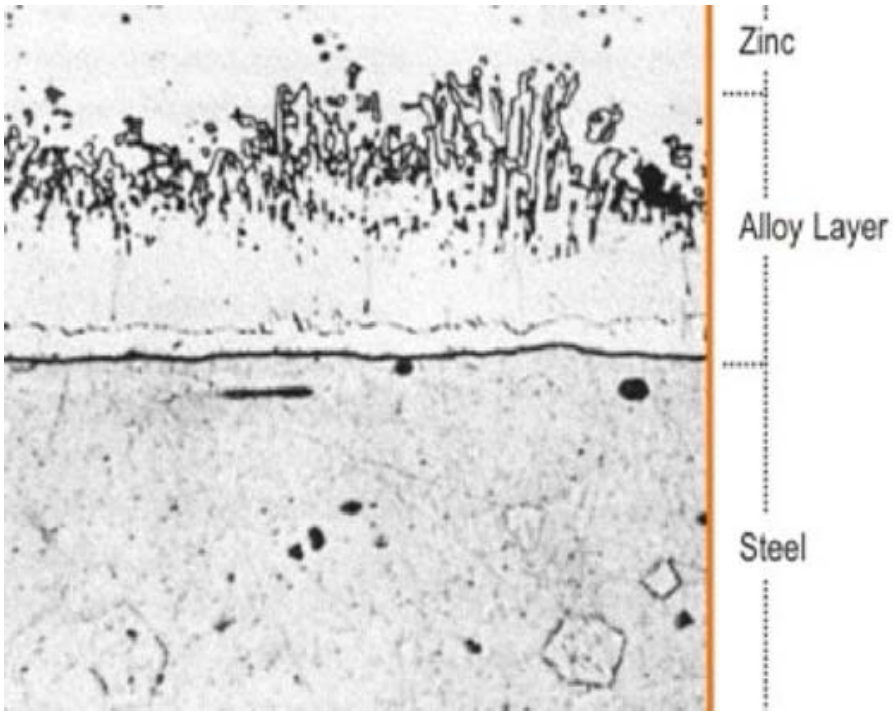
کنفرانس بین‌المللی مهندسی برای جهان پایدار
مجلهٔ فیزیک: مجموعه کنفرانس‌ها. سال ۲۰۱۹-قسمت دوم

بررسی اجمالی فرایند تولید و خواص ورق‌های گالوانیزهٔ سقفی

۲ ـ فرایند تولید ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی

ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی با فرایند روکش پیوستهٔ گرم غوطه‌ای تولید می‌شود. در طول تولید ورق سقفی، روی مذاب در یک فرایند پیوسته بر سطح فولاد به عنوان زیرلایه، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، ریخته می‌شود. روکش فولاد با عبور از حمامِ روی مذاب، با سرعتی نزدیک به ۶۰۰ فوت در دقیقه به شکل نواری یک‌دست به دست می‌آید. ضخامت ورق فولاد از ۰/۱۲ تا ۰/۵۵ میلیمتر و عرض آن تا ۱۸۳۰ میلیمتر متغیر است. به طور کلی، فرایند روکشی مستمر گرم غوطه‌ای با تمیز کردن سطح فولاد به کمک مایع قلیایی و سپس شستشو و خشک کردن آن شروع می‌شود. فولاد پس از تمیزی کامل، برای اینکه نرم‌تر شده و همچنین شکل‌پذیری و استحکام مطلوبی به‌دست آورد، وارد کورهٔ بازپخت یا گرمایی می‌شود. کورهٔ گرمایش فولاد در محیطی کم‌گاز، شامل نیتروژن و هیدورژن کار می‌کند تا قادر به حذف آثار اکسیدی احتمالی بر سطح فولاد باشد. محفظه خلاء معروف به «دماغه» به انتهای خروجی کوره و به حمام روکشِ روی مذاب متصل است تا از اکسید مجدد محصول فولادی گرم در هوا جلوگیری کند. در حمام روکش روی، محصول فولادی به نزدیک غلتک غوطه‌ور منتقل می‌شود و به نوعی، به فلز روی مذاب واکنش نشان می‌دهد تا روکش چسب را تشکیل دهد و سپس در جهت عمودی خارج شود. با خروج فولاد روکش‌دار از حمام به کمک هوای پرفشار، هرگونه روی مذاب اضافی حذف می‌شود و بدین ترتیب روکشی به‌دست می‌آید که ضخامتش را می‌توان از نزدیک کنترل کرد. در نهایت، باید منتظر شد تا فولاد خنک و روکشِ روی آن کاملا منجمد شود. نقطهٔ کلیدی برای جلوگیری از آسیب و تغییر شکل روکش روی، انجماد فلز مذاب قبل از تماس با غلتک دیگر است.



