

روش‌های کنترل سایش لوله توپ

احمد جهانیان^۱، علیرضا زارعی^{۲*}

تهران - دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*E-mail: zarei1349@gmail.com

(تاریخ وصول: ۹۰/۲/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۰/۶/۱۴)

چکیده

سایش لوله توپ فرآیند فیزیکی پیچیده‌ای است که به عنوان آسیب تصاعدی در سطح داخلی لوله توپ تعریف می‌شود. بروز چنین پدیده‌ای به علت تغییر ابعادی در قطر داخلی لوله توپ، سبب کاهش سرعت دهانه، برد و دقت می‌شود. به طور کلی سایش لوله توپ با سه مکانیسم حرارتی، شیمیایی و مکانیکی اتفاق می‌افتد که فهم و درک درست این مکانیسم‌ها، به یافتن روش‌هایی برای کنترل این پدیده منجر می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی از جمله مقاوم سازی فولاد، استفاده از پوشش‌ها و آسترها در سطح داخلی لوله و به کاربردن افزودنی‌ها در فرمولاسیون پیشران‌های تفنگی برای کنترل سایش لوله پیشنهاد شده است. با این وجود، سایش لوله توپ همچنان یک مشکل اساسی است، که موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران می‌باشد. در این مقاله در ابتدا، تئوری و مکانیسم‌های سایش لوله شرح داده شده و سپس روش‌های کنترل سایش لوله توپ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: لوله توپ، پیشرانه تفنگی، کنترل سایش لوله توپ.

۱- مقدمه

تحقیق، توسط برلو با عنوان توپ‌های با سرعت بسیار بالا^۱ و کنترل سایش توپ منتشر شد. در این گزارش، تئوری‌های سایش لوله توپ به طور قابل توجهی تشریح شد. در سال‌های بعد در زمینه مکانیسم‌های پدیده سایش لوله توپ و همچنین روش‌های کاهش سایش، تحقیقات بسیار زیادی انجام شد، که خلاصه نتایج این

از زمان اختراع تفنگ‌ها و توپ‌ها، سایش سطح داخلی لوله همواره به عنوان عامل محدود کننده کارایی سلاح مطرح بوده است [۱]. برای اولین بار در سال ۱۹۴۶، کمیته تحقیقات دفاعی ایالات متحده، تحقیق گسترده‌ای را در مورد سایش لوله توپ انجام داد، گزