

مقایسه آماری عمر خستگی فولاد Ck45 آهنگری شده در شرایط نرماله، کوئنچ و تمپر شده با شرایط کوئنچ و تمپر شده*

احمد ضابط^(۱)حسین حیدری^(۲)جنابا برادران^(۳)

چکیده

در فرآیند تولید، نرماله کردن معمولاً پس از عملیات آهنگری و قبل از عملیات کوئنچ و تمپر بر روی قطعات صنعتی انجام می‌شود. این عملیات موجب یکنواختی و ریزش شدن ریزساختار می‌گردد. با توجه به تأثیر کم عملیات نرماله بر خواص مکانیکی فولاد Ck45 آهنگری، کوئنچ و تمپر شده و ضرورت کاهش هزینه‌های تولید، حذف این عملیات پس از آهنگری مطلوب به نظر می‌رسد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری، سختی‌سنجی و آزمایش کشش، تأثیر بسیار کم عملیات نرماله را بر خواص یاد شده تأیید می‌نماید. لکن خواص خستگی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد که موضوع اصلی این تحقیق است. عمر خستگی قطعات در حالت آهنگری، کوئنچ و تمپر شده و حالت نرماله، کوئنچ و تمپر شده مورد بررسی قرار گرفته. تعداد ۶۴ آزمون خستگی خمشی دورانی ($R=-1$) در چهار دامنه تنش مختلف انجام شد. این آزمایشات در تنش‌های متوسط به بالا، ۵۹٪ تا ۶۸٪ برابر استحکام کششی، انجام شد. متوسط عمر نمونه‌های نرماله، کوئنچ و تمپر شده در دامنه تنش‌های ۵۰۸، ۵۴۱، ۵۷۴ و ۵۸۳ مگاپاسکال به ترتیب برابر با ۲۱۱ هزار، ۱۲۸ هزار، ۱۰۱ هزار و ۴۶ هزار سیکل بود. مقایسه نتایج در هر دامنه تنش نشان دهنده تمپر شده در تنش‌های یاد شده به ترتیب برابر با ۲۰۹ هزار، ۱۳۸ هزار، ۱۰۱ هزار و ۴۶ هزار سیکل بود. مقایسه نتایج در هر دامنه تنش نشان دهنده متوسط عمر بیشتر نمونه‌های نرماله شده می‌باشد لکن به خاطر تعداد محدود نمونه‌ها در هر سطح تنش آزمون واریانس، اختلاف معنی‌داری را میان عمر خستگی در دو حالت عملیات حرارتی تأیید نمی‌نماید. در واقع توان آزمون آماری در تشخیص اختلاف بین متوسط طول عمر کم است. از این رو، نویسندگان مقاله روشی را برای هم‌ارزسازی نتایج چهار سطح تنش پیشنهاد نموده و پس از هم‌ارز نمودن تمام نتایج را در یک آزمون میانگین با واریانس نامعلوم و توان بیشتر مقایسه کردند. نتیجه آزمون واریانس در این حالت حاکی از اختلاف میانگین دو جامعه در سطح معنی دار ۵٪ بوده و عمر متوسط خستگی قطعات نرماله شده حداقل ۱۸٪ بیش‌تر از عمر قطعات نرماله نشده تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عمر خستگی، فولاد کم‌کربن آهنگری شده، عملیات نرماله، بررسی آماری.

Statistical Comparison of Fatigue Lives of Forged Ck45 Steel in Normalized, Quenched and Tempered Condition with Those in Quenched and Tempered Condition

