

# کنترل تنشهای پس ماند با عملیات حرارتی در فولاد بلبرینگ 52100<sup>۱</sup>

## ترجمه و تدوین: امور مهندسی و تحقیق و توسعه / شرکت بین المللی تاوریز بلبرینگ

**چکیده:** حتی اگر دمای آستنیت کردن کمتر از آن حد و حدودی باشد که برای حل کردن کاربیدهای اولیه مورد نیاز است با این همه در سطح بیرونی فولاد 52100 (با ۱٪ کربن، ۱.۵٪ کروم) که در محیط بسته کربن دهی، آستنیت و متعاقباً تحت عملیات کوئنچ و برگشت دادن واقع شده باشد، تنشهای پس ماند فشاری ایجاد می شود. لایه سطحی کربوریزه شده، محتوی حجم بزرگتری از کاربیدهای اولیه و آستنیت باقیمانده زیادی و با اندکی سختی بیشتر نسبت به بخش داخلی است. آزمایشات خستگی بر روی سطوح چرخشی نشان داده است که عملیات کربن دهی می تواند بمیزان پنجاه درصد عمر خستگی فولاد 52100 را افزایش و توسعه دهد.

فولادهای پرکربن نظیر AISI 52100 (محتوی ۱٪ کربن، ۱.۵٪ کروم) با سختکاری حجمی و نیز طیفی از فولادهای کم کربن با سختکاری سطحی، در یاتاقان های ضد اصطکاکی مورد استفاده واقع می شوند. از آنجائیکه بین این دو گروه از فولادها و طبقه بندی آنها از نظر ریزساختاری، تفاوت های ماهوی وجود دارد بر این اساس هم می توان گفت که کیفیت این تفاوت ها بترتیبی است که کارکردهای آنها را متاثر و تحت تاثیر خود قرار میدهند از همین منظر باید اذعان داشت که انتخاب هر کدام از انواع فولادهای مورد بحث (با سختکاری حجمی و یا سختکاری سطحی) بمنظور استفاده های مد نظر، بطور مشخص و تحت تاثیر بلافصل داده ها و ملاحظات اقتصادی می باشد.

دو تفاوت عمده شاخص اشاره شده در استفاده از این فولادها عبارتند از:

(۱) فولاد های پر کربن نظیر 52100 عمدتاً تمیزتر (محتوی اکسیدها و سیلیکات های کمتر) از فولادهای کم کربن نظیر 8620, 4118, 4620 و غیره میباشند. دلیل اصلی آن این است که تمام این قبیل نوع از فولاد ها که برای استفاده در کاربردهای یاتاقانی منظور میگردند بعد از ذوب، در خلاء گاز زدائی میگردند و بر حسب این توصیف، محصول نهایی اکسیژن زدائی حاصل شده از درجه خلوصیت و کربن محتوی بالاتر برخوردار است. اثر مخرب اکسیدها و سیلیکات ها در کارکرد یاتاقانی در گزارشات مختلف و متناوبی بطور مکرر مورد بررسی و نتایج حاصل بتصویر کشیده شده اند؛

(۲) قطعاتی که سختی سطحی شده اند، تنش های پسماند فشاری آنها در سطح گسترش می یابد. تنش های گفته شده در سه محور متعامد و اغلب تا عمقی از سطح (که بصورت تابعی از اندازه و شکل قطعه و عمق مد نظر میباشند) در وضعیت فشاری و متعادل با تنش های پسماند باقی می ماند. بطور مشخص، تنش های پس ماند فشاری در سطح قطعه، موجبات خستگی خمشی را فراهم می آورند و احتمالاً بهمان میزان هم برای مقاومت در خستگی سطوح چرخشی موثر هستند.

بدلیل مشکلات تجربی، تائید این پدیده فاقد شهود واضح و روشن قابل اتکاء است؛ بنظر می آید که میتوان بصورت منطقی انتظار داشت که تنش های پسماند فشاری می توانند در مقابله با موارد مندرج در ذیل موثر بوده باشند:

(۱) ترک خوردگی زیر سطحی در آخال های سخت وقتی که در آخال ها تنش های کششی موضعی پدیدار شده از

<sup>1</sup> Controlling Residual Stresses In 52100 Bearing Steel By Heat Treatment

By : C. A. STICKELS & A. M. JANOTIK

سر منشاء بارگذاری های فشاری نشأت گرفته باشند ؛

۲) ترک خوردگی سطحی ناشی از تنش کششی سطحی بدلیل کمانش الاستیکی در سطح تماس بارگذاری شده که با اعمال مقدار اندکی از نیروی لغزشی فزونی گرفته باشند.

باید توجه داشت که قطعات پرکربن با سختکاری حجمی، بطور کامل عاری از تنش های پسماند نمی باشند و بر همین اساس هم می توان اذعان داشت که در تمام قطعات ساخته شده از قطعات پرکربن کم آلیاژی، سطح اندکی از تنش های پس مانده از سر منشأ تفاوت ساختار های شمش اولیه مورد استفاده مانده باشد. مضافاً بر این احتمال آن است که تنش های پسماند از حرارت، تنش های پسماند از دگرشکلی دائمی با سر منشأ شیب حرارتی منتج از عملیات کووئنچینگ حاصل شده باشد. در قطعات کوچک کووئنچ شده در روغن نظیر اجزاء یاتاقانی خودروئی، شیب حرارتی احتمالاً کمتر خواهد بود و بر این اساس تنش های پسماند حاصل شده در سطح بمیزان نازل خواهد بود. در قطعات بزرگتر هم ممکن است بدلیل امتزاج تنش های حرارتی در فاز تبدیلی آستنیت-مارتنزیت تنش های پس ماند را در سطح متعادل تعدیل بنماید.

تنش های پسماند با بزرگی بیشتر می توانند در فولاد های پرکربن کم آلیاژی کووئنچ و برگشت داده شده در اثر عملیات سنگ زنی و سطح کربن زدائی شده پدید آیند. عملیات سنگزنی یک لایه کم عمق در حد  $100\ \mu$  را در ضخامت قطعه با تنش های پسماند فشاری بمیزان نصف نقطه تسلیم بوجود می آورد. اگر بدلیل حرارت تولید شده در جریان عملیات سنگ زنی، موضع سطح بیرونی تحت عملیات برگشت واقع گیرد از میزان تنش های فشاری سطحی کاسته میگردد و تنش پسماند کششی مورد اشاره درست به بخش تحتانی لایه سطح که تحت تنش فشاری است منتقل میگردد. کربن زدائی های شدید سطحی احتمالاً منتج به تنش های پسماند کششی بالاتر در سطح و موجبات گرایش به ترک خوردگی در اثر کووئنچ را فراهم خواهد ساخت.

