بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب **محسن ایاز** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکرگردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر متعلق به دانشگاه شهید رجایی می‌باشد.

امضاء

محسن ایاز

تهران – لویزان – کدپستی ۱۶۷۸۸- صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۸۵ تلفن ۹-۲۲۹۷۰۰۶۰ (داخلی ۲۳۴۷) نمابر ۲۲۹۷۰۰۱۱ پست الکترونیک sru@sru.ac.ir

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تأثیر پارامترهای ترمومکانیکی نورد گرم بر شکل‌پذیری فولادهای میکروآلیاژی نایابیوم‌دار

نگارش

محسن ایاز

اساتید راهنما: دکتر نصراله بنی‌مصطفی عرب

دکتر محمدمراد شیخی

استاد مشاور: مهندس داود میراحمدی خاکی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک

بهمن ماه ۹۱

بسمه تعالي

شماره: ۱۱/۹۲/۱۱۴۸۶
تاریخ: ۱۳۹۲/۶/۱۰
پیوست:

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

صورتجلسهٔ دفاع پایان‌نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تاییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد جناب آقای محسن ایاز رشتهٔ مهندسی مکانیک-ساخت‌وتولید تحت عنوان: بررسی تاثیر پارامترهای ترمودینامیکی نوردگرم بر شکل‌پذیری فولادهای میکروآلیاژ نایابیوم‌دار، که در تاریخ ۹۱/۱۱/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.

☑ قبول (بادرجه ...عالی... امتیاز ...۲۰...) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود.

۱ ـعالی (۲۰ – ۱۹)

۲ ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ – ۱۸)

۳ ـ خوب (۱۷/۹۹ – ۱۶)

۴ ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ – ۱۴)

۵- غیرقابل قبول (کمتر از ۱۴)

اعضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر نصراله بنی مصطفی عرب	استادیار	
استاد راهنما	دکتر محمدمراد شیخی	استادیار	
استاد مشاور	مهندس میراحمدی	کارشناس ارشد	
استاد داور داخلی	دکتر محمد حسین پور	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر محمدرضا خلیلی	استاد	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر فرامرز آشنای‌قاسمی	استادیار	

دکتر غلامحسن پایگانه
رئیس دانشکده مهندسی مکانیک

تهران، لویزان، کد پستی:۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸
صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۸۵
تلفن: ۹-۲۲۹۷۰۰۶۰ فکس: ۲۲۹۷۰۰۳۳
Email:sru@sru.ac.ir
www.srttu.edu

تقدیم به:

تمامی کسانی که در تهیه این پایان‌نامه مرا یاری رساندند

چکیده

در این تحقیق پارامترهای فرآیند نورد گرم همچون دمای نورد آغازین، دمای نورد پایانی و دمای کلاف‌پیچی برای پیش‌بینی شکل‌پذیری و ریزساختار ورق‌های فولادی میکروآلیاژی نایابیوم‌دار، بهینه‌سازی شد. بدین منظور چهار سطح از هر فاکتور (پارامتر) انتخاب شد تا تأثیر آنها بر توان کرنش سختی، ارتفاع گنبد و اندازه دانه بررسی شود. سپس با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها، آزمایش‌ها با سه روش تاگوچی، طراحی فاکتوریال دوسطحی و طراحی فاکتوریال کلی، طراحی شدند و پس از انجام آزمایش‌ها نتایج حاصل با هر سه روش بهینه‌سازی شد. در هر روش بهینه‌سازی، آنالیز واریانس انجام شد تا فاکتورهای معنادار تعیین شوند و سپس شرایط بهینه فاکتورها برای دستیابی به بیشترین توان کرنش سختی و ارتفاع گنبد و ریزترین اندازه دانه بدست آورده شد. در نهایت نیز مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تمامی روش‌ها انجام شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که پارامترهای دمای نورد پایانی و دمای کلاف‌پیچی بیشترین تأثیر را بر شکل‌پذیری و ریزساختار دارند. علاوه‌براین، نتایج نشان داد که با افزایش دمای نورد آغازین، دمای نورد پایانی و دمای کلاف‌پیچی، توان کرنش سختی و ارتفاع گنبد افزایش می‌یابد، درحالیکه با کاهش این پارامترها اندازه دانه کاهش می‌یابد و شکل ساختار از حالت فریت چندضلعی به فریت سوزنی تغییر می‌کند. بررسی کفایت مدل‌ها نشان داد که مدل‌های حاصل از تمامی روش‌ها توانایی کافی برای پیش‌بینی را دارند.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، نورد گرم، شکل‌پذیری، ریزساختار، فولاد میکروآلیاژی نایابیوم‌دار، روش تاگوچی، روش طراحی فاکتوریال.

