوی مشاهده شده است (شکل ۷)، در حالی که نمونه‌هایی که تا ۷۷٪ نورد سرد اولیه را متحمل شده‌اند، عملاً در مرحله‌ی



الف) پس از ۳۰٪

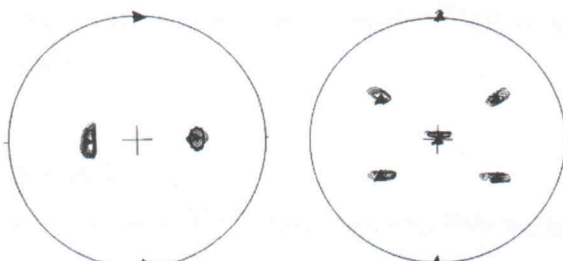


ب) پس از ۵۵٪

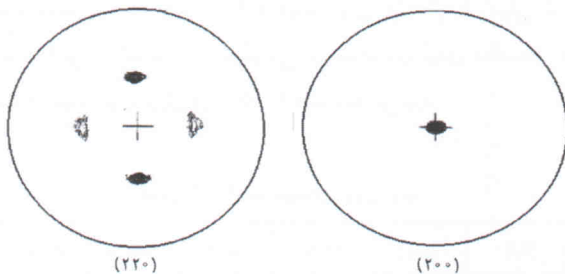


ج) پس از ۶۸٪

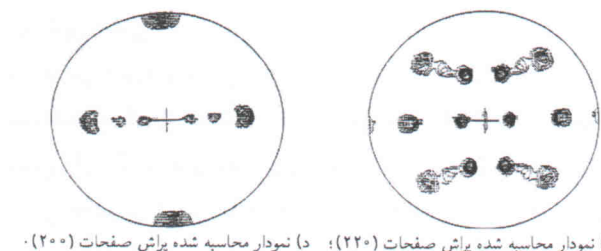
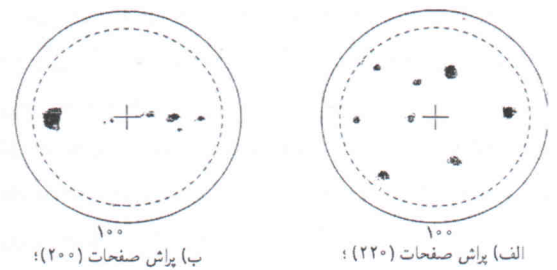
شکل ۴. ساختار نمونه‌ها، بزرگ‌نمایی ۵۰۰X.



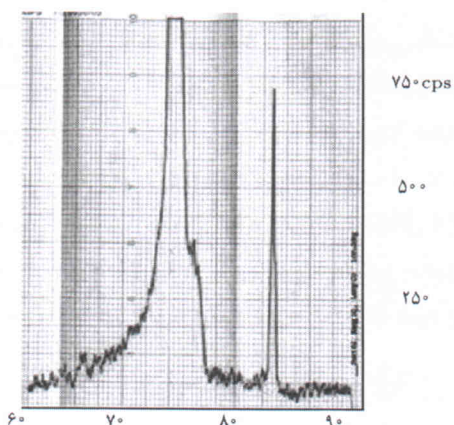
الف) نمودار محاسبه شده پراش صفحات (۲۲۰)؛ ب) نمودار محاسبه شده پراش صفحات (۲۰۰). شکل ۶. نمایش پراش بافت‌های صفحات (۲۲۰) و (۲۰۰) نمونه نورد سرد به موازات جهت اولیه‌ی نورد به میزان ۵۵٪ پس از آنیل میانی، نورد سرد ثانویه در جهت نورد به میزان (۳۰٪) و عملیات آنیل نهایی. مثلث‌های تیره نمایانگر محل‌های محاسبه شده‌ی پراش بافت [۰۰۱] (۱۱۰) برای مقایسه هستند.



شکل ۷. نمودارهای پراش اشعه‌ی X از نمونه‌هایی که ۶۸٪ به موازات جهت اولیه، نورد سرد شده‌اند (ضخامت ۰٫۰۹ میلی‌متر)، پس از ۳۰٪ نورد در مرحله‌ی دوم و آنیل نهایی. قله‌های به دست آمده با بافت [۰۰۱] (۱۱۰) مطابقت دارند.



ج) نمودار محاسبه شده پراش صفحات (۲۲۰)؛ د) نمودار محاسبه شده پراش صفحات (۲۰۰). شکل ۵. الف و ب) نمایش پراش بافت‌های صفحات (۲۲۰) و (۲۰۰) نمونه نورد سرد به موازات جهت اولیه‌ی نورد به میزان ۶۸٪ پس از آنیل میانی؛ ج و د) محل‌های محاسبه شده‌ی پراش صفحات با بافت [۰۰۱] (۱۲۰) برای مقایسه.



