

ارایه شیوه خنک کاری بهینه غلتکها در نورد گرم و بررسی مدل ریاضی تنش حرارتی غلتک

امیرزائرن^۱

^۱ آذربایجان شرقی، بناب، شرکت مجتمع فولاد صنعت بناب

چکیده

بدلیل ماهیت فرآیند نورد گرم (ورق - مقاطع) و نورد شمش در دماهای بین ۱۳۰۰ - ۸۵۰ درجه سانتیگراد در قسمتهای مختلف خط تولید، غلتک‌ها در حین تماس با شمش در معرض پدیده‌های انتقال حرارت گوناگون قرار می‌گیرند. شیوه خنک کاری غلتکها و عوامل موثر بر آن در کیفیت محصول تولیدی و هم چنین طول عمر غلتکها در قفسه‌های مختلف نورد، بسیار حائز اهمیت است. با خنک کاری مناسب از بوجود آمدن تنشهای حرارتی که عامل خستگی حرارتی در سطح غلتک هستند جلوگیری بعمل می‌آید. در این مقاله به بسط مدل ریاضی دمای غلتک حین نورد گرم، معادله انتقال حرارت آن، مکانیزم خستگی حرارتی سطح غلتک، پیش‌بینی و تخمین تنش حرارتی، توسعه دما و تنش حرارتی در غلتک تحت سیستم‌های مختلف خنک کاری پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت، خنک کاری در فرآیند نورد گرم، تنش حرارتی

¹ amir.zaerin11@yahoo.com

مقدمه

خنک کاری غلتکهای نوردی از اهمیت بالایی در صنعت نورد گرم برخوردار است و خنک کاری نامناسب سطح غلتک در نورد گرم باعث بروز مشکلات در تولید و افزایش هزینه ها خواهد بود. اغلب در کارخانجات نورد کمتر به این مساله توجه می شود در صورتیکه در افزایش کیفیت محصولات تولیدی تاثیر بسزایی دارد. در این مقاله سعی شده است طرز صحیح خنک کاری غلتکها، راهکارها و عوامل موثر بر آن مورد بررسی قرار گیرد تا از این راه بتوان سطح کیفیت محصولات تولیدی و طول عمر غلتکها را بالا برد. در متن به منابع علمی مورد استفاده در این مقاله اشاره شده است. همچنین مشاهدات تجربی نیز در این زمینه ذکر گردیده اند.

سیستم خنک کاری غلتک های کاری در نورد گرم (ورق - مقاطع)، از تجهیزات مهم و اساسی در هر کارخانه نورد بوده که بدون آن و یا عدم کارکرد مطلوب آن، با توجه به ماهیت دمای بالای فرآیند، میتواند مشکلات زیادی زیر را به همراه داشته باشد.

روش تحقیق

در این مقاله با استفاده از فلومتر و فشارسنجهای ویژه در پایپینگ آبرسانی سیستم خنک کاری، میزان دبی و فشار آب خنک کاری در هر مرحله اندازه گیری شده است. جهت پایش میزان خنک کاری انجام گرفته غلتک از دستگاه اندازه گیری دما (پرومتر) های لیزری با دقت بالا بهره گرفتیم.

نتایج و بحث

بدلیل ماهیت فرآیند نورد گرم (ورق - مقاطع) و نورد شمش در دماهای بین ۱۳۰۰ - ۸۵۰ درجه سانتیگراد در قسمتهای مختلف خط تولید، غلتک ها در حین تماس با بار یا شمش در معرض پدیده های انتقال حرارت گوناگون قرار گرفته که دمای نقاط مختلف آن بسرعت مطابق شکل (۱) بالا میرود. خنک کاری غلتکها باید بسیار اصولی و حساب شده باشد تا هم از بالا رفتن بیش از حد دمای غلتک ها پیشگیری شود و هم از سرد شدن بیش از حد فلز جلوگیری گردد [۱].