فهرست عناوین

عنوان **صفحه**

چکیده ..... أ

فهرست عناوین ..... ب

فهرست جداول ..... ه

فهرست اشکال ..... ح

۱ فصل اول: مقدمه ۱

۲ فصل دوم: مروری بر منابع ۵

۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲- عناصر میکروآلیاژی در فولادهای استحکام بالا (HSLA) ۶

۲-۲-۱- تأثیر نایابیوم بر فولاد میکروآلیاژی ۶

۲-۲-۲- ویژگی های عناصر میکروآلیاژی ۸

۲-۲-۳- کاربرد فولادهای میکروآلیاژی ۹

۲-۳- فرآیندهای ترمومکانیکی و نورد کنترل شده فولادهای میکروآلیاژی ۱۲

۲-۴- پارمترهای موثر در نورد گرم ۱۴

۲-۴-۱- دمای پیش گرم (Reheating Temperature) ۱۵

۲-۴-۲- دمای نورد مقدماتی (Roughing Temperature) ۱۵

۲-۴-۳- دمای نورد پایانی (Finishing Temperature) ۱۶

۲-۴-۴- دمای کلاف‌پیچی (Coiling Temperature) ۱۹

۲-۵- شکل‌پذیری ورقهای میکروآلیاژی نورد گرم شده ۲۱

۲-۵-۱- توان کرنش سختی (n-value) ۲۲

۲-۵-۲- ارتفاع گنبد (Dome Height) ۲۳

۲-۵-۳- اندازه و ساختار دانه‌ها (Grain Size and Morphology) ۲۵

۲-۶- بهینه‌سازی شکل‌پذیری فولادهای میکروآلیاژی نورد گرم شده ۲۸

۳ فصل سوم: طراحی آزمایش‌ها ۳۱

۳-۱- مقدمه ۳۲

۳-۱-۱- طرح ریزی ۳۳

۳-۱-۲- غربالگری ۳۳

۳-۱-۳- بهینه سازی ۳۳

۳-۱-۴- صحه گزاری ۳۴
۳-۲- طراحی آزمایش‌ها با روش تاگوچی ۳۴
۳-۲-۱- مقدمه ۳۴
۳-۲-۲- آرایه های متعامد ۳۵
۳-۲-۳- نسبت سیگنال به اختلال (S/N) ۳۷
۳-۲-۴- آنالیز روش Grey Relational Grade ۳۸
۳-۲-۵- آنالیز واریانس (ANOVA) ۳۹
۳-۳- طراحی آزمایش‌ها با روش طراحی فاکتوریال (Factorial Design) ۴۱
۳-۳-۱- مقدمه ۴۱
۳-۳-۲- طراحی فاکتوریال دو سطحی (Tow-level Full Factorial Design) ۴۱
۳-۳-۳- طراحی فاکتوریال کلی (General Full Factorial Design) ۴۳

۴ فصل چهارم: اجرای آزمایش‌ها ۴۴

۴-۱- مقدمه ۴۵
۴-۲- مواد اولیه ۴۵
۴-۳- تعیین دماهای بحرانی ۴۶
۴-۴- فرآیند نورد گرم ۴۷
۴-۵- بررسی ریزساختار ۵۰
۴-۶- آزمایش کشش ۵۱
۴-۷- آزمایش اریکسن ۵۲

