

افزایش عمر کاری و بهبود عملکرد موتورهای درون‌چاهی با استفاده از الاستومر نانوکامپوزیتی

مهرداد ایزدی^۱، محمد طباطبایی قمی^{۱*} و غلامرضا پیرچراغی^۲

۱- پژوهشکده توسعه تکنولوژی، جهاد دانشگاهی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۹

چکیده

با در نظر گرفتن شرایط کار موتورهای درون‌چاهی، تقویت استحکام مکانیکی و حرارتی آنها ضروری به نظر می‌رسد. برخی تحقیقات به منظور بهبود عملکرد موتور از طریق تغییر در طراحی انجام شده است ولی فقدان افزایش استحکام از طریق تقویت الاستومر در تحقیقات گذشته چشمگیر به نظر می‌رسد. در این تحقیق نمونه‌های کامپوزیت NBR/Nanoclay با مقادیر مختلف از نانو رس از طریق اختلاط مذابی در مخلوط‌کننده داخلی آماده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الاستومر موتور، آزمون‌های مختلف مکانیکی و حرارتی با در نظر گرفتن شرایط درون‌چاهی، از جمله سیال حفاری و دما انجام گرفته است. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان می‌دهد که سختی و چقرمگی نمونه‌ها افزایش یافته و در آزمون خستگی نمونه‌های کامپوزیت تعداد سیکل بیشتری در مقایسه با نمونه‌های معمولی تحمل نموده‌اند. همچنین آزمون دینامیکی مکانیکی نشان از کاهش ضریب اتلاف دارد که به معنای تولید کمتر حرارت در هر سیکل برخورد بوده و لذا افزایش عمر نمونه‌ها قابل دستیابی است. نانو کامپوزیت حاصل شده استحکام مکانیکی، حرارتی و نفوذناپذیری بالاتری در مقایسه با الاستومر معمولی داشته و افزایش عمر و کارایی موتور با استفاده از این نانوکامپوزیت قابل دستیابی است. افزایش عمر موتور به کاهش دفعات لازم برای بالا پایین کردن لوله‌ها و در نتیجه کمتر شدن زمان حفر چاه و همچنین کمتر شدن هزینه حفاری منجر خواهد شد.

کلمات کلیدی: موتورهای درون‌چاهی، لاستیک نیتریل، نانو رس، مواد ویسکو الاستیک، نانو کامپوزیت

مقدمه

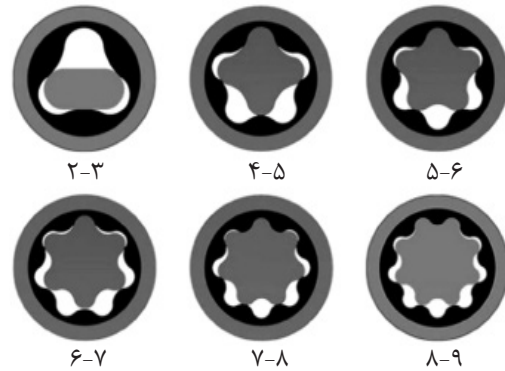
می‌کنند. موتورهای درون‌چاهی به طور عمده از سه قسمت مهم بخش تولید توان^۳، بخش تنظیم شونده^۴ و بخش یاتاقان‌ها^۵ تشکیل شده‌اند که بخش حیاتی و مهم موتور چه از نظر کارایی و چه از نظر عمر کاری بخش تولید توان است [۲].

موتورهای درون‌چاهی^۱ مهم‌ترین ابزار برای حفاری چاه‌های جهت‌دار نفت و گاز هستند که اساس کار آنها پمپ‌های موئین^۲ یا پمپ‌های پیشرونده هستند [۱]. این موتورها انرژی هیدرولیک سیال حفاری را به انرژی دورانی لازم برای چرخش مته حفاری تبدیل

1. Down hole Mud Motors
2. Moineau Pump
3. Power Section
4. Adjustable Section
5. Bearing Section

تعداد روزهای دکل حفاری برای اتمام حفاری چاه خواهد انجامید. در صنعت حفاری زمان رابطه مستقیمی با هزینه حفاری دارد و افزایش عمر موتور، منجر به کاهش قابل توجهی در هزینه این صنعت گران خواهد شد [۶]. تحقیقاتی در زمینه افزایش عمر الاستومر موتور از طریق توسعه طراحی انجام شده است. با معرفی موتورهای با الاستومر کم ضخامت، عملکرد و عمر موتور افزایش یافته است زیرا که عملکرد بهتر و تحمل دمای بالاتر، دو برتری این موتورها است [۷]. مسأله اصلی در مورد این موتورها روش تولید سخت آنهاست که دقت ابعادی درستی به دست نمی‌دهد و از سوی دیگر فرآیند تولید آنها بسیار پر هزینه است [۸]. افزایش عمر از طریق افزایش استحکام الاستومر نیز امکان‌پذیر است که تا کنون تحقیق کاملی در آن زمینه انجام نشده است. سیال حفاری غالباً به سه گروه پایه آبی و پایه روغنی و پلیمری تقسیم می‌شود. در این میان سیال روغنی بیشترین تاثیر بر تخریب الاستومر را دارد [۹]. تخریب الاستومر به دلیل تنش‌ها و افزایش دمای ناشی از برخورد مداوم روتور به آن است. وجود سیال حفاری با چگالی بالاتر یا به عبارتی گل حفاری با وزن سنگین تر و همچنین دمای درون‌چاهی بالاتر در برخی میدان‌های نفتی، موجب تسریع تخریب الاستومر می‌شوند [۵]. دما و فشار حفاری در میدان‌های مختلف متفاوت بوده ولی به طور کلی می‌توان گفت فشار در حدود ۸۰۰۰ Psi و دما تا حدود ۱۳۰ °C می‌تواند بالا برود. الاستومرهای مختلفی در ساخت استاتور مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این میان الاستومرهای پایه نیتریل به دلیل مقاومت بالا در برابر مواد روغنی، بسیار پرکاربرد هستند. مقایسه انواع الاستومرهای به کار رفته در موتور از لحاظ خصوصیات مختلف در تحقیقی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۱۰].

بخش تولید توان شامل روتور و استاتور بوده که استاتور ترکیب الاستومر در درون یک پوسته فلزی است و احتمال خرابی در استاتور بخش تولید توان از همه اجزای دیگر بیشتر است [۳]. روتور و استاتور چند گوشه بوده و همواره تعداد این گوشه‌ها در استاتور یکی بیشتر از روتور است. شکل ۱ سطح مقطع بخش تولید توان را برای تعداد گوشه‌های مختلف موتور نشان می‌دهد. تعداد گوشه بیشتر از روتور و استاتور، افزایش گشتاور و کاهش سرعت دورانی را به ازای پمپاژ دبی مشخصی از سیال حفاری در پی خواهد داشت.



شکل ۱ سطح مقطع بخش تولید توان

پمپاژ سیال حفاری موجب چرخش روتور در داخل استاتور شده و تنش‌های فشاری و برشی ناشی از برخورد متناوب روتور در محیط سیال پر فشار و در دمای بالا به الاستومر استاتور اعمال می‌شوند. با توجه به خصوصیات ویسکو الاستیک و رسانایی کم لاستیک، اتلاف حرارتی^۱ یا به عبارت دیگر هیستریزیس^۲ در داخل آن ایجاد شده که منجر به افزایش دمای داخل الاستومر می‌شود که از مهم‌ترین عوامل تخریب موتورهای درون‌چاهی هستند همچنین تغییر شکل و تورم الاستومر در محیط سیال و در دمای بالا، از دیگر عواملی هستند که تخریب الاستومر را تسریع می‌کنند [۴ و ۵]. تقویت الاستومر و افزایش عمر موتور به کاهش تعداد دفعات مورد نیاز برای بالا و پایین کردن لوله‌ها^۳ جهت تعویض موتور و از این طریق کاهش