A. Zabett

H. Heidari

J. Baradaran

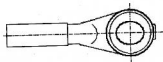
Abstract

A common process in auto-parts manufacturing consists of forging, normalizing, quenching and tempering. Normalizing treatment is usually employed to improve machinability of steel, and to homogenize and refine the microstructure. For simple parts, production cost would be reduced if normalizing stage were eliminated. In this paper, the effect of normalizing treatment on fatigue life of a quenched and tempered carbon steel has been studied. Samples were taken from forged, quenched and tempered parts at industrial conditions. Sixty four fatigue specimens were tested using a rotary bending fatigue machine ($R=-1$) at four different stress amplitudes between 500 and 600MPa. Results showed minor effect of normalizing on microstructure, hardness and tensile properties. However, specimens normalized after forging indicated improved fatigue life at the same stress amplitude. Average fatigue lives at 508, 516, 534 and 583MPa were 261000, 194000, 119000 and 54000 cycles respectively for normalized quenched and tempered samples and 209000, 138000, 101000 and 46000 cycles for quenched and tempered samples. Due to variation of fatigue life results, Student's t-test was employed to prove any meaningful difference of fatigue life for specimens with or without normalizing treatment. Student's t-test is often used to determine if the averages of two samples are significantly different. The test approved the difference with 95% confidence. Fatigue life of normalized samples was estimated at least 18% higher than the life of samples without normalizing.

Key Words Fatigue Life, Heat Treatment, Normalizing and Carbon Steel.

- * نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۷/۷/۳۱ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۸/۱۲/۲۱ به دفتر نشریه رسیده است.
- (۱) عهده‌دار مکاتبات: استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- (۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- (۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

قطعه سیبک فرمان بحث خواهد شد.



شکل ۱ تصویر شماتیک سیبک فرمان

بسیاری از محققان اثر ریزساختار را بر رفتار خستگی فولادهای کم کربن بررسی کرده‌اند [5-10]. توزیع فازهای اصلی تشکیل دهنده تأثیر به سزایی در شروع ترک و اشاعه آن دارد. این موضوع توسط تعدادی از محققان در فولادهای ساده کربنی به خوبی نشان داده شده است [7,8]. شروع ترک در فاز فریت و اشاعه ترجیحی ترک در این فاز تأیید شده است. De Los Rios و همکاران [9] و Zettl و همکاران [10] اثر مورفولوژی فریت بر شروع و اشاعه ترک را بررسی نموده و نشان داده‌اند که شروع ترک در فریت درشت در تنش‌های کمتر اتفاق افتاده و تعداد ترک‌ها در فریت درشت بیشتر از تعداد ترک‌ها در فریت ریز است.

نتایج آزمایش‌های خستگی معمولاً دارای پراکندگی و تغییرات زیادی هستند [11,12]. از این رو، کسب اطمینان از اختلاف عمر متوسط قطعات در دو حالت عملیات حرارتی مختلف نیاز به بررسی آماری دارد. در مواقعی که نیاز است بین دو جامعه به صورت آماری مقایسه انجام شود و یا این‌که لازم باشد یک فرضیه به صورت آماری مورد امتحان قرار گیرد، بررسی‌ها و نتیجه‌گیری‌های آماری معمولاً منجر به ارائه فرضیه‌های آماری می‌شوند [13]. در مورد درستی یا نادرستی یک فرضیه آماری هرگز نمی‌توان اظهارنظر قطعی نمود مگر آن‌که تمام جامعه امتحان شود و این کار معمولاً غیرعملی است، اما می‌توان یک نمونه تصادفی از جامعه را انتخاب نموده و با استفاده از آن درمورد قبول یا رد فرضیه تصمیم گرفت. برای این کار از آزمون فرضیه‌های آماری استفاده می‌شود. در مسئله

مقدمه

در صنعت قطعه سازی، در فرآیند تولید قطعات فولادی آهنگری و عملیات حرارتی شده معمولاً قبل از مراحل کوئنچ و تمپر، عملیات نرمال کردن بر روی قطعات انجام می‌شود. این عملیات بیشتر به منظور ریز و یکنواخت کردن فولاد بعد از آهنگری انجام شود. لیکن در مواردی که قطعه باید ماشین‌کاری می‌شود، برای کاهش هزینه‌های ماشین‌کاری و همچنین حذف تنش‌های پس‌ماند و پیش‌گیری از اعوجاج قطعه، عملیات نرمال کردن قبل از کوئنچ و تمپر انجام می‌شود. در قطعاتی که نیاز به ماشین‌کاری ندارند یا شکل قطعه پیچیدگی زیادی که منجر به اعوجاج یا ترک برداشتن آن شود نداشته باشد، امکان حذف عملیات نرمال کردن وجود دارد [1-4]. لکن با توجه به اهمیت اثر یکنواختی ساختار بر خواص دینامیکی قطعه، اثر عملیات نرمال کردن بر خواص خستگی قطعات مورد سوال است. هدف این تحقیق بررسی امکان حذف مرحله نرمال کردن در فرآیند آهنگری، نرماله، کوئنچ و تمپر قطعات تولیدشده از جنس فولاد ساده کربنی می‌باشد.