۵ فصل پنجم : نتایج آزمایش‌ها و بهینه‌سازی ۵۳

۵-۱- مقدمه ۵۴
۵-۲- بهینه سازی با روش تاگوچی ۵۴
۵-۲-۱- آنالیز نسبت سیگنال به نویز (S/N) ۵۵
۵-۲-۲- آنالیز واریانس (ANOVA) و بررسی کفایت مدل ۶۰
۵-۲-۳- آزمایش صحه گذاری (Confirmation Test) ۶۲
۵-۲-۴- بهینه‌سازی همزمان نتایج تاگوچی با روش Grey Relational Grade ۶۴
۵-۳- بهینه سازی با طرح فاکتوریال دو سطحی (2^k Full Factorial Design) ۶۶
۵-۳-۱- آنالیز واریانس (ANOVA) ۶۷
۵-۳-۲- بهبود مدل رگرسیون ۶۹
۵-۳-۳- بررسی کفایت مدل ۷۰
۵-۳-۴- بررسی نواحی بهینه با نمودارهای تراز و رویه (Contour and Surfase plots) ۷۱
۵-۳-۵- آنالیز نمودار اثرهای اصلی و برهمکنش (Main effect and Interaction plots) ۷۳
۵-۳-۶- بهینه سازی پاسخ ها ۷۸
۵-۴- بهینه سازی با طرح فاکتوریال کلی (General Full Factorial Design) ۷۹

۵-۴-۱- آنالیز واریانس (ANOVA) ۸۲
۵-۴-۲- آنالیز مدل رگرسیون ۸۴
۵-۴-۳- بررسی کفایت مدل ۸۵
۵-۴-۴- بررسی شرایط بهینه با نمودارهای اثرهای اصلی و برهمکنش ۸۸
۵-۴-۵- بهینه‌سازی پاسخ‌ها ۹۳
۵-۵- مقایسه نتایج حاصل از روش های مختلف بهینه سازی ۹۶
۵-۵-۱- مقایسه آنالیز واریانس (ANOVA) و کفایت مدل‌ها ۹۶
۵-۵-۲- مقایسه شرایط بهینه پارامترها ۹۸
۵-۵-۳- مقایسه بهینه سازی پاسخ ها ۹۹
۵-۶- تحلیل ریزساختار ۱۰۰

۶ نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۰۵

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۶
۶-۲- پیشنهادها ۱۰۷

۷ مراجع ۱۰۸

فهرست جداول

صفحه

جدول (۳-۱) - طراحی تاگوچی در آرایه های متعامد برای سطوح هم اندازه ۳۵

جدول (۳-۲) - سطوح فاکتورهای استفاده شده در بررسی تأثیر RT، FT و CT با روش تاگوچی ۳۶

جدول (۳-۳) – ماتریس L16 طراحی آزمایش به روش تاگوچی ۳۷

جدول (۳-۴) - جدول آنالیز واریانس (ANOVA) نمونه ۴۰

جدول (۳-۵) - سطوح فاکتورهای استفاده شده در بررسی تاثیر RT، FT و CT با روش فاکتوریال دوسطحی ۴۲

جدول (۳-۶) - طراحی آزمایشها برای طرح فاکتوریال $۲^۳$ ۴۲

جدول (۳-۷) - سطوح فاکتورهای استفاده شده در بررسی تأثیر RT، FT و CT با روش فاکتوریال کلی ۴۳