فشار آب کم و خنک کاری نامناسب، موجب ایجاد گرادیان حرارتی زیاد در مقطع غلتک و سوختگی سطحی آن می گردد که ممکن است در شرایط حاد منجر به شکستگی غلتک شود.

سیستم خنک کاری در نورد گرم

این سیستم متشکل است از:

- هدر ها در ورودی و خروجی قفسه
 - نازلها مطابق مشخصات تعیین شده
 - فشار سنج و فلو متر
 - شیرهای کنترلی
 - فلکسی بل ها و لوله های ارتباط
 - فشار آب خنک کاری توزیع آب در قفسه (خروجی/ورودی - بالا/پایین)
 - کلکتور پاشش آب بر روی نقاط مختلف سطح غلتک (شکل ۲)
- در ۶ دور اول بعد از شروع نورد با وجود جریان آب خنک کاری در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل ۳ دمای سطح را در عمقهای مختلف از سطح بخوبی نشان می دهد. در این جدول دمای هر نقطه از سطح غلتک در دوره های اولیه نورد بین 490°C و 510°C نشان داده شده است.

آسیب دیدگی غلتکها در اثر خنک کاری نامناسب

الف) مکانیزم خستگی حرارتی سطح غلتک: همانگونه که قبلاً اشاره گردید در هر دور دمای سطح غلتک به حد ماکزیمم و می نیمم می رسد که این امر سریعاً باعث به وجود آمدن تنشهای حرارتی که عامل خستگی حرارتی هستند، می شوند و باعث شکست غلتک می گردند. در شکل ۴ نمونه شکست غلتک در اثر این عامل نشان داده شده است [۲].

ب) شکستگی کامل ناشی از شوک حرارتی: این نوع شکست، بدلیل ایجاد شوک حرارتی و اختلاف دمای زیاد بین سطح و مغز غلتک، ناشی از عدم کارکرد مطلوب سیستم خنک کاری، می باشد. گرادیان حرارتی بالا، باعث تنش های حرارتی می گردد و این تنش ها باعث شکست ترد بشکه غلتک می شود.

ج) پیش بینی و تخمین تنش حرارتی: روش محاسبه تنش حرارتی بوسیله Stevens و همکارانش توضیح داده شده است. وقتی دمای سطح غلتک افزایش پیدا می کند، کرنش معادل تشکیل شده از تنش محوری و الاستیک از روابط زیر بدست می آید [۳]:

$$-\alpha_e \cdot \Delta T = \varepsilon' - \mu' \varepsilon' \quad (1)$$

$$i.e., \quad \varepsilon' = -\frac{1}{1-\mu'} \cdot \alpha_e \cdot \Delta T \quad \text{and}$$

$$\sigma_{el} = E \cdot \varepsilon' = -\frac{E}{1-\mu'} \cdot \alpha_e \cdot \Delta T$$

در ناحیه پلاستیک، تنش در هر دمایی مساوی تنش تسلیم ماده در آن دما در نظر گرفته می شود. کرنش کلی در هر دمایی از معادله زیر بدست می آید:

$$-\alpha_e \cdot \Delta T = \varepsilon'(1 - \mu') + \varepsilon''(1 - \mu'') \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''$$

بعد از رسیدن به ماکزیمم دما، سطح غلتک آغاز به خنک شدن می کند و تنش فشاری شروع به کاهش بصورت الاستیکی می نماید، اما تنش پلاستیک ε'' در ماکزیمم دما ثابت باقی می ماند و پس از این تنش کلی در دمایی از معادلات فوق تعیین می شود.

خواص چدن کروم بالا که در محاسبه تنش حرارتی و کرنش در سطح غلتک استفاده می شوند، بشرح زیرند:

$$\alpha_e = 10.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \quad \mu' = 0.28, \quad \mu'' = 0.50, \quad (3)$$

$$E = 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$$

مقاومت کششی چدن کروم بالا در حدود ۶۵۰ Mpa است. در غیاب مقاومت تسلیم ماده بنظر می رسد که مقاومت کششی تسلیم ماده ۸۰٪ مقاومت کششی خواهد بود. مقدار مقاومت فشاری تسلیم چدن کروم بالا وقتی بالاتر می رود، موجود نیست. اگرچه تنش فشاری تسلیم این ماده در دمای اتاق ۱۶۰۰ Mpa، در حدود ۲۱٪ بیشتر از S.G.Cast Iron است. تنش حرارتی و کرنشی به خوبی در شکل (۱۰) دیده می شود.