قطعه انتخاب شده برای این تحقیق سیبک فرمان از سیستم تعلیق خودرو از جنس فولاد Cr45 می‌باشد، (شکل ۱). چون این قطعه قبل از کوئنچ و تمپر کردن ماشین‌کاری نمی‌شود، نرمال کردن ریزساختار ضرورتی ندارد. از طرفی قطعه دارای شکل پیچیده‌ای نبوده و مشکل اعوجاج و تنش‌های پسماند نیز وجود ندارد. لکن در فرآیند معمول تولید قطعه عملیات نرماله پس از آهنگری و قبل از کوئنچ وجود دارد که می‌تواند به منظور ریزکردن دانه‌بندی و بهبود خواص مکانیکی بوده باشد. در این تحقیق ضمن بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی از جمله سختی و خواص کششی، عمر خستگی در تنش‌های مختلف تعیین و مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمون خستگی در شرایط مختلف عملیات حرارتی، در خصوص اثر حذف عملیات نرماله از فرآیند تولید

سپس عملیات حرارتی نرماله، آستنیت، کوئنچ و تمپر بر روی قطعات انجام می‌شود. برای انجام آزمایشات تعداد ۱۲۰ نمونه از قطعات آهنگری شده به طور تصادفی انتخاب شدند. ۶۰ نمونه تحت عملیات نرماله قرار گرفتند و ۶۰ نمونه نرماله نشدند. در این مرحله بر روی همگی ۱۲۰ نمونه طبق روال معمول بقیه فرایند یعنی عملیات آستنیت، کوئنچ و تمپر اعمال شد. عملیات نرماله به مدت ۱۳۰ دقیقه در دمای ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و سپس قطعات در هوای آرام سرد شدند. مرحله آستنیت کردن به مدت ۱۰۰ دقیقه در دمای ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و قطعات در حمام روغن متلاطم کوئنچ شدند. عملیات تمپر در دمای ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۵ دقیقه انجام گردید.

قطعات طبق جدول (۲) نام‌گذاری شده و سختی تمام نمونه‌ها در مقیاس راکول A اندازه‌گیری شد. بررسی‌های ریزساختاری برای تمام مراحل نمونه‌های جدول (۲) انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش از مغز قطعات مطابق استاندارد ASTM E8M تهیه شدند و دو نمونه QT و دو نمونه NQT تحت آزمایش کشش قرار گرفتند.

آزمون فرضیه (Hypothesis Testing) معمولاً یک ادعا در قالب فرضیه مخالف و خلاف آن در قالب فرضیه صفر بیان می‌شود. در صورتی که بر اساس نمونه دلیلی برای رد فرضیه صفر وجود نداشته باشد، آن را پذیرفته و ادعا رد می‌شود. آزمون فرضیه در موارد مختلفی از جمله مقایسه میانگین دو یا چند جامعه کاربرد دارد. در مقایسه نتایج آزمون سختی در شرایط مختلف عملیات حرارتی، با توجه به پراکندگی نتایج، می‌توان از آزمون مقایسه دو جامعه (آزمون t) (Student t-test) استفاده نمود. با استفاده از این روش آماری تشخیص داده می‌شود که آیا تمام داده‌ها متعلق به یک جامعه آماری هستند یا این‌که به دو جامعه آماری با دو میانگین متفاوت تعلق دارند.