1. Thermal Loss

2. Hysteresis

3. Trip in and Trip out

روش کار

تهیه نانو کامپوزیت با زمینه الاستومر

لاستیک نیتریل شامل ۳۳٪ آکریلونیتریل با وزن مخصوص ۰/۹۸ از شرکت SIBUR لهستان تهیه شده است. برای دستیابی به نانو کامپوزیت با فواصل لایه‌ای بیشتر، از نانوخاک رس نوع مونت موریلونیت اصلاح شده کلوزیت B 30 به دلیل قطبیت بیشتر آن استفاده می‌شود [۱۴]. قطبیت بیشتر این نانو خاک رس در مقایسه با سایر انواع آن موجب می‌شود تا با زمینه لاستیک نیتریل که قطبی است، سازگاری بیشتری داشته باشد و نقش نیروهای الکتروستاتیک را در افزایش فاصله لایه‌های نانو خاک رس و نفوذ لاستیک به درون ساختار لایه‌ای آن موثرتر کند [۱۵]. دوده از شرکت دوده پارس و از نوع N 330 که استحکامات مکانیکی و مقاومت به ساییش بالاتری دارد استفاده شده است. فرمولاسیون آمیزه لاستیک در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ فرمولاسیون آمیزه نانو کامپوزیتی با زمینه الاستومر

Component	Role	PHR ^۴
NBR	Elastomer	۱۰۰
N 660	Filler	۶۰
DOP	Plasticizers	۵
Zn O	Activator	۵
Stearic Acid	Activator	۲
IPPD 4010	Anti-Oxidant	۱
Sulfur	Cure Agent	۲
OBTS	Accelerators	۱
TMTD	Accelerators	۱
Nanoclay	Reinforcement	۱۰، ۷/۵، ۵، ۲/۵، ۰

1. Copolymer
2. Emulsion Copolymerization
3. Aspect Ratio
4. Per Hundred Rubber

در مورد موتورهای درون‌چاهی از پرکاربردترین لاستیک‌ها NBR هستند. NBR یا همان لاستیک نیتریل یک هم‌بسیار^۱ بوتادی‌ان و آکریلونیتریل است که به طریق بسیپارش امولسیون^۲ ساخته می‌شوند [۱۱]. خواص این ماده به درصد مقدار آکریلونیتریل که از ۲۰ تا ۵۰٪ متغیر است بستگی دارد و در کاربردهای میدان‌های نفتی که مقاومت به هیدروکربن‌ها در دماهای بالا نیاز است استفاده می‌شود [۱۱]. نانو کامپوزیت‌ها گروه جدیدی از کامپوزیت‌ها هستند که در آنها حداقل یک بعد از ماده توزیع شده در محدوده نانومتری است [۱۲]. استفاده از ذرات نانو به دلیل خواص چشم‌گیری که به محصول می‌بخشند و استفاده از آنها در تقویت پلیمرها روز افزون است. با توجه به نوع نانو ذرات، نانو کامپوزیت‌ها خصوصیات ویژه‌ای نسبت به الاستومر خالص یا میکرو کامپوزیت‌ها از خود نشان می‌دهند. با توجه به شرایط کار موتور درون‌چاهی که نیاز به افزایش استحکام مکانیکی و حرارتی و همچنین افزایش نفوذ ناپذیری نسبت به ورود سیال می‌باشد، نانو رس به‌عنوان نانو تقویت کننده انتخاب شده است [۱۳]. نانو رس به‌دلیل نسبت منظر^۳ بالا، مساحت سطح بالا و پیوند مولکولی قوی تشکیل شده بین نانو رس و پلیمر، تقویت استحکام و به‌دلیل شکل لایه‌ای خود تقویت نفوذ ناپذیری را در پی خواهد داشت. از طرف دیگر قیمت کمتر این نانو ماده در مقایسه با نانو مواد دیگر استفاده از آن را به‌عنوان بخش تقویت کننده در موتور توجیه می‌کند. صفحات نانو رس به‌عنوان محافظ به خوبی به‌عنوان حائل برای جلوگیری از نفوذ سیال یا عبور گازها عمل می‌کنند، زیرا صفحات نانو رس مسیری پر پیچ و خم ایجاد کرده که مانع از نفوذ بخارهای گازی و مایعات به درون پلیمر می‌شود. در تحقیق حاضر، هدف تهیه الاستومر کامپوزیتی با استفاده از ذرات نانو رس و انجام آزمون‌های استحکام سنجی جهت اطمینان از حصول افزایش کارایی آن با توجه به شرایط درون‌چاهی است.

06 در گل حفاری انجام شده است. در ابتدا وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری گردیده و سپس نمونه‌ها در گل روغنی در دمای °C ۷۵ برای مدت ۷۲ hr در کوره حرارتی قرار داده شده‌اند و وزن نمونه‌ها برای تعیین نسبت تورم ثبت گردیده است. برای هر مورد طبق استاندارد سه مورد نمونه تهیه و با میانگین‌گیری از آنها نتیجه ثبت می‌شود. این آزمون نفوذپذیری گل حفاری به داخل لاستیک را از طریق افزایش وزن و حجم نمونه‌ها نشان می‌دهد. برای محاسبه درصد تغییر وزن از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$\Delta M \% = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

که در آن M_1 و M_2 به ترتیب جرم اولیه نمونه در هوا و جرم نمونه در هوا پس از غوطه‌وری هستند. برای محاسبه افزایش حجم نمونه‌ها از رابطه ۲ استفاده می‌شود. در این رابطه نیاز به محاسبه وزن شناور شده نمونه‌ها در آب نیز می‌باشد.

$$\Delta V \% = \frac{(M_3 - M_4) - (M_1 - M_2)}{(M_1 - M_2)} \times 100 \quad (2)$$

$$\Delta V \% = \frac{(M_3 - M_1)}{d(M_1 - M_2)} \times 100$$

که در این فرمول M_1 ، M_2 ، M_3 و M_4 به ترتیب جرم اولیه نمونه در هوا، جرم اولیه نمونه در آب، جرم نمونه در هوا پس از غوطه‌وری، جرم نمونه در آب پس از غوطه‌وری و d چگالی سیال غوطه‌وری در شرایط استاندارد دمای اتاق می‌باشد.

آزمون سختی

آزمایش سختی در استاندارد ASTM D 2240 آمده است که معیاری برای مقاومت در برابر تو رفتگی تحت شرایط مشخص شده است. در این آزمون از سردندانه‌های مختلف که در قطعه فشرده می‌شوند استفاده شده و سختی در مقیاس Shore Scale با میانگین‌گیری از سه نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

درصدهای مختلف نانورس از ۰ تا ۱۰ PHR با اختلاف دو و نیم PHR افزایش نانورس در هر مرحله آماده شده‌اند و لذا نمونه PHR NC ۵ نشانگر نمونه آمیزه با ۵٪ وزنی از نانورس است. آمیزه در دستگاه مخلوط‌کن داخلی با سرعت دورانی ۵۰ rpm در دمای °C ۶۰ به مدت ۱۲ min مخلوط گردید و سپس آمیزه در غلتک باز دو محوره به منظور رفع حباب غلطک کاری شده است. مهم‌ترین عامل در بهبود خواص لاستیک از طریق نانو مواد توزیع^۱ و پراکنش^۲ مواد نانو در زمینه لاستیک است. آمیزه لاستیک در ماشین قالب‌گیری فشاری در دمای °C ۱۶۵ و تحت فشار ۱۰ MPa، مطابق با زمان پخت بهینه طبق استاندارد ASTM D-5289 به دست آمده از رئومتر پخت گردیده است. نتایج نشان داده است که زمان پخت با افزایش درصد نانوکلی کاهش می‌یابد.

سیال حفاری با پایه گل روغنی از میدان نفتی سلمان چاه شماره 2S-58 حفره ۱۲/۵ اینچ دکل Aban VI انتخاب شده است که وزن گل ۸۵ pcf و لزجت فونل^۳ برابر با ۴۳ s بر کوارت دارد. نمونه‌های لازم برای هر آزمون در دمای °C ۷۵ به مدت ۷۲ hr در گل روغنی قرار داده شده‌اند. این دما و ساعت کاری با توجه به دمای اکثر چاه‌ها و ساعت کاری حفاری انتخاب شده‌اند. از میان آزمون‌های بسیار زیادی که برای تعیین خصوصیات مکانیکی و حرارتی لاستیک وجود دارند آزمون‌های تورم، سختی، استحکام کششی، مقاومت پارگی، مانایی فشاری، دینامیکی مکانیکی حرارتی و خستگی با توجه به شرایط کاری موتور درون‌چاهی انتخاب و مورد اندازه‌گیری و تحلیل قرار گرفته شده است.

