مجتمع فولاد مبارکه

معاونت تکنولوژی
تحقیق و توسعه

گزارش فازهای دوم و سوم:

توسعه نرم‌افزار پیش‌بینی ضخامت و ساختار پوسته تشکیلی بر سطح نوار فولادی حین و پس از عملیات نورد داغ به منظور بهبود عملکرد فرایند اسیدشویی از طریق پیش‌بینی سرعت فرایند و میزان ازدیاد طول ورق در عملیات Stretch Leveler

پاییز ۱۳۹۱

۸۹۰۰۳۰۲۰۳

معاونت امور تکنولوژی

تحقیق و توسعه

عنوان پروژه تحقیقاتی

توسعه نرم‌افزار پیش‌بینی ضخامت و ساختار پوسته تشکیلی بر سطح نوار فولادی حین و پس از عملیات نورد داغ به منظور بهبود عملکرد فرایند اسیدشویی از طریق پیش‌بینی سرعت فرایند و میزان ازدیاد طول ورق در عملیات Stretch Leveler

مجری پروژه:

شرکت دیسا افزار پارس

واحدهای همکار در شرکت فولاد مبارکه

–واحد نورد سرد ۱

–واحد نورد گرم

–واحد تحقیق و توسعه

اسامی همکاران شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان

–محمود حسین‌آبادی

–داریوش درویشی

–حسن حیدری

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

چکیده

به منظور پیش‌بینی سرعت بهینه اسیدشویی برای ورق‌های گرم نوردیده، نرم‌افزار zoda طراحی و ارایه گردید. به طور کلی، سرعت اسیدشویی ورق فولادی نورد گرم شده، بسته به شرایط تولید آن در خط نورد داغ، میزان کاهش در دستگاه Stretch Leveler و شرایط مخازن اسیدشویی تعیین می‌شود. شرایط تولید ورق در خط نورد داغ، ضخامت و ساختار پوسته اکسیدی تشکیل شده بر سطح ورق را مشخص می‌کند. به منظور پیش‌بینی ضخامت و ساختار پوسته اکسیدی تشکیل شده بر سطح ورق در عملیات نورد داغ، نرم‌افزار zoda، تغییرات دمایی ورق حین و پس از نورد نهایی را محاسبه می‌نماید و با استفاده از نتایج تحلیل حرارتی و مدل‌های رشد و تغییر حالت فازی پوسته، ضخامت و ساختار پوسته تشکیلی را پیش‌بینی می‌نماید. با تعیین ضخامت و ساختار پوسته اکسیدی و با مشخص بودن شرایط تولید در خط اسیدشویی، می‌توان با استفاده از مدل‌های اسیدشویی، به تعیین سرعت بهینه اسیدشویی پرداخت. نرم‌افزار zoda با استفاده از برخی مدل‌های اسیدشویی، قادر به پیش‌بینی سرعت بهینه اسیدشویی می‌باشد.

نتایج حرارتی نرم‌افزار zoda، تطابق خوبی با نتایج واقعی خط تولید نورد داغ نشان می‌دهد. همچنین مقایسه ضخامت و ساختار پوسته اکسیدی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار zoda و ضخامت و ساختار مشاهده شده در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌هایی از خط نورد داغ، اختلاف ناچیزی را نشان می‌دهد. سرعت اسیدشویی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار zoda در دامنه عملیات واقعی قرار دارد. بنابراین، نرم‌افزار zoda به نحو موثری قادر به پیش‌بینی سرعت بهینه اسیدشویی با توجه به شرایط تولید واقعی است.

فهرست مطالب

فهرست تصاویر پ

فهرست جداول ث

مقدمه ۱

۱ مدل حرارتی ۳
۱.۱ انتقال حرارت در منطقه تماس بین ورق و غلتک‌های کاری ۴
۱.۱.۱ محاسبه تنش سیلان ۶
۲.۱.۱ محاسبه کرنش و آهنگ کرنش ۷
۳.۱.۱ محاسبه سرعت نورد ۸
۲.۱ انتقال حرارت جابجایی در اثر تماس بین ورق با هوا یا آب ۸
۱.۲.۱ مدل اجزای محدود ۹
۲.۲.۱ ضرایب انتقال حرارت جابجایی ۱۲
۳.۲.۱ ویژگی‌های ترموفیزیکی ورق و غلتک‌ها ۱۳
۳.۱ فلوچارت کلی مورد استفاده در تعیین دمای ورق ۱۴