روش تحقیق

برای تولید سبک فرمان، قطعاتی به طول ۲۵ سانتی‌متر از میل‌گرد فولاد Ck45 با قطر ۳۸ میلیمتر برش‌زده می‌شوند. ترکیب شیمیایی فولاد در جدول (۱) آورده شده است. قطعات در یک کوره القایی تا دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده و در دو مرحله توسط پرس ۱۰۰۰ تن و پرس ۱۶۰۰ تن آهنگری می‌شوند.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد Ck45

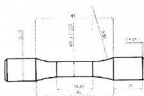
عناصر شیمیایی	Mo	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C
درصد وزنی	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۲۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۶۶	۰/۲۲	۰/۴۴

جدول ۲ نام‌گذاری نمونه‌ها

کد	نمونه
AR	نمونه خام
AF	نمونه آهنگری شده قبل عملیات حرارتی
N	نمونه آهنگری نرماله شده
NQ	نمونه آهنگری، نرماله و کوئنچ شده
Q	نمونه آهنگری و کوئنچ شده
NQT	نمونه آهنگری، نرماله، کوئنچ و تمپر شده
QT	نمونه آهنگری، کوئنچ و تمپر شده

نمونه‌های آزمون خستگی نیز از مغز قطعات، طبق نقشه شکل (۲) با ماشین تراشکاری CNC تهیه شدند. نمونه‌های خستگی پس از سمباده‌زنی با شماره‌های ۵۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ با خمیر الماس ۱ میکرون پولیش شدند. پولیش نهایی به منظور بررسی‌های میکروسکوپی سطح نمونه‌ها بعد از آزمون خستگی انجام شد. برای آزمایشات خستگی از دستگاه خستگی خمشی- دورانی Zwick/Roel مدل UBM200 استفاده شد.

نمونه‌های آزمون خستگی نیز از مغز قطعات، طبق نقشه شکل (۲) با ماشین تراشکاری CNC تهیه شدند. نمونه‌های خستگی پس از سمباده‌زنی با شماره‌های ۵۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ با خمیر الماس ۱ میکرون پولیش شدند. پولیش نهایی به منظور بررسی‌های میکروسکوپی سطح نمونه‌ها بعد از آزمون خستگی انجام شد. برای آزمایشات خستگی از دستگاه خستگی خمشی- دورانی Zwick/Roel مدل UBM200 استفاده شد.



شکل ۲ نمونه شتابیک آزمون خستگی

نتایج و بحث

مقادیر سختی پس از هر مرحله عملیات حرارتی در جدول (۳) آورده شده‌اند. سختی سنجی هر قطعه در ۵ نقطه انجام شده است. این نتایج نشان‌دهنده سختی‌پذیری کم فولاد و عدم مارتنزیتی شدن کامل نمونه‌ها بعد از کوئنچ می‌باشد. اختلاف سختی نمونه‌ها بین حالت‌های Q و NQ و نیز بین حالت‌های QT و NQT بسیار کم می‌باشد. برای مقایسه سختی حالت‌های QT و NQT با توجه به تعداد کافی

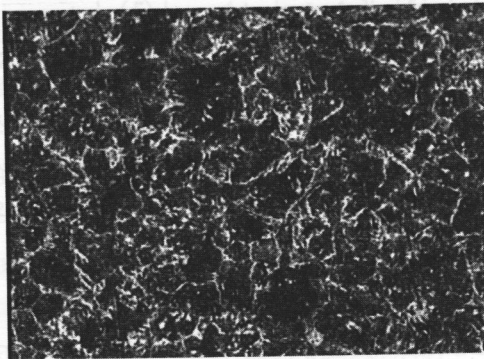
برای هر حالت عملیات حرارتی QT و NQT دو آزمایش کشش انجام شده و متوسط نتایج خواص کششی در جدول (۵) گزارش شده است. خواص کششی نمونه‌ها کاملاً مشابه بوده و نشان می‌دهد عملیات نرماله اثر محسوسی بر خواص کششی نمونه‌های کوئنچ و تمپر شده نداشته است.

متالوگرافی نمونه‌های کوئنچ شده در حالت‌های Q و NQ حاکی از مقادیر بسیار ناچیز مارتنزیت در نمونه‌ها می‌باشد که به خاطر ضخامت قطعه و کوئنچ در روغن در شرایط صنعتی است. شکل (۴) تصویر متالوگرافی نمونه‌های QT و NQT را در بزرگنمایی یکسان نمایش می‌دهد. این تصویر نشان دهنده ساختار فریت و پرلیتی هر دو نمونه می‌باشد. تفاوت و ریزساختار در میزان فریت، شکل و نحوه توزیع آن می‌باشد. در نمونه‌های QT به میزان ناچیزی فریت بیشتر و پراکنده‌تر مشاهده می‌شود. که این اختلاف ناچیز با اختلاف سختی مشاهده شده هم‌خوانی دارد.