آزمون تورم

آزمون تورم یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های مورد نیاز می‌باشد. در دمای بالای چاه روتور منبسط شده و الاستومتر تورم می‌یابد. تورم الاستومتر می‌تواند باعث کنده شدن بیشتر آن و لذا کاهش عمر موتور گردد. آزمون تورم براساس ASTM D471-

1. Distribution
2. Dispersion
3. Funnel Viscosity

به ابعاد ۲۰ mm قطر و ۱۵ mm ضخامت انجام شد. نمونه‌های آزمایشی بین صفحات دستگاه فشار قرار داده شده و درصد فشار اعمال شده ۲۵٪ ضخامت اصلی نمونه‌ها بوده است. سپس ابزار فشرده‌سازی در اجاق در دمای ۱۰۰ °C برای مدت ۲۴ hr قرار داده شده است. پس از آن نمونه‌های آزمایشی برداشته شده و اجازه داده شده تا برای ۳۰ min خنک شوند و ضخامت نهایی نمونه‌ها برای تعیین مانایی فشاری با میانگین‌گیری از سه نمونه اندازه‌گیری شده است. میزان مانایی فشاری از فرمول زیر یافت می‌شود که در آن t_0 و t_1 به ترتیب ضخامت ثانویه و اولیه نمونه‌ها است.

$$C_A = \left[\frac{t_0 - t_1}{t_1} \right] \times 100 \quad (3)$$

آزمون دینامیکی مکانیکی

الاستومر جزو مواد ویسکو الاستیک است باشد که نسبت تنش به کرنش به صورت یک عدد مختلط بیان می‌شود که در آن E' مدول ذخیره و E'' مدول اتلاف نشان داده می‌شود. مدول اتلاف بیانگر انرژی از دست رفته به صورت گرما است و ضریب اتلاف یا $\tan \delta$ نسبت مدول اتلاف به مدول ذخیره است.

$$E^* = E' + iE'' \quad (4)$$

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (5)$$

خصوصیات مکانیکی دینامیکی نمونه‌ها با استفاده از ابزار TTDMA ساخت شرکت TRITON در مد کششی مورد تحلیل قرار گرفته است. نمونه‌ها تحت جابجایی سینوسی با ۱/۰٪ کرنش در فرکانس ۱۵ Hz بین دمای ۵۰ تا ۱۵۰ °C قرار گرفته‌اند. مدول ذخیره و نسبت اتلاف ترکیبات برای سه ترکیب بدون نانو ذرات و با ۵ و ۱۰ PHR نانوذرات رس مورد تحلیل قرار گرفته شده است و مدول‌های ذخیره و نسبت اتلاف $\tan \delta$ برای سه ترکیب مورد بررسی محاسبه گردیده است. شرایط آزمایش با توجه به شرایط کار موتور درون چاهی لحاظ شده است. به‌عنوان مثال دوران موتور در داخل استاتور

برای انجام آزمایش باید سطح صاف بودن و نمونه‌ها حداقل ۶ mm ضخامت داشته باشند. در اینجا از مقیاس Shore A که روش معمول برای محاسبه سختی اکثر لاستیک‌هاست استفاده می‌شود.

آزمون کشش تک محوره

آزمون کشش نمایان‌گری از تمام خصوصیات استحکام مکانیکی می‌باشد زیرا تقویت الاستومر بر طبق افزایش مدول و خصوصیات شکست بیان می‌شود. استحکام کششی بر طبق استاندارد ASTM D-412-06 با استفاده از دستگاه آزمون کشش تک محوره، مدل H10KS انجام گرفته است. نمونه‌های دمبلی شکل برای آزمون از ورقه‌های لاستیکی و قالب C استاندارد بریده شده و در دمای اتاق (۲۳ °C) و در سرعت کششی ۵۰۰ mm/min، آزمون انجام شده است. مقادیر استحکام کششی، مدول یانگ، تغییر طول در نقطه شکست به طور مستقیم از نمایشگر دیجیتالی در پایان هر آزمون مشخص می‌گردد.

آزمون مقاومت پارگی

استحکام پارگی لاستیک طبق استاندارد ASTM D624 اندازه‌گیری در سه نوع مختلف انجام می‌گیرد. در اینجا استحکام پارگی نوع C که ماکزیمم نیروی لازم برای برش نمونه با زاویه ۹۰° تقسیم بر ضخامت آن است مد نظر بوده و به صورت انرژی پارگی با واحدهای kN/m یا lb/in محاسبه می‌گردد. پارگی لاستیک فرآیند مکانیکی است که به علت تمرکز تنش آغاز شده و موجب برش و خرابی آن می‌شود. پارگی الاستومر موتورها یکی از مدهای اصلی تخریب موتور است.

آزمون مانایی فشاری

مانایی فشاری معیاری از توانایی لاستیک در نگهداری خصوصیات الاستیک بعد از فشار طولانی در کرنش اعمال شده تحت شرایط مشخص شده است. آزمون مانایی فشاری بر اساس استاندارد ASTM D395-03 بر روی نمونه استاندارد استوانه‌ای شکل

بالا تری در مقایسه با NBR خالص نشان داده‌اند. در نمونه PHR NC ۱۰ به میزان ۶۸٪ کاهش در تغییرات جرم و حجم نسبت به نمونه بدون نانو رس مشاهده می‌شود. مورد قابل توجه این است که ۳۴٪ کاهش در تغییرات جرم و حجم تنها با افزودن ۲/۵٪ وزنی نانو رس به دست آمده است و تاثیر زیادی در اولین مرحله افزودن نانو رس مشاهده شده است. لایه‌های نانو رس با داشتن شکل صفحه‌ای از طریق ایجاد مسیری پرپیچ و خم، مانع از نفوذ سیال به داخل الاستومر می‌شود [۱۷]. شکل ۳ میزان سختی در ترکیبها با افزایش نانو رس را برای هر دو حالت قبل و بعد از پیر سازی در سیال حفاری نشان می‌دهد. با افزایش درصد نانو رس برای ۲/۵ تا PHR ۱۰ سختی نسبت به نمونه خالص بدون نانو رس به ترتیب ۱۰/۸، ۱۳/۸، ۱۴/۶ و ۱۵/۴٪ افزایش یافته است. بعد از پیر سازی و قراردادن در سیال حفاری سختی نمونه‌ها برای نمونه خالص و نمونه‌های حاوی نانو رس از ۲/۵ تا PHR ۱۰ به ترتیب ۱۶/۹، ۱۲/۵، ۱۲/۱، ۱۲/۷ و ۱۰/۷٪ کاهش می‌یابد. کاهش سختی در دمای ته چاه و قرار گرفتن در سیال حفاری بدیهی است ولی نکته جالب در این بین کمتر شدن این میزان کاهش برای نمونه‌های حاوی نانو رس است. به طوری که میزان کاهش سختی برای نمونه خالص در حدود ۱۷٪ ولی میزان کاهش سختی برای نمونه‌های مختلف حاوی نانو رس در حدود ۱۰-۱۲٪ است.

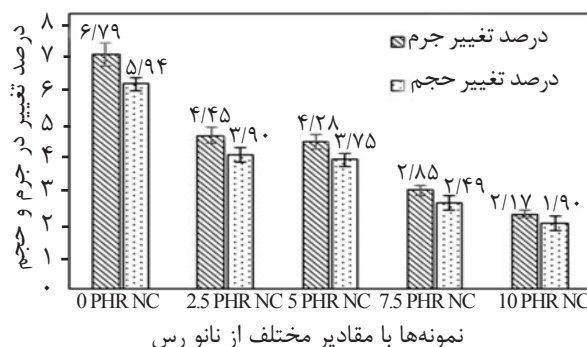
در حدود rpm ۱۴۰ معادل فرکانس ۲/۳ هرتز است و لذا برای یک موتور با تعداد گوشه‌های ۶/۷ فرکانس تحریک هر قله در حدود ۱۶ است.

