



لایه نشانی کربن بر روی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی

زیوه، نرگس - حبیبی، مرتضی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده فیزیک و انرژی، گروه گداخت

چکیده

در این مقاله با استفاده از قرص گرافیت بر روی نوک آند دستگاه پلاسمای کانونی و گاز متان، لایه‌نشانی کربن بر روی نمونه‌های از جنس فولاد ۳۱۶ انجام شد. نمونه‌ها در معرض ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ شات و در زاویه‌ی صفر درجه نسبت به آند قرار گرفتند. در نتایج تجربی مشاهده شد که لایه‌نشانی در ۵ شات یکنواخت‌تر و همگن‌تر صورت گرفته است. نتایج SEM نشان می‌دهد با افزایش تعداد شات، ناهمگنی سطح افزایش یافته و ترک‌هایی در سطح لایه‌نشانی شده مشاهده می‌شود. برای نمونه‌ی لایه‌نشانی شده با ۵ شات، مقایسه نتایج XRD و استفاده از رابطه شرر، اندازه کریستالیت‌های کربن برابر ۲۸ نانومتر بدست آمد و حضور یک لایه میانی بین لایه زیرین و کربن خالص به اثبات رسید. هدف از این پژوهش، لایه‌نشانی یکنواخت کربن بر روی فولاد در ابعاد نانومتر و ایجاد یک لایه میانی می‌باشد.

کلیدواژه: لایه‌نشانی کربن، پلاسمای کانونی، فولاد ضدزنگ، قرص گرافیت، گاز متان.

۱- مقدمه

مهم‌ترین موادی که در دیواره‌ی داخلی دستگاه‌های گداخت بکار می‌روند، تنگستن و فولاد ضدزنگ هستند. تاکنون بررسی‌های زیادی بر روی مواد مختلف و فلزات گوناگون صورت گرفته است [1-2]. فولاد ضدزنگ بدلیل مزایایی همچون استحکام بالا و هزینه‌ی ساخت پایین، به‌عنوان یکی از مواد ساختاری دیواره‌ی راکتورهای گداخت و پلاسمای بکار می‌رود، ولی در دماهای کاری پلاسمای (۱-۳ keV) مقاومت به خوردگی و تحمل حرارتی پایینی دارد. کربن با داشتن مقاومت حرارتی و همچنین نقطه‌ی ذوب بسیار بالا، یکی از گزینه‌های مطرح برای محفظه راکتور می‌باشد. اما ساخت محفظه راکتور از جنس کربن خالص به علت هزینه ساخت بالا و استحکام مکانیکی پایین میسر نیست. یکی از راه‌های بهبود هر چه بیشتر خواص یک فلز پایه، پوشش‌دهی آن با یک ماده‌ی دیگر است. روش‌های گوناگونی برای لایه‌نشانی وجود دارند که از میان آن‌ها می‌توان به روش لایه‌نشانی شیمیایی بخار در دستگاه پلاسمای کانونی اشاره کرد [۳]. این دستگاه نسبت