در این دیاگرام دمای سطح غلتک توسط روابط ریاضی بین 104.5°C و 550°C بر آورد شده است. وقتی سطح غلتک با شمش در نورد گرم تماس پیدا می کند تنش در سطح غلتک با بالا رفتن دمای سطح، افزایش می یابد. در شکل (۵) حلقه هیستریزس تنش - کرنش نشان داده شده است.

(د) توسعه دما و تنش حرارتی در غلتک تحت سیستم های مختلف خنک کاری: دمای غلتک کاری و در نتیجه آن تنش حرارتی به فاکتورهای زیادی بستگی دارد. تعدادی از این فاکتورها در زیر آمده است:

- مقدار جریان آب خنک کاری
- موقعیت نواحی اسپری آب
- تعداد ردیفهای نازل اسپری کننده
- توزیع آب خنک کاری در محیط غلتک

نتیجه گیری

اثر موقعیت و مکان نازل های اسپری آب

خنک کاری غلتک بوسیله اسپری آب، در صورت امکان باید از نزدیکی محل گیرش غلتک شروع شود.

حالت ۱: موقعیت زاویه ای نازلها در طرف خروجی 40° نسبت به نزدیک گیرش غلتک است.
حالت ۲: نازلهای اسپری کننده در موقعیت زاویه ای 130° همانگونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، قرار می گیرند.
دمای غلتک و تنش حرارتی القا شده در سطح غلتک بعد از بحالت موازنه در آمدن در جدول (۱) بطور خلاصه برای هر دو حالت ذکر شده است.

اثر دبی جریان آب خنک کاری

دبی جریان آب برای غلتک بالایی استند ۱ در حدود $317 \text{ m}^3/\text{hr}$ است. اثر مقادیر مختلف روی دما و علاوه کرنش حرارتی غلتک در جدول (۳) نشان داده شده است. در این جدول مشاهده می شود که با افزایش دبی جریان آب، مقدار کرنش پلاستیک از 4.521×10^{-3} به 4.330×10^{-3} کاهش می یابد. این مشاهدات بطور خلاصه در جدول (۲) آمده است.

مشاهده می شود که با افزایش دبی جریان آب خنک کاری از 40% کمتر از حالت فعلی به 10% بیشتر از حالت فعلی، کرنش پلاستیک به طور تدریجی کاهش می یابد. اما وقتی دبی از 10% بیشتر به 20% بیشتر از حالت کنونی افزایش یابد، کاهش کرنش پلاستیک ناچیز می باشد. بنابراین افزایش مقدار دبی آب به طور محسوس و قابل توجهی کرنش پلاستیک را کاهش نمی دهد. از اینرو، نتیجه می گیریم با ترتیب خنک کاری موجود نشان داده شده در شکلهای قبل (دو ردیف نازل در طرف ورود شمش و سه ردیف در طرف خروج)، بهینه ترین دبی جریان آب، دبی 10% بیشتر از حالت کنونی خواهد بود.

ترکیب اثر دبی آب خنک کاری و تعداد ردیف نازلها

با استفاده از مدل آزمایش اثر تعداد ردیفهای نازلهای اسپری در دو طرف ورودی و خروجی با مقادیر مختلف دبی، دانسته می شود اگر از ردیف بالایی نازلها در ورود صرفنظر گردد و دبی جریان در کل ردیفها بدون تغییر بماند، ماکزیمم دمای سطح و بدنه غلتک از 550°C و 184.5°C به 556°C و 198°C و کرنش پلاستیک از 3.873×10^{-3} به 4.337×10^{-3} خواهد رسید. این مشاهدات در جدول (۵) آورده شده است. از جدول (۵) استنباط می شود که اگر از ردیف بالایی در خروج صرفنظر شود، 18% کل دبی کاهش می یابد. ماکزیمم دمای سطح و بدنه غلتک به 558°C و 206°C ، و کرنش پلاستیک از 3.873×10^{-3} به 4.506×10^{-3} افزایش می یابند. در جدول (۴) دماهای غلتک در سطح و عمقهای مختلف در مدت زمانهای مختلف پس از نورد نشان داده شده است.