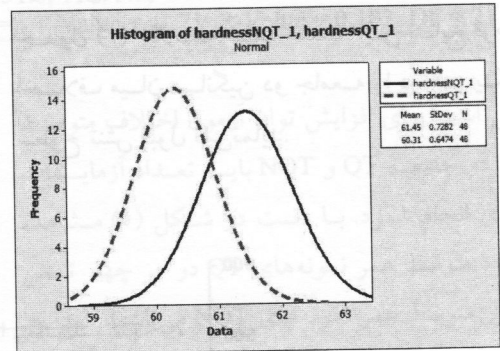
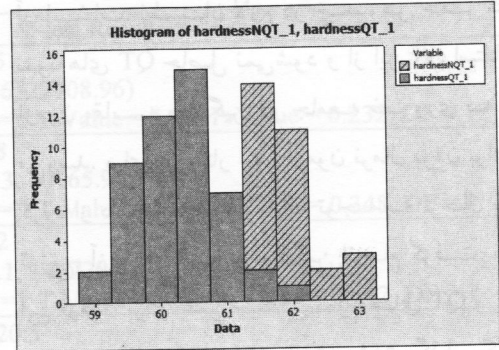
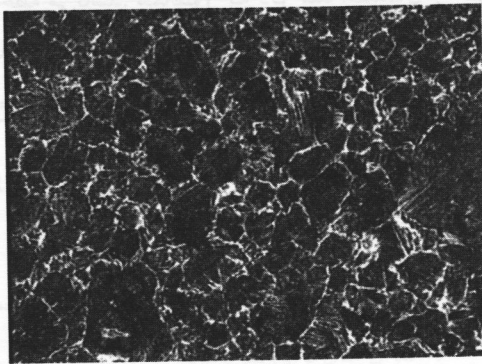
جدول ۳ نتایج سختی سنجی نمونه‌ها پس از هر مرحله عملیات حرارتی

حالت عملیات حرارتی	AR	AF	N	Q	NQ	QT	NQT
متوسط سختی HRA	58/05	58/15	18/7	17/92	17/22	17/31	17/15
تعداد نمونه	۳	۳	۳	۳	۳	۶	۶

QT



NQT



شکل ۳ هیستوگرام سختی نمونه‌های QT و NQT

شکل ۴ تصویر متالوگرافی نمونه‌های کوئنچ تمپر شده (بالا)، نرماله کوئنچ تمپر شده (پایین).

جدول ۴ نتایج آزمون سختی سنجی دو جامعه

Two-Sample T-Test and CI: hardness NQT, hardness QT

	N	Mean	StDev	SE Mean
Hardness NQT	48	61.452	0.728	0.11
Hardness QT	48	60.308	0.647	0.093

Difference = mu (hardnessNQT_1) - mu (hardnessQT_1)

Estimate for difference: 1.14375

95% CI for difference: (0.86445, 1.42305)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 8.13 P-Value = 0.000 DF = 92

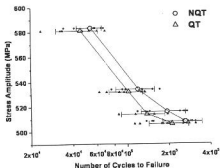
جدول ۵ خواص کششی نمونه‌ها در شرایط QT و NQT

عملیات حرارتی	تنش تسلیم N/mm ²	استحکام کششی N/mm ²	ازدیاد طول %
QT	۵۸۱	۸۵۶	۱۷/۲۱
NQT	۵۸۶	۸۴۷	۱۶/۹۵

به خاطر پراکندگی زیاد نتایج و تعداد محدود آزمایشات، اطمینان لازم در خصوص عمر کمتر نمونه‌های QT حاصل نمی‌شود و از این رو، استفاده از آزمون مقایسه میانگین دو جامعه ضروری به نظر می‌رسد. برای این کار ابتدا آزمون نرمال بودن برای هر گروه از داده‌ها انجام شده و با توجه به نرمال بودن توزیع، آزمون مقایسه دو میانگین انجام گرفت. نتایج این آزمون برای عمر خستگی نمونه‌های QT و NQT در تنش‌های ۵۸۱، ۵۳۴، ۵۱۶ و ۵۰۸ مگاپاسکال در جدول (۷) خلاصه شده است. این نتایج فرضیه اختلاف میان میانگین دو جامعه را در هر یک از سطوح تنش قبول نمی‌نماید.