جدول (۴-۱) - ترکیب شیمیایی (درصد وزنی wt%) فولاد ۴۵

جدول (۴-۲) - برنامه نورد گرم کنترل شده ۴۷

جدول (۴-۳) - برنامه تغییر شکل نوررد گرم ۴۷

جدول (۴-۴) - شرایط مختلف نورد داغ آزمایشگاهی ۴۵

جدول (۵-۱) – ماتریس L16 نتایج آزمایشها با روش تاگوچی ۵۵

جدول (۵-۲) – آنالیز نسبت S/N برای هر پاسخ ۵۶

جدول (۵-۳) – نسبت S/N برای n-value با در نظر گرفتن بزرگتر بهتر ۵۷

جدول (۵-۴) - نسبت S/N برای ارتفاع گنبد با در نظر گرفتن بزرگتر بهتر ۵۷

جدول (۵-۵) - نسبت S/N برای اندازه دانه با در نظر گرفتن کوچکتر بهتر ۵۸

جدول (۵-۶) - آنالیز واریانس (ANOVA) نسبت S/N برای n-value ۶۰

جدول (۵-۷) - آنالیز واریانس (ANOVA) نسبت S/N برای ارتفاع گنبد ۶۱

جدول (۵-۸) - آنالیز واریانس (ANOVA) نسبت S/N برای اندازه دانه ۶۱

جدول (۵-۹) – نتایج آزمایش صحه گذاری برای n-value ۶۲

جدول (۵-۱۰) – نتایج آزمایش صحه گذاری برای ارتفاع گنبد ۶۳

جدول (۵-۱۱) – نتایج آزمایش صحه گذاری برای اندازه دانه ۶۳

جدول (۵-۱۲) - نتایج آنالیز Grey Relational grade پاسخ ها ۶۴
جدول (۵-۱۳) - میانگین Grey Relational Grade سطوح پارامترها ۶۵
جدول (۵-۱۴) - آنالیز واریانس (ANOVA) بر اساس Grey Relational Grade ۶۶
جدول (۵-۱۵) – نتایج آزمایشها با روش فاکتوریال دو سطحی ۶۶
جدول (۵-۱۶) – آنالیز واریانس(ANOVA) برای n-value ۶۷
جدول (۵-۱۷) – آنالیز واریانس (ANOVA) برای ارتفاع گنبد ۶۸
جدول (۵-۱۸) – آنالیز واریانس (ANOVA) برای اندازه دانه ۶۸
جدول (۵-۱۹) - بررسی کفایت مدل برای n-value ۷۰
جدول (۵-۲۰) - بررسی کفایت مدل برای ارتفاع گنبد ۷۰
جدول (۵-۲۱) - بررسی کفایت مدل برای اندازه دانه ۷۱
جدول (۵-۲۲) – نتایج آزمایش بر اساس طراحی فاکتوریال کلی برای n-value، ارتفاع گنبد و اندازه دانه ۸۰
جدول (۵-۲۳) – نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای n-value ۸۲
جدول (۵-۲۴) – نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای ارتفاع گنبد ۸۳
جدول (۵-۲۵) – نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای اندازه دانه ۸۳
جدول (۵-۲۶) – نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای مدل n-value ۸۵
جدول (۵-۲۷) – نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای مدل ارتفاع گنبد ۸۶
جدول (۵-۲۸) – نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای مدل اندازه دانه ۸۷
جدول (۵-۲۹) – قیود بکار برده شده روی فاکتورها و پاسخ ها ۹۳
جدول (۵-۳۰) – ترکیب شرایط بهینه فاکتورها و پاسخ ها ۹۴
جدول (۵-۳۱) – مقایسه جداول آنالیز واریانس برای n-value ۹۷
جدول (۵-۳۲) – مقایسه جداول آنالیز واریانس برای ارتفاع گنبد ۹۷
جدول (۵-۳۳) – مقایسه جداول آنالیز واریانس برای اندازه دانه ۹۷
جدول (۵-۳۴) – مقایسه شرایط بهینه پارامترها برای n-value ۹۸
جدول (۵-۳۵) – مقایسه شرایط بهینه پارامترها برای ارتفاع گنبد ۹۸

جدول (۵-۳۶) – مقایسه شرایط بهینه پارامترها برای اندازه دانه ۹۸

جدول (۵-۳۷) - مقایسه بهینه سازی پاسخ ها با روش طراحی فاکتوریال دو سطحی و کلی ۹۹

فهرست اشکال

صفحه

شکل (۲-۱) - تأثیر عناصر میکروآلیاژی بر دمای توقف تبلور مجدد فولادهای HSLA ۷

شکل (۲-۲) - تغییرات اندازه دانه آستنیت با دمای حرارت دهی ۹

شکل (۲-۳)- فولادهای بکار رفته در قسمتهای مختلف اتوموبیل با توجه به دیاگرام تنش تسلیم- ازدیاد طول و عناصر میکروآلیاژی به کار رفته در آنها ۱۰

شکل (۲-۴) - کاربرد انواع فولادها در بدنه اتوموبیل ۱۱

شکل (۲-۵) - شرح شماتیکی از مراحل مختلف نورد کنترل شده ۱۳

شکل (۲-۶) - فرآیند ترمومکانیکی نورد کنترل شده ورق ۱۴

شکل (۲-۷) - حالات مختلف ممکن برای دمای نورد نهایی (FRT) ۱۷

شکل (۲-۸) - تأثیر درجه حرارت نورد پایانی برساختار محصول ۱۸

شکل (۲-۹) - تأثیر دمای کلاف پیچی بر روی ساختار حاصله (دمای کلاف پیچی پایین) (پرلیت=P) ۱۹

شکل (۲-۱۰) - نمای کلی از تست اریکسن ۲۴

شکل (۲-۱۱) - تصویر شماتیک سه مرحله نورد کنترل شده و تغییرات ریز ساختاری حاصل ۲۶

شکل (۲-۱۲) - طرح شماتیکی از ریزساختار آستنیت تغییر شکل یافته ۲۷

شکل (۲-۱۳) - شرایط مختلف شکل‌دهی ورق‌های فلزی و خصوصیات مواد که بر رفتار شکل‌دهی تأثیر می گذارند ۲۸

شکل (۴-۱) - میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده در تحقیق حاضر ۵۱

شکل (۴-۲) - دستگاه لایه نشانی طلای مورد استفاده در تحقیق حاضر ۵۱

شکل (۴-۳) - دستگاه آزمایش اریکسن مورد استفاده در تحقیق حاضر ۵۲

شکل (۵-۱) – نمودار اثرهای اصلی برای میانگین n-value ۵۸

شکل (۵-۲) – نمودار اثرهای اصلی برای میانگین ارتفاع گنبد ۵۹

شکل (۵-۳) – نمودار اثرهای اصلی برای میانگین اندازه دانه ۵۹

شکل (۵-۴) - نمودار اثرهای اصلی Grey Relational Grade ۶۵

شکل (۵-۵) – n-value در برابر CT و FT در نمودارهای آ) تراز و ب) رویه ۷۲

شکل (۵-۶) – ارتفاع گنبد در برابر CT و FT در نمودارهای آ) تراز و ب) رویه ۷۲
شکل (۵-۷) – ارتفاع گنبد در برابر RT و FT در نمودارهای آ) تراز و ب) رویه ۷۲
شکل (۵-۸) – اندازه دانه در برابر CT و FT در نمودارهای آ) تراز و ب) رویه ۷۳
شکل (۵-۹) – نمودار اثرهای اصلی برای n-value ۷۴
شکل (۵-۱۰) – نمودار اثرهای اصلی برای ارتفاع گنبد ۷۴
شکل (۵-۱۱) – نمودار اثرهای اصلی برای اندازه دانه ۷۵
شکل (۵-۱۲) – نمودار برهمکنش برای n-value ۷۶
شکل (۵-۱۳) – نمودار برهمکنش برای ارتفاع گنبد ۷۶
شکل (۵-۱۴) – نمودار برهمکنش برای اندازه دانه ۷۶
شکل (۵-۱۵) – نمودار بهینه‌سازی پاسخ ها ۷۸
شکل (۵-۱۶) – نمودار توزیع نرمال برای مدل n-value ۸۶
شکل (۵-۱۷) – نمودار توزیع نرمال برای مدل ارتفاع گنبد ۸۷
شکل (۵-۱۸) – نمودار توزیع نرمال برای مدل اندازه دانه ۸۸
شکل (۵-۱۹) – نمودار اثرهای اصلی برای n-value ۸۹
شکل (۵-۲۰) – نمودار اثرهای اصلی برای ارتفاع گنبد ۸۹
شکل (۵-۲۱) – نمودار اثرهای اصلی برای اندازه دانه ۸۹
شکل (۵-۲۲) – نمودار برهمکنش برای n-value ۹۲
شکل (۵-۲۳) – نمودار برهمکنش برای ارتفاع گنبد ۹۲
شکل (۵-۲۴) – نمودار برهمکنش برای اندازه دانه ۹۲
شکل (۵-۲۵) – مقایسه مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای n-value ۹۵
شکل (۵-۲۶) – مقایسه مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای ارتفاع گنبد ۹۵
شکل (۵-۲۷) – مقایسه مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای اندازه دانه ۹۶
شکل (۵-۲۸) - ریزساختار ورق‌های نورد شده در دماهای پایانی a) ۹۵۰ °C ،FT= b) ۹۰۰ °C ، FT= c) ۸۵۰ °C ،FT= d) ۸۰۰ °C بعد از سرد کردن ۱۰۱