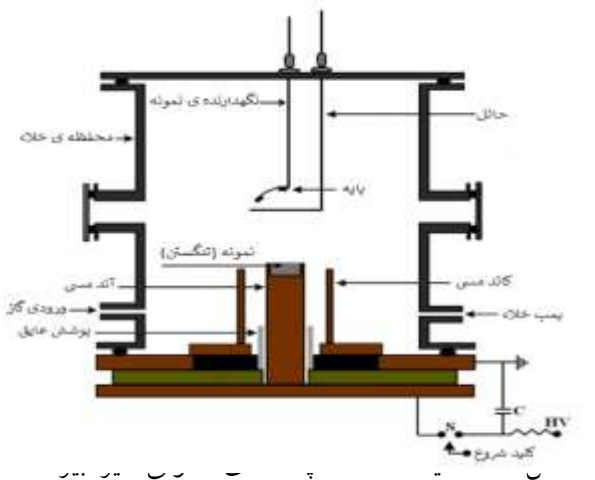


به سایر روش‌های متعارف لایه‌نشانی از مزیت‌هایی همچون فرآیند خشک، قیمت پایین، پراورژی بودن و زمان کوتاه واکنش برخوردار است. هرچند معایبی نظیر اختلاف در پارامترهای یون در شات‌های مختلف را نیز داراست. اطاعتی و همکارانش در سال ۲۰۱۱، فیلم نازکی از نیتريد تنگستن بر روی فولاد ضدزنگ لایه‌نشانی شده و موجب افزایش سختی سطح شده است [4]. گوپتا و سریواستاوا در سال ۲۰۰۴، لایه‌ای از کربن بر روی تیتانیوم ایجاد کردند [5]. فولاد ضدزنگ ۳۱۶ یکی از پرکاربردترین و رایج‌ترین نوع فولاد ضدزنگ است [6]. با توجه به پایین بودن مقاومت حرارتی فولاد ضد زنگ، برای استفاده در محفظه‌های راکتور مناسب نمی‌باشد. لایه‌نشانی کربن بر روی فولاد ضدزنگ گزینه مناسبی برای افزایش مقاومت حرارتی است. با لایه‌نشانی کربن روی فولاد ضدزنگ ترکیب جدیدی ایجاد می‌شود که می‌تواند به عنوان دیواره محفظه‌های راکتور گداخت و دستگاه‌های مولد پلاسما استفاده شود. در این مقاله، پوشش‌دهی کربن بر روی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر بررسی شده است. به عنوان نوآوری در این مطالعه از گاز متان و قرص گرافیتی به صورت هم زمان استفاده شده است.

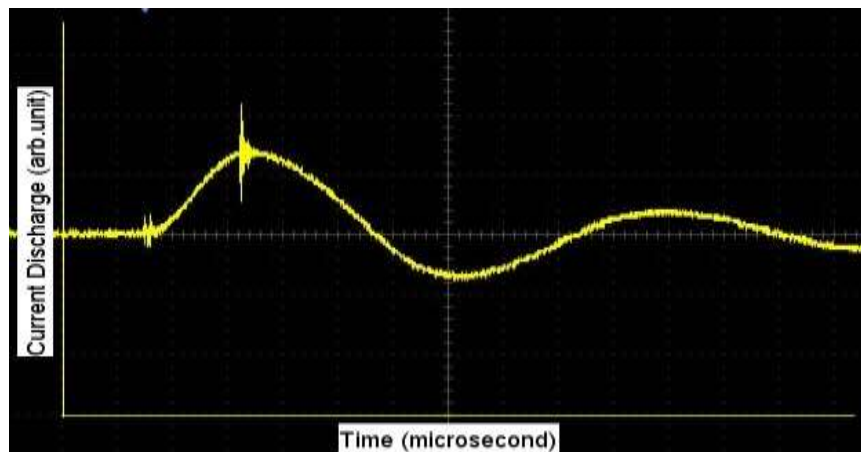
۲- دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر و چیدمان تجربی

در دستگاه پلاسمای کانونی $4/5 \text{ kJ}$ پلاسمای چگال ($10^{20} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) دردمای بالا ($1 \text{ keV} - 0/2$) با طول پالس کوتاه ($10 \text{ ns} - 100$) تولید می‌شود. شماتیک دستگاه پلاسمای کانونی امیرکبیر در تصویر (۲) دیده می‌شود. این دستگاه از نوع مدر بوده و توسط یک خازن (20 kV ، $10 \mu\text{F}$ ، 90 nH) تغذیه می‌شود. آزمایش در دمای اتاق صورت گرفت. همچنین جریان تخلیه با استفاده از پیچ‌روگوفسکی در حدود 170 kA به دست آمد. سیستم الکتروود شامل یک آند مسی به طول 160 mm و قطر 20 mm می‌باشد که توسط 12 میله‌ی مسی (با طول 150 mm و قطر 15 mm) احاطه شده‌اند. بین الکتروودها عایق شیشه‌ای پیرکس با قطر داخلی $20/5 \text{ mm}$ و ضخامت $2/5 \text{ mm}$ استفاده شده که 35 mm از طول آند را پوشش می‌دهد. قرص گرافیتی قرار گرفته بر روی سر آند به قطر 19 mm و ارتفاع 3 mm است. محفظه‌ی خلاء ابتدا توسط یک پمپ روتاری تخلیه شده‌است و سپس گاز متان با فشار $1/5 \text{ torr}$ تزریق می‌شود. پس از تشکیل و تخریب ستون پلاسمای چگال در اثر ناپایداری سوسیسی و رشد شدید اندوکتانس، میدان الکتریکی القائی یون‌ها را به سمت بالای محفظه شتاب می‌دهد. همچنین الکترون‌ها که در جهت مخالف شتاب می‌گیرند، با سطح نوک آند به شدت برخورد کرده

و سبب کندن سطح و انباشت آن به نمونه از قسمت بالایی الکترودها می‌شوند. در نتیجه، با توجه به اینکه در این مقاله از گاز متان استفاده شده و نوک آند نیز گرافیت قرار داده شده است، کربن هم در اثر پلاسمای گاز محفظه و هم در اثر پراکنش گرافیت در اثر برخورد الکترون‌ها و کندن آن‌ها بر روی نمونه از جنس فولاد ضدزنگ لایه‌نشانی خواهد شد. با ایجاد هر پالس پلاسما، یون‌های کربن، هم از قرص گرافیتی و هم از پلاسمای گاز متان به سطح فولاد برخورد کرده و تشکیل لایه‌ای از گرافیت بر روی فولاد می‌دهند. پس از انجام آزمایش، با استفاده از تصاویر SEM به بررسی و تحلیل خواص فولاد لایه‌نشانی شده توسط کربن پرداخته شده است.



شکل (۱) تصویر سر آند و پولک گرافیت



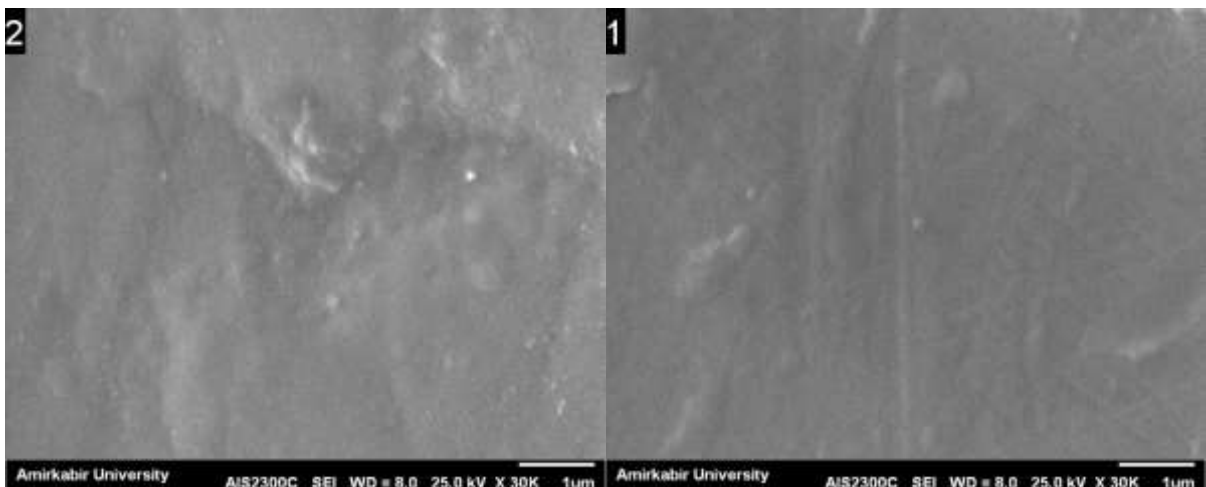
شکل (۳) سیگنال جریان تخلیه پیچه روگوفسکی گاز کاری متان فشار ۱/۵ میلی بار و ولتاژ ۱۲ ولت