شکل ۷. نمودار ۲۰ - I نمونه‌ی تحت نورد اولیه به میزان ۶۸٪، پس از آنیل میانی و ۱۵٪ نورد ثانویه در جهت عمود و آنیل نهایی (زاویه ۷۷/۵°C مربوط به صفحات (۱۰۰)). پیک اضافی کوتاه در سمت راست پیک اصلی منوط به دانه‌یی با بافت متفاوت است.

گرچه تغییر فرم در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های دارای ۵۵٪ نورد سرد اولیه مشکل‌تر و با صرف انرژی بیشتری همراه بوده و اثراتی از پراش تعداد کمی از دیگر بافت‌های جزئی ایجاد شده نیز در آن مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰). برای ۷۷٪ نورد اولیه نیز عملاً تغییر ضخامت در مرحله‌ی دوم امکان‌پذیر نشد و در نتیجه عدم ذخیره‌ی انرژی کافی پیش از انجام آنیل نهایی، بافت مکعبی به دست نیامد.

به‌طور خلاصه، نورد متقاطع در شرایط مشابه با میزان کم‌تری عملیات نورد سرد منجر به ایجاد بافت مکعبی قوی شده است. حجم بالای نورد مورد نیاز از محدودیت‌های جدی روش نورد دومرحله‌یی هم‌جهت به‌شمار می‌رود. همچنین کاهش میزان مورد نیاز نورد در روش نورد متقاطع امکان ساخت ورق با بافت مکعبی در ضخامت بیشتر را فراهم می‌سازد. با توجه به آن که ضخامت بسیار پایین ورق در روش نورد دومرحله‌یی هم‌جهت، استفاده‌ی عملی از آن را دشوار می‌سازد، گسترش بافت مکعبی در ضخامت‌های بالاتر در روش نورد متقاطع مزیت مهمی به‌شمار می‌رود.

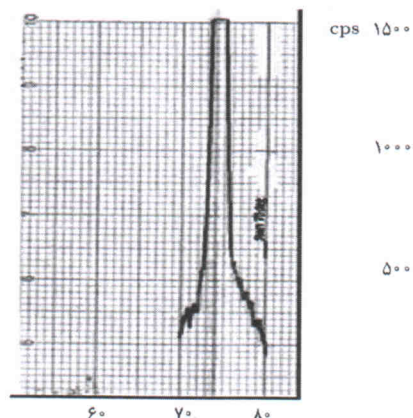
نتیجه‌گیری

علت رشد ترجیحی و مبالغه‌آمیز دانه‌های دارای بافت مکعبی (۱۰۰)، انرژی سطحی کم‌ترین بافت نسبت به بافت‌های دیگر از جمله بافت (۱۱۰) است. استفاده از این مزیت به ایجاد تعداد کافی جوانه‌های اولیه‌ی دارای بافت مکعبی و همچنین کاهش ضخامت ورق تا میزان مناسب برای افزایش سطح آزاد دانه‌ها بستگی دارد. در نمونه‌هایی که در مرحله اول ۵۵٪، و در مرحله دوم ۳۰٪ به موازات جهت اولیه نورد شده‌اند، به دلیل عدم ایجاد تعداد کافی جوانه‌های اولیه با بافت مکعبی و احتمالاً عدم برقراری روابط مرزی ویژه با دانه‌های اطراف، گسترش

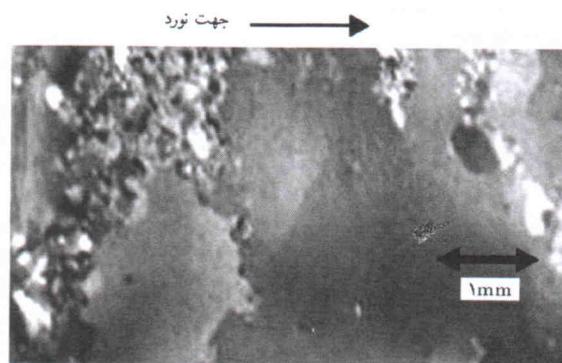
دوم نورد تغییرپذیری ضخامت مجدد را نداشته‌اند و در نتیجه ساختار نهایی تقریباً فاقد بافت خاصی بوده است (ساختار بدون جهت). در صورت وجود امکان ایجاد تغییر فرم مناسب با دستگاه‌های قوی‌تر نورد، ساختار مکعبی حتی قوی‌تر از حالت‌های قبل برای این نمونه‌ها نیز وجود خواهد داشت، [۷] اما ایجاد این بافت در چنین شرایطی بسیار هزینه‌بر و غیر اقتصادی خواهد بود.