آزمون خستگی

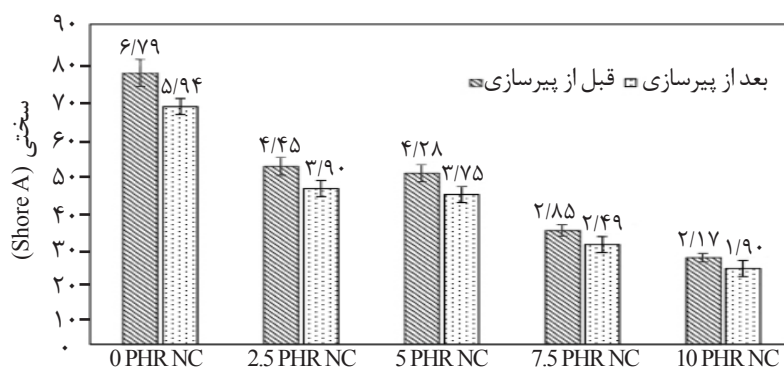
الاستومر موتور به دلیل ضربات روتور در معرض بارگذاری مداوم است. بنابراین استحکام و عمر خستگی الاستومر نیز مورد اهمیت بوده و لذا تاثیر نانو رس بر رفتار خستگی الاستومر از طریق استاندارد ASTM-D4482-11 اندازه گیری شده است. نمونه‌های آماده شده دستگاه با فرکانس ۱۰۰ Cycle/min تحت کرنش‌های مختلف قرار گرفته و تعداد سیکل لازم برای برای تخریب لاستیک در اثر بارگذاری خستگی در هر حالت ثبت می‌گردد. تعداد نمونه‌ها برای هر مورد طبق استاندارد حداقل ۶ عدد است.

نتایج و بحث

خصوصیات تورم ترکیبات در سیال حفاری در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. با مشاهده نمودارهای افزایش جرم و حجم میتوان گفت که درصد سیال جذب شده به طور قابل ملاحظه‌ای برای ترکیبات حاوی نانو رس کاهش یافته‌اند. تقویت بالای نانو رس در لاستیک انعطاف پذیری زنجیره‌های به وجود آمده را محدود نموده و حلال برای نفوذ در فاصله بین مولکول‌های لاستیک دچار مشکل می‌شود و از این طریق درصد تورم کاهش می‌یابد [۱۶]. در نهایت می‌توان گفت ترکیبات شامل نانو رس خصوصیات نفوذناپذیری



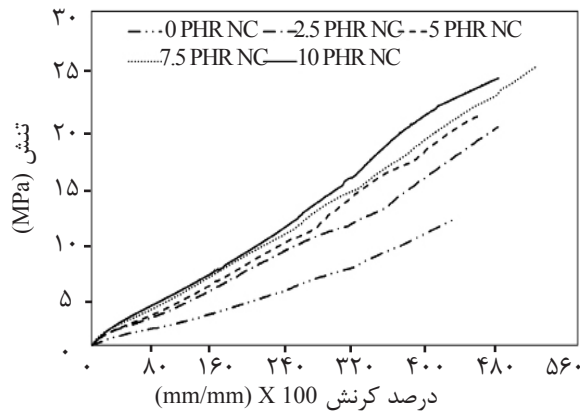
شکل ۲ مقایسه نسبت افزایش وزن و حجم در گل پایه روغنی نمونه‌ها با مقادیر مختلف از نانو رس



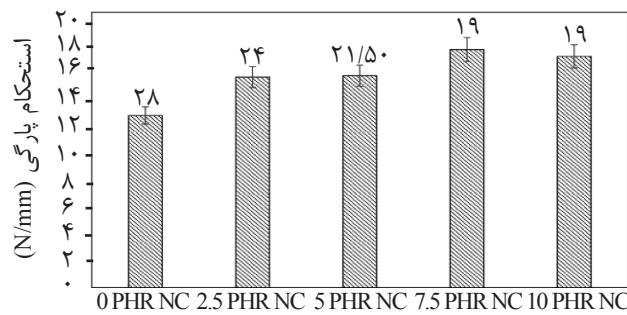
شکل ۳ نتایج آزمون سختی برای نمونه‌های مختلف قبل و بعد از پیرسازی در سیال فشاری نمونه‌ها با مقادیر مختلف از نانو رس

درزبندی بهتر بین روتور و استاتور فراهم می‌شود. استحکام پارگی شاخص مناسب دیگری برای سنجش استحکام مکانیکی است. شکل ۵ مقاومت پارگی را برای نمونه‌ها نشان می‌دهد. ترکیبات ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ به ترتیب ۲۲/۴، ۲۳/۲، ۳۸/۴ و ۳۴/۴٪ افزایش در استحکام پارگی در مقایسه با ماده خالص نشان دادند. نتایج استحکام پارگی در تطابق خوبی با نتایج آزمون سختی و آزمون کششی هستند. ماکزیمم مقاومت پارگی مربوط به نمونه با 7/5 PHR NC است. مانایی فشاری نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. ترکیبات با افزایش تدریجی در مقادیر نانو رس مقادیر کمتر مانای فشاری در مقایسه با لاستیک نیتریل خالص نشان می‌دهد که مطلوب است. درصد کاهش مانای فشار با افزایش مقدار نانو رس بیشتر می‌شود به این ترتیب که درصد کاهش به ترتیب ۱۴/۳ و ۲۳/۲، ۳۲/۱ و ۳۲/۱ برای نمونه‌ها است. این موضوع به دلیل افزایش شکل‌گیری زنجیره‌های قوی‌تر ناشی از حضور نانو رس در زمینه الاستومر است. علاوه بر آن زنجیره‌های پلیمری جهت دار شده به دلیل حضور نانو رس، منجر به کاهش تغییر شکل دائمی الاستومر می‌شوند [۱۹]. افزایش استحکام حرارتی از طریق افزایش مدول ذخیره به مدول اتلاف امکان‌پذیر است که در این حالت اتلاف حرارتی کمتری در داخل استاتور تولید شده و تخریب آن را به تعویق می‌اندازد.

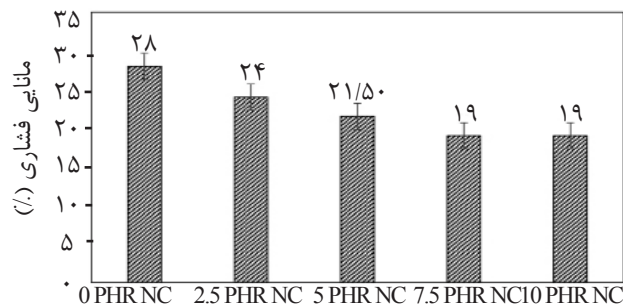
کاهش سختی کمتر تخریب دیرتر و افزایش عمر الاستومر را به دنبال دارد و نشان می‌دهد نانو رس تاثیر خوبی برای حفظ و نگهداری استحکام سختی الاستومر در شرایط درون چاهی دارد. این نتیجه می‌تواند در اثر پیوندهای قوی‌تر ایجاد شده بین زنجیره‌های الاستومر و لایه‌های سیلیکاتی باشد [۱۸]. نتایج استحکام کششی در شکل ۴ آمده است. ترکیبات ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰٪ به ترتیب ۷۱، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۱۰٪ افزایش در استحکام کششی، در مقایسه با ماده خالص نشان دادند. همچنین با افزایش درصد مواد نانو میزان افزایش طول در نقطه شکست به میزان به ترتیب ۱۱، ۶، ۲۲ و ۱۱٪ برای نمونه‌های ۲/۵ تا ۱۰٪ نانو رس افزایش یافته است. انحراف معیار برای نمونه‌های مختلف از ۰ تا ۱۰ PHR نانو رس برای استحکام کششی به ترتیب برابر ۱۴/۶، ۱۰/۳، ۲۱/۵، ۱۶/۵ و ۱۸ بوده و برای کرنش در نقطه شکست به ترتیب برابر با ۰/۷، ۱/۵، ۱/۱، ۰/۹ و ۱/۹ هستند. نمونه‌های نانو کامپوزیتی مدول چقرمگی بالاتری داشته که به معنی تحمل بار بیشتر قبل از شکست است. افزایش قابل توجه مدول‌های استحکام مکانیکی در نتیجه پیوندهای قوی بین لایه‌های سیلیکاتی و زمینه الاستومر و همچنین افزایش تعداد پیوندهای عرضی به دلیل حضور نانو رس است. افزایش استحکام مکانیکی الاستومر درزبندی بهتر بین روتور و استاتور را فراهم می‌کند و بازدهی بالاتر موتور به دلیل ایجاد