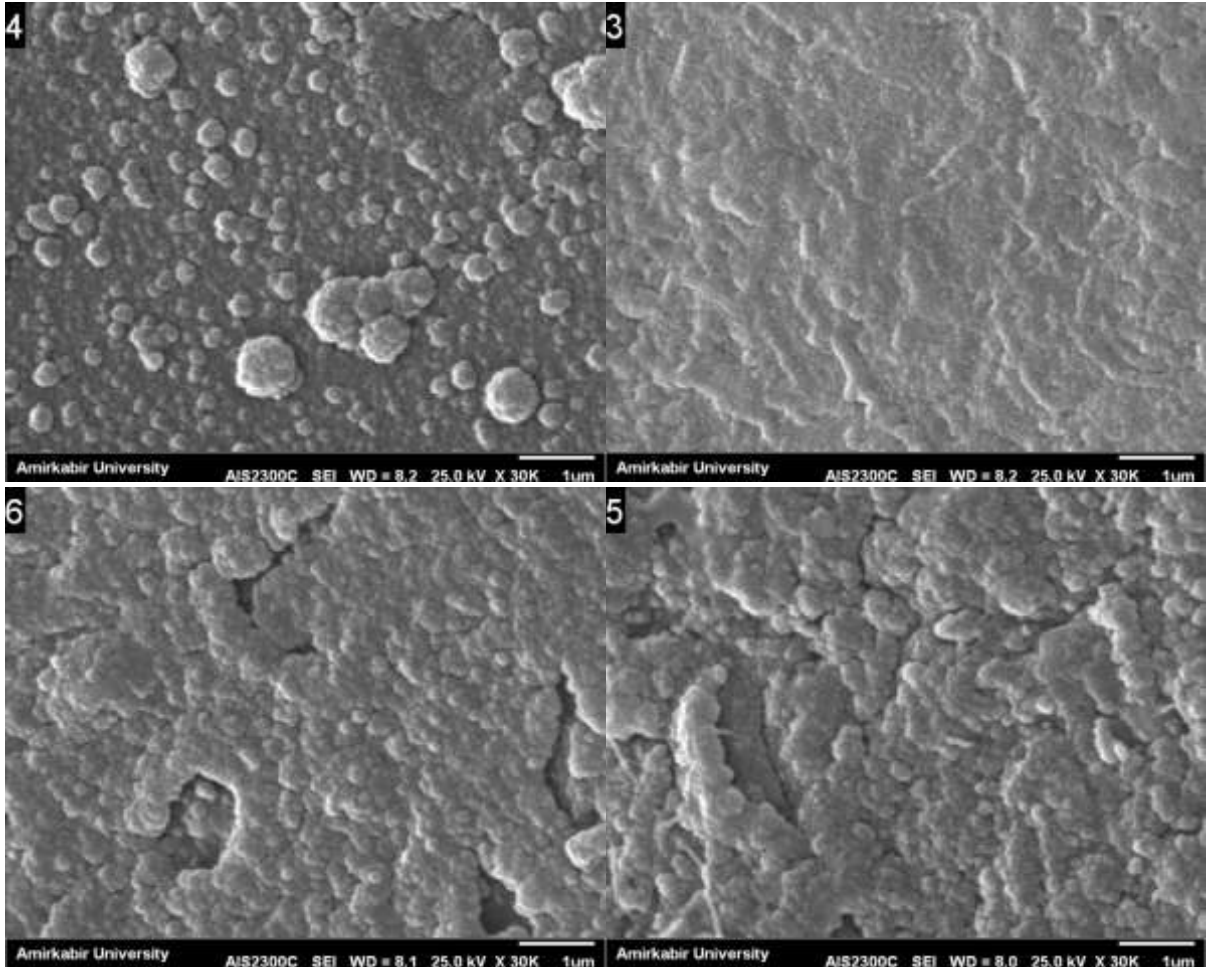


۳- نتایج تجربی و تحلیل

۱-۳ نتایج SEM

تصاویر SEM بدست آمده از نمونه اولیه و نمونه‌های قرار گرفته در معرض ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ شات در زاویه ۰ درجه، در شکل (۴) ارائه شده‌اند. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد شات‌های پلاسمای کانونی، ضخامت ساختار کربنی شکل گرفته بر روی زیرلایه فولادی افزایش یافته است. با توجه به شکل، با افزایش ضخامت پوشش حاصل از افزایش تعداد شات‌های پلاسمای کانونی، عدم یکنواختی سطح پوششی از یک نقطه‌ای به بعد افزایش می‌یابد و با توجه به ایجاد ترک‌های عمیق افقی، احتمال جدا شدن آن از زیر لایه و گسترش ترک افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴-۴ که متناسب با تعداد شات‌های ۱۰ است، می‌توان مشاهده کرد که لایه پوششی یکنواخت زیرینی وجود دارد که به عنوان هسته برای رشد بیشتر و نامتقارن لایه‌های بعدی عمل کرده است. لذا افزایش بیش از حد شات‌های پوشش‌دهی منجر به دور شدن