نشریه صنعت لاستیک ایران
سال ۲۶/شماره ۱۰۴/زمستان ۱۴۰۰

علمی- فنی

شناخت عوامل موثر بر دوام تایر و ارتباط بین آن‌ها

Identify the factors affecting on tire durability and the relationship between them

چکیده:

تایر به دلیل آنکه مستقیماً با عملکردهایی همچون ترمزگیری، شتاب‌گیری و راحتی سرنشین در ارتباط است، یک جزء بسیار مهم و ویژه برای خودرو می‌باشد. افزایش دوام تایر و اهمیت دادن به این پارامتر باعث افزایش امنیت جاده‌ای خواهد شد. نکته قابل توجه این است که عمر خستگی تایر باید همواره بیشتر از عمر سایش آن باشد و اگر عمر سایش افزایش یابد متناسب با آن عمر خستگی نیز باید افزایش یابد. خستگی یک علت معمول در مورد واماندگی تایرهای رادیال با بلت فولادی است. پارامترهایی همچون گرما، سرعت، ساختار تایر و پیرشدگی بر روی عمرخستگی تایر اثرگذار هستند. در این مقاله اثر عواملی همچون گرما، سرعت، عمر خستگی و پیرشدگی بر روی دوام تایر و ارتباط بین آنها مطالعه شده است همچنین نحوه ایجاد ترک و شروع رشد ترک در سر بلت بررسی شده است. در انتها تاثیر تعداد سیم‌های بلت و آرایش آن بر روی استحکام ناحیه بلت نشان داده شده است. در این مقاله نشان داده شده است که عامل مکانیکی به خصوص بحث خستگی تایر باعث ایجاد ترک و شروع رشد ترک بر اثر بارهای نوسانی می‌شود. همچنین به علت خاصیت ویسکوالاستیک کامپاند، در نواحی بحرانی تایر گرمای زیادی ایجاد می‌شود که این گرما باعث کاهش عمر تایر می‌شود. همچنین پیرشدگی همراه با گرما باعث کاهش استحکام کششی و تخریب تایر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دوام تایر، خستگی، پیرشدگی، بلت

نوع مقاله: مروری

مرتضی رشیدی‌مقدم[۱*]، فرشید ذوالعلی[۲]، فرحناز حاج ابراهیمی[۳]
۱- دکترای تخصصی، اداره تحقیقات و توسعه گروه صنعتی بارز، تهران، ایران
۲- کارشناسی ارشد، اداره تحقیقات و توسعه گروه صنعتی بارز، تهران، ایران
۳- کارشناسی ارشد، اداره تحقیقات و توسعه گروه صنعتی بارز، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

1-*morteza_rashidi@alumni.iust.ac.ir
2- morteza2046@gmail.com
3- morteza2455046@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲

مقدمه

تایر جزیی از وسیله نقلیه می‌باشد که وظیفه آن انتقال نیروها و گشتاورها به وسیله نقلیه است. این نیروها و گشتاورها حاصل پاسخ به واکنش‌های دینامیکی وسیله نقلیه و راننده است که نمونه‌ای از آن چرخش فرمان وسیله نقلیه می‌باشد و کمترین وظیفه تایر مربوط به تحمل نیروی وزن حاصل از وسیله نقلیه است. همچنین، تایرها تحت تاثیر شرایط مختلفی همچون سطوح جاده، شرایط محیطی، شرایط عملکردی، شرایط نگه‌داری و رخدادهای آسیب قرار می‌گیرند.

اصطلاح دوام تایر مربوط به درستی ساختار تایر در سرویس می‌باشد. به طور مثال در بعضی موارد، پارامتر مربوط به نرخ سایش لاستیک شکننده به عنوان یک پارامتر دوام در نظر گرفته می‌شود. مهندسان و محققان حوزه صنعت تایر، ساختار تایر را در راستای فاکتورهای عملکردی همچون سایش، راحتی سرنشین، راحتی چرخش تایر در پیچ‌ها، دوام، مقاومت غلتشی و غیره بهینه‌سازی می‌کنند. فاکتورهایی همچون هزینه و اقتصاد نیز بسیار مهم بوده و این پارامترها ممکن است در تضاد با یکدیگر باشند، به طوریکه بهبود یک مورد باعث افت مورد دیگر شود. به همین دلیل، تایرهای بسیار مختلف با عملکردهای مختلفی طراحی شده است به طوریکه برای مثال فاکتورهای موردنیاز در راستای طراحی تایرهای صحرایی[1] متضاد تایرهای برای سرعت بالا است. از جنبه نگاه به دوام تایر، سعی می‌شود که تایر طوری طراحی شود که یک تعادل بین خواص و ویژگی موردنیاز داشته باشد با این شرط که مصرف‌کننده مراقبت و نگه‌داری‌های اصولی را انجام دهد [۱].

هنگامی که یک تایر وامانده[2] می‌شود، لزوماً به این معنی نیست که یک نقص و کمبود در طراحی و یا ساختار آن وجود دارد. واماندگی ساختاری در یک تایر ممکن است در هر نقطه‌ای از تایر اتفاق بیفتد که در آن نقطه به عمر پیش‌بینی شده خود رسیده است، خواه تایر دارای عمق کامل شکننده باشد یا تایر دارای سایش حداکثری پس از گذشت چندین سال باشد. هر تایر می‌تواند دچار واماندگی شود. هدف طراحی یک محصول می‌تواند براساس ضوابط و استانداردهای حکومتی، صنعتی و شرکتی و همچنین برطبق نیاز مشتری باشد تا زمانی که تایر ساییده شود و تعویض گردد. به هر حال عواملی همچون شرایط سرویس سخت و یا رخدادهای آسیب زننده همچون جاده‌های بسیار ناهموار می‌تواند بر روی عمر سرویس تایر و کاهش آن تاثیرگذار باشد [۲].

اصول اولیه مربوط به دوام تایر

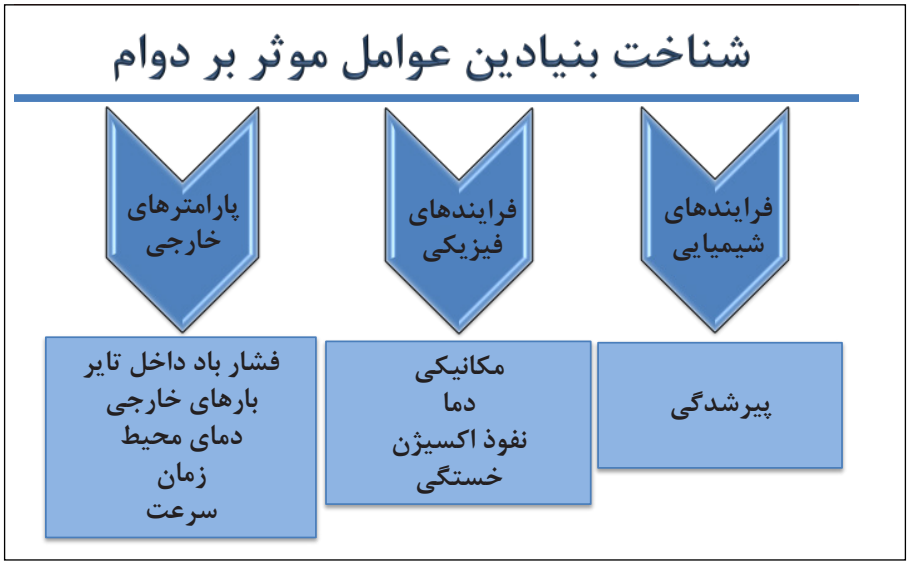
خستگی یک علت معمول در مورد واماندگی تایرهای رادیال با بلت فولادی است. در ساختار تایر، خستگی از طریق یک فرایند مربوط به رشد جلورونده ترک از نواحی دارای تنش و کرنش بیش از حد مجاز و در طول بارگذاری دینامیکی اتفاق می‌افتد. همچنین در یک ماده ویسکوالاستیک، فاکتورهایی همچون دما و نرخ بارگذاری بر روی استحکام ماده تاثیرگذار است. آسیب‌های ناشی از شکست (مربوط به بلت و لایه سیمی)، پارگی (مربوط به آمیزه)، پنچری، عدم خلوص و فشار داخلی در محدوده ساختار داخلی درون تایر باعث افزایش سرعت روند فرایند خستگی و یا واماندگی ناگهانی می‌شود [۳].

در بحث شناخت بنیادین عوامل موثر بر دوام تایرها می‌وان پارامترهای بسیار زیادی نام برد که این پارامترها در سه حوزه پارامترهای خارجی، پارامترهای مربوط به فرایندهای فیزیکی و پارامترهای مربوط به فرایندهای شیمیایی تقسیم‌بندی کرد. این سه حوزه همراه با فاکتورهای موثر آن‌ها در شکل ۱ آورده شده است.

فشار باد داخل تایر و بارهای خارجی

بارهای خارجی که بر روی تایر اثر می‌گذارند می‌توانند ناشی از وزن خودرو، نیروی جانبی، زاویه لغزش، گشتاورهای حاصل از ترمزگیری و شتاب‌گیری و نیروهای ضربه به علت ناهواری‌های جاده باشد. این نیروهای ضربه‌زننده باعث کنده‌شدن لایه رویه تایر

1. Off-road 2. Fail



شکل ۱- عوامل موثر بر دوام تایر

می‌شود و بر اثر این کنده‌شدن آب وارد ناحیه قرارگیری بلت‌ها شده و باعث خوردگی ناحیه بلت می‌شود. در بحث نیروی جانبی و زاویه لغزش، ناحیه بلت ادج[1] تحت تاثیر این دو نیرو بسیار دچار تغییرشکل می‌شود. برروی محور فرمان وسیله نقلیه، تنش‌ها و کرنش‌هایی که باعث افزایش گرما تحت عنوان تجمع حرارتی شده درنهایت باعث تخریب ناحیه بلت و رویه تایر به مرور زمان می‌شوند. عواملی همچون مدت و نرخ پیچش[2] و تاریخچه زاویه لغزش[3] حاصل از پیچش بر روی این افزایش گرما اثرگذار خواهد بود. به‌طورکلی، این بارهای خارجی منجر به تنش‌های مکانیکی در تایر به خصوص در نواحی بلت ادج و بید تایر می‌شود که در اثر حرکت دورانی تایر منجر به تنش‌های مکانیکی دینامیکی و هدر رفتن انرژی و نهایتا افزایش دما می‌شود [۴].

فشار داخلی تایر از دو جنبه قابل بررسی است، جنبه اول تاثیری که فشار داخلی تایر بروی روی نفوذ اکسیژن و انتشار آن دارد و جنبه دیگر آن بحث تغییرشکل الاستیک تایر است. در حالتی که بار روی تایر ثابت باشد، با افزایش فشار، مقدار تغییرشکل تایر کاهش پیدا می‌کند که این باعث کاهش تنش مکانیکی شده و یک اثر مثبت بر روی دوام تایر است. برای حالتی که مقدار تغییرشکل تایر ثابت است. با افزایش فشار، مقدار بار نیز باید افزایش یابد که باعث افزایش سطح تنش در تایر می‌شود که این افزایش فشار همراه با افزایش بار یک اثر منفی بر روی دوام تایر خواهد داشت [۴].

پارامترهای بار و فشار داخلی تایر دو پارامتر اساسی است که بر روی عملکرد و دوام تایر تاثیرگذار هستند، این دو پارامتر را می‌توان در فاکتوری به عنوان تغییرشکل عمودی تایر بررسی کرد. با استفاده از مدل بسیار ساده نشان داده شده در شکل ۲، وقتی که یک تایر تحت بار P قرار می‌گیرد، تفاوت بین مقدار شعاع بدون بار (r_0) با فاصله بین مرکز چرخ و سطح زمین در حالت بارگذاری شده (r_L) همان تغییر شکل عمودی (d) است [۱].

$$d = r_0 - r_L$$

با در نظر گرفتن تایر تحت فشار داخلی به عنوان یک فنر عمودی، و به کار بردن قانون هوک:

$$P = Kd$$

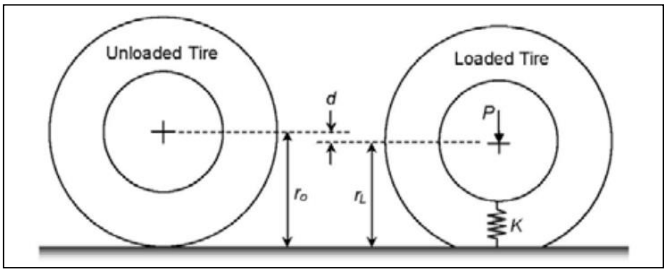
که سفتی عمودی K[4]، اصولا قابل استناد به فشار داخلی نیز

1. Belt Edge 2. Turning 3. Slip Angle 4. Vertical stiffness

می‌باشد. کار انجام شده مربوط به فشرده‌سازی یک فنر خطی و به صورت زیر است:

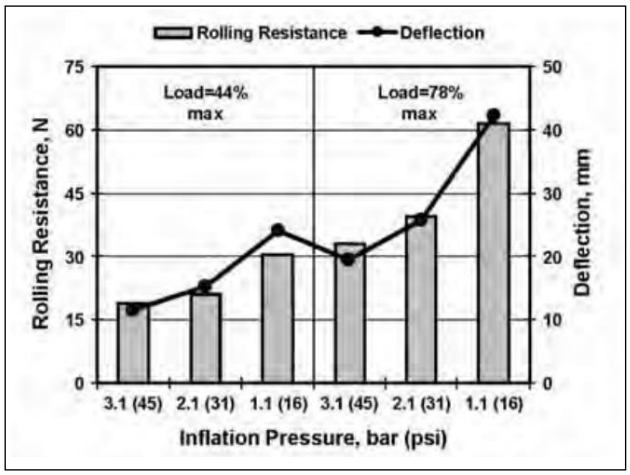
$$W=1/2\ Kd^2$$

مقدار کار انجام شده از دو طریق افزایش می‌یابد، الف) با ثابت نگه داشتن مقدار بار P و کاهش مقدار K (به طور مثال با کاهش فشار) مقدار تغییر شکل d افزایش پیدا می‌کند ب) با ثابت نگه داشتن مقدار K و افزایش بارگذاری، مقدار تغییر شکل d افزایش پیدا می‌کند.



شکل۲- تایر تحت بارگذاری و بدون بار [۱]

هنگامی‌که تایر در حال دوران است یک مکانیزم اتلاف انرژی مکانیکی خودش را از طریق تولید گرما آشکار می‌کند. با افزایش بارگذاری روی تایر یا با کاهش فشار (که منجر به کاهش استحکام K می‌شود) مقدار اتلاف انرژی افزایش پیدا می‌کند که منجر به افزایش مقاومت غلتشی تایر می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده

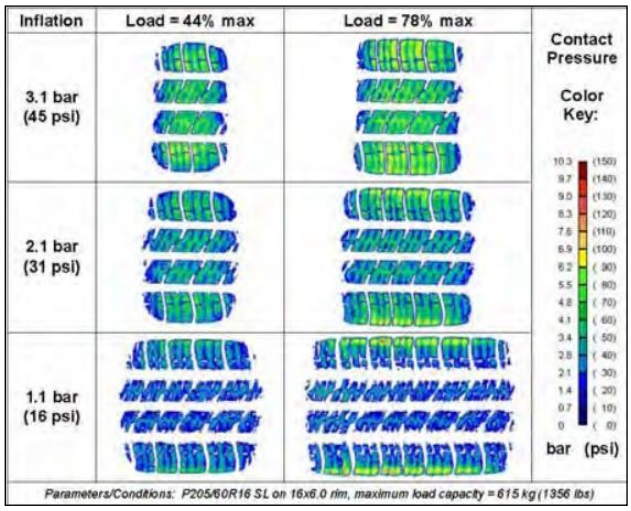


شکل۳- مقاومت غلتشی و تغییر شکل عمودی یک تایر سواری [۱]

است. همچنین در این شکل قابل مشاهده است که اثر فشار داخلی بر روی مقاومت غلتشی در بارهای بالاتر بیشتر مشهود است.

اثر مربوط به تغییرشکل عمودی تایر بر روی اندازه، شکل و مقدار تنش‌ها در ناحیه تماس(فوت پرینت) در شکل ۴ نشان داده شده است. طول فوت پرینت در جهت محیطی با افزایش بار و یا کاهش فشار داخلی افزایش پیدا می‌کند.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که فشار تماس در لبه‌های فوت پرینت (شولدر) در کمترین فشار داخلی به خصوص در بیشترین بار رو به کاهش است که علت آن می‌تواند به کمانش ترد و ساختار بلت برگردد.



شکل۴- شرایط تماس سطح تخت برای تایر [۱]

یکی از موضوعات بسیار قابل توجه در حوزه دوام تایر مربوط به مقدار چگالی انرژی کرنشی در موقعیت بین لبه‌های بلت[1] در ناحیه شولدر است. در طی فرآیند تغییر شکل، کرنش‌های بین‌لایه‌ای[2] در ناحیه قرارگیری بلت‌ها[3] به علت خمش و کشش ترد توسعه می‌یابند. این کرنش‌ها در ناحیه لبه‌های بلت بسیار شدید هستند. در سال‌های اخیر مکانیزم بنیادی مربوط به توسعه کرنش و تنش توسط آنالیز المان محدود[4] در جهت محاسبات موردنیاز انجام می‌شود که در شکل ۵، چگالی انرژی کرنشی سیکلی برای یک

1. Belt edges 2. Interlaminar 3. Belt package 4. Finite element method

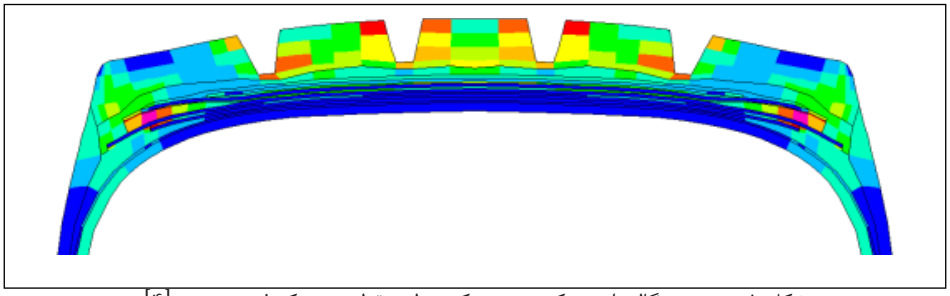
المان جامد[1] در تایر P215/55R18 تحت بار و فشار استاندارد نشان داده شده است [۴].

سرعت

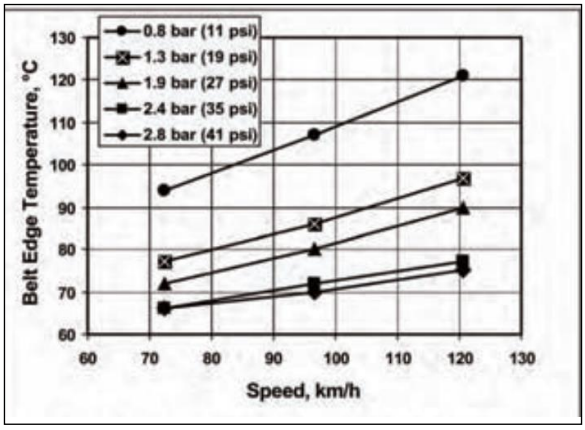
تغییر دادن سرعت چرخش تایر بر روی نیروی گریز مرکز و فرکانس تغییرشکل دینامیکی اثرگذار خواهد بود. این تغییرات باعث تغییر در مقدار تنش و کرنش در اجزای تایر خواهد شد که بر روی ویژگی‌های تولید گرما در تایر موثر خواهد بود. تغییرشکل‌هایی اضافه ناشی از موج‌های ثابت[2] اتفاق خواهد افتاد که این پدیده به اندازه، ساختار، سفتی و به‌ویژه به سرعت چرخش وابسته خواهد بود. تاثیر اصلی ناشی از سرعت زیاد، برروی فرکانس تغییرشکل‌های دینامیکی، اتفاق می‌افتد. با هر چرخش، یک سکشن شعاعی از تایر در لحظه عبور از ناحیه تماس تایر با زمین تحت تنش-کرنش دینامیکی قرار می‌گیرد. افزایش فرکانس سیکلی باعث افزایش تولید گرما می‌شود و بنابراین بر عملکرد تایر و به خصوص بر پارامترهای درگیر با دوام تایر تأثیرگذار خواهد بود.

نیروی گریز از مرکز طبق رابطه $F=mr\omega^2$ به جرم، فاصله از محور دوران و مجذور سرعت زاویه‌ای وابسته است. برای یک تایر، ترد و ساختار بلت در دورترین نقطه از محور دوران قرار دارند و شامل یک بخش قابل توجه از جرم تایر می‌باشند. بنابراین، نیروی گریز از مرکز بر روی ناحیه ترد و به‌خصوص شولدرها در زمانی که در هر چرخش تحت تنش-کرنش دینامیکی قرار می‌گیرند، تاثیر می‌گذارد[۱].

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش سرعت باعث افزایش دما در تایر به خصوص در ناحیه شولدر می‌شود. در شکل ۶، نتایج برای یک تایر مورد ازمون قرار گرفته در سرعت 120 Km/h در بار ثابت و فشار داخلی‌های متفاوت، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای هر فشار ثابت رابطه بین سرعت و تغییرات دما در ناحیه بحرانی لبه بلت تقریبا خطی است، به طوریکه با کاهش فشار، شیب رابطه خطی افزایش پیدا می‌کند [۵ و ۶].