۲ مدل رشد پوسته ۱۶

۳ مدل خواص مکانیکی پوسته ۱۹

۴ مدل تغییر حالت فازی پوسته ۲۲

۵ مدل اسیدشویی ۲۵
۱.۵ معادله اسیدشویی ۲۵
۲.۵ تاثیر میزان کاهش در مرحله Stretch Leveling بر زمان اسیدشویی ۲۶
۳.۵ سرعت اسیدشویی ۲۸

۶ نرم افزار zoda و خطوط تولید شرکت فولاد مبارکه ۳۱
۱.۶ مشخصات خط نورد داغ شرکت فولاد مبارکه ۳۱
۱.۱.۶ پیش از قفسه‌های پایانی ۳۱
۲.۱.۶ قفسه‌های پایانی ۳۲
۳.۱.۶ پس از قفسه‌های پایانی ۳۲
۲.۶ مشخصات خطوط اسیدشویی شرکت فولاد مبارکه ۳۳

۷ نتایج حرارتی ۳۴

۸ نتایج رشد و تغییر حالت پوسته ۴۱

۹ نتایج اسیدشویی ۴۸
۱.۹ پارامترهای نورد داغ و سرعت اسیدشویی ۴۸
۲.۹ ابعاد محصول و سرعت اسیدشویی ۴۹
۱.۲.۹ اثر ضخامت ۴۹

۲.۲.۹ اثر پهنا ۵۰
۳.۹ رده فولاد و سرعت اسیدشویی ۵۱
۴.۹ پارامترهای اسیدشویی و سرعت اسیدشویی ۵۱
۱.۴.۹ خط اسیدشویی شماره ۱ . . . . . ۵۲
۲.۴.۹ خط اسیدشویی شماره ۲ . . . . . ۵۲

نتیجه‌گیری **۵۵**

منابع **۵۶**

فهرست تصاویر

۱.۱ انواع روش‌های انتقال حرارت در فرایند نورد داغ [۱] ۳
۲.۱ هندسه و شرایط مرزی مدل استفاده شده در تحلیل انتقال حرارت [۲] ۱۰
۳.۱ فلوچارت تحلیل انتقال حرارت ۱۵

۱.۳ تغییر ضخامت پوسته اکسیدی به صورت تابعی از کاهش ارتفاع نمونه در آزمون فشار کرنش صفحه‌ای در دمای بالا [۱۱] ۱۹
۲.۳ میزان کاهش پوسته اکسیدی و فولاد زیرلایه تحت آزمون فشار کرنش صفحه‌ای در دماهای بالا [۱۱] ۲۰
۳.۳ رفتار تغییر شکل پلاستیک پوسته اکسیدی به صورت تابعی از دما و میزان کاهش [۱۱] ۲۱

۱.۴ انوع پوسته بر اساس دمای شروع خنک‌کاری و آهنگ خنک‌کاری [۱۲] ۲۳
۲.۴ طرحواره پوسته نوع اول [۱۲] ۲۳
۳.۴ طرحواره پوسته نوع دوم [۱۲] ۲۴
۴.۴ طرحواره پوسته نوع سوم [۱۲] ۲۴

۱.۵ تاثیر غلظت اسید و دمای محلول بر زمان لازم برای زدایش کامل پوسته اکسیدی از سطح ورق فولادی نورد داغ شده که تحت عملیات نورد تمپر به منظور ترک خوردن پوسته قرار نگرفته است [۱۳] ۲۷
۲.۵ تاثیر غلظت اسید و دمای محلول بر زمان لازم برای زدایش کامل پوسته اکسیدی از سطح ورق فولادی نورد داغ شده که تا ۳ درصد تحت عملیات نورد تمپر به منظور ترک خوردن پوسته قرار گرفته است [۱۳] ۲۸

۱.۶ طرح‌واره بخش پایانی خط نورد داغ شرکت فولاد مبارکه ۳۱

۱.۷ طرحواره تغییرات دمای حین عملیات نورد داغ برای سطح و مرکز ضخامت ورق [۱۱] ۳۴
۲.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۲ mm ۳۶
۳.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۲٫۲ mm ۳۶
۴.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۲٫۳ mm ۳۷
۵.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۲٫۵ mm ۳۷
۶.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۲٫۸ mm ۳۸
۷.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۳ mm ۳۸
۸.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۳٫۳ mm ۳۹
۹.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۴ mm ۳۹

۱۰.۷ تغییرات دما در نورد پایانی برای سطح، ربع و مرکز (در راستای ضخامت) محصول با ضخامت ۵ mm ۴۰