شکل (۵-۲۹) - ریزساختار ورق‌های نورد شده در دماهای کلاف‌پیچی a) CT= ۵۵۰ ºC، b) CT= ۶۰۰ ºC، c) CT= ۷۰۰ ºC، d) CT= ۶۵۰ ºC ۱۰۲

شکل (۵-۳۰) - تصاویر SEM از ریزساختار ورق‌های نورد شده در دمای پایانی FT= ۸۰۰ ºC بعد از سرد کردن ۱۰۳

شکل (۵-۳۱) - تصاویر SEM از ریزساختار ورق‌های نورد شده در دمای کلاف‌پیچی CT= ۵۵۰ ºC بعد از سرد کردن ۱۰۴

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

فرآیند نورد یکی از متداول‌ترین فرآیندها برای تولید فرآورده‌های فلزی به ویژه فولادها با شکل‌ها و ابعاد مختلف است، به طوری که بیش از ۸۰ درصد از فرآورده‌های فلزی در جهان با این روش تولید می‌شود. از میان انواع مختلف فرآیندهای نورد، نورد تخت از پرکاربردترین فرآیندها است به طوری که در کشورهای صنعتی ۴۰ تا ۶۰ درصد محصولات حاصل از فرآیندهای مختلف نورد، به وسیله نورد تخت ایجاد می‌شود [۱].

فرآیند نورد به فرآیندی گفته می‌شود که به کمک حرکت خلاف جهت دو غلتک و فشار حاصل از غلتکها، تغییر ضخامت برای قطعه‌کار مورد نظر حاصل می‌شود. در این فرآیند ماده خام ورودی به کمک نیروهای وارد شده از طرف غلتکها به شکلها و ابعاد دلخواه تغییر می‌یابد. این فرآیند حداقل با دو غلتک انجام می‌شود که این غلتکها نسبت به قطعه کار بسیار بزرگتر و سنگین‌تر هستند و برای به چرخش درآوردن آنها نیاز به توان زیادی است. از این رو در بعضی مواقع از غلتکهای کوچک که به وسیله غلتکهایی بزرگتر پشتیبانی می‌شوند استفاده می‌گردد [۱].

فضای موجود بین دو غلتک از قطعه‌کار ورودی کوچکتر بوده بنابراین برای ورود قطعه کار به بین دو غلتک نیاز به نیروی اصطکاک است. با ورود قطعه کار به فضای بین دو غلتک قطعه کار فشرده شده و به همراه کاهش ضخامت افزایش طول نیز می‌یابد.

نورد مهمترین فرآیند شکل‌دادن فلزات بوده و در آن ظرفیت و سرعت تولید بسیار بالاست به نحوی که تناژ محصولات حاصل از این فرآیند به تنهایی از کل محصولات حاصل از دیگر فرآیندها بیشتر می‌باشد به همین دلیل اهمیت آن در صنعت به ویژه صنایع فلزی بسیار بالاست.

در گذشته نورد گرم به طور سنتی و تنها برای تغییر شکل از آن استفاده می‌شد و کاربردی جهت دستیابی به ریزساختار مطلوب نداشت. به منظور دستیابی به استحکام مورد نظر و بهبود ریزساختار، عواملی چون آلیاژسازی، افزایش سطح کربن و منگنز، افزایش سطح عناصری مانند سیلیکون و فسفر یا اضافه کردن کرم، نیکل و مس، دستاوردهای اصلی استفاده شده قبل از جنگ جهانی دوم بود. بطور کلی این دستاوردها فلز را از لحاظ چقرمگی، جوش‌پذیری و شکل‌پذیری ضعیف می‌کرد و قیمت آنرا افزایش می‌داد [۲].