شکل ۵- توزیع چگالی انرژی کرنشی در یک سطح مقطع در مرکز فوت پرینت [۴]



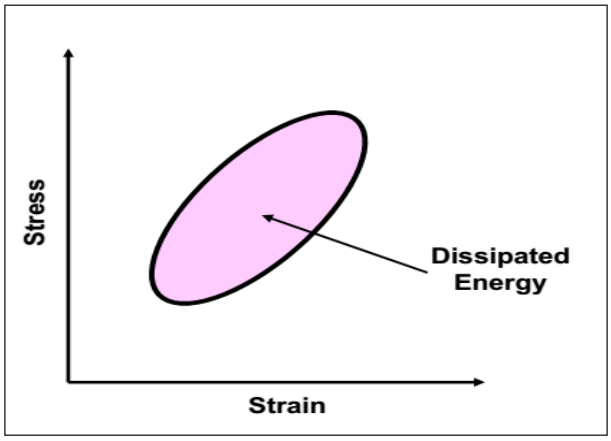
شکل۶- دمای ناحیه بلت از یک تایر در حال کارکرد برحسب سرعت در فشارهای داخلی متفاوت [۵ و ۶]

1. Solid element 2. Standing waves

برای مقابله با نیروی گریز از مرکز، راهکارهای متفاوتی وجود دارد. صرف از نظر از کاهش سایز تایر یا وزن آن که یک روش غیرعملی است، یک روش معمول در طراحی، استفاده از تقویت‌گر محیطی[1] در ناحیه ترد تایر است. در صنعت تایر به این منظور از کپ پلای[2]، استریپ[3] یا لایه استفاده می‌شود که ممکن است تک جزیی یا چند جزیی باشد. این به ویژه زیر سطح ترد اطراف ناحیه بلت فولادی و اغلب در ناحیه شولدر می‌باشد. در حقیقت، این اجزا، رشد تایر ناشی از نیروی گریز از مرکز در سرعت بالا را محدود می‌کند. برای تایرهای سواری به خصوص در سرعت‌های بالاتر از 180km/h این طراحی لازم است. به‌هرحال، برای تایرهای کامیونی سبک یا تایرهایی با Lugهای ترد سنگین ممکن است در سرعت‌های پایین‌تر نیاز پیدا کند.

گرما

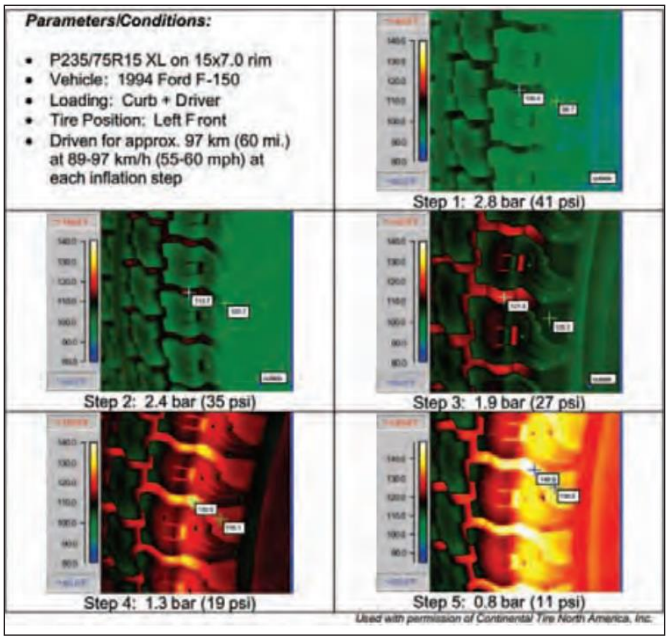
همانطور که قبلاً به آن اشاره شد، تایر که در حال دوران بر روی یک سطح است، تولید گرما می‌کند. لاستیک‌ها دارای خواص ویسکوالاستیک هستند. در بارگذاری کششی مقدار انرژی کرنشی ذخیره شده و در برگشت انرژی آزاد می‌شود. اختلاف این دو انرژی طی تغییرشکل رفت و برگشتی بصورت انرژی اتلافی هدر می‌رود که حاصل خاصیت ویسکوز لاستیک است و در شکل ۷ نشان داده شده است[۷].



شکل۷- منحنی تنش بر حسب کرنش برای یک رابر تحت کشش-فشار [۷]

هنگامی‌که یک تایر به صورت دینامیکی در حال تغییرشکل است، به یک تعادل گرمایی می‌رسد که این تعادل گرمایی خود را در ترم‌های مربوط به دماهای اجزای داخلی تایر و دمای محیط احاطه‌شده در اطراف تایر نشان خواهد داد. تغییرات مربوط به شرایط سرویس تایر (شامل فشار، بار، شرایط جاده و ...) و تغییرات فیزیکی ساختار تایر خود می‌تواند عاملی در تغییرات شرایط تعادل گرمایی باشد که باعث می‌شود دماهای اجزای داخلی تایر و دمای محیط احاطه شده اطراف تایر تغییر بکند.

افزایش تولید گرما یک فاکتور اصلی در واماندگی تایر است. افزایش دما سبب کاهش مقاومت پارگی[4] لاستیک خواهد شد که نتیجه آن افزایش ترویج شروع ترک و رشد ترک خواهد بود. از طرفی باید توجه کرد که افزایش دما باعث کاهش دائمی خواص مواد می‌شود که این خود بسته به تاریخچه[5] افزایش دما است. ناحیه شولدر در تایرهای رادیال باری ازجمله نواحی است که بالاترین تولید گرما را دارد. شکل ۸ نشان می‌دهد که دما در ناحیه شولدر با افزایش تغییرشکل، افزایش بیشتری خواهد داشت[۱].



شکل۸- تصویر ترموگرافی از یک تایر در سرویس با کاهش فشار [۱]

1. Circumferential reinforcement 2. Cap Ply 3. Strip

نتایجی که از شکل ۸ قابل استنتاج است به این صورت است که:

۱- دمای لبه سیم‌های بلت در اکثر اوقات به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

۲- از آنجایی‌که دوام لبه بلت به دمای آن وابسته است، انتخاب یک آمیزه با فاکتور اتلاف پایین و ضریب هدایت حرارتی بالا برای ناحیه تاج بلت، هدف نهایی برای کاهش تولید حرارت در تایر است.

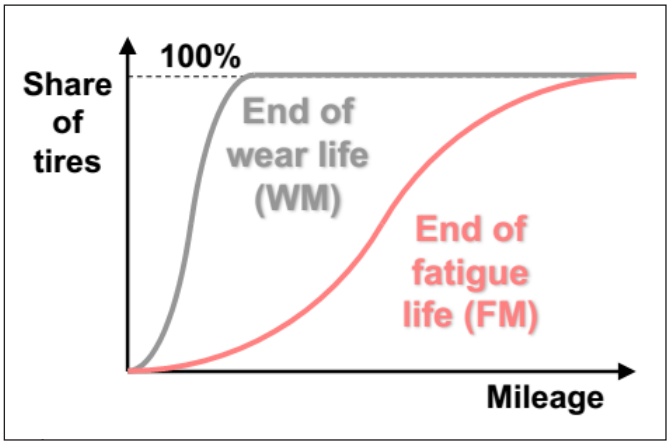
۳- با انتخاب آمیزه با فاکتور اتلاف پایین و ضریب هدایت حرارتی بالا، تاثیرات مفید این نوع آمیزه برای بهبود دوام ناحیه بید تایر نیز قابل‌ملاحظه می باشد.

تولید گرما بیش از حد باعث تنزل دائمی خواص لاستیک می‌شود که این خود باعث کاهش استحکام کششی[1] و باعث نرمی کلی[2] می‌شود. سرانجام، یک جز از تایر که دمای آن به حد دمای بحرانی می‌رسد، دچار زوال لاستیک[3] می‌شود که باعث کنده شدن تکه‌هایی از ترد یا کل ترد می‌شود. لاستیک تخریب‌شده دارای شکل متخلخل است.