اثر توزیع آب در پیرامون غلتک

آب در دوناحیه ورودی و خروجی غلتکها بر روی انها اسپری می گردد که در شکل (۴) نشان داده شد. جهت بهینه نمودن اثر خنک کاری یک نرخ معینی از دبی آب، هدر در قسمت خروجی باید آب بیشتری نسبت به قسمت ورودی توزیع نماید. توصیه شده است که ۷۰٪ آب خنک کاری در قسمت خروجی و ۳۰٪ آن در قسمت ورودی برای غلتکهای چدنی کروم بالا استفاده گردد. در بعضی از مقالات این نسبت ۱:۲ پیشنهاد میگردد.

مراجع

[۱] دکتر محمدحسین مشکسار، "اصول مهندسی نورد"، مرکز نشر دانشگاه شیراز، چاپ دوم ۸۴.

- [2] Dr. Karl Heirich Schroder, "A Basic Understanding of The Mechanics of Rolling Mill Rolls" 2003, pp. 71-75.
- [3] Jayanta Kumar SAHA, Sourabh KUNDU, Sanjay CHANDRA, Santosh Kumar SINHA, Mathematical Modeling of Roll Cooling and Roll Surface Stress, ISIJ International, 2005, Vol. 45, No. 11, pp. 1641-1650.
- [۴] "خنک کاری غلتکها"، اولین همایش تخصصی غلتک و نورد، اردیبهشت ۱۳۸۸.

جدول ۱- دما و کرنش حرارتی روی غلتک در موقعیت های متفاوت نازل های اسپری.

Angular Location of lowermost row if nozzles at exit side	Temperature, °C			Plastic Strain/Cycle
	Max. at Surface	Min. at Surface	Roll Body	
40 (Close to roll bite)	549.5	104.4	181.5	3.830×10^{-3}
130 (Close to back-up roll)	551.6	104.5	194.0	4.002×10^{-3}

جدول ۲- تغییرات دما و کرنش حرارتی غلتک با تعداد ردیفهای نازل اسپری.

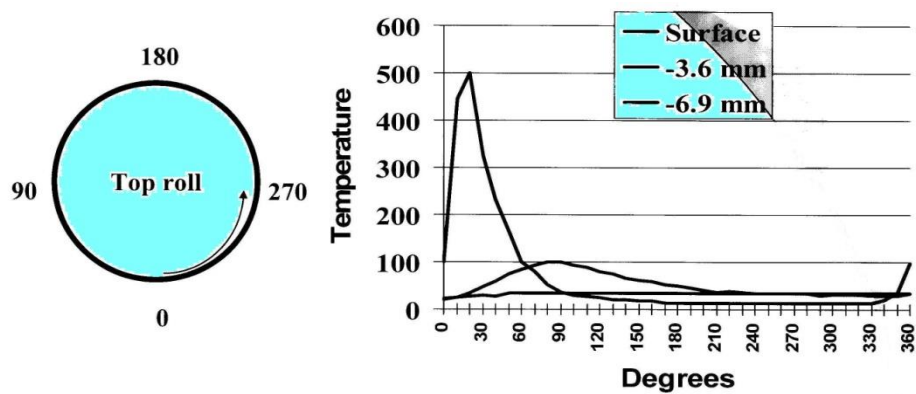
Total Water flow	Temperature, °C			Plastic Strain/Cycle
	Max. at Surface	Min. at Surface	Roll Body	
40% less than the existing flow	558	105.3	206.5	4.52×10^{-3}
30% less than the existing flow	556	105.1	201	4.33×10^{-3}
20% less than the existing flow	554	104.9	195.5	4.194×10^{-3}
10% less than the existing flow	552	104.5	190	4.034×10^{-3}
Existing flow (about 317 m ³ /hr.)	550	104.2	184.5	3.873×10^{-3}
10% less than the existing flow	547.7	104.2	179	3.693×10^{-3}
20% less than the existing flow	545.8	100.1	174	3.689×10^{-3}
30% less than the existing flow	545	99.7	171	3.634×10^{-3}