از حالت بهینه می‌شود و با توجه به موارد بیان شده، پوشش‌دهی با ۵ شات که منجر به ایجاد پوششی همگن بر سطح فولاد شده و ترک‌های سطحی قابل مشاهده‌ای وجود ندارد نشان‌دهنده شرایط ایده‌آل و بهینه است.





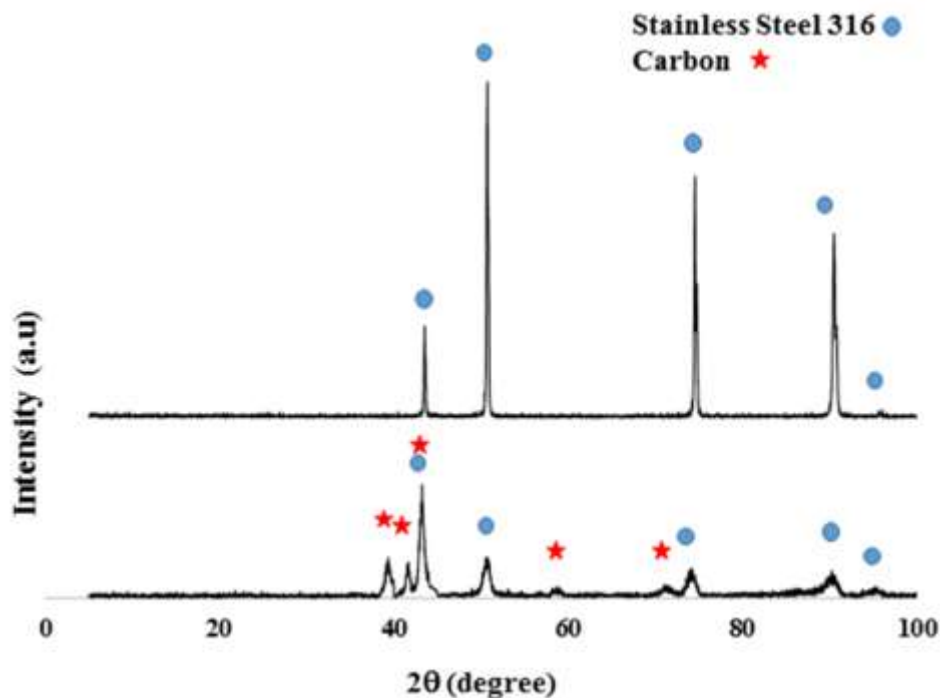
شکل (۴) تصاویر SEM در زاویه‌ی صفر درجه (۱ شاهد (۲) ۱ شات (۳) ۵ شات (۴) ۱۰ شات (۵) ۱۵ شات (۶) ۲۰ شات.

۲-۳ نتایج XRD

نتایج XRD نمونه فولاد ضدزنگ ۳۱۶ برای حالت بدون پوشش و با پوشش در شکل (۵) آورده شده است. برای تحلیل از نرم‌افزار Expert High Score Plus استفاده شده است. با توجه به رابطه شرر ($D = \frac{0.93\lambda}{(FWHM)\cos\theta}$) و قرار دادن پهنای شدیدترین پیک در نصف شدت بیشینه (FWHM) اندازه کریستالیت‌های کربن ۲۸ نانومتر بدست آمد. با مقایسه نتایج XRD حاصل از نمونه‌های فولاد خالص و نمونه بهینه حاصل از ۵ شات که با گرافیت پوشش‌دهی شده است، می‌توان مشاهده کرد که یک تغییر قابل ملاحظه‌ای در ساختار بلورین و نظم لایه‌های فولاد در نزدیکی سطح مشترک رخ