نتایج آزمایشات خستگی برای همه حالت‌های آزمایش شده در جدول (۶) آورده شده است. شکل (۵) منحنی S/N را نمایش می‌دهد. لازم به توضیح است که دامنه تنش در آزمایشات برای نمونه‌های QT و NQT برابر بوده و اختلاف سطح نتایج خستگی در هر تنش در شکل (۵) برای تمایز نتایج نمونه‌های QT و NQT می‌باشد.

در شکل (۵) تفاوت طول عمر نمونه‌های QT و NQT در هر چهار سطح تنش آزمایش شده قابل ملاحظه می‌باشد. همانطور که ذکر شد اطمینان از این اختلاف نیاز به بررسی آماری دارد. چنانچه اختلاف نتایج در هر یک از تنش‌ها را مورد بررسی قرار دهیم



شکل ۵ نمودار S-N قطعات در دو حالت QT و NQT

جدول ۶ نتایج آزمون خستگی

شرایط عملیات حرارتی	تنش اسمالی (MPa)	تعداد آزمایش	میانگین طول عمر (سیکل)	انحراف معیار
QT	583	8	45635	15181
QT	534	8	101399	27881
QT	516	4	137837	48125
QT	508	10	209664	66702
NQT	583	8	54018	11184
NQT	534	6	119552	37531
NQT	516	6	194089	68817
NQT	508	14	261885	82885

جدول ۷ خلاصه نتایج آزمون دو جامعه

Stress Amplitude	T-test Results
583 MPa	Estimate for difference: 8383.75 95% CI for difference: (-6141.46, 22908.96) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.26 P-Value = 0.232 DF = 12
534 MPa	Estimate for difference: 18152.8 95% CI for difference: (-23860.3, 60165.9) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.00 P-Value = 0.348 DF = 8
516 MPa	Estimate for difference: 56252.2 95% CI for difference: (-31216.1, 143720.4) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.52 P-Value = 0.172 DF = 7
508 MPa	Estimate for difference: -52220.5 95% CI for difference: (-115831.0, 11390.0) T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.71 P-Value = 0.103 DF = 21

شده به ترتیب زیر به دست می‌آیند.

$$(R_{\sigma_1})_{NQT} = \left(\frac{N_{583}}{N_{534}} \right)_{NQT}$$

$$N_{\sigma_2} = R_{\sigma_2} \times N_{\sigma_1}$$

به عنوان مثال برای نمونه‌های NQT متوسط عمر در تنش ۵۸۳ مگاپاسکال ۵۴۰۱۸ سیکل و متوسط عمر در تنش ۵۳۴ مگاپاسکال ۱۱۹۵۵۲ سیکل است. لذا (R534)NQT نسبت متوسط عمر در ۵۸۳ مگاپاسکال به متوسط عمر در ۵۳۴ مگاپاسکال خواهد بود.

$$(R534)NQT = (54018) / (119552) = 0.452$$

نسبت‌های R برای عمر متوسط نمونه‌های تست شده در تنش‌های ۵۳۴، ۵۱۶ و ۵۰۸ مگاپاسکال در شرایط NQT و QT به ترتیب زیر محاسبه شده‌اند.

$$(R_{534})_{NQT} = \left(\frac{N_{583}}{N_{534}} \right)_{NQT} = 0.452$$

$$(R_{534})_{QT} = \left(\frac{N_{583}}{N_{534}} \right)_{QT} = 0.450$$

$$(R_{516})_{NQT} = \left(\frac{N_{583}}{N_{516}} \right)_{NQT} = 0.278$$

بدیهی است برای افزایش توان آزمون اختلاف متوسط عمر دو جامعه QT و NQT باید تعداد آزمایشات بیشتری انجام شود. با دقت در شکل (۵) مشاهده می‌شود متوسط عمر نمونه‌های QT در هر چهار تنش کمتر از متوسط عمر نمونه‌های NQT می‌باشد. لذا با توجه به هزینه‌بر و وقت‌گیر بودن آزمایشات خستگی، نویسندگان روشی را برای هم‌ارزسازی نتایج عمر خستگی در چهار سطح تنش پیشنهاد نموده‌اند، تا تمامی نتایج در یک آزمون مقایسه میانگین دو جامعه قابل استفاده باشند.