شکل ۱ ـ ریزساختار روکش معمول گالوانیزهٔ گرم غوطه‌ای

۲ـ۱ مراحل تولید ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی

تولید ورق‌های فولاد گالوانیزهٔ سقفی را می‌توان در شش مرحلهٔ مجزا بدین ترتیب طبقه‌بندی کرد:

- فرایند جوشکاری: ورق پیوسته از جوشکاری انتهای ورق‌های فولادی به ورق‌های قبلی برش‌خورده، تشکیل می‌شود.
- فرایند صافکاری: یک صاف‌کنندهٔ کششی پرقدرت برای صاف کردن ورق فولادی استفاده می‌شود. نتیجهٔ کار از نظر صاف بودن فوق‌العاده است.
- فرایند نظافت: ورق فولادی در یک حمام قلیایی تمیز می‌شود و برای چربی‌زدایی اولیه برس می‌خورد تا اکسیدهای سطحی کاهش یابد. بدین ترتیب چسبندگی روکش کامل می‌شود. ورق سپس برای فعال شدن، در حمام اسیدی غوطه‌ور می‌شود.
- فرایند بازپخت مداوم: این مرحله شامل کاهش لایهٔ اکسیدشده سطح ورق فولادی با عبور پیوستهٔ آن از کورهٔ احیا انجام می‌گیرد.
- فرایند گالوانیزه: ورق در فضای احیا به حال خود گذاشته شده و سپس مستقیماً در حمام روی مذاب غوطه‌ور می‌شود. ورق فولادی به دور غلطکی که در وانِ روکش فرو رفته، پیچیده و

به‌صورت عمودی از وان بیرون کشیده می‌شود. حذف روی مذاب اضافی، با استفاده از هوای پرفشار انجام می‌گیرد تا روکشی که ضخامت آن را بتوان از نزدیک کنترل کرد، به دست آید.

- فرایند عملیات شیمیایی: ورق روکشِ روی، برحسب نیاز تحت عملیات گوناگون شیمیایی قرار می‌گیرد. این عملیات شامل عملیات فسفات‌کاری برای رنگ‌پذیری عالی و عملیات ویژهٔ آزاد کردن کرومات برای داشتن مقاومت بالا در برابر خوردگی است.

۲ ـ ۲ انواع ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی

ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی یکی از پرمصرف‌ترین سقف بام‌ها در منازل، صنایع و اماکن تجاری است. ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی معمولا برای استفادهٔ بلندمدت در شکل‌های متفاوتی چون ذوزنقه، مقطع ناودانی / نیم‌درز و موجدار عرضه می‌شود. همچنین گاهی اوقات به شکل ورق‌های تخت، سفال و کاشی هم عرضه می‌شود. سقف‌ها از فولاد نرم با روکش روی ساخته می‌شوند. یک سقف بادوام معمولا با استفاده از گل‌میخ‌های سربی در جای خود ثابت می‌شود.

۲ ـ ۳ تأثیر ضخامت و جرم روکش بر ورق سقف فولادی گالوانیزه

در فرایند روکش پیوستهٔ گرم غوطه‌ای، روکش کردن با سرعت بالایی انجام و ضخامت و جرم روکش در فرایند مربوطه کنترل می‌شود. ضخامت روکش بر حسب گرم بر متر مربع یا میکرون اندازه‌گیری می‌شود. توانایی مقاومت در برابر تخریب ورق فولادی گالوانیزهٔ سقفی، تابعی از ضخامت روکش است. به عنوان مثال، در هر شرایط محیطی، روکش G۹۰ بیشتر از روکش G۶۰ دوام می‌آورد، درحالی‌که نگهداری، رنگ‌آمیزی و سایر عوامل برابرند. در اینجا G به معنای گالوانیزه است. با اینکه ضخامت بیشتر روکش فولاد گالوانیزه، مقاومت بالاتری در برابر خوردگی ایجاد می‌کند، ولی همین کار باعث شکل‌پذیری کمتر ورق فولادی می‌شود. برای همین، در کاربردهای مهم سقف‌سازی ضخامت روکش باید به ترکیب مطلوبی از مقاومت خوردگی و شکل‌پذیری ورق، بهینه شود. ضخامت روکش را می‌توان با اندازه‌گیری لایه لخت‌شدهٔ فولاد با یک ابزار ضخامت‌سنج اندازه گرفت. سایر شیوه‌های تعیین ضخامت روکش روی، ضخامت‌سنج‌های مغناطیسی، وزن قبل و بعد گالوانیزه و میکروسکوپ نوری هستند. کنترل وزن یا جرم روکش در یکنواختی روکش به‌صورت عرضی یا طولی و عرضی، در دو طرف ورق با وزن مشخص روی وجود دارد. فاصله تیغه، فشار گاز تیغه و سرعت خط، متغیرهایی هستند که بر جرم و ضخامت روکش تأثیر می‌گذارند. دلیلش این است که کنترل وزن یا جرم در نوار تیغه اعمال می‌شود که

باید بین حد بالا و پایین هر نقطه از نوار باشد تا نیاز استاندارد را برآورده کند. بنابراین، جرم روکش باید با نظارت دقیق بر ضخامت روکش بهینه شود.