داده است. دلیل این تغییرات می‌تواند حضور یک لایه میانی حاصل از واکنش فولاد و کربن و تشکیل یک لایه میانی به عنوان فاز سوم باشد، که برای افزایش استحکام اتصال دو لایه اصلی و کاهش احتمال جدایش سطحی لایه پوششی از سطح زیر لایه ضروری و ایده‌آل است. پیک‌های پراش 2θ اصلی فولاد عبارتند از: ۴۳، ۵۱، ۷۴، و ۹۰ درجه. یک کاهش شدید در شدت پیک‌های اصلی فولاد در زوایای ۵۱، ۷۴، و ۹۰ رخ داده است و پیک پراشی موجود در زاویه ۴۳ درجه از حالت تیزی خارج شده و دو پیک جدید با شدت قابل توجه در سمت چپ این پیک ظاهر شده است که نشان‌دهنده نظم ساختاری تغییر یافته سلول واحد، و مورفولوژی ساختارهای بلورین در لایه میانی و تشکیل لایه‌های کربنی بر سطح فولاد است. علت کاهش شدید شدت پیک‌های اصلی فولاد نیز مربوط به ذات تست XRD است که عمق نفوذ پائینی دارد و لایه‌های کربنی تشکیل شده مانع از تشخیص این لایه زیرین می‌شود.



شکل (۵) الگوهای XRD بدست آمده از نمونه شاهد و نمونه ۵ شات.



نتیجه

گیری:

با توجه به نتایج SEM و XRD، پوشش ۵ شات کربن بر روی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ بهینه‌ترین حالت به دست آمده است. با افزایش بیشتر تعداد شات‌ها، از همگنی لایه نشانده شده کاسته شده و ترک‌های عمیق افقی در لایه نشانده شده ایجاد می‌شود. لایه‌نشانی در ۵ شات، که با توجه به SEM بهترین حالت لایه‌نشانی بوده، اندازه کریستالیت‌های کربن با توجه به نتایج XRD، ۲۸ نانومتر به دست آمد. با توجه به تغییرات مشاهده شده در طیف XRD، تشکیل لایه کربنی بر سطح زیرلایه فولادی و حضور یک لایه میانی واسط بین این دو لایه به عنوان یک لایه تقویت کننده استحکام اتصال اثبات می‌شود. فولاد پوشش داده شده با لایه‌ی کربنی به علت داشتن خواص مفید کربن و فولاد، می‌تواند به عنوان یک ماده مناسب برای ساخت محفظه‌های مولد پلاسما و دیواره راکتورهای گداخت که در واکنش و برخورد مستقیم با پلاسما قرار دارند، استفاده شوند. در واقع کربن لایه‌نشانی شده روی فولاد به علت مقاومت حرارتی و نقطه ذوب بالا، می‌تواند در دیواره داخلی راکتورهای گداخت مورد استفاده قرار گیرد. با لایه‌نشانی انجام شده در واقع نقاط ضعف فولاد با کربن برطرف می‌شود.

منابع

- [1] Hino, T., et al. "Silicon Carbide as Plasma Facing or Blanket Material." *Advanced SiC/SiC Ceramic Composites: Developments and Applications in Energy Systems* 144 (2006): 353-361.
- [2] Miyahara, A., and T. Tanabe. "Graphite as plasma facing material." *Journal of Nuclear Materials* 155 (1988): 49-57.
- [3] Abegunde, Olayinka Oluwatosin, et al. "Overview of thin film deposition techniques." (2019).
- [4] Etaati, G. R., et al. "Deposition of tungsten nitride on stainless steel substrates using plasma focus device." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 269.10 (2011): 1058-1062
- [5] Gupta, Ruby, and M. P. Srivastava. "Carbon ion implantation on titanium for TiC formation using a dense plasma focus device." *Plasma Sources Science and Technology* 13.3 (2004): 371.



بیست و ششمین کنفرانس هم‌تای ایران

۸ و ۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



- [6] Lippold, John C., and Damian J. Kotecki. "Welding metallurgy and weldability of stainless steels." *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, by John C. Lippold, Damian J. Kotecki, pp. 376. ISBN 0-471-47379-0. Wiley-VCH, March 2005. (2005): 376.