وقتی که میزان حجم کربن زدائی در سطح اندک باشد تنش های کششی سطحی کم عمقتر متناسب با مقدار اندکی از میزان کربن زدوده شده تولید می شوند با این توصیف که در غالب عملیات های حرارتی تجارتي در حفاصل زمانی مورد نیاز برای برداشتن از کوره آستنیت و انتقال به محیط کووئنچ صورت پذیرد این امکان رخ میدهد. با عنایت به اینکه اجزای بیرینگ ها بعد از عملیات حرارتی غالباً بنحو مناسب سنگزنی میگرددند اگر نه همگی بلکه باید غالب آثار زیانبار سطوح کربن زدائی شده مطروحه حذف و از بین برده شده و یا بحداقل رسانیده می شوند.

در سال ۱۹۶۴ کویشتاین روشی را برای تولید تنش های پسماند فشاری در سطح قطعات فولادی 52100 با بهره گیری از عمل آستنیت کردن در محیط اشباع شده از آمونیاک معرفی کرد. در مقاله حاضر نشان داده خواهد شد که در فولادهای 52100 که امکان برقراری و ایجاد تنش های پسماند فشاری با مبادرت به عمل آستنیت کردن در کوره اشباع شده پرکربن وجود دارد.

در روشهای تجاری معمول فولاد 52100 بازیخت کروی شده، در دمای  $825\sim 850\ ^\circ\text{C}$  و در طی مدت زمان  $30\sim 60\ \text{min}$  صورت واقعیت بخود میگیرد. حل کردن 40% تا 60% کاربید های کروی (بستگی به درجه حرارت و کربن محتوی مشخص دارد) برای حصول به یک توزیع یکنواخت بین کاربید و آستنیت کفایت می کند. زمان مورد نیاز برای حصول

موثر توزیع متعادل کربن مطمئنا در طول بیشتر از چهار ساعت بوقوع می پیوندد. اگر کربن دهی به سطح فولاد از طریق اتمسفر کوره صورت پذیرد عمل آستنیتته شدن در نزدیکی های سطح بیرونی بدلیل اشباع شدگی محیط از کربن با سرعت بالاتری صورت وقوع خواهد یافت چرا که سرعت اشباع با توجه به سینیتیک حلالیت کربن زیاده طول نخواهد کشید. مضافا بر اینکه چون جریان حلالیت کربن در آستنیت تداوم می یابد شکل گیری کاربید در آستنیت آنرا از کروم تهی می سازد و میزان حلالیت کربن را فزونی می بخشد. هر دوی این عوامل به ایجاد یک لایه سطحی منجر میگردد بترتیبی که در آنجا :

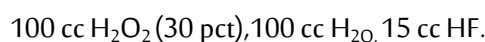
کربن زیادی در آستنیت ، ۲) کروم کمتر در آستنیت و ۳) حجم بیشتری از کاربید های اولیه نسبت به داخل قطعه. میزان شیب حلالیت کربن محتوی بعد از عملیات کوؤنچ موجبات تنش های پسماند را فراهم می سازد چرا که بزرگی حجم مارتنزیت نسبت به آستنیت تغییر می کند و این امر بدلیل افزایش میزان حلالیت کربن رخ می دهد.

سایر عوامل مشتمل بر تفاوت های سطح و مغز قطعه نسبت به میزان آستنیت باقی مانده محتوی و نیز دگر شکلی پلاستیکی ناشی از تغییرات فازی و یا شیب های حرارتی جریان کوؤنچینگ هم می توانند موجبات تنش های پسماند را فراهم آورند که بر روی تنش های ایجاد شده با تغییرات حجمی فوق الذکر اضافه خواهند شد.

### جریان مبادرت به آزمایش

تسمه های کوچکی از فولاد بازپخت - کروی شده از میله های نورد سرد شده با قطر 1.27 cm بصورت شمش های مسطح با ضخامت 0.5 cm آماده سازی شدند متعاقب مبادرت به بازپخت، سطوح تخت مورد سنگ زنی قرار گرفتند. برای نمونه های ۱ الی ۵ (جدول شماره ۱) سایز نمونه ها 7.62x1.25x0.23 cm و برای نمونه های ۶ و ۷ سایز نمونه ها 8x2x0.18 cm تعیین گردیدند. عملیات حرارتی آستنیتته کردن در یک کوره کربن دهی با مارک لیندبرگ (Linderberg) با مخزن کوؤنچ یک پارچه صورت گرفت. درجه حرارت روغن کوؤنچ بصورت تثبیت شده روی 55 °C حفظ و از گاز ایندوترمیک غنی شده از گاز متان برای کربن دهی استفاده گردید.

توزیع تنش پسماند با بهره گیری از معرف شیمیایی صرفا از یک طرف تسمه ها صورت پذیرفت، اندازه گیری تغییر شکل تسمه بمثابه تابعی از مقدار میزان فلز باربرداری شده منظور گردید. ترکیب شیمیایی محلول معرف بکار گرفته شده :



میزان انحراف با بهره گیری از ساعت اندازه گیری اندیکاتور با دقت 0.01 mm و یک صفحه صافی کارگاهی بانجام رسید. روش استفاده شده برای محاسبه تنش های پسماند از این اندازه گیری ها در پیوست توصیف شده است. آستنیت باقیمانده با بهره گیری از روش اشعه X یعنی بهمان طریقی که در کارهای متاخر بکار گرفته شده صورت پذیرفته است.