مفاهیم مربوط به رشد ترک و خستگی در تایر

عمر سایشی و عمر خستگی پیش‌بینی شده تایر بستگی به شرایط سرویس دارند. شرایط سرویسی سنگین، عمر سایشی و عمر خستگی تایر را کوتاه می‌کند. بعلاوه سایش تایر ممکن است بر روی شرایط خستگی آن تاثیر بگذارد. اگر عمر خستگی کمتر از عمر سایش باشد، نارضایتی مشتری را به دنبال دارد. هدف مطلوب این است که عمر خستگی از عمر سایش بیشتر باشد. در نمودار شکل ۹ می‌توان نرخ تغییرات این دو عامل را به خوبی مشاهده نمود. لازم به ذکر است که با افزایش عمر سایشی تایر، لازم است که عمر خستگی تایر نیز افزایش یابد. به عبارت دیگر افزایش دوام باید به صورت هماهنگ برای تمام پارامترهای مهم هدف‌گذاری شود[۴].

خستگی دینامیکی یکی از مهم‌ترین آسیب‌های ماده تحت بار مکانیکی نوسانی است و در بیشترین مقدار تنش و کرنش مکانیکی و معمولا در سطح ماده یا در سطح مشترک مواد روی می‌دهد) انتهای برش خورده سیم‌ها در تایر از نظر وقوع پدیده خستگی ناحیه‌ای حساس محسوب می‌شود). پدیده خستگی با ایجاد ترک‌های ریز در ساختار ماده شروع شده و در ادامه، موجب رشد و ایجاد ترک‌هایی با ابعاد ماکروسکوپیک[4] در ساختار ماده خواهد شد. در مواردی و البته نه به صورت اجتناب‌ناپذیر، در مجاورت ناحیه‌ای از ماده که دچار شکست دینامیکی شده است آمیزه دچار تغییرات شیمیایی می‌شود.



شکل ۹- مقایسه عمر خستگی و عمر سایشی تایر [۴]

واماندگی‌ها در ساختار تایر

در بحث دوام، ناحیه بسیار اثرگذار بر روی دوام تایر در ناحیه انتهایی بلت و انتهایی لایه است. به صورت محلی، نواحی انتهایی تقویت‌کنندگان تایر همانند نواحی انتهای بلت و انتهای سیم لایه دارای تغییرشکل بالایی هستند. به‌طوریکه، در محل بلت ادج مقدار کرنش‌ها در حالت حرکت تایر می‌تواند به ۵۰ درصد نیز برسد. ناحیه تغییرشکل محلی با رشد ترک تغییر خواهد کرد و به صورت محلی، استحکام ساختار نیز تغییر می‌یابد. بنابراین، این نواحی پتانسیل بالایی برای شروع رشد ترک و ایجاد عیب در تایر دارند که با شروع رشد ترک و رسیدن آن به مقدار بحرانی، عمر تایر به پایان خواهد رسید. در تایرهای رادیال باری بالاترین سطح تنش-کرنش

1. Tensile strength 2. General softening 3. Reversion 4. macroscopic

(چگالی انرژی کرنشی) در نوک لبه بلت اتفاق خواهد افتاد.

تحت تنش یا کرنش‌های بسیار زیاد، هر ماده‌ای ممکن است وامانده شود. مواد تایر تحت اثر عوامل مختلفی همچون خستگی، سایش، خوردگی و آسیب‌های خارجی دیگر قرار می‌گیرند. مقدار و فرکانس نیروها و گشتاورهای خارجی می‌تواند سرانجام باعث خستگی یا پارگی لاستیک و یا باعث پارگی سیم‌های فولادی و نخ‌های پلی استر شود. این فرآیند خستگی و پارگی می‌تواند به کندی انجام شود و یا تغییرات سریع داشته باشد که بستگی به مقدار و نرخ انرژی وارد شده و شرایط محیطی همچون دما دارد [۸ و ۹].

وقتی که یک تایر پخته می‌شود، لایه‌های تایر و اجزای آن با یکدیگر مخلوط و یا همگن نمی‌شوند. در طی فرآیند پخت[1]، مواد به طور شیمیایی به یکدیگر متصل می‌شوند. شکست و شروع رشد ترک می‌تواند در سطح تماس دو ماده یا در هر کدام از مواد جداگانه رخ دهد یا ترکیبی از سطح تماس و داخل ماده‌ها رخ دهد. ترک‌های داخل لاستیک می‌تواند در نواحی یا نزدیکی سطح مشترک بین لاستیک و کورد تایر ایجاد شود که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنین ترک‌هایی ممکن است اطراف کورد شروع به رشد کرده و یک حفره تولید کند. رشد ترک می‌تواند حاصل به هم پیوستن چندین ریزترک باشد. شکل ۱۰ نشان‌دهنده رشد ترک در نواحی بلت فولادی تایر است.

نحوه اثرگذاری خستگی بر ماده الاستومر

برای فهم نحوه تاثیر خستگی بر ماده الاستومر ابتدا باید ساختار این نوع مواد شناسایی شود. در ساختار ماده الاستومری، به صورت موضعی شبکه‌ای ناهمگن از زنجیره‌هایی با طول و انعطاف‌پذیری متفاوت وجود دارد. در طول اثر خستگی بر ماده، بخش‌هایی از این زنجیره‌ها به نحوی دچار گسیختگی می‌شوند که نمی‌توانند ساختار خود را با کرنش محلی وارد شده تطبیق دهند. در صورتی که انتهای آزاد زنجیره‌های ایجاد شده نتوانند با یکدیگر ترکیب شوند، ساختار ماده در همین ناحیه ضعیف خواهد شد. می‌توان گفت حضور اکسیژن در جلوگیری از ترکیب شدن انتهای آزاد زنجیره‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای دارد. به عبارتی دیگر، غلظت موضعی اکسیژن بر شکل‌گیری و رشد ترک‌ها تاثیرگذار است. علاوه بر اکسیژن، به دلیل تاثیر دما بر میزان انعطاف‌پذیری زنجیره‌های ماده، خستگی تابعی از دمای موضعی نیز می‌باشد.

ترک بین لبه های بلت

ترک های ایجاد شده در ناحیه نزدیک به کورد پلی استر

شکل ۱۰- ترک‌های نواحی بحرانی تایر

1. Vulcanization

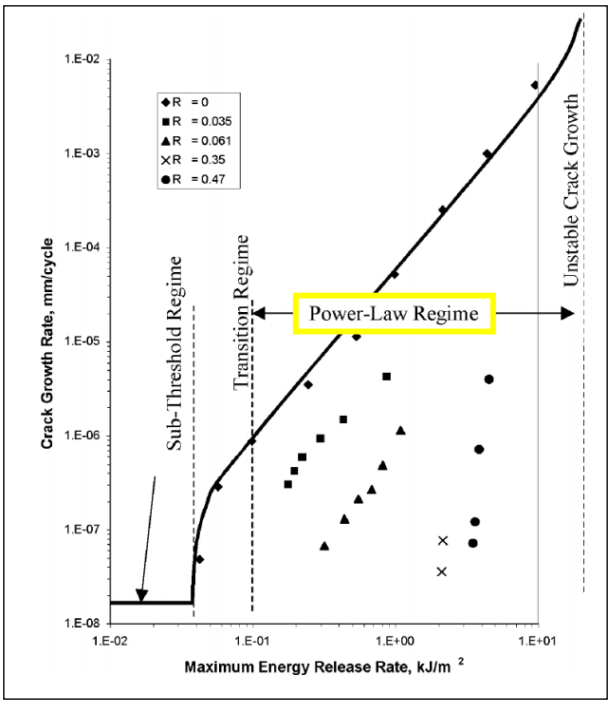
ترک‌های ایجاد شده در ساختار ماده به صورت محلی موجب کاهش سفتی ماده می‌شوند. در شرایط تغییرشکل با نیروی کنترل شده کاهش سفتی موجب افزایش کرنش در ماده و در نتیجه افزایش سرعت رشد ترک خواهد شد. همچنین خستگی تابعی از بار مکانیکی وارد شده (دامنه بار، بار حداقل، نوع بار وارد شده (برشی، کششی/ فشاری، زمان رهایی[1])) می‌باشد. نمودار شکل ۱۱ تغییرات سرعت رشد ترک در اثر خستگی را به صورت تابعی از بار مکانیکی نشان می‌دهد. باید در نظر داشت که مقاومت خستگی آمیزه می‌تواند در اثر پیرشدگی[2] به شدت تغییر کند. در نمودار سرعت رشد ترک بر حسب بار مکانیکی، G نرخ انرژی تلف شده در اثر شکست است و رابطه ریاضی آن بصورت کاهش انرژی پتانسیل کل به ازای واحد سطح شکست تعریف می‌شود. بر اساس نمودار مشخص است که به ازای مقادیر بزرگتر R شیب نمودار و در نتیجه سرعت رشد ترک بیشتر خواهد بود (R= G min/G max).