جدول ۳- اثر تغییرات دبی جریان آب روی کرنش حرارتی سطح غلتک با تعداد ردیفهای نازل اسپری در ورود و خروج.

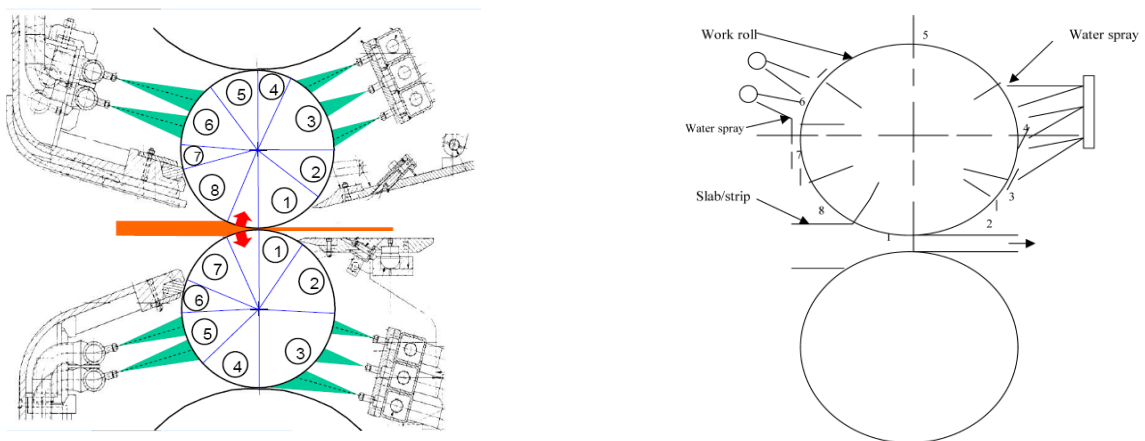
Increament in water flow		Reduction in plastic strain/cycle		Amount of reduction in plastic strain/cycle
From	To	Min. at Surface	Roll Body	
40% less than the present flow	30% less than the present flow	4.52×10^{-3}	4.330×10^{-3}	0.191×10^{-3}
30% less than the present flow	20% less than the present flow	4.330×10^{-3}	4.194×10^{-3}	0.136×10^{-3}
20% less than the present flow	10% less than the present flow	4.194×10^{-3}	4.034×10^{-3}	0.160×10^{-3}
10% less than the present flow	Present flow (about 317 m ³ /hr.)	4.034×10^{-3}	3.873×10^{-3}	0.160×10^{-3}
Present flow	10% less than the present flow	3.873×10^{-3}	3.693×10^{-3}	0.180×10^{-3}
10% more than present flow	20% less than the present flow	3.693×10^{-3}	3.689×10^{-3}	0.004×10^{-3}
20% less than the present flow	30% less than the present flow	3.689×10^{-3}	3.634×10^{-3}	0.055×10^{-3}

جدول ۴- دمای غلتک در سطح، عمقهای مختلف و زمانهای متفاوت.