اندازه گیری میزان کربن دهی اتمسفر کوره با توزین وزن فویل از فولاد 1008 بضامت 0.064 mm که بمدت سی دقیقه در داخل کوره و در معرض دید قرار داده شده بود و متعاقبا بصورت سریع خنک گردید صورت گرفت. اختلاط گاز برای هر عملیات آزمایشی مقدماتا میزان گردید بترتیبی که کربن محتوی در هر یک فویل ها سرانجام در حد وزنی 0.9 wt pct تثبیت گردید. در غالب آزمایشات ، فویل ها همراه نمونه ها باقی گذاشته شدند. از آنجائیکه موقع شارژ اندکی هوا همراه با نمونه ها بدخل کوره نفوذ پیدا می کرد عملیات کربن دهی با سرعت کمتری صورت می پذیرفت. بعنوان مثال فویل همراه نمونه

آزمایشی شماره سه که بمدت سی دقیقه کربن دهی گردید فقط محتوی 0.72 wt oct کربن بود. زمان های آستنیتیه کردن که در سایر موارد طولانی تر بود فویل های همراه نمونه ها دارای کربن محتوی بیشتر از حد میزان نیاز اشباع برای آستنیت کردن بود.

### نتایج اندازه گیری تنش پسماند

در هر دو آزمایش نخست ، جدول شماره ۱ ، نمونه های پوشش داده شده و پوشش داده نشده با آب مس همراه هم دیگر تحت عملیات قرار گرفتند. تنش های پسماند فشاری در نمونه های پوشش داده نشده ، در سطح بیرونی بمنصه ظهور رسیدند. در سایر نمونه ها بدلیل پوشش مسی از انتقال کربن از اتمسفر اطراف جلوگیری بعمل آمد و این عمل موجب گردید که تنشهای پسماند کششی تمایل به توزیع در قسمت بیرونی را پیدا کنند. تصاویر ۱ و ۲ را ملاحظه نمائید.

در سه آزمایش ، دو نمونه بترتیب در مدت سی دقیقه ، یکساعت و دو ساعت در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  تحت عملیات آستنیتیه شدن قرار گرفتند. نمونه ها بعد از کوئنچ در روغن ، بعد تقلیل میزان آستنیت باقیمانده در نیتروژن مایع کوئنچ گردیدند و بعد برگشت داده شدند. در کد های چهار و پنج عملیات کوئنچ در نیتروژن مایع در یکی از نمونه ها حذف شد.

Table 1. Summary of Experimental Results

Code	Heat Treatment	$A_5$	Fit Constants <sup>§</sup>			Goodness of fit $V \times 10^6$
			$A_3$	$A_1$		
1A*	850°C/1 h; OQ	-11.965	-11.257	-0.23812	19	
1B	same	-2.528	-1.114	0.28240	12	
2A*	875°C/1 h; OQ; LNQ; 100°C/1.5 h	1.355	1.958	0.03841	3.8	
2B	same	-5.227	-3.954	0.14728	22	
3A	850°C/30 min; OQ; LNQ; 150°C/1.5 h	-13.034	-12.225	-0.21400	6.1	
3B	same	2.607	2.273	-0.01397	13	
4A	850°C/1 h; OQ; 150°C/1.5 h	-3.436	-2.183	0.16576	9.7	
4B	850°C/1 h; OQ; LNQ; 150°C/1.5 h	0.309	1.280	0.22747	5.2	
5A	850°C/2 h; OQ; 150°C/1.5 h	-4.032	-3.383	0.13025	0.73	
5B	850°C/2 h; OQ; LNQ; 150°C/1.5 h	-3.833	-3.252	0.13071	3.9	
6A	800°C/1 h; OQ	11.440	16.216	1.14900	55	
6B	800°C/2 h; OQ	-6.520	-2.417	0.89377	15	
7A*	980°C/35 min; AC; 815°C/55 min; OQ; 150°C/1 h	-0.533	-0.355	-0.03855	4.3	
7B†	same	-3.780	-1.899	0.30846	6.3	
7C	815°C/55 min; OQ; 150°C/1 h	5.100	7.232	0.68515	8.2	

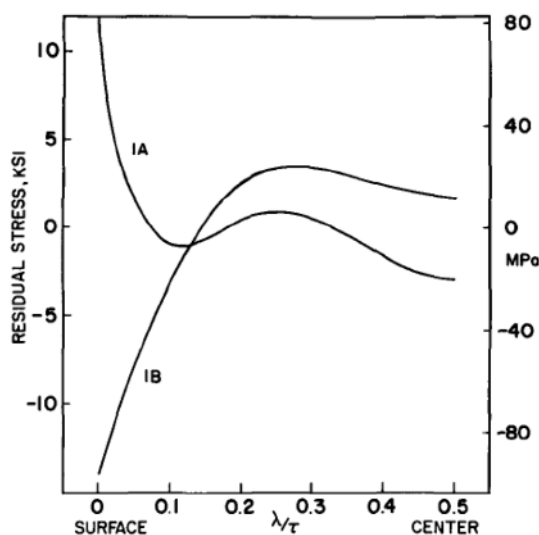
\*Copper plated specimens.

†Copper plate removed after 980°C treatment.

OQ: Quenched in 55°C oil.

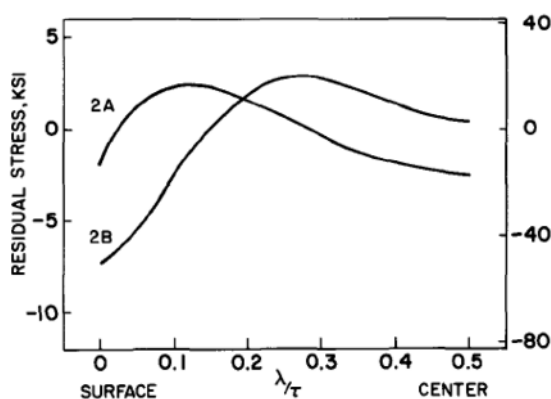
LNQ: Quenched in liquid nitrogen.

<sup>§</sup> $A_1$ ,  $A_3$ , and  $A_5$  describe the residual stress distribution and are defined, along with  $V$ , in the Appendix. The surface residual stress is proportional to  $A_1$ .



تصویر شماره یک - تنش پسماند بمثابه تابعی از فاصله از سطح نرمالیزه شده بیرونی نمونه های 1A و 1B.

ضخامت نمونه ها 0.25 cm



تصویر شماره دو - تنش پسماند بمثابه تابعی از فاصله از سطح نرمالیزه شده بیرونی نمونه های 2A و 2B.