ماکزیمم مقدار بار خارجی وارد شده می‌تواند منجر به شکل‌گیری آسیب‌های موضعی شده و در نتیجه به میزان قابل ملاحظه‌ای عمر دوام را کاهش دهد. پایان عمر دوام تایر زمانی خواهد بود که اندازه‌ی ترک‌ها به حالت ماکروسکوپیک می‌رسد. فرآیند اثرگذاری خستگی بر بلت تایر رادیال سواری (شکل ۱۲) به صورت زیر است[۴]:

۱. یک فضای خالی در انتهای تمام بلت ها قرار دارد. دلیل وجود آن این است که انتهای بریده شده‌ی سیم‌های بلت پوشش برنجی ندارد و در نتیجه لاستیک به سیم فولادی نمی‌چسبد. فضای خالی در انتهای سیم‌های بلت تایر به دلیل عدم چسبندگی لاستیک با سیم‌های برش خورده و در اثر از بین رفتن پوشش برنجی، ایجاد می‌شود.

۲. با حرکت و جابجایی بلت‌ها فضاهای خالی رشد می‌کنند.

۳. با ادامه‌ی حرکت و جابجایی بلت فضاهای خالی انتهای سیم‌های مجاور به یکدیگر وصل می‌شوند. (هر چه تعداد سیم‌های بکار رفته در بلت[3] کمتر باشد مدت زمان لازم برای رسیدن فضاهای



شکل۱۱- سرعت رشد ترک در اثر خستگی به صورت تابعی از بار مکانیکی[۴]

1. relaxation time 2. Aging 3. End count

خالی به یکدیگر بیشتر خواهد بود).

۴. شکست در زیر بلت به دلیل تنش برشی میان بلت‌ها گسترده‌تر خواهد شد.

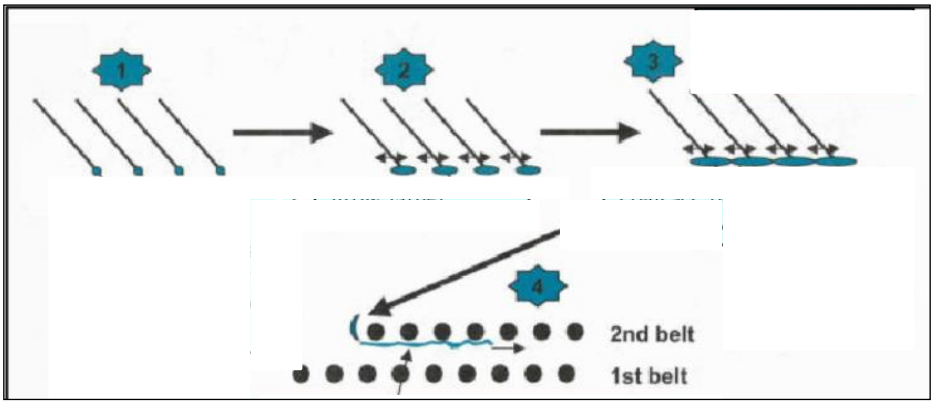
همچنین در جدول (۱) تاثیر خستگی با تاثیر پیرشدگی بر تایر نشان داده شده است:

تاثیر نوع کورد و تعداد سیم‌ها در واحد سانتی‌متر مربع[1] بر دوام بلت

در شکل ۱۳ نتیجه تست دوام بلت را برای سه چیدمان مختلف استیل کورد در بلت تایر رادیال باری نشان می‌دهد. مقایسه استیل کورد قرمزرنگ با استیل کورد زردرنگ نشان می‌دهد که با وجود

جدول ۱- تاثیر خستگی و تاثیر پیرشدگی بر تایر

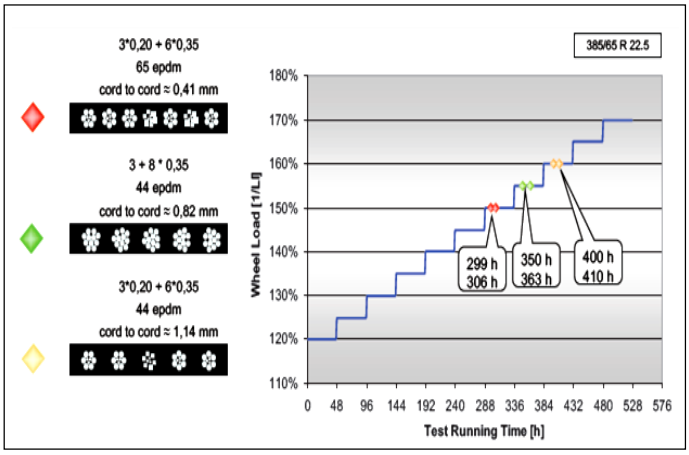
پیرشدگی	خستگی	
افت خواص ماده (فرایند شیمیایی)	تولید شدن سطح جدید (شروع و رشد ترک)، نوع فرایند فیزیکی است.	اثر
توزیع آسیب به صورت یکنواخت	تمرکز اصلی آسیب در نقاط ماکزیمم تنش/ کرنش	نحوه توزیع در ماده
دما و زمان	بار مکانیکی پریودیک	عامل اصلی بوجود آورنده
کاهش شیب تغییرات در طول زمان	افزایش شیب تغییرات طی مسافت پیموده شده	رشد و گسترش در مدت سرویس تایر
نوع ۱: افزایش کلی نوع۲: کاهش کلی	کاهش به صورت موضعی در محل آسیب	تاثیر بر stiffness



شکل۱۲- فرآیند اثرگذاری خستگی بر بلت تایر رادیال سواری[۴]

1. EPDM

فرمول ساختاری یکسان، استیل کورد با مقدار EPDM کمتر تحت بار بزرگتر وارد شده، دوام بیشتری داشته است. در پایان می‌توان گفت در محدوده ۱,۴ تا ۲ میلیمتر، هرچه فاصله بین کوردها بیشتر باشد دوام بلت بهتر خواهد بود و نوع استیل کورد بکار رفته تاثیری در دوام بلت ندارد.