برای هم‌ارز نمودن عمر نمونه‌های خستگی در تنش‌های مختلف، عمر نمونه‌های آزمایش شده در تنش‌های ۵۳۴، ۵۱۶ و ۵۰۸ مگاپاسکال با نسبت متوسط عمرشان به متوسط عمر نمونه‌های آزمایش شده در تنش ۵۸۳ مگاپاسکال وزن داده شدند. به عبارت دیگر، عمر نمونه‌ها در تنش ۵۸۳ مگاپاسکال مبنا گرفته شده و با تقسیم عمر مبنا بر متوسط عمر نمونه‌ها در تنش‌های ۵۳۴، ۵۱۶ و ۵۰۸ مگاپاسکال نسبت R برای هم‌ارز کردن عمر نمونه‌های آزمایش شده به دست آمده است. عمر هم‌ارز شده از حاصل ضرب نسبت R در عمر هر نمونه به دست می‌آید. بدین ترتیب عمر تمام نمونه‌ها با عمر نمونه‌های آزمایش شده در تنش ۵۸۳ مگاپاسکال هم‌ارز و قابل مقایسه می‌شوند. نسبت R و عمر هم‌ارز

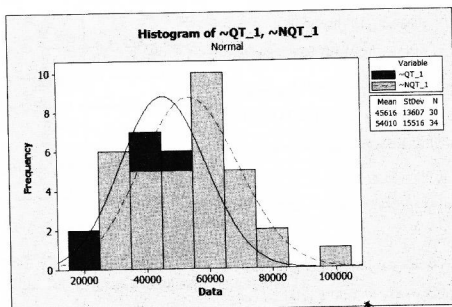
قطعات نرمال نشده QT در تنش ۵۸۳ و برای تنش‌های ۵۳۴، ۵۱۶ و ۵۰۸ مگاپاسکال به ترتیب ۱۸٪، ۴۱٪ و ۲۵٪ بیشتر تخمین زده می‌شوند. این نتیجه در حالی به دست آمده است که نتایج بررسی‌های مثالوگرافی، سختی سنجی و خواص کششی اختلاف بسیار ناچیزی را نشان داده‌اند. این موضوع اهمیت عملیات نرمال کردن را پس از عملیات آهنگری در قطعات صنعتی که در معرض آسیب خستگی می‌باشند، نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌های اولیه و پیشینه موضوع [9,10] علت این تفاوت، به فریت بیشتر و پراکندگی بیشتر آن در نمونه‌ها نرمال نشده مربوط می‌شود. لکن تعیین دقیق علت این تفاوت مستلزم بررسی‌های بیشتر شکست‌نگاری و ریزساختاری می‌باشد که توسط نویسندگان مقاله در دست بررسی می‌باشد.

$$(R_{516})_{QT} = \left(\frac{N_{583}}{N_{516}} \right)_{QT} = 0.331$$

$$(R_{508})_{NQT} = \left(\frac{N_{583}}{N_{508}} \right)_{NQT} = 0.218$$

$$(R_{508})_{QT} = \left(\frac{N_{583}}{N_{508}} \right)_{QT} = 0.218$$

پس از هم‌ارز کردن داده‌ها، اندازه نمونه‌های آماری NQT برابر با ۳۴ و QT برابر با ۳۰ می‌باشد. نتایج آزمون مقایسه میانگین دو جامعه برای داده‌های هم‌ارز شده که پس از آزمون نرمال انجام شده است، در شکل (۶) دیده می‌شود. همانطور که نتایج آزمون نشان می‌دهد، نتایج آزمون خستگی نمونه‌های QT و NQT مربوط به دو جامعه آماری با اطمینان بیش از ۹۵٪ متفاوت می‌باشند. با توجه به نتایج آزمایشات خستگی، متوسط عمر قطعات نرمال شده NQT ۱۸/۴٪ بیشتر از