ضخامت نمونه ها 0.23 cm

نتایج نمونه های 3B, 4B, 5B در تصویر شماره سه نشان داده شده اند بترتیبی که تمام نمونه های حاضر قبل از عملیات برگشت در نیتروژن مایع کووئچ گردیده اند. نمونه 3B تقریباً عاری از تنش پسماند بوده است؛ نمونه قرینه 3A از تنش کششی سطحی بالائی برخوردار می باشد. چنانکه در بالا نیز گفته شد احتمال دارد که مقدار اندکی کربن از اتمسفر کوره در آزمایش شماره ۳ به نمونه ها انتقال یافته باشد.

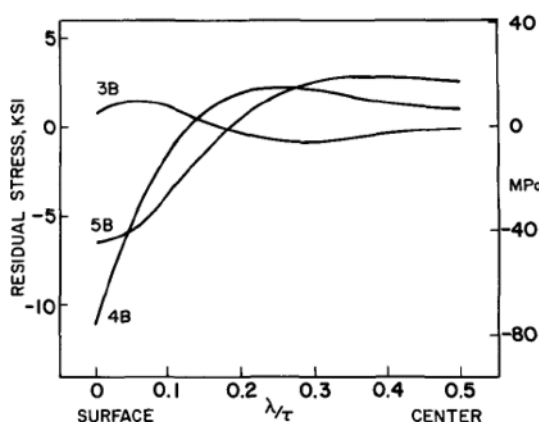
نمونه هایی که بمدت طولانی در کوره نگهداری شدند تنش های پسماند فشاری در سطح آنها گسترش یافت. توزیع میزان تنش، بوضوح با میزان عمق نفوذ کربن همخوانی و مرتبط است. با ملاحظه  $D = 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  در دمای  $850^\circ\text{C}$  آنگاه برای مدت یکساعت  $(Dt)^{1/2} = 0.2 \text{ mm}$  و برای دوساعت مقدار آن  $0.27 \text{ mm}$  خواهد بود و اگر علامت تنش پسماند هم تغییر یابد همین نتیجه حاصل خواهد شد. علاوه بر این نسبت عمقی که علائم تغییرات تنش در نمونه 5B نسبت به همان عمق در نمونه 4B بدست می دهد برابر با 1.48 است که تقریباً معادل با  $\sqrt{2}$  می شود یعنی برابر با همان مقدار عمقی که انتظار می رود با میزان نفوذ کربن از اتمسفر، تنش فشاری در آن عمق ایجاد شده باشد.

برای نمونه 5B توزیع کاربید های اولیه در  $850^{\circ}\text{C}$  و بعد از دو ساعت در تصویر شماره چهار نشان داده شده است. اکسید های مرز دانه ای در سطح نمونه قابل رویت هستند؛ این امر اتفاق مشترکی است که وقتی عملیات حرارتی بر روی فولاد کروم دار بلبرینگ در اتمسفر گاز ایندوترمیک انجام میگیرد رخ می دهد. در بخش تحتانی اکسید، یک منطقه خالی شده از کاربید وجود دارد که شاید منتج از خروج کروم بطرف اکسیدها باشد. با این حساب کربن محتوی آستنیت در این منطقه بایستی فزونی زیادی داشته باشد. در ثانی، منطقه ای گسترده محتوی حجم بالائی از کاربیدهای اولیه از اندازه های  $0.008\text{ mm}$  تا  $0.07\text{ mm}$  الی تا  $0.10\text{ mm}$  در بخش تحتانی سطح وجود دارد. نمونه هایی که تصاویر ریز ساختاری آنها در تصویر ۴ بنمایش گزارده شده است مربوط به نمونه هایی است که در دمای پائین تر یا زمان های کمتر عمل آوری شده اند و بنظر می رسد که از انواعی باشند که در آنها گرایش برای تشکیل فیلم های کاربیدی در مرز دانه های آستنیتی در لایه سطحی کربن دهی شده وجود ندارد؛ ترجیحا کاربیدهای کروی موجود بسادگی رشد می کنند.

یک میکروسختی سنجی افقی (Knoop indenter)، با بارگذاری (1kg) در سطح نمونه 5B، متوسط سختی در  $0.12\text{ mm}$  از بخش بیرونی را  $947\text{ Khn}$  (معادل  $68\sim 69\text{ Rc}$ ) را نشان میدهد. با افزایش عمق فاصله اندازه گیری از سطح بیرونی، میزان سختی تقلیل می یابد بترتیبی که متوسط سختی در عمق  $0.20\text{ mm}$  الی  $0.25\text{ mm}$  به حد  $880\text{ Khn}$  (معادل  $66\sim 67\text{ Rc}$ ) بدست می آید.

نمونه های 4A و 5A که فقط در روغن کوئنچ شده بودند از تنش های فشاری سطحی کمتر (حدود  $2\sim 5\text{ MPa}$  کمتر) و نیز از تنش های کششی پائینتر نسبت به نمونه های 4A و 5A که در نیتروژن مایع کوئنچ شده بودند برخوردار بودند. اگر چنین تصور شود که مقدار کربن محلول محتوی زیادتر در سطح قطعه موجب آستنیت باقیمانده زیادی در سطح قطعه است پس این نتیجه حاصل میگردد که عمل کوئنچ در نیتروژن مایع باعث و بانی افزایش تنش پسماند فشاری در سطح قطعه احتساب میگردد. این آن چیزی است که مشاهده گردید.

عمل آستنیتته کردن در درجه حرارت پائین، موجبات تنش های پسماند بیشتر را فراهم می سازد. شکل شماره ۵ توزیع تنش حاصل را بعد از انجام عملیات حرارتی در یک و دو ساعت و تحت درجه حرارت  $800^{\circ}\text{C}$  را برای نمونه آزمایشی شماره ۶ نشان میدهد. معلوم میگردد که تنش فشاری حاصل سطحی در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  در حدود دو برابر مقدار بدست آمده در درجه حرارت  $850^{\circ}\text{C}$  میباشد. تصاویر شماره ۱ و ۵ مقایسه کنید. عمق لایه فشاری کمتر است  $0.18\text{ mm}$  بعد از یک ساعت و  $0.26$  بعد از دو ساعت.