شکل ۱۳- تست دوام بلت

مفاهیم مربوط به پیرشدگی در تایر

درک کلی از فاکتورهایی که منجر به تخریب پلیمر شده و مکانیزم‌هایی که توسط آن‌ها پلیمر تخریب می‌شود، به انتخاب محیط کاربری این مواد،کمک می‌کند. تخریب، روی ویژگی‌های ظاهری پلیمر تاثیر می‌گذارد. برخی تاثیرگذاری‌های رایج، منجر به بی‌رنگ شدن یا شکستن پلیمر می‌شود. تحت شرایط نهایی، آزاد شدن محصولات فرار یا حتی احتراق ممکن است اتفاق بیافتد. پلیمرها می‌توانند در اثر گسیختگی پیوندهای مولکولی تخریب شوند. این نوع تخریب ممکن است منجر به کاهش وزن مولکولی شود. چنین تخریبی می‌تواند در نتیجه‌ی تاثیرات جوی بر روی پلیمر و یا قرارگرفتن پلیمر در معرض گرما یا پرتو رخ دهد. حلال‌ها نیز می‌توانند باعث ایجاد تخریب و تغییر در ویژگی‌های مکانیکی پلیمرها شوند. درک چگونگی فعل و انفعال پلیمرها و حلال‌ها و تشکیل محلول‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است، چراکه محلول‌ها اساس تشکیل انواع رنگ و چسب هستند[۱۱ و ۱۲].

روش‌های زیادی را می‌توان برای شناسایی مکانیزم تخریبی پلیمرها و مواد تشکیل شده در نتیجه تخریب پلیمرها به کار برد. عنصر جوی نظیر اکسیژن یا ازون می‌توانند گسستگی زنجیر در پلیمر را تسریع کنند. گرمانرم‌ها و الاستومرها به روش پراکسیدی، در شرایط محدود تخریب می‌شوند. پروکسیده‌شدن، یک واکنش زنجیری رادیکالی آزاد است که با هیدروپروکسیدها آغاز می‌شود:

$$PH + POO\cdot \rightarrow P\cdot + POOH$$

$$P\cdot + O_2 \rightarrow POO\cdot$$

که PH نمایانگر یک مولکول پلیمر است. هیدروپرکسیدها ترکیبات ناپایداری هستند به گونه‌ای که پیوند پروکسیدی وقتی گرما ببیند دستخوش تجزیه‌ی گرمایی می‌شود. این واکنش توسط یون‌های فلز واسطه که مهم‌ترین آغازکننده‌های پروکسیدشدن در عدم حضور نور هستند، کاتالیز می‌شود:

$$2POOH \xrightarrow{Heat,\ M+/M2+\ catalyst} PO\cdot + POO\cdot + H_2O$$

فرآیند اصلی آغاز در یک محیط آزاد، نورکافت یا فتولیز هیدروکسیدهاست:

$$ROOH \xrightarrow{h\nu,\ M+/M2+\ catalyst} RO\cdot + \cdot OH$$

یک پلیمر در طول فرآیند تخریب ممکن است در معرض نیروهای برشی قوی قرار گیرد و این موضوع منجر به اکسیدشدن مکانیکی شود:

$$P\text{-}P \xrightarrow{shear} 2P\cdot \xrightarrow{O_2} 2\ POO\cdot \xrightarrow{PH} 2POOH$$

که در فرمول بالا P-P نمایانگر یک مولکول پلیمر است. آنتی‌اکسیدان‌ها، پایدارکننده‌هایی هستند که به پلیمرها اضافه و از پروکسیدشدن آنها ممانعت به عمل می‌آورند. این افزودنی‌ها تشکیل هیدروپروکسیدها را کنترل می‌نمایند. عوامل تجزیه‌کننده پروکسید، هیدروپروکسید را به رادیکال‌های آزاد تبدیل می‌کنند.

عوامل تجزیه‌کننده پروکسید اغلب شامل ترکیباتی محتوی سولفور دو ظرفیتی یا فسفر سه ظرفیتی هستند:

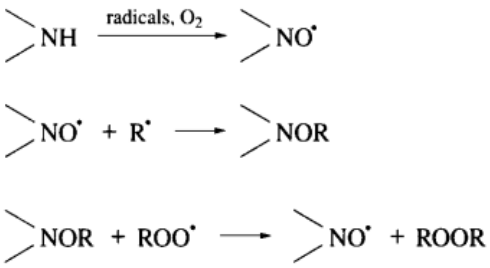
$$R2S + ROOH \rightarrow R2S{=}O + ROH$$

$$R3P + ROOH \rightarrow R3P{=}O + ROH$$

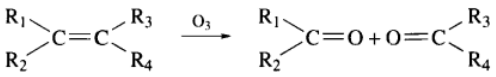
مکانیزم دیگری که توسط آن، آنتی‌اکسیدان‌ها عمل می‌کنند، واکنش با رادیکال‌های پروکسی است. این ترکیبات، تخریب ایجاد شده به وسیله چنین رادیکال‌هایی را با رقابت با پلیمر، کاهش می‌دهند.

$$ROO\cdot + RH \longrightarrow ROOH + R\cdot$$

فنول‌های استخلاف‌دار و آمین‌های آرماتیک نوع دوم، می‌توانند به عنوان منابع رادیکال‌های پروکسی مورداستفاده قرار گیرند. پلیمرها، همچنین می‌توانند با فرآیند به تله انداختن رادیکال، از اکسید شدن نوری محافظت شوند. در واقع افزودنی‌هایی که در این مکانیزم شرکت می‌کنند علاوه بر آنتی‌اکسیدان‌ها، تثبیت‌کننده‌های نوری نیز می‌باشند. این افزودنی‌ها، هم رادیکال‌های آلکیل و هم رادیکال‌های پروکسی را به تله انداخته و بنابراین از طریق افزایش تعداد مراحل تخریب، در این فرایند دخالت می‌کنند.



افزودنی‌هایی که رادیکال‌ها را به تله می اندازند، اغلب آمین‌های غیرآزاد هستند. اوزون که از عملکرد نور فرابنفش یا تخلیه الکتریکی برروی اکسیژن ایجاد شده است نیز منجر به تخریب چشمگیری در پلیمرها به ویژه در لاستیک می‌شود. اغلب، غلظت اندکی از ازون در محیط‌های صنعتی منجر به ایجاد ترک در مواد الاستومر می‌شود. در طی فرآیند ازونولیز، پیوندهای دوگانه در لاستیک گسسته و ایجاد دو ترکیب کربونیلی را می نمایند[۱۳، ۱۴ و ۱۵].



پیرشدگی

پیرشدگی[1] به معنای یک تغییر پیوسته و برگشت‌ناپذیر در خواص مواد در طول عمر تایر است. این تغییرات شامل موارد ذیل می‌باشد:

سخت‌تر شدن آمیزه در اثر تشکیل اتصالات عرضی اضافی

کوتاه‌تر شدن پیوندهای گوگرد (S1 – S2 - … - S8)

ایجاد پیوندهای بیشتر گوگردی

طولانی‌تر شدن زنجیره اصلی پلیمر (C – C , C – O - C)

نرم شدن پلیمر

تخریب زنجیره اصلی پلیمر

تبدیل پیوندهای عرضی گوگرد به حلقوی (Reversion)

پدیده‌های فوق همگی باهم اتفاق افتاده و با یکدیگر در تعامل می‌باشند.