۱.۸ طرحواره تغییرات ضخامت پوسته اکسیدی حین فرایند نورد داغ ورق [۱۱] ۴۱
۲.۸ تصویر SEM پوسته اکسیدی تشکیلی بر سطح ورق با ضخامت ۲ mm و پهنای ۷۳۳ mm . . . ۴۲
۳.۸ تصویر SEM پوسته اکسیدی تشکیلی بر سطح ورق با ضخامت ۲٫۵ mm و پهنای ۱۴۳۵ mm . ۴۲
۴.۸ تصویر SEM پوسته اکسیدی تشکیلی بر سطح ورق با ضخامت ۳ mm و پهنای ۱۱۷۰ mm . . ۴۳
۵.۸ تصویر SEM پوسته اکسیدی تشکیلی بر سطح ورق با ضخامت ۳٫۳ mm و پهنای ۱۰۳۰ mm . ۴۳
۶.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۲ mm ۴۳
۷.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۲٫۲ mm ۴۴
۸.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۲٫۳ mm ۴۴
۹.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۲٫۵ mm ۴۵
۱۰.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۲٫۸ mm ۴۵
۱۱.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۳ mm ۴۶
۱۲.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۳٫۳ mm ۴۶
۱۳.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۴ mm ۴۷
۱۴.۸ تغییرات ضخامت پوسته در نورد پایانی محصول با ضخامت ۵ mm ۴۷

۱.۹ تغییرات سرعت اسیدشویی بر حسب ضخامت محصول در خطوط اسیدشویی شماره ۱ و شماره ۲ شرکت فولاد مبارکه (نتایج جدول ۲.۹) ۵۰

فهرست جداول

۱.۲ ترکیب شیمیایی فولادهای جدول ۲.۲ [۱۰] ۱۷
۲.۲ ثوابت آهنگ اکسیداسیون فولادهای جدول ۱.۲ [۱۰] ۱۷

۱.۴ ویژگی‌های انواع ساختار پوسته اکسیدی [۱۲] ۲۳

۱.۵ ضرایب رابطه ۵.۵ برای غلظت‌های اولیه مختلف حمام [۱۴] ۲۶
۲.۵ مقایسه زمان لازم برای زدایش کامل پوسته اکسیدی در فرایند اسیدشویی که تحت تاثیر غلظت HCl، دمای محلول، درجه نورد تمپر و دمای کلاف‌پیچی ۲۹

۱.۶ ضخامت و دمای بار خروجی از نورد خشن‌کاری برای برخی محصولات نورد داغ شرکت فولاد مبارکه ۳۲
۲.۶ میزان کاهش ($r = \frac{h_f}{h_\cdot - h_f}$) و سرعت غلتک‌ها در هر قفسه برای برخی محصولات نورد داغ شرکت فولاد مبارکه ۳۳
۳.۶ برخی ویژگی‌های خطوط اسیدشویی شرکت فولاد مبارکه ۳۳

۱.۷ دماهای واقعی نورد خشن‌کاری، نورد نهایی و کلاف‌پیچی برای محصولات با ضخامت‌های مختلف ۳۵
۲.۷ دمای نورد نهایی محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار zoda و دمای نورد نهایی واقعی برای محصولات با ضخامت‌های مختلف ۳۵

۱.۸ ضخامت و ساختار پوسته محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار zoda و ضخامت و ساختار واقعی پوسته اکسیدی برای محصولات با ضخامت‌ها و عرض‌های مختلف ۴۲

۱.۹ تاثیر دمای نورد خشن‌کاری بر سرعت اسیدشویی پیش‌بینی شده برای شرایط یکسان تولید محصولات مشابه (محصول با ضخامت ۲ mm و خط اسیدشویی ۱) ۴۸
۲.۹ تاثیر ضخامت محصول بر سرعت اسیدشویی در خطوط اسیدشویی شماره ۱ و شماره ۲ شرکت فولاد مبارکه ۴۹
۳.۹ مقایسه سرعت اسیدشویی واقعی و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار zoda برای شرایط مختلف تولید خط اسیدشویی شماره ۱ شرکت فولاد مبارکه ۵۳
۴.۹ مقایسه سرعت اسیدشویی واقعی و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار zoda برای شرایط مختلف تولید خط اسیدشویی شماره ۲ شرکت فولاد مبارکه ۵۴