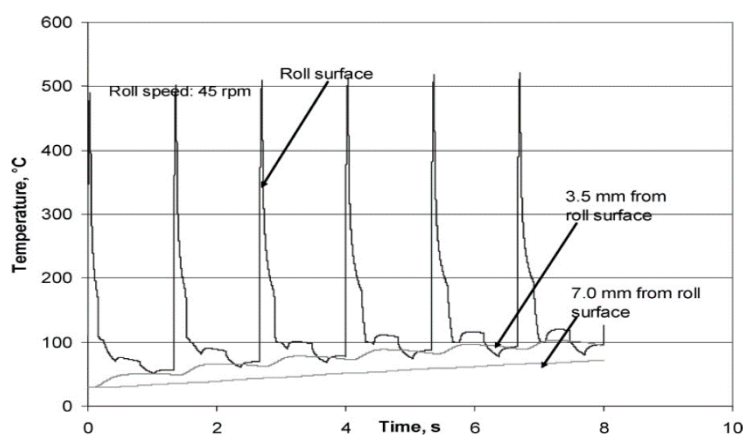
Time after commencement of rolling	Condition	Location	Temperature, °C at different depths				
			surface	7mm	87mm	175mm	Centre
About 1h 1min	Rolling a Slab	End of roll bite	498	160	106	95	84
		Just before roll bite	140	160.3	106	95	84
About 1h 2min	Idling	End of roll bite	55	72	107	95.6	84.8
		Just before roll bite	54	71	107	95.6	84.8



شکل ۱- تغییرات دمای نقاط مختلف غلتک در حین نورد.



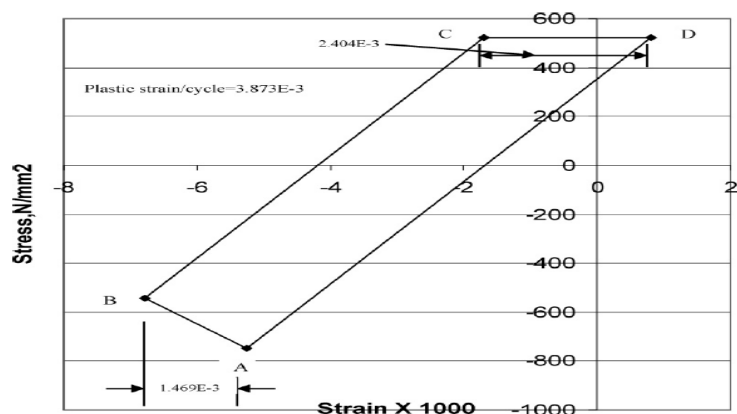
شکل ۲- ترتیب خنک کاری غلتک در نورد.



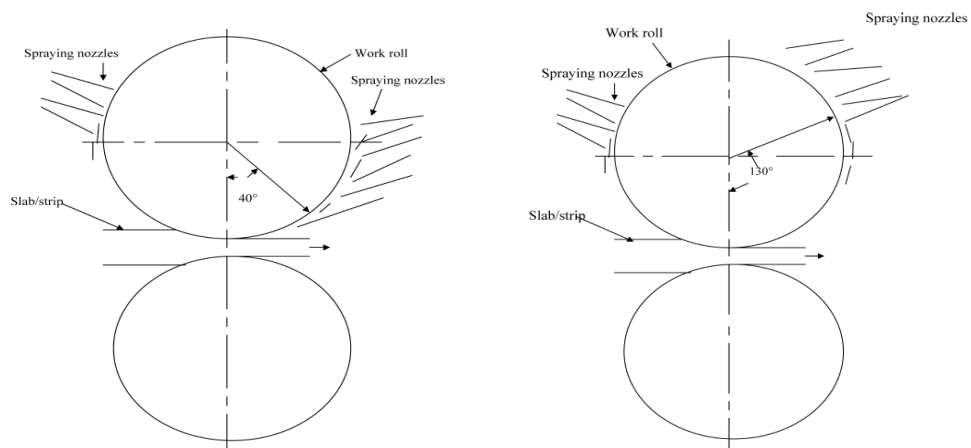
شکل ۳- تغییرات دمای یک نقطه از سطح غلتک با زمان طی شش دور اول.



شکل ۴- غلتک شکسته شده از وسط کالیبر.



شکل ۵- حلقه هیستریزس تنش - کرنش.



شکل ۶- ترتیب خنک کاری برای غلتک پایینی و بالایی.