شکل ۱۴ بیانگر عوامل موثر بر پیرشدگی آمیزه هستند[۱۵]:

علاوه بر عوامل خارجی (فشار باد داخلی، دما و زمان) ویژگی‌های آمیزه نیز بر پیرشدگی تاثیرگذار هستند این ویژگی‌ها می‌توانند شامل موارد زیر باشد:

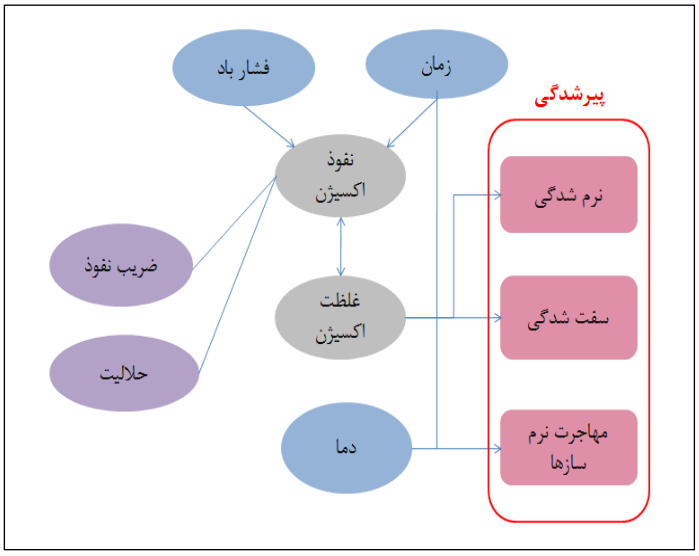
وجود پیوندهای دوگانه

میزان گوگرد

تاثیر اکسیژن بر پیرشدگی تایر

واکنش اکسیژن با الاستومرها باعث تخریب زنجیره‌ی اصلی و اتصالات عرضی می‌شود. در دماهای پایین تشکیل اتصالات عرضی اکسیژن رخ می‌دهد که منجر به افزایش مدول و سختی و نیز کاهش ازدیاد طول تا نقطه پارگی می‌شود. با این وجود،

1. Aging



شکل ۱۴- عوامل موثر بر پیرشدگی آمیزه[۱۵]

تخریب زنجیره‌ی الاستومرها در دمای بالاتر اتفاق می‌افتد و یا در زمان طولانی‌تر با دمای پایین‌تر، که این امر منجربه کاهش استحکام کششی و تخریب بیشتر می‌شود. در دماهای پایین‌تر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد نفوذ اکسیژن سریع‌تر از مقدار مصرف آن می‌باشد، درحالی‌که در دماهای بالاتر این روند برعکس می‌شود. نفوذ اکسیژن به شکل محدودی برای قطعات با ضخامت زیاد در دماهای بالاتر اتفاق می‌افتد. تغییرات مدول، استحکام کششی و ازدیاد طول ناشی از حضور اکسیژن با لگاریتم غلظت آن متناسب است. علاوه بر این وجود فلزاتی مانند کبالت، روی، مس و آهن در شبکه لاستیکی باعث افزایش سرعت تخریب آن می‌شود. متفاوت بودن نتایج حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی و ارزیابی آزمون‌های میدانی نشان‌دهنده تاثیرات پیچیده شرایط سرویس است، که ناشی از تغییرشکل‌های مکانیکی است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عوامل موثر بر واماندگی تایر مورد مطالعه قرار گرفت. این عوامل را می‌توان به سه دسته عوامل مکانیکی، گرمایی و پیرشدگی تقسیم کرد. هر کدام از این عوامل می‌تواند سهم بسزایی در واماندگی تایر داشته باشد. مهم‌ترین عامل مکانیکی در کاهش عمر تایر، بحث خستگی تایر است که وجود بارهای دینامیکی در تایر عامل پیدایش ترک و رشد ترک در محل‌های بحرانی (نواحی با بیشترین شدت تنش و چگالی انرژی کرنشی) است که نهایتا رشد ترک در نواحی مانند سر بلت و سرلایه که جابجایی زیادی دارا است، باعث پایان عمر تایر می‌شود. همچنین در این نواحی که مقدار کرنش‌ها زیاد است به علت خاصیت ویسکوالاستیک، گرمای زیادی ایجاد می‌شود که این گرما خود عامل مؤثری در کاهش عمر تایر است. همچنین، عامل پیرشدگی همراه با افزایش دما باعث کاهش استحکام کششی و تخریب تایر می‌شود.

سپاسگزاری

IRM...

مراجع

1. Pneumatic Tire, Alan Neville Gent ,Joseph D. Walter, 2006, The University Of Akron.
2. Baker, J.S. and McIlraith, G.D., Tire Disablements and Accidents on High-Speed Roads, Highway Research Record, Number 272, Highway Research Board, Washington, DC, 1969.
3. Williams, J.G., Fracture Mechanics of Polymers, Ellis Horwood Limited,
Chichester, 1984.
4. Tire Endurance "A Brief Introduction", OLE group, (TECHNICAL CONSULTANT).
5. Grant, J.L. Rim Line Grooves as an Indicator of Underinflated or Overloaded Tire
Operation in Radial Tires, Paper 45, Presented at the International Tire Exhibition and
Conference, Akron, Ohio, September 21-23, 2004.
6. Song, T.S., Lee, J.W., and Yu, H.J. Rolling Resistance of Tires—An Analysis of Heat
Generation, SAE Technical Paper 980255, Society of Automotive Engineers, Inc.,
Warrendale, 1998.
7. Termomechanical fatigue life investigation of an ultra-large mining dump truck tire, Wedam Nyaaba, Summer 2017, Doctoral Dissertations.
8. Belt edge deterioration in radial steel belted tires, Rubber & Plastics News ● November 27, 2006.
9. Failure Analysis of Tire Tread Separations, J.W. Daws, PFANF8 (2003) 5:73-80.
10. A Comprehensive Review of Tread Wear And Tire Conditions, Copyright 1994 The Maintenance Council Printed in U.S.A.
11. Sandier, S. R., Karo, W., Bonesteel, J. and Pearce. E. M., Polymer Synthesis and Churacrerization: A Laboratory Manual, Academic Press, San Diego, CA, 1998.
12. Yang, N. L., Liutkas, J. and Haubenstock, H., 'An ESR Study of Initially Formed Intermediatesin the Photodegradation of Poly(Viny1Chloride)', in Polymer Characterization byESRandNMR,
13. Woodward, A. E. and Bovey, F. A. (Eds), ACS Symposium Series 142, American Chemical
Society, Washington, DC, 1980, pp. 35-48.
14. Carlsson, D. J. and Wiles, D. M., 'Degradation',in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol. 4, Mark, H. F. (Ed.), Wiley, New York, 1987, pp. 630-696.
15. Ormerod, M. G. and Charlesby, A., Polymer, 4, 459-464 (1963).

Identify the factors affecting on tire durability and the relationship between them

M. Rashidi-Moghadam[1,*], F. Zolali[2], F. Hajebrahimi[3]

1. PhD, Research and Development Department of Barez Industrial Group, Tehran, Iran
2. Master, Research and Development Department of Barez Industrial Group, Tehran, Iran
3. Master, Research and Development Department of Barez Industrial Group, Tehran, Iran

*Corresponding author Email: morteza_rashidi@alumni.iust.ac.ir

Abstract: Tires are an important and special part of car that have a directly relation with the functions such as braking, acceleration and passenger comfort. Increasing the durability of the tire will increase road safety. It is important to note that the fatigue life must be longer than wear life. If the wear life is prolonged, the fatigue life expectancy has to be expanded correspondingly. Fatigue is a common cause of failure of a steel belted radial tire in use. Thermal, speed, tire structure and aging have an important effect on tire fatigue life. In this paper the effect of factors such as thermal, speed, fatigue life and aging on durability and relation between them are studied. Crack initiation and crack growth at filament ends and rubber are also studied in details. At the end, it is shown that the cord type and EPDM have a significant influence on belt endurance. In this paper, it is shown that the mechanical factor, especially the tire fatigue, causes crack initiation and crack growth due to cycling load. Also, heat is generated in the critical areas of the tire due to the visco-elastic property of the compound, which reduces the life of the tire. Also aging along with thermal reduces the tensile strength and degrades the tire.

Keywords: Tire durability, Fatigue, Aging, Belt