شکل ۴ نمودار تنش کرنش برای نمونه‌های مختلف



شکل ۵ مقایسه استحکام پارگی بین نمونه‌های مختلف
نمونه‌ها با مقادیر مختلف از نانو رس



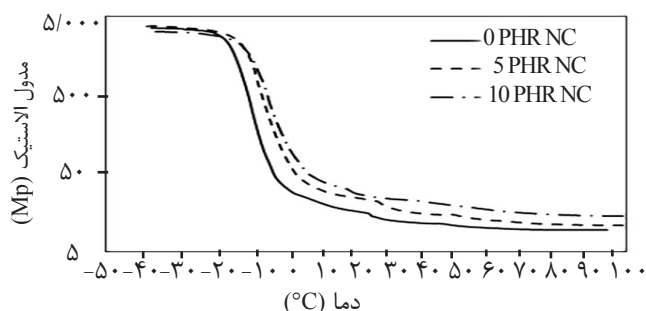
شکل ۶ مقایسه مانای فشاری در نمونه‌های مختلف
نمونه‌ها با مقادیر مختلف از نانو رس

ایجاد شده در الاستومر خواهد شد. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب وابستگی دمایی مدول ذخیره و ضریب اتلاف را نشان می‌دهند. با افزایش میزان درصد نانو مدول ذخیره در مقایسه با لاستیک نیتریل خالص افزایش نشان داده است. با افزایش درصد نانو رس کاهش تدریجی در پیک $\tan \delta$ در مقایسه با لاستیک نیتریل خالص مشاهده می‌شود.

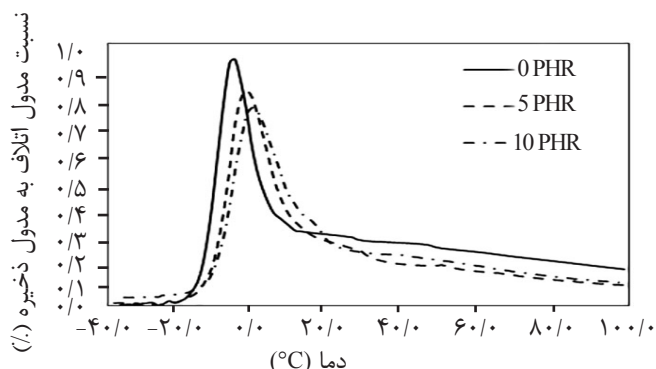
رابطه ۶ حرارت ایجاد شده در واحد حجم در داخل الاستومر را نشان می‌دهد که در آن ω فرکانس زاویه‌ای چرخش روتور در استاتور، σ تنش و ε کرنش ایجاد شده در الاستومر است [۲].

$$Q = 2 \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} = \pi E'' \varepsilon_{\max}^2 = \pi E' \varepsilon_{\max}^2 \tan \delta \quad (۶)$$

کمتر شدن ضریب اتلاف منجر به کاهش حرارت



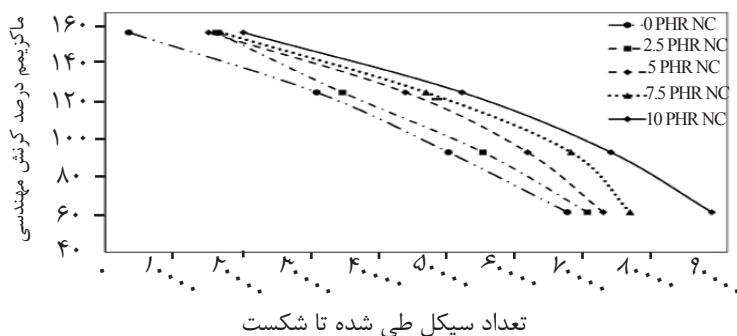
شکل ۷ مقایسه مدول ذخیره در نمونه‌های مختلف



شکل ۸ مقایسه نسبت اتلاف به ذخیره

انجام شده و با میانگین‌گیری از شش نمونه در هر حالت محاسبه می‌شود. عمر خستگی با افزایش میزان کرنش الاستومر برای تمامی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. افزایش عمر خستگی در هر کرنش معین در نمونه‌های نانو کامپوزیتی نسبت به نمونه خالص بیشتر است و افزایش عمر با افزایش درصد نانو رس مشهود می‌باشد. شکل ۹ این افزایش را برای نمونه‌های مختلف تحت کرنش‌های مختلف نشان می‌دهد.

کاهش این مقدار با در نظر گرفتن رابطه ۶ افزایش حرارت کمتری در الاستومر ایجاد کرده و خصوصیات اتلاف حرارتی کمتری برای آمیزه نانو رس کامپوزیتی نشان می‌دهد. همچنین کاهش در دمای گذار شیشه^۱ وجود دارد. به‌طور کلی در هم رفتگی قوی بین لایه‌های نانو و پلیمر زمینه می‌تواند حرکت بخش‌های پلیمر را محدود نماید و لذا منجر به کم شدن دمای گذار گردد. آزمون خستگی در درصد کرنش‌های ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰٪



شکل ۹ تعداد سیکل لازم برای شکست برای کرنش‌های مختلف

نتیجه گیری

مدول ذخیره به مدول اتلاف و کمتر شدن ضریب اتلاف که متناظر با کمتر شدن انباشت حرارت در الاستومر است می‌توان از افزایش استحکام حرارتی نانو کامپوزیت اطمینان حاصل نمود. همچنین نگهداشت ابعادی هندسه الاستومر در آزمایشات تورم و مانای فشاری مشخص است. هر چقدر هندسه الاستومر تحت تاثیر سیال حفاری و دمای چاه کمتر تغییر نماید می‌تواند موجب افزایش کارایی و عمر آن گردد. با توجه به موارد ذکر شده به نظر می‌رسد نمونه نانو کامپوزیتی به خوبی موجب افزایش عمر کاری آن گردد. با استفاده از این نانو کامپوزیت بهبود عملکرد و عمر موتور درون چاهی منجر به کاهش قابل توجهی در زمان حفاری و در نتیجه کاهش هزینه‌های حفاری می‌گردد.

با انتخاب صحیح آزمون‌های مورد نیاز موتورهای درون چاهی، نتایج نشان از تقویت مکانیکی و حرارتی الاستومر نانو کامپوزیتی دارد. در آزمون‌های سختی، مقاومت کششی و پارگی افزایش استحکام مکانیکی نمونه‌های نانو کامپوزیتی تایید گردید. نمونه‌ها افزایش مقاومت خوبی خصوصاً با افزودن مقادیر کم نانو رس در اولین مرحله نشان داده‌اند ولی با افزایش درصد نانو رس افزایش استحکامات به صورت افزایش خطی نیست. در برخی از آزمایشات با افزودن بیش از ۷/۵ PHR نانو رس نتایج در جهت نامطلوب حاصل شده‌اند. این موضوع می‌تواند به دلیل کمتر شدن توزیع و پراکنش ذرات نانو رس در بخش زمینه باشد. با انجام آزمون دینامیکی مکانیکی استحکام حرارتی موتور مورد بررسی قرار گرفته که با توجه به خصوصیات ویسکوالاستیک الاستومر با افزایش نسبت