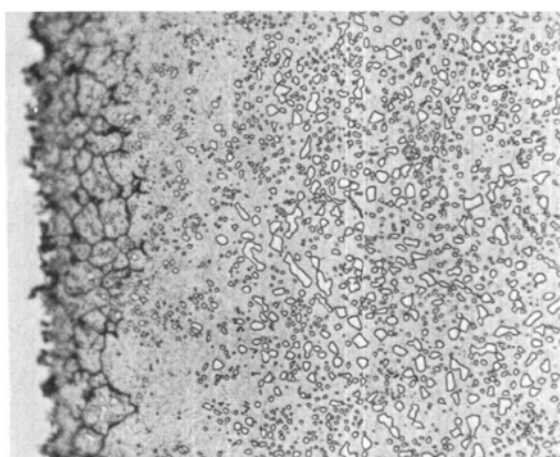


تصویر شماره ۳ - تنش پس ماند بصورت تابعی از فاصله کناره سطح نمونه های 3B, 4B, 5B. نمونه هایی با ضخامت  $0.23\text{ cm}$

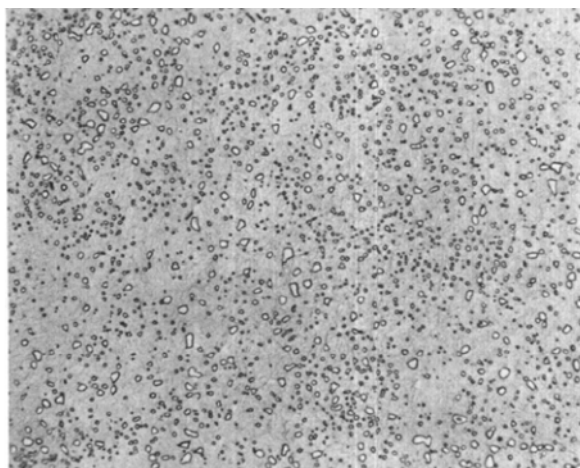


تجربه آخری برای ارزیابی اهمیت نسبی دو عامل مشخص که امکان میدهد تا گرادیان کربن محلول را تعیین وضعیت کرد طراحی شده بود. نمونه های 7A و 7B بمنظور حل تقریباً تمام کاربیدهای اولیه تا  $980^{\circ}\text{C}$  گرم شدند سپس در یک کوره سرپوشیده برای تشکیل ساختار پرلیت اولیه سرد شدند. در طول انجام این عملیات نمونه ها برای محافظت در مقابل تبادلات کربن در داخل محیط کوره با فویل مسی پوشش داده شدند. کارهای قبلی نشان داده است که اشباع کربن در آستنیت وقتی که کاربید ریزتر باشد همانند پرلیت سریعتر اتفاق می افتد. بعد از باز کردن فویل مسی از نمونه 7A (کاربید اولیه ریز) ، 7B (کاربید اولیه ریز) و 7C (کاربید اولیه کروی) نمونه ها در درجه حرارت  $815^{\circ}\text{C}$  و در کوره محبوس کربوریزه ، متعاقباً کوئنچ و سپس برگشت داده شدند. نتایج مکسوبه در زمینه توزیع تنش پس ماند در تصویر شماره ۶ بنمایش گذاشته شده است.

چون نمونه 7B ، یک تنش فشاری را در لایه سطحی فراهم می آورد مقدار کربن محلول محتوی سطح آن (تمایل به ایجاد تعادل با محیط کوره) باید از مقدار کربن داخلی آن بیشتر



(a)

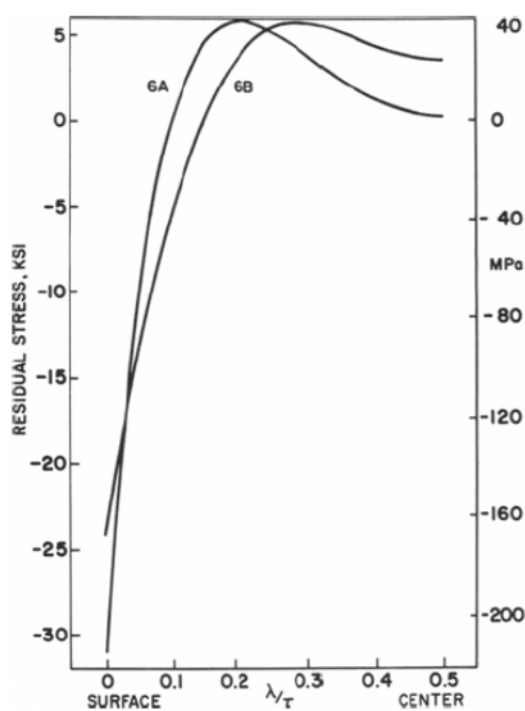


تصویر شماره ۴ - ریز ساختار نمونه 5B ، اچ شده در پیکرال با بزرگنمایی 740 .

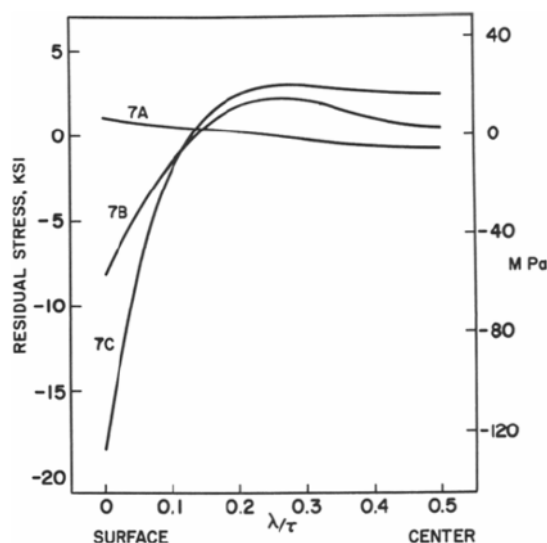
برای دریافت تصویر روشن عدسی شیئی روی سطح بصورت عمودی در 5.5 تنظیم شده است. (a) اکسیدها در مرز دانه ها با عمقی در حدود  $0.004\text{ mm}$  ، در ادامه منطقه کاربیدهای تخلیه شده در حدود همان ضخامت و سپس کاربیدهای اولیه به میزان تقریبی  $0.18$  حجمی ، (b) قسمت داخلی نمونه ، میزان تقریبی کاربیدهای اولیه در حد  $0.08$  حجمی ، تقزیا نصف مانده به فاصلی کناری باشد که این موضوع با تعادل در کاربید اولیه مشخص میگردد. بزرگی تنش فشاری سطح در نمونه 7C

در حدود دو برابر نمونه 7B می باشد که این امر نشانگر این مطلب می باشد که حلالیت کربن در کاربید های اولیه در سطوح پهن تر، با شدتی به سمت مرکز و بصورت آرامی بانجام میرسد . چنین نتیجه ای دال بر آن است که اختلاف کربن محلول سطح و مرکز قطعه یک عامل حساس نسبت به زمان در هر دمای آستینته کردن است.