مقدمه

پوسته اکسیدی تشکیل شده بر سطح ورق فولادی حین عملیات نورد داغ، باید پیش از اعمال فرایند نورد سرد بر روی ورق، زدوده شود. عملیات زدایش پوسته اکسیدی از سطح ورق، در فرایندی به نام اسیدشویی صورت می‌گیرد. در فرایند اسیدشویی، پوسته اکسیدی از طریق گذراندن ورق از یک سری مخازن حاوی اسید (با غلظت و دمای مشخص)، زدوده می‌شود. در صورتی که سرعت عبور ورق از مخازن بیشتر از مقدار مورد نیاز برای زدایش کامل پوسته باشد، ممکن است، پوسته اکسیدی به طور کامل زدوده نشود. در صورتی که سرعت کمتر از مقدار مورد نیاز باشد، ممکن است که با حل شدن آهن در اسید، مقدار زیادی آهن (ورق) تلف گردد. بنابراین، آگاهی از سرعت بهینه برای زدایش کامل پوسته اکسیدی در فرایند اسیدشویی، از اهمیت بالایی برخوردار است.

به منظور پیش‌بینی سرعت بهینه اسیدشویی برای ورق‌های گرم نوردیده، نرم‌افزار zoda طراحی و ارایه گردیده است. در گزارش پیش رو، ابتدا به بررسی و مطالعه مدل‌های مورد استفاده در این نرم‌افزار پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از نرم‌افزار zoda با مقادیر واقعی خطوط تولید در شرکت فولاد مبارکه مقایسه می‌شود. در نهایت، با تایید درستی نتایج حاصل، پروژه «*توسعه نرم‌افزار پیش‌بینی ضخامت و ساختار پوسته تشکیلی بر سطح نوار فولادی حین و پس از عملیات نورد داغ به منظور بهبود عملکرد فرایند اسیدشویی از طریق پیش‌بینی سرعت فرایند و میزان ازدیاد طول ورق در عملیات Stretch Leveler*»، به صورت نرم‌افزار zoda ارایه می‌گردد. بنابراین، در فصول مختلف گزارش پیش رو به موارد زیر پرداخته می‌شود.

فصل اول: مدل حرارتی کوششی برای *تهیه مدلی عددی به منظور پیش‌بینی دمای سطح بار از هنگام ورود به نورد نهایی تا هنگام خنک شدن کلاف تولیدی تا دمای اتاق با در نظر گرفتن حضور پوسته بر سطح بار* می‌باشد. با آگاهی یافتن از تغییرات دمای ورق حین و پس از عملیات نورد نهایی، اطلاعات لازم برای پیش‌بینی ضخامت پوسته اکسیدی بر سطح ورق فولادی فراهم می‌شود.

فصل دوم: مدل رشد پوسته شامل *تهیه مدلی به منظور محاسبه ضخامت پوسته تشکیلی بر سطح بار با استفاده از معادلات آهنگ اکسیداسیون فولاد و با توجه به دمای محاسبه شده* می‌باشد. به این منظور، با استفاده از تغییرات دمایی ورق که از طریق مدل حرارتی تعیین شده است، پیش‌بینی ضخامت پوسته اکسیدی تشکیلی بر سطح ورق امکان‌پذیر می‌شود.

فصل سوم: مدل خواص مکانیکی پوسته به منظور *تهیه مدلی برای تعیین ویژگیهای مکانیکی پوسته تشکیلی در دمای مشخص* ارایه شده است. با ارایه مدل مورد نظر، می‌توان از رفتار مکانیکی پوسته اکسیدی حین عملیات نورد داغ اطلاع یافت.

فصل چهارم: مدل تغییر حالت فازی پوسته کوشش می‌کند تا به *تهیه مدلی به منظور در نظر گرفتن تغییر حالت فازی پوسته و پیش‌بینی ساختار نهایی پوسته تشکیلی بر سطح کلاف خنک‌شده* بپردازد. با آگاهی از آهنگ خنک‌کاری ورق حین عملیات خنک‌کاری نهایی، تعیین ساختار نهایی پوسته اکسیدی تشکیلی بر سطح ورق فولادی فراهم می‌شود.

فصل پنجم: مدل اسیدشویی با *تهیه مدلی به منظور برقراری ارتباط بین ضخامت و ساختار پوسته تشکیلی بر سطح ورق و پارامترهای موثر در فرایند اسیدشویی*، امکان بهینه‌سازی پارامترهای اسیدشویی با توجه به ضخامت و ساختار پوسته اکسیدی سطح ورق فولادی امکان‌پذیر می‌شود.

فصل ششم: نرم‌افزار zoda و خطوط تولید شرکت فولاد مبارکه *استفاده از مدل‌های تهیه شده و ارایه یک نرم‌افزار واحد به منظور تعیین پارامترهای مناسب اسیدشویی برای هر کلاف تولیدی در واحد نورد داغ* شرایط ارایه نرم‌افزار zoda به صورت سفارشی برای خطوط تولید شرکت فولاد مبارکه را فراهم می‌آورد.