مراجع

- [1]. Nguyen T., Al-Safran E., Saasen A. and Nes O. M., "Modeling the design and performance of progressing cavity pump using 3-D vector approach," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 122, pp. 180–186, 2014.
- [2]. Zhang J., Liang Z. and Han C., "Failure analysis and finite element simulation of key components of PDM," Engineering Failure Analysis, Vol. 45, pp. 15–25, 2014.
- [3]. Zhang Z., Yu X., Zhao W., Zhang L. and Zhang R., "Exploring wear detection method for special drilling parts in liquid media," International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 61, pp. 249–258, 2016.
- [4]. Delpassand M. S., "Stator life of a positive displacement downhole drilling motor," Journal of Energy Resources Technology, Vol. 121, No. 2, pp. 110–116, 1999.
- [5]. Han C., Zhang J. and Liang Z., "Thermal failure of rubber bushing of a Positive displacement motor: A study based on thermo-mechanical coupling," Applied Thermal Engineering, Vol. 67, No. 1–2, pp. 489–493, 2014.
- [6]. Lukawski M. Z., Anderson B. J., Augustine Ch., Capuano Jr. L. E., Beckers K. F. and J. Tester W., "Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 118, pp. 1–14, 2014.
- [7]. Zhang J., Han C. and Liang Z., "Physics of failure analysis of power section assembly for positive displacement motor," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 44, pp. 414–423, 2016.
- [8]. Azizov A., Davila W., Nnanna O. and Rizen A., "Positive displacement motor innovation drives increased performance with PDC in unconventional plays," In Spe/iadc Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, pp. 1–15, 2011.
- [9]. E. K. Ross K. C., Pugh T. and Huycke J., "Performance characteristics of drilling equipment elastomers

- evaluated in various drilling fluids,*” In Spe/iadc Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers, SPE 21960, 1991.
- [10]. Hendrik J., “*Elastomers in mud motors for oil field application,*” in Corrosion 97. NACE International, 1997.
- [11]. Liu J., Li X., Xu L. and Zhang P., “*Investigation of aging behavior and mechanism of nitrile-butadiene rubber (NBR) in the accelerated thermal aging environment,*” Polymer Testing, Vol. 54, pp. 59–66, 2016.
- [12]. Pavlidou S. and Papaspyrides C. D., “*A review on polymer-layered silicate nanocomposites,*” Progress in Polymer Science, Vol. 33, No. 12, pp. 1119–1198, 2008.
- [13]. Santamaría P., González I. and Eguiazábal J. I., “*Mechanical and barrier properties of ternary nanocomposite films based on polycarbonate/amorphous polyamide blends modified with a nanoclay,*” Polymers for Advanced Technologies, Vol. 26, No. 6, pp. 665–673, 2015.
- [14]. Tolooei S., Naderi G., Shokoohi S. and Soltani S., “*Elastomer nanocomposites based on NBR/BR/nanoclay: Morphology and mechanical properties,*” Journal of Polymer Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 133–139, 2013.
- [15]. Islam M. S., Masoodi R. and Rostami H., “*The effect of nanoparticles percentage on mechanical behavior of silica-epoxy nanocomposites,*” Journal of Nanoscience, Vol. 2013, pp. 1–10, 2013.
- [16]. Nah C., Ryu H. J., Han S. H., Rhee J. M. and Lee M. H., “*Fracture behaviour of acrylonitrile-butadiene rubber/clay nanocomposite,*” Polymer International, Vol. 50, No. 11, pp. 1265–1268, 2001.
- [17]. Paul D. R. and Robeson L. M., “*Polymer nanotechnology: Nanocomposites,*” Polymer, Vol. 49, No. 15, pp. 3187–3204, 2008.
- [18]. Mahallati P., Arefzar A. and Naderi G., “*Thermoplastic elastomer nanocomposites based on PA6 / NBR,*” International Polymer Processing, Vol. 25, No. 2, pp. 132–138, 2010.
- [19]. Alberola N. D., Benzarti K., Bas C. and Bomal Y., “*Interface effects in elastomers reinforced by modified precipitated silica,*” Polymer Composites, Vol. 22, No. 2, pp. 312–325, 2001.

Increasing the Working Life and Performance Improvements of Down Whole Mud Motors Using Nanocomposite Elastomer

Mehrdad Izadi¹, Mohammad Tabatabaee Ghomi¹ and Gholamreza Pircheraghi²

1. Technology Development Institute, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR)

2. Department of Materials Science and Engineering, Sharif University

tabatabaee@usc.ac.ir

10.22078/pr.2018.3388.2556

Received: February/12/2018

Accepted: July/16/2018

INTRODUCTION

The most important tools for drilling directional and horizontal oil and gas wells are downhole mud motors, which are designed, based on Moineau pumps [1]. The power section is the most important part from the viewpoint of performance efficiency and working life [2]. Moreover, the power section consists of rotor and stator. In addition, stator is a lining elastomer within the metal housing. Both the stator and rotor are helical where the stator always has one more helix than the rotor. Fig.1 shows the power section in different lobe configurations. Therefore, the used elastomer is subject to mechanical and thermal stresses in the high pressure and high temperature of drilling fluid environment, consequently, the probability of stator failure is more than other parts [3]. Also, the deformation and elastomer swelling in

drilling fluid are the other factors that accelerate elastomer degradation [4,5].

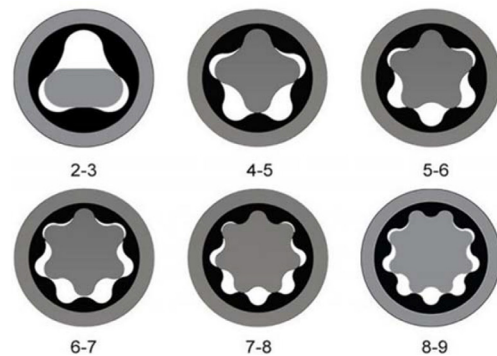


Figure 1: The cross section of the mud motor in different lobe configurations.

Reinforcement of the elastomer, which increase the motor working life, reduces the number of drill string trip times for changing the motor, and in turn will reduces the working days of the drilling rig. In the drilling industry, there is a direct relation between time and cost, so increasing the working life of the motor leads to a considerable

cost reduction in this expensive industry [6]. Several attempts were down to extend the elastomer life by developing the design or materials used [7,8]. Various elastomers are used to produce stator lining, among which nitrile-based elastomers such as NBR are widely used. A comparison of various types of elastomers used in motors has been done, and NBR shows better outcome on other types. Drilling fluids are often divided into water-based, oil-based and polymer-based types. Among these, oil-based drilling fluid has the highest effect on the elastomer degradation [9]. Usage of heavier fluid and the higher temperature of the well precipitate the degradation of the elastomer [5]. NBR showed satisfactory resistance to nonpolar fluids and is the most accepted rubber as the elastomer of motor [10,11]. In the Mud motor, mechanical and thermal cyclic stresses are the main reason of elastomer failure. The mechanical stresses are due to interactional and continuous contact of rotor and elastomer and mud pressure. The more swelling of elastomer by drilling fluid, the more stress between rotor and elastomer will occur, so the dimensional stability of elastomer is a comparative important factor.

Thermal stresses are due to the gradient wellbore temperature and as well as hysteresis effect. This heat generation effect is caused by the interaction of rotor and elastomer regarding viscoelastic properties of elastomer. Moreover, the generated heat traps inside the elastomer due to its low thermal conductivity. In combination with the downhole temperature, this heat buildup can seriously degrade the elastomer's physical and mechanical properties.

Nanocomposites are a new group of composites in which at least one dimension of the filler materials

is in the nanometer range [12]. Considering the need to increase the elastomer mechanical and thermal properties, nanoclay has been selected as the nano reinforcement in several studies [13]. The clay known as montmorillonite consists of plates with an inner octahedral layer sandwich between two silicate tetrahedral layers. The purpose of this work is to improve elastomer resistance against mechanical and thermal stress by using NBR/clay nanocomposite instead of pure NBR. In this study, different loads of nanoclay have been added to the nitrile rubber. Afterwards, the effect of nanoclay loading on thermal, mechanical, and barrier properties behaviors of elastomer has been studied. To investigate the effect of nanoclay on performance and properties of elastomer, swelling, hardness, tensile strength, tear resistance, compression set, dynamic mechanical thermal analysis, and fatigue tests have been conducted regarding to working conditions of mud motors in downhole.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

NANOCOMPOSITE SAMPLE PREPARATION

Nitrile rubber containing 33 percent acrylonitrile with the specific gravity of 0.98 was supplied from SIBUR Company. The cloisite 30b with high polarity to make strong crosslinking with polymer chains selected [14,15]. Different percentages of nanoclay were mixed with the NBR from 0 to 10 PHR by adding 2.5 PHR in each steps. So 2.5 PHR NC stands for the nanocomposite which contains 2.5 PHR nanoclay.