آستینیت باقیمانده بوسیله اشعه X در سطح کربن دهی نمونه های 7B و 7C اندازه گیری شد و همچنین این اندازه گیری در خطوط مرکزی آنها بعد از رقیق کردن برای اندازه گیری تنش پسماند انجام شد.



تصویر شماره ۵- تنش پسماند بصورت تابعی از فاصله از سطح نمونه های 6A & 6B. ضخامت نمونه ها 0.18 cm



تصویر شماره ۶- تنش پسماند بصورت تابعی از فاصله از سطح نمونه های 7A, 7B & 7C. ضخامت نمونه ها 0.18 cm



در هر دو نمونه ، متوسط آستنیت باقی مانده اندازه گیری شده حدود ۲۴ تا ۲۶ درصد بود. در خط مرکزی نمونه 7B متوسط آستنیت باقیمانده ۱۵٪ و در خط مرکزی نمونه 7C میزان آن ۹٪ بود. این اختلافات در آستنیت باقیمانده مبین ناشی شدن آن از اختلاف در میزان کربن محلول محتوی است. اختلافات ، همچنین تائید کننده مطالعات و مشاهداتی است که نمونه های کربن دهی کووئنچ شده در نیتروژن مایع ، برای کاستن از آستنیت باقیمانده تمایل به افزایش تنش های پس ماند دارند.

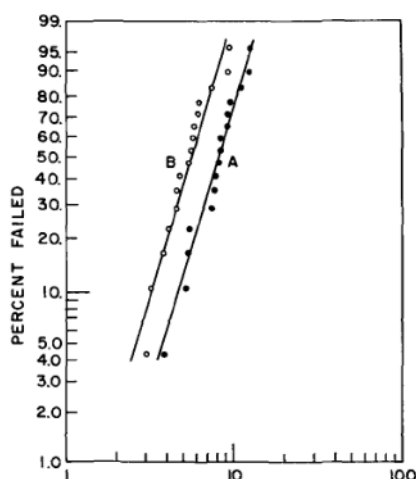
نتایج میکروسختی در مقاطع مخروطی شده 7B و 7C بصورت خلاصه شده در جدول II آورده شده اند. سختی داخل قطعه در نمونه 7B (کاربید های اولیه ریز) از نمونه 7C (کاربید های اولیه درشت) بیشتر است که مؤید کارهای قبلی است. در هر دو نمونه یک افزایش سختی در سطح کربوریزه مشاهده میگردد.

### آزمایش خستگی در سطح تماس چرخشی

نمونه های میله ای با قطر 0.973 cm برابر با (0.383 in.) با طول حدود 8 cm از فولاد 52100 بازپخت آنیل شده ماشینکاری شدند. دو تا از نمونه ها برای جلوگیری از کربن گیری با فویل مسی پوشانده شدند و سپس به همراه دو نمونه پوشش داده نشده بمدت دو ساعت در یک محیط کربن دهی در دمای 815 °C آستنیت شده و بعد در روغن کووئنچ و سپس بمدت یک و نیم ساعت در دمای 175 °C بازگشت داده شدند. بعد از سنگ زنی نهایی تا 0.953 mm برابر با (0.375 in.) ، نمونه ها با استفاده از دستگاه تست خستگی Polymet Model RCF-1 با ثبت حداکثر مقدار تنش 503 MPa (729 ksi) مورد آزمایش قرار گرفتند. با بهره گیری از طرح *Weibull* ، شکل ۷ از نتایج مستخرج از هر ۱۶ نمونه آزمایشی معلوم می گردد که نمونه هایی که

سطح

True Distance below the Surface, mm	0-0.04	0.04-0.08	0.08-0.20	Interior
Specimen	Average Hardness, Khn (1 kg load)			
7B	948	877	852	831
7C	928	883	858	824



آنها کربن دهی شده بودند پنجاه درصد عمر خستگی شان بیشتر از سایر نمونه هایی است که در همان سیکل حرارتی قرار گرفته بودن ولی کربوریزه نشده بودند. آزمایش غیر پارامتری Walsh برای مقدار استاتیکی مشخص می ساز که در ۹۹.۵ درصد

اطمینان بخشی ، بازهم اطلاعات مربوط به تست خستگی در دو سری آزمایش از هم اختلاف زیادتری دارند.

در یک نمونه تسمه ای ضخامت 0.18 cm و بدون پوشش مسی که همراه نمونه های میله ای (Bar) تحت عملیات حرارتی واقع شده بودند حداکثر تنش سطحی فشاری به 60 MPa برابر با (8.7 ksi) رسیده بود و عمق لایه تحت تنش فشاری 0.31 mm بود.

## بحث و گفتگو

نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که توزیع تنش های پسماند در فولاد 52100 کووئنچ و برگشت داده شده می تواند با کنترل کربن اتمسفر کوره در طول آستنیت کردن اصلاح شود. استفاده از اتمسفر کربن دهی برای آستنیت کردن بمدت ۱ تا ۲ ساعت در دمای  $815^{\circ}\text{C}$  تا  $850^{\circ}\text{C}$  با دمای برگشت  $150^{\circ}\text{C}$  باعث بوجود آمدن تنش های پسماند فشاری تا عمق 0.20 mm الی 0.40 mm زیر سطح با ماکزیمم تنش فشاری سطحی تا 70 الی 135 MPa برابر با (10 الی 20 ksi) خواهد شد. تنش های پسماندی که با این روش تولید شده اند  $1/2$  تا  $2/3$  مقدار تنش های پسماندی است که *Koistinen* با اضافه کردن نیتروژن روی سطح فولاد 52100 در طول آستنیت کردن بوجود آورد. مقایسه ها بخاطر اینکه نمونه های *Koistinen* برگشت نشده بودند مشکل است.