فصل هفتم: نتایج حرارتی با *مقایسه نتایج محاسبات حرارتی حاصل از نرم‌افزار و دماهای واقعی ثبت شده در خط نورد داغ شرکت فولاد مبارکه*، امکان ارزیابی درستی محاسبات حرارتی نرم‌افزار zoda فراهم می‌شود.

فصل هشتم: نتایج رشد و تغییر حالت پوسته با *مقایسه ضخامت و ساختار پوسته تشکیلی پیش‌بینی شده بر سطح بار توسط نرم‌افزار و نتایج حاصل از مطالعه و اندازه‌گیری بر کلاف‌های تولیدی در شرکت فولاد مبارکه*، بررسی درستی مدل‌های رشد، خواص مکانیکی و تغییر حالت پوسته امکان‌پذیر می‌شود.

فصل نهم: نتایج اسیدشویی با *مقایسه سرعت اسیدشویی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار zoda برای کلاف‌های مختلف با سرعت واقعی اسیدشویی آنها* ، امکان ارزیابی مدل اسیدشویی بکار گرفته شده در نرم‌افزار zoda فراهم می‌شود.

منابع

[1] X. LI, M. WANG and F. DUA, *A coupling thermal mechanical and microstructural FE model for hot strip continuous rolling process and verification*, Materials Science and Engineering A, No. 408, 33–41 (2005).

[2] A. LAASRAOUI and J.J. JONAS, *Prediction of temperature distribution, flow stress and microstructure during the multipass hot rolling of steel plate and strip*, ISIJ International, Vol 31, No. 1, 95-l05 (1991).

[3] G. J. RICHARDSON, D. N. HAWKINS and C. M. SELLARS, *Worked examples in metalwork-ing*, The Institute of Metals (1985).

[4] M. PRABHAKAR, P. B. B. BEHERA and A. K. LAHIRI, *Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature*, Journal of Materials Processing Technology, No. 170, 323–335 (2005).

[5] F. SICILIANO, K. MINAMl, T. M. MACCAGNO and J. J. JONAS, *Mathematical modeling of the mean flow stress, fractional softening and grain size during the hot strip rolling of C-Mn steels*, ISIJ International, Vol. 36, No. 12, 1500-1506 (1996).

[6] S. X. ZHOU, *An integrated model for hot rolling of strips*, Journal of Materials Processing Technology, No. 134, 338–351 (2003).

[7] R.D. MORALES, A.G. LOPEZ and l.M. OLIVARES1, *Heat transfer analysis during water spray cooling of steel rods*, ISIJ International, Vol. 30, No. 1, 48-57 (1990).

[8] S. SERAJZADEH, A. KARIMI TAHERI and F. MUCCIARDIB, *UnUnsteady state work-roll temperature distribution during continuous hot slab rolling*, International Journal of Me-chanical Sciences, No. 44, 2447–2462 (2002).

[9] R. Y. CHEN and W. Y. D. YUEN, *Review of the high-temperature oxidation of iron and carbon steels in air or oxygen*, Oxidation of Metals, Vol. 59, No. 5/6, 433-468 (2003).

[10] R. VIŠCOROVÁ, *Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung*, PhD thesis, Technische Universität Clausthal (2007).

[11] M. KRZYZANOWSKI, J. H. BEYNON, and D. C. J. FARRUGIA, *Oxide Scale Behaviour in High Temperature Metal Processing*, Wiley-VCH (2010).

[12] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen, *A Study of the Scale Structure of Hot-Rolled Steel Strip by Simulated Coiling and Cooling*, Oxidation of Metals, Vol. 53, Nos. 5/6, 539-560 (2000).

[13] Hudson, R.M., *Pickling of iron and steel* in Metals Handbook, 9th edition, ASM, Vol 5, 68-82 (1994).

[14] Y. JATUPHAKSAMPHAN, N. PHINICHKA, K. PRAPAKORN and M. SUPRADIST, *Pickling Kinetics of Tertiary Oxide Scale Formed on Hot-Rolled Steel Strip*, Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol. 20, No. 1, 33-39 (2010).

[15] R. Y. CHEN and W. Y. D. YUEN, *Oxide-Scale Structures Formed on Commercial Hot-Rolled Steel Strip and Their Formation Mechanisms*, Oxidation of Metals, Vol. 56, No. 1/2, 89-117 (2001).