۲ ـ ۴ رابطه ضخامت، عرض، طول، استحکام کششی و جرم روکش روی موجدار

ضخامت روکش متناسب است با جرم روکش. با این حال، طول و عرض را می‌توان بر اساس مشخصات و هدف مورد نیاز انتخاب کرد. ضخامت روکش گالوانیزهٔ گرم غوطه‌ای را از طریق ضخامت لایهٔ آلیاژ روی ـ آهن که موقع واکنش فولاد به روی تشکیل می‌شود، تعیین می‌کنیم. لایهٔ آلیاژی معمولا ۹۵٪ آهن و ۵٪ روی است. از روکش گالوانیزهٔ ضخیم‌تر، دوام بیشتری به‌دست می‌آید. استحکام کششی لایهٔ روکش روی با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد.

۲ ـ ۵ پارامترهای مؤثر برای ظاهر روکش‌های فولاد گالوانیزه

ورق فولاد گالوانیزه در کاربردهای مختلفی استفاده می‌شود. با این حال، کاربردهای مختلف نیاز به ظاهر خاص خودشان دارند. پولکی (شکل دانه‌برفی) ویژگی معمول سطوح گالوانیزه است. روکش روی پولکی‌شکل، روکشی تزیینی است. ظاهر روکش تابعی از پارامترهای فولاد زیرلایه چون ترکیب شیمیایی فولاد، شرایط سطح مثل خرابی یا زبری سطحی خاص پردازش (همراه با نورد و تولید)، دمای حمام روکش، مدت زمان روکش و سرعت روکش و رفتار مکانیکی ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی.

خواص مکانیکی ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی خود را در استفادهٔ بیرونی تعریف می‌کنند. خواص مکانیکی اصلی از این قرارند:

- استحکام: مقاومتی است که ورق سقفی هنگام اعمال بار خارجی از خود نشان می‌دهد. استحکام ورق سقفی تابعی از توانایی آن است که در برابر نیروهای خارجی تاب می‌آورد. تنش ورق فولاد سقفی به‌صورت فشاری، کششی یا برشی است.
- الاستیسیته: ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی باید قابلیت بازگشت به حالت اولیه‌اش را پس از تغییر شکل هنگام برداشتن بار، داشته باشد. حد الاستیک ورق سقفی، حداکثر تنشی است که بدون تغییر شکل دایمی می‌تواند تحمل کند.
- پلاستیسیته: این قابلیت ورق فولادی است که تغییر شکلی دایمی را تا حد عدم گسیختگی بپذیرد. تغییر شکل پلاستیک زمانی رخ می‌دهد که از حد الاستیک فراتر رود. به‌طور کلی، میزان پلاستیسیته با افزایش دما افزایش می‌یابد. پلاستیسیته یکی از خواص مواد است که در

فرایندهای شکل‌دهی ثانویه باید در نظر گرفته شود. پلاستیسیته از طریق اعمال گرما، فشار یا ترکیبی از گرما و فشار، تبدیل ورق فولاد گالوانیزه را به محصولی متفاوت در شکل و اندازه‌های دلخواه امکان‌پذیر می‌کند.

- شکل‌پذیری: این خاصیتی است که کشیدن فولاد با اعمال بار یا نیرو را امکان‌پذیر می‌کند. فلز پایهٔ ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی، فولاد نرم است که به شکل‌پذیری شناخته می‌شود که کشیدن با اکستروژن (روزن‌رانی) یا کشیدن از میان روزن یک قالب آماده را امکان‌پذیر می‌کند. شکل‌پذیری ورق فولادی با افزایش دما کاهش می‌یابد. ازدیاد طول و کاهش دما، پارامترهای کلیدی اندازه‌گیری شکل‌پذیری هستند.
- چکش‌خواری: چکش‌خواری، توانایی ورق شدن فولاد بدون انتشار ترک در طول فرایند کار سرد و گرم است. چکش‌خواری یک خاصیت فشاری است، درحالی‌که شکل‌پذیری خاصیت کششی است. چکش‌خواری یک ماده با افزایش دمای آن افزایش می‌یابد.
- شکنندگی: شکنندگی ورق فولاد، قابلیت شکستگی بدون اعوجاج دایمی آن است. مبنای فولاد نرم ورق گالوانیزه، تردی کمتری دارد و این باعث می‌شود که برخلاف شیشه و چدن، پس از تغییر شکل زیاد دچار شکستگی نشود.
- چغرمگی: این قابلیت ورق فولاد، مقاومت در برابر تغییر شکل الاستیک و پلاستیک است. ورق فولاد گالوانیزه به دلیل وجود عناصر نایاب آلیاژی، درجه چغرمگی قابل توجهی دارد. مقدار انرژی که ورق فولاد گالوانیزه سقفی قبل از شکست جذب می‌کند، چغرمگی آن محسوب می‌شود.