منبع تنش های پسماند کششی سطحی در نمونه های تسمه ای پوشش داده شده هنوز مشخص نشده است. تنش های کششی سطحی که بوسیله گرادیان های حرارتی در طول کووئنچ کردن ایجاد شده اند اغلب در قطعات با سختی حجمی مشاهده می شوند. با این توصیف که در آزمایشات اخیر، قطعات نازک بودند و محیط کووئنچ متوسط بود؛ حداکثر مقدار اختلاف درجه حرارت سطح و مرکز نمونه در طول عمل کووئنچ بیشتر از  $25^{\circ}\text{C}$  تجاوز نمی کرد. بنظر می رسد به احتمال زیاد تنش های کششی سطح از جدایش (Segregation) آلیاژها در فولادها ناشی میشود. بمیزان ثلث از مرکز سطح مقطع نمونه میله ای استفاده شده بعنوان ماده شروع محتوی نسبت به دو سوم سطح باقیمانده از کاربیدهای فراوان برخوردار بوده است و تمایل به پیوستگی در آن قسمت بیشتر است؛ این درجه از پیوستگی برای فولاد 52100 تجارتي تولیدی برای محصولات میله ای تو پر غیر معمول نیست.

مشخص گردیده است که زمان کمتر، درجه حرارت پائین کربن دهی باعث افزایش عمر خستگی ضد اصطکاکی در فولاد 52100 میشود. افزایش در عمر را تنها نمی توان به تغییر در توزیع تنش پسماند استناد داد زیرا کربن دهی باعث افزایش آستنیت باقیمانده و حجم کاربیدهای اولیه در سطح میگردد. افزایش در آستنیت باقیمانده سطح، مخصوصا چون افزایش همراه با درشت شدن دانه های آستنیت یا کاهش سختی نیست احتمالا برای عمر خستگی مفید اتفاق خواهد افتاد. رولر برینگ هایی که بصورت سطحی کربوریزه شده اند بیشتر از ۳۰٪ آستنیت باقیمانده در پوسته درند و وقتی که حجم بزرگی از کاربیدهای اولیه مقاومت خوردگی لغزشی را افزایش می دهد. بدیهی است که افزایش حجم یزرگی از کاربیدها مقاومت خستگی تماسی را کاهش می دهد پس غیرمحمتمل است که جزء بیشتر کاربید منبعی برای افزایش عمر خستگی باشد.

## نتیجه گیری ها

تنش های پسماند فشاری می تواند تحت عمل آستنیت کردن در یک اتمسفر کربن دهی، در سطح فولاد 52100 پدید آید. منشاء و سرچشمه تنش ها در اثر اختلاف و تفاوت ها در میزان حلالیت کربن محتوی در آستنیت است؛ کربن محتوی آستنیت در نزدیکی سطح، گرایش به تعادل با اتمسفر بیرونی دارد در حالی که کربن محتوی بخش مغزی در تعادل با کاربیدهای اولیه با محدودیت مواجه می گردد.

تنش های پسماند بالا در زمان کمتر باعث قطع تعادل کربن بین آستنیت و کاربید اولیه در مغز قطعه می شوند. وقتی که کاربیدهای اولیه در قبل از آستنیت شدن بصورت کروی هستند بر میزان تنش ها افزوده می گردد (همانند پرلیت

و باینیت ریزتر هستند).

حجم کاربیده‌های اولیه وقتی که در طول آستنیت‌ه کردن کربن اضافه می‌گردد در سطح قطعه بزرگتر است . سطح کربوریزه شده حدود  $RC \sim 4 \sim 2$  سخت تر از مغز قطعه است.

مقدار آستنیت باقیمانده در نمونه های کووئنچ شده در روغن در سطوح کربن دهی شده بیشتر از بخش داخل است که دلیل آن بعلت اختلاف در میزان حلالیت کربن محتوی است.

آزمایشات خستگی سطح تماس چرخشی نشان می دهد که عمر مفید نمونه های آزمایشی کربوریزه شده در قیاس با نمونه های غیر کربوریزه شده در حدود یک و نیم برابر بیشتر است و این در حالی است که از سیکل حرارتی مشابه برخوردار بوده اند.

### ضمیمه

تنش های پسماند با روش موسوم به Treuting & Read اندازه گیری شده اند. معادله آنها برای تعدیل تنش های پسماند با محورهای متعامد در یک صفحه برای تنش  $\sigma$  باز نویسی شدند در عبارات زیر سطح  $\lambda$  و انحراف کج شدن  $\delta$  وقتی یک لایه با ضخامت  $\lambda$  از سطح جابجا شود. معادله آنگاه بشکل زیر خواهد بود:

$$\sigma(\lambda) = \frac{-4E}{3(1-\nu)l^2} [(\tau - \lambda)^2 \frac{d\delta}{d\lambda} - 4(\tau - \lambda)\delta + 2 \int_0^\lambda \delta(x) dx]$$

[1A]

در این معادله  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پویسون،  $l$  طول تسمه و  $\tau$  ضخامت اولیه تسمه می باشد. با آگاهی از  $\delta = \delta(x)$  می توان گفت که توزیع تنش پسماند حاصل میگردد.

Treuting & Read از دیفرانسیل و انتگرال گرافیکی برای یافتن  $d\delta/d\lambda$  و  $\int_0^\lambda \delta dx$  استفاده کردند. سایر محققین از روشهای افزایشی سود جسته اند. در این کار جفت داده  $(\delta, \lambda)$  بصورت بدون بعد  $(\delta/\tau, \lambda/\tau)$  منظور گردیده اند و سپس بصورت چند جمله ای مرتبه پنجم با روش کوچکترین مربعات مورد احتساب قرار گرفته اند.

هرگاه  $\xi = \lambda/\tau$  و  $\eta = \delta/\tau$  آنگاه معادله مندرج، بشرح ذیل پدیدار میگردد:

$$\sigma(\xi) = \frac{-4E\tau^2}{3(1-\nu)l^2} [(1-\xi)^2 \frac{d\eta}{d\xi} - 4(1-\xi)\eta + 2 \int_0^\xi \eta(x) dx]$$

[2A]

چند جمله ای  $\eta = \sum_{n=0}^5 A_n/\xi^n$  با توجه به سه فرض زیر بنا شد است:

(۱) وقتی که  $\xi = 0$  و  $\eta = 0$  آنگاه عبارت ثابت صفر خواهد شد؛

(۲) اگر عبارت بصورت

$$\int_0^{1/2} [(1-\xi)^2 (d\eta/d\xi) - 4(1-\xi)\eta + 2 \int_0^\xi \eta dx] d\xi = 0,$$

باشد نیروی خالص روی سطح مقطع باید صفر باشد.