شکل ۶ نتایج آزمون میانگین دو جامعه برای داده‌های هم‌ارز شده

جدول ۸ نتایج آزمون دو جامعه برای داده‌های هم‌ارز شده

Two-Sample T-Test and CI: QT_normalized, NQT_normalized

	N	Mean	StDev	SE Mean
~QT_1	30	45616	13607	2484
~NQT_1	34	54010	15516	2661

Estimate for difference: -8393.37

95% CI for difference: (-15672.67, -1114.07)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -2.31 P-Value = 0.025 DF = 61

خلاصه و نتیجه‌گیری

عمر خستگی قطعات آهنگری، کوئنچ و تمپر شده با عمر خستگی قطعات آهنگری، نرماله، کوئنچ و تمپر شده در چهار دانه تنش متفاوت مقایسه شد. علی‌رغم اختلاف ناچیز سختی و خواص کششی نمونه‌ها در دو حالت عملیات حرارتی، اختلاف عمر خستگی در چهار دانه تنش مشاهده شد. با توجه به پراکندگی ذاتی نتایج آزمون خستگی و ضرورت بررسی آماری، از آزمون مقایسه میانگین دو جامعه استفاده شد. برای حصول اطمینان از اختلاف آماری دو جامعه تعداد بیشتری نمونه مورد نیاز بود که با هم‌ارزسازی داده‌های چهار دانه تنش این امر میسر شد. نتایج آزمون میانگین دو جامعه نشان‌دهنده اختلاف عمر خستگی

قطعات آهنگری، کوئنچ و تمپر شده با عملیات نرماله و بدون عملیات نرماله می‌باشد. متوسط عمر قطعات نرماله شده حداقل ۱۸٪ بیشتر از عمر قطعات نرماله تخمین زده می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را نسبت به طرح اینترنشیپ، شرکت مساپکو و شرکت آهنگری پارت‌سازان که شرایط انجام این تحقیق را فراهم آوردند اعلام می‌دارند. نظرات ارزنده جناب آقای دکتر دوست‌پرست در خصوص تحلیل آماری موجب تقدیر و تشکر می‌باشد.

مراجع

1. ASM Metals handbook, *Properties and selection: Irons, steels and high-performance alloys*, ASM International Publication, Vol. 1., (1990).
2. ASM Metals handbook, *Failure analysis and prevention*, ASM International Publication, Vol. 11, (1986).
3. ASM Metals handbook, *Fractography*, ASM International Publication, Vol. 12, (1987).
4. ASM Metals handbook, *Fatigue and Fracture*, ASM International Publication, Vol. 19, (1996).
5. Tamura M., Yamada K., Shimizu M. and Kunio T., "On the relationship between threshold behavior of micro-crack and endurance limit of pearlitic-ferritic steel", *Transactions of the JSME*, Vol. 49, pp. 1378-1387, (1983).
6. Hussain, K., and De Los Rios R. R., "Microstructural effect on tensile and fatigue behavior of C-Mn steel", *J. Mater. Sci.*, Vol. 32, pp. 3565-3569, (1997).
7. Bonnen, J.J.F., and Topper, T. H., "The effect of bending overloads on torsional fatigue in normalized SAE 1045 steel", *Int. J. of Fatigue*, Vol. 21, pp. 23-33, (1999).
8. Tokaji, K., Ogama T., and Osako, S., "The growth of microstructurally small fatigue cracks in a ferritic-pearlitic steel", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 11 No. 5, pp. 331-342, (1988).
9. Zettl, B., Mayer, H., Ede, C. and Stanzl-Tschegg, S., "Very high cycle fatigue of normalized carbon steels", *Int. J. Fatigue*, Vol. 28, pp. 1583-1589, (2006).
10. De Los Rios, E. R., Tang, Z. and Miller, K.J., "Short crack fatigue behavior in a medium carbon steel", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 7 No. 2, pp. 97-108, (1984).
11. S. Suresh, *Fatigue of materials* (2nd ed.), Cambridge University Press, Cambridge, (1998).

12. R. W. Hertzberg: *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials* (4th ed.) Wiley, (1989).
13. Box, G. E. P., Hunter, W. G., and Hunter, J. S., *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*, John Wiley and Sons, (1978).