بعد از سال ۱۹۵۰ پی برده شد که نورد گرم، خواص فولادهای نورد گرم شده را نیز تغییر می‌دهد. یکی از پیشگامان این دستاورد جرنورک[1] در سوئد در سال ۱۹۴۰ بود که دمای نورد پایانی کمتر از حد معمول را استفاده کرد تا فریت ساختار را ریزدانه کند و خواص آنرا بهبود دهد. مزایای این فرآیند صرفه جویی در مصرف انرژی با حداقل کردن یا حتی حذف عملیات حرارتی بعد از نورد گرم بود. این قبیل فرآیندها توسط وندربک[2] در سال ۱۹۵۸ نورد کنترل شده نامیده شد [۲].

در طول ۲۰ سال گذشته بر اساس درک بهتر بسیاری از پدیده‌های متالوژیکی، نورد کنترل شده متداول (CCR[3]) بهبود داده شده است. امروزه نورد کنترل شده برای تولید فولادهای میکروآلیاژی استحکام بالا (HSLA[4]) که شامل افزایش آلیاژهایی مانند Nb، Ti و V می‌باشد، بطور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی در رابطه با تأثیر پارامترهای نورد گرم بر شکل‌پذیری و ریزساختار فولادهای میکروآلیاژی نایابیوم‌دار انجام شده است. ولی در تحقیق حاضر بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند نورد گرم برای دستیابی به بیشترین شکل‌پذیری و ریزترین اندازه دانه با روشهای تاگوچی و فاکتوریال از طریق کاربرد طراحی آزمایش‌ها (DOE[5]) انجام می‌شود تا ضمن تعیین فاکتورهای تأثیرگذار، سطح بهینه پارامترها برای دستیابی به پاسخ بهینه بدست آورده شود. اهداف اصلی این تحقیق با بیان نکات زیر مشخص می‌شود:

۱) بهینه‌سازی توان کرنش سختی، ارتفاع گنبد و اندازه دانه با روش تاگوچی و طراحی فاکتوریال.
۲) بررسی پارامترهای موثر بر پاسخ‌ها و دقت مدل‌های بدست آمده با استفاده از آنالیز واریانس در هر روش بهینه‌سازی.
۳) بررسی تأثیر هر پارامتر ورودی بر پاسخ‌ها با بهبود مدل رگرسیون و بررسی کیفیت مدل‌ها.
۴) تعیین سطح بهینه پارامترها برای دستیابی به شرایط مطلوب پاسخ ها.
۵) بررسی ریزساختار بدست آمده تحت شرایط متفاوت نورد گرم.

برای تحقق اهداف فوق، تحقیق کنونی به صورت زیر شرح داده شده است:

1- Jernverck
2- Vanderbeck
3- Conventional Controlled Rolling
4- High Strength Low Alloy
5- Design of Experiments

در فصل دوم درباره فولادهای میکروآلیاژی، نورد گرم و پارامترهای آن و مروری بر تحقیقات پیشین انجام شده درباره پارامترهای نورد گرم، شکل‌پذیری فولادهای استحکام بالا و بهینه‌سازی با روش‌های مختلف، بررسی شده است. در فصل سوم طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش DOE برای روش‌های تاگوچی و طراحی فاکتوریال توضیح داده شده است. در فصل چهارم مواد، روش انجام آزمایش‌ها و تجهیزات بکار رفته شرح داده شده است. در فصل پنجم نتایج آزمایش‌ها آورده شده و بهینه‌سازی با روش های مختلف بر روی این نتایج انجام شده است. علاوه‌براین تحلیل ریزساختار حاصل از تصاویر متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی نیز در این فصل گنجانده شده است. در نهایت در فصل ششم نتیجه‌گیری کلی از این تحقیق بطور خلاصه به همراه پیشنهادها برای تحقیقات آتی آورده شده است.

فصل دوم

مروری بر منابع