۳ ـ پیش‌بینی خواص مکانیکی ورق فولاد گالوانیزه

ورق یا کلاف فولادی مناسب مشتری را می‌توان با پیش‌بینی خواص مکانیکی‌شان قبل از فرایند گالوانیزه تولید کرد. با این شیوه درعین‌حال هدررفت مواد به حداقل می‌رسد. پژوهشگران بر روی خواص مکانیکی کلاف‌های فولادی مختلف قبل از گالوانیزه، بررسی تطبیقی انجام دادند.

آن‌ها مدل‌های یاد شده را به روش‌های خطی و غیرخطی، کیسه‌ای و سایر روش‌های ساختاری مورد ارزیابی قرار دادند. در مجموع بر روی ۳۰ مدل پیش‌بینی کردند. پیش‌بینی برای هر پارامتر در نظر گرفته شد تا اطلاعات معناداری درباره ظرفیت این مدل و روش‌ها به‌دست آید. پژوهشگران همچنین هر

یک از این مدل‌ها را در برابر هر داده چندین بار آزمایش کردند و توانستند مدلی بسازند تا ارتباط نمره (گرید) فولاد را مشخص و مدل مناسب هر پارامتر را ارائه کنند. آن‌ها مشخصات مکانیکی ورق فولاد گالوانیزه را با استفاده از روش‌های داده‌کاوی چون شبکه عصبی، ماشین بردار پشتیبان، تحلیل برگشت‌ها (رگرسیون) و روش‌های درخت برگشت‌ها (رگرسیون) پیش‌بینی کردند. استفاده از روش شبکهٔ عصب‌دار، جهت یافتن بهترین نتیجهٔ پیش‌بینی خواص مکانیکی فولاد گالوانیزه است. این پیش‌بینی با جمع‌آوری اطلاعات مرتبط با ترکیبات شیمیایی، ضخامت و عرض ورق‌ها، سرعت‌های نوار و دمای تاب‌کاری از طریق مدل‌های پیش‌بینی به‌دست آمد، به‌طوری‌که وقتی قرار است ورق در خط گالوانیزه تولید شود، تمام پارامترهای غیرقابل کنترل و دما و سرعت به عنوان پارامترهای قابل کنترل به مدل وارد شده و نتایج دقیق به‌دست می‌آیند. درنهایت با تغییر پارامترهای قابل کنترل، بهترین مقدار برای آنها از قبل تعیین خواهد شد.

ورق‌های فولاد گالوانیزه را می‌توان به عنوان ترکیبی از روکشی فلزی متصل به زیرلایهٔ فولادی به کمک فاز بین‌فلزی که جنس شکننده‌ای دارد، دانست. ترک‌های ریزی در طول عملیات شکل‌دهی بین روکش روی و فاز بین‌فلزی ایجاد می‌شوند. در مجموع، ترک‌های درون‌رگه‌ای روکش خالص روی، به‌صورت موازی با هم پدیدار می‌شوند. مشاهدات دقیق نشان داده است که کریستال‌های روی، تغییر شکل ناهمسانگرد غالب را نشان می‌دهند.

۴ـ نتیجه

مشخص شد فولاد گالوانیزه کاربردهای گستردهٔ تأثیرگذاری در شرکت‌های گوناگون تولیدی دارد. ورق فولاد گالوانیزهٔ سقفی به دلیل انعطاف‌پذیری روش‌ها، سالیان متمادی است که با فرایند روکش‌دهی پیوستهٔ گرم غوطه‌ای تولید شده و همچنان بسیار رایج است. انتخاب ورق گالوانیزهٔ سقفی به دلیل استحکام و طول عمر آن مورد تأیید است. فولاد غیرگالوانیزه در مدت زمان کوتاهی زنگ می‌زند که مستقیم یا غیرمستقیم بر اقتصاد کشور تأثیر می‌گذارد.