نورد ثانویه در جهت عمود بر جهت اولیه نورد و آنیل نهایی: نمونه‌هایی که با انجام ۵۵٪ نورد سرد در مرحله‌ی اول و سپس تحمل آنیل میانی، در مرحله‌ی دوم نورد به میزان ۲۵٪ (ضخامت ۱ میلی‌متر)، ۳۰٪ (ضخامت ۰٫۹۳ میلی‌متر) و ۴۰٪ (ضخامت ۰٫۸ میلی‌متر) عمود بر جهت اولیه نورد کار سرد شده‌اند نشانگر پیشرفت در ایجاد بافت مکعبی با افزایش میزان نورد در مرحله‌ی دوم هستند (شکل ۸). ساختار پس از ۳۰٪ نورد ثانویه شامل بیش از ۹۰ درصد دانه‌های درشت با اندازه‌ی در حد سانتی‌متر است (شکل ۹).

در همین حال به‌ازاء ۶۸٪ نورد سرد اولیه و آنیل میانی فقط ۱۵٪ نورد سرد ثانویه به تشکیل بافت مکعبی نسبتاً قوی انجامیده است.



شکل ۸. نمودار ۲۰ - I نمونه‌ی تحت نورد اولیه به میزان ۵۵٪، پس از آنیل میانی و نورد ثانویه عمود بر جهت اولیه‌ی نورد به میزان ۳۰٪ و آنیل نهایی (زاویه ۷۷/۵°C مربوط به صفحات (۱۰۰)).



شکل ۹. سطح نمونه‌ی شکل ۸.

نورد مرحله‌ی اول احتمالاً موجب ایجاد تعداد بیشتری جوانه‌های اولیه با بافت مکعبی می‌شود که این جوانه‌ها با استفاده از مزیت انرژی سطحی پایین‌تر منجر به گسترش بافت مکعبی در ورق شده‌اند. این پدیده موجب کاهش قابل توجه انرژی مورد نیاز در عملیات نورد سرد شده و علاوه بر آن بافت مکعبی در ضخامت‌های بالاتر (۰/۹۳ میلی‌متر) نسبت به نورد دومرحله‌یی هم‌جهت (۰/۶۵ میلی‌متر) ایجاد شده است.

کامل بافت مکعبی مشاهده نمی‌شود و رشد ترجیحی بافت گوسی (۱۱۰) انجام پذیرفته است. اما در شرایط یکسان (۵۵٪ نورد در امتداد جهت اولیه‌ی نورد و ۳۰٪ نورد ثانویه در جهت عمود) عملیات نورد متقاطع منجر به گسترش ترجیحی بافت مکعبی شده است. به‌منظور ایجاد بافت مکعبی در نورد دومرحله‌یی هم‌جهت حداقل ۶۸٪ نورد در مرحله‌ی اول مورد نیاز بوده است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از این دو روش می‌توان نتیجه گرفت که نورد ثانویه در جهت عمود بر امتداد

پانویس

1. texture
2. cubic
3. goss
4. cube texture on edge
5. general electric company
6. vacuumschmelze AG
7. cross rolling
8. rapid solidification
9. pole figures

منابع

1. Berliner, Michael., "Encyclopedia of materials science and engineering", London, Pergamon press, 4, pp. 2670-2676 (1986).
2. Mekhiche, M., Theirry waeckerle, "A metallurgical and magnetic study of {100} textured soft Magnetic sheets", *Jour.of magnetism and mag.mat.*, **160**, pp. 125-126 (1996).
3. Sakakura, Akria., "process for producing electrical steel sheet", *U.S.patent.* pp. 4, 762, 575 (Aug. 9, 1988).
4. Chih-Wenchen, "Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials", Dover publication (1986).
5. Stanley, Edward B., "method of producing electrical sheet steel with cube texture", *U.S. patent* pp. 3,640,780 (Feb. 8, 1972).
6. Osamu Kondo, "electromagnetic steel sheet having excellent magnetic properties and production method thereof", U.S. P. 6,248,185 B1 (Jun.19 2001).
7. C. Talowski, F. Khomamizadeh, "Thin Fe 3 Wt%Si doubly oriented magnetic sheet for medium power devices", *IEEE, trans. On. Mag.* **31**, (6), P. 3988-3990 (1995).
8. Nakashima, "Process for production grain-oriented thin electrical steel sheet having high magnetic flux density by one-stage cold-rolling method", U.S. patent 4,992,114 (Feb. 12, 1991).