The compound was mixed for 12 minutes at 60 °C in a Brabender internal mixer with rotational speed of 50 rpm. Then in order to eliminate its bubbles, the compound was rolled by an open two-roll mill.

The rubber compound was cured in a hot press machine at 165 °C, and under the pressure of 10 MPa. The curing time was obtained from Rheometer apparatus based on ASTM D-5289 standard. The results have shown that the curing time is reduced with the increase in the nanoclay percentage. This effect can be attributed to the ammonium groups in the organoclay and facilitation of the formation of crosslinks. For aging, the oil-based drilling mud has been selected with the mud weight of 85 pounds per cubic foot and funnel viscosity of 43 seconds per quart. The required samples for each test were put in oil based drilling mud at 75 °C for 72 hours. The temperature and working hour have been chosen according to the temperature of most wells and the drilling working hours.

RESULTS AND DISCUSSION

The swelling properties of the compounds in the drilling fluid have been demonstrated in Fig. 2. The fluid intake percentage of the compounds has been considerably reduced by increasing nanoclay loading which has been observed in previous research [16,17].

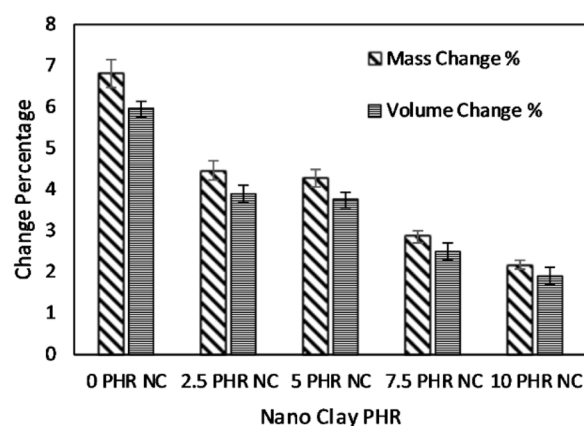


Figure 2: The comparison of weight and volume change in oil-based mud.

Fig. 3 depicts the rising trend of hardness with increasing the clay content. It is predictable that hardness increases by adding Nanoclay for both samples, before aging and after aging test. It is due to the stronger bond between the elastomer chains and the silicate layers [18].

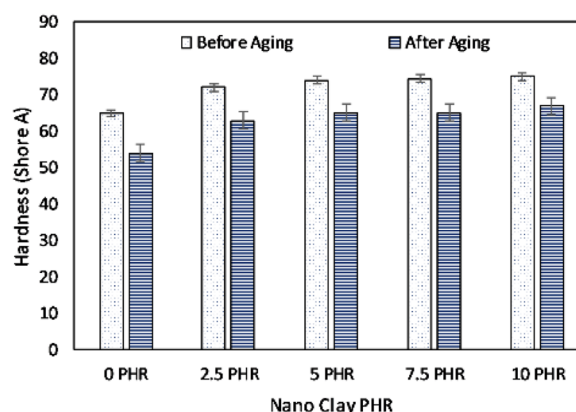


Figure 3: The comparison of the results obtained from hardness test (Shore A) for different compounds.

The strain stress diagram is presented in Fig. 4. The Young’s Modulus and also tensile strength and maximum elongation at break are comparable factors. This shows the increased modules for different compounds of nanoclay.

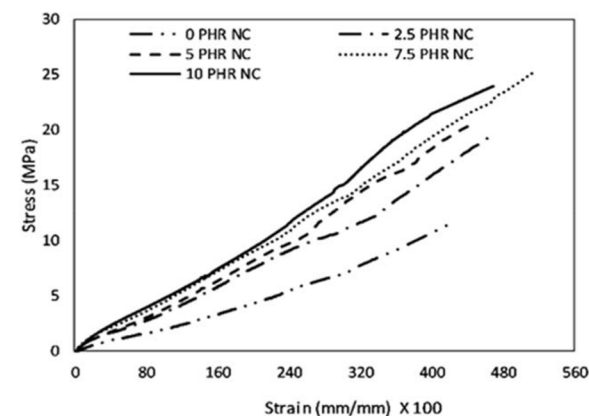


Figure 4: The strain stress diagram for different compounds of nanoclay.

Fig. 5 demonstrates tear strength, which has proved to be also a useful indicator for mechanical strength of specimens.

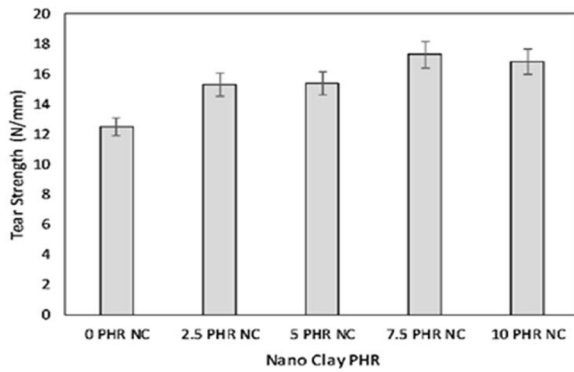


Figure 5: The comparison of tear strength.

The compression set which is one of the main properties of rubbers has been shown in Fig. 6. Aligned polymer chains due to the presence of nanoclay, lead to a reduction in the permanent elastomeric deformation [19].

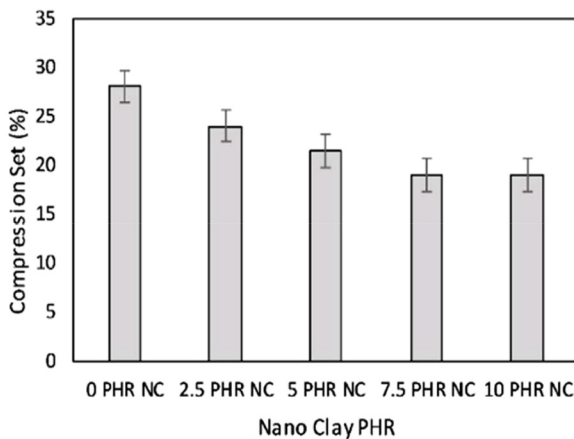


Figure 6: The comparison of compression set in different samples.

Increase in thermal strength becomes possible by increasing the storage modulus compared to loss modulus, which in turn decreases the stored hysteresis heat buildup.

Under cyclic loading due to hysteresis losses and low rubber thermal conductivity, the temperature of rubber increases. This leads to degradation of its physical and mechanical properties. The following Figs. 7 and 8 show the temperature dependence of storage modulus and tan delta for specimens. Nanocomposite compounds have shown a considerable increase

in storage modules compared to neat rubber, as expected. By increasing the nanoclay loading, a reduction in tan delta peak is observed. The tan delta reduction causes a reduced heat buildup and demonstrates fewer damping properties for nanoclay composite compound.

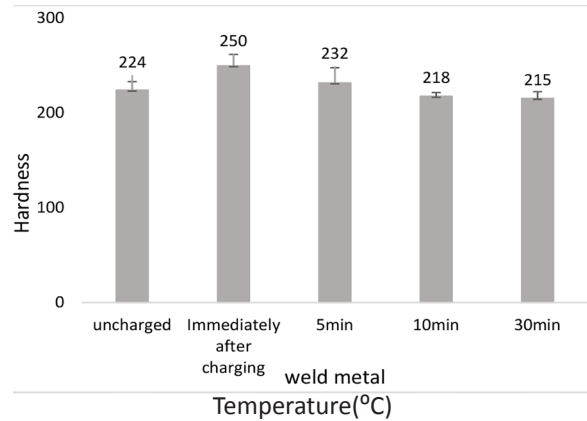


Figure 7: The comparison of storage module in different samples.