(۳) وقتی  $\xi = 1/2$  آنگاه  $d\sigma/d\xi = 0$  یک معادله با سه ثابت قابل تنظیم  $A_1, A_2$  &  $A_3$  حاصل خواهد شد:

$$\eta(\xi) = A_5(\xi^5 - \frac{5}{3}\xi^4 + \frac{1}{2}\xi^2) + A_3(\xi^3 - \frac{3}{4}\xi^2) + A_1\xi \quad [3A]$$

این عبارت عمومی است و کافی است که تمام اطلاعات جاگذاری شود و می تواند تحت دیفرانسیل گیری و انتگرال گیری واقع گردد تا به یک شکل نزدیک از مرتبه ششم برای  $\delta$  برسد. در سطح خارجی  $\xi = 0$  و  $\eta = 0$  با بهره گیری از معادلات [2A] و [3A] تنش پس مانده سطح به این ترتیب خواهد بود:

$$\sigma(0) = \frac{-4E\tau^2}{3(1-\nu)l^2} A_1 \quad [4A]$$

جایگذاری داده ها تحت این روش این مزیت را دارد که یک تصویر دقیقی از خصوصیات اصلی توزیع تنش می تواند با چند اندازه گیریهای نسبی (۷ تا ۱۰) ، انحنای را بصورت تابعی از پهنای ضخامت بدست دهد. عدم امتیاز روش مورد بحث این است که نوسانات شدید تنش های باقی مانده مثلا از انناغ مشابهی که در عملیات سنگ زنی ایجاد میگردد دقیقا مشخص نخواهد شد.

مقدار :

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{(\eta_i^c - \eta_i)^2 \tau^2}{n-3} \quad [5A]$$

بعنوان شاخصی برای برازش استفاده گردید جائیکه مقدار  $\eta_i^c$  مقدار  $\eta$  از معادله [3A] حاصل شده باشد و  $\eta_i$  مقدار اندازه گیری شده  $\eta$  حاصل شده در هر  $\xi_i$  باشد.

اندازه گیری های انحنای تخمین زده می شود که در حد دقت  $\pm 0.005$  mm باشد. ضخامت متوسط نمونه از وزن ورق که هربار نازکتر می شد محاسبه گردید. به طور کلی ، اگر قصد آن باشد که اندازه ضخامت را روی  $\pm 0.015$  ثابت نگه داشته شود آنگاه حدود  $0.5$  mm از مواد را می توان از طریق شیمیایی حذف کرد. بعد از برداشتن  $1$  mm میزان اعوجاج بصورت تیپیکال در حد  $\pm 0.350$  خواهد بود. در این آزمایش بمنظور برای یکنواخت سازی ضخامت از استفاده از روش سنگ زنی بدلیل اجتناب از احتمال وقوع عمل برگشت موضعی احتراز گردید. عملیات کاستن از ضخامت نمونه ها در ۸ الی ۱۳ مرحله صورت پذیرفت. اولین ضخامتی که برداشته شد در حد  $0.1$  mm بود ؛ بیشترین میزان ضخامت برداشته شده در هر مرحله ای کمتر از  $0.3$  mm بود. تنها عملیات آماده سازی سطح در بعد از عملیات حرارتی برای اندازه گیری میزان تنش پس ماند ، فرو بردن آن در اسید کلریدریک با غلظت  $50$  pct با هدف زدودن آثار اکسید شدگی در جریان عملیات برگشت دادن بود.

## REFERENCES

1. K. Bohm, H. Schlicht, O. Zwirlein, and R. Eberhard: *Bearing Steels: The Rating of Nonmetallic Inclusions*, pp. 96-113, ASTM, Philadelphia, PA., 1975.
2. D. P. Koistinen: *Trans. ASM*, 1958, vol. 50, pp. 227-41.
  
11. G. Parrish: *Heat Treat. Met.*, 1976, vol. 3, pp. 6-12.
12. R. A. Baughman: *Mech. Eng.*, 1959, vol. 81, p. 94.
13. S. Siegel: *Nonparametric Statistics*, 1956, pp. 83-87, McGraw-Hill, NY.
14. D. P. Koistinen: *Trans. ASM*, 1964, vol. 57, pp. 581-88.
15. C. A. Stickels: unpublished work, Ford Motor Co., Dearborn, MI 48121.
16. K. Monma, R. Maruta, T. Yamamoto, and Y. Wakikado *Jp. Inst. Metall. J.*, 1968, vol. 32, pp. 1198-1204.
17. L. C. Johnson: *The Statistical Treatment of Fatigue Experiments*, Elsevier Publ. Co., New York, N.Y., 1964.
18. R. G. Treuting and W. T. Read, Jr.: *J. Appl. Phy.*, 1951, vol. 22, pp. 130-34.
19. J. L. Waisman and A. Phillips: *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, 1952, vol. 11, pp. 29-44.
20. Y. Toshioka, M. Fukagawa, and Y. Saiga: *Iron Steel Inst. Jpn*, 1972, vol. 12, pp. 6-15.
  
11. G. Parrish: *Heat Treat. Met.*, 1976, vol. 3, pp. 6-12.
12. R. A. Baughman: *Mech. Eng.*, 1959, vol. 81, p. 94.
13. S. Siegel: *Nonparametric Statistics*, 1956, pp. 83-87, McGraw-Hill, NY.
14. D. P. Koistinen: *Trans. ASM*, 1964, vol. 57, pp. 581-88.
15. C. A. Stickels: unpublished work, Ford Motor Co., Dearborn, MI 48121.
16. K. Monma, R. Maruta, T. Yamamoto, and Y. Wakikado *Jp. Inst. Metall. J.*, 1968, vol. 32, pp. 1198-1204.
17. L. C. Johnson: *The Statistical Treatment of Fatigue Experiments*, Elsevier Publ. Co., New York, N.Y., 1964.
18. R. G. Treuting and W. T. Read, Jr.: *J. Appl. Phy.*, 1951, vol. 22, pp. 130-34.
19. J. L. Waisman and A. Phillips: *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, 1952, vol. 11, pp. 29-44.
20. Y. Toshioka, M. Fukagawa, and Y. Saiga: *Iron Steel Inst. Jpn*, 1972, vol. 12, pp. 6-15.