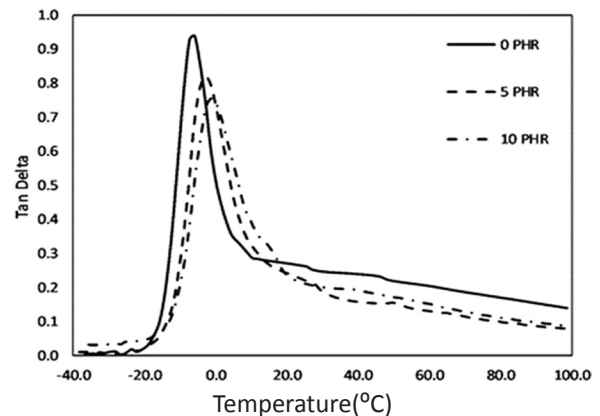


Figure 8: The comparison of tan delta in different samples.

DIFFERENT SAMPLES

Fatigue life of aged elastomer has been measured based on ASTM 4482 standard. Strain percentage was set on 60, 90, 120, and 150%. Results were derived by averaging between six samples. Increasing fatigue life of nanocomposite is clear in Fig. 9 for each definitive elongations.

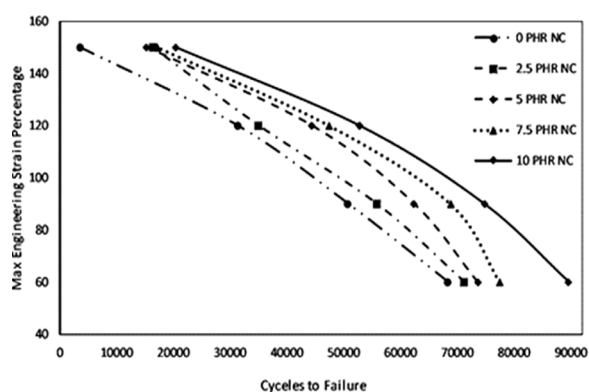


Figure 9: Cycles to failure under different strain.

There is a significant increase in the fatigue life with increasing nanoclay content. Chunking occurs when the rotor wear stator in its circular movement, and elastomer has reached the fatigue limit. Small pieces break free so the drilling mud could leak between rotor and stator so efficiency of power section decreases. This leads to ROP decrement and to maintain efficiency and rate of penetration, operators will normally push motors harder and increase flow rate, further accelerating the motor working life time. Therefore, the elastomer has to have ample fatigue strength to withstand the cycling loads. Moreover, stalling the motor is most probable, and pulling out and changing the mud motor are inevitable.

CONCLUSIONS

In hardness, tensile, and tear resistance tests, the increase in the mechanical strength of the new samples was confirmed. The specimens showed a significant increase in their strength particularly by the addition of small amounts of nanoclay in first steps. No remarkable changes are recognized in the mechanical properties with the addition of more than 7.5 wt.% of nanoclay, which suggests the agglomeration of silicate layers in high content. On the other hand,

fatigue life of nanocomposite samples is highly improved. The thermal strength of the motor was investigated by conducting the dynamic mechanical test, which showed that because of the viscoelastic properties of rubber, the increase in the thermal strength of the proposed nanocomposite can be ensured. It is concluded because of loss coefficient, which corresponds to the enhancement of heat accumulation in the elastomer, is reduced. In addition, the geometry of the nanocomposite remains more stable than pure elastomer that is resulted from swelling and compression set tests. The more stable geometry of the elastomer under the effect of the drilling fluid and the temperature of the well, the more its efficiency and working life increase. Based on the mentioned points, the proposed nanocomposite from the nanoclay strongly increases mud motor performance and working life. Consequently, reducing the drilling times by increasing the working life of the motor is directly related to the reduction of drilling costs.

REFERENCES

- [1]. Nguyen T., Al-Safran E., Saasen A. and Nes O. M., "Modeling the design and performance of progressing cavity pump using 3-D vector approach," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 122, pp. 180–186, 2014.
- [2]. Zhang J., Liang Z. and Han C., "Failure analysis and finite element simulation of key components of PDM," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 45, pp. 15–25, 2014.
- [3]. Zhang Z., Yu X., Zhao W., Zhang L. and Zhang R., "Exploring wear detection method for special drilling parts in liquid media," *International Journal of Refractory Metals and*

- Hard Materials, Vol. 61, pp. 249–258, 2016.
- [4]. Delpassand M. S., “*Stator life of a positive displacement downhole drilling motor,*” Journal of energy resources technology, Vol. 121, No. 2, pp. 110–116, 1999.
- [5]. Han C., Zhang J. and Liang Z., “*Thermal failure of rubber bushing of a Positive displacement motor: A study based on thermo-mechanical coupling,*” Applied Thermal Engineering, Vol. 67, No. 1–2, pp. 489–493, 2014.
- [6]. Lukawski M. Z., Anderson B. J., Augustine Ch., Capuano Jr.L. E., Beckers K. F. and J. Tester W., “*Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling,*” Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 118, pp. 1–14, 2014.
- [6]. Lukawski M. Z., Anderson B. J., Augustine Ch., Capuano Jr.L. E., Beckers K. F. and J. Tester W., “*Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling,*” Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 118, pp. 1–14, 2014.
- [7]. Zhang J., Han C. and Liang Z., “*Physics of failure analysis of power section assembly for positive displacement motor,*” Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 44, pp. 414–423, 2016.
- [8]. Azizov A., Davila W., Nnanna O. and Rizen A., “*Positive displacement motor innovation drives increased performance with PDC in unconventional plays,*” In Spe/iadc Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, pp. 1–15, 2011.
- [9]. E. K. Ross K. C., Pugh T. and Huycke J., “*Performance characteristics of drilling equipment elastomers evaluated in various drilling fluids,*” In Spe/iadc Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers, SPE 21960, 1991.
- [10]. Hendrik J., “*Elastomers in mud motors for oil field application,*” in Corrosion 97. NACE International, 1997.
- [11]. Liu J., Li X., Xu L. and Zhang P., “*Investigation of aging behavior and mechanism of nitrile-butadiene rubber (NBR) in the accelerated thermal aging environment,*” Polymer testing, Vol. 54, pp. 59–66, 2016.
- [12]. Pavlidou S. and Papaspyrides C. D., “*A review on polymer-layered silicate nanocomposites,*” Progress in polymer science, Vol. 33, No. 12, pp. 1119–1198, 2008.
- [13]. Santamaría P., González I. and Eguiazabal J. I., “*Mechanical and barrier properties of ternary nanocomposite films based on polycarbonate/ amorphous polyamide blends modified with a nanoclay,*” Polymers for Advanced Technologies, Vol. 26, No. 6, pp. 665–673, 2015.
- [14]. Tolooei S., Naderi G., Shokoohi S. and Soltani S., “*Elastomer nanocomposites based on NBR/BR/nanoclay: Morphology and mechanical properties,*” Journal of Polymer Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 133–139, 2013.
- [15]. Islam M. S., Masoodi R. and Rostami H., “*The effect of nanoparticles percentage on mechanical behavior of silica-epoxy nanocomposites,*” journal of nanoscience, Vol. 2013, pp. 1–10, 2013.
- [16]. Nah C., Ryu H. J., Han S. H., Rhee J. M. and Lee M. H., “*Fracture behaviour of acrylonitrile-butadiene rubber/clay nanocomposite,*” Polymer International, Vol. 50, No. 11, pp. 1265–1268, 2001.
- [17]. Paul D. R. and Robeson L. M., “*Polymer nanotechnology: Nanocomposites,*” Polymer,

Vol. 49, No. 15, pp. 3187–3204, 2008.

[18]. Mahallati P., Arefzar A. and Naderi G.,
“Thermoplastic elastomer nanocomposites
based on PA6 / NBR,” International Polymer
Processing, Vol. 25, No. 2, pp. 132–138, 2010.

[19]. Alberola N. D., Benzarti K., Bas C. and
Bomal Y., “Interface effects in elastomers
reinforced by modified precipitated silica,”
Polymer Composites, Vol. 22, No. 2, pp. 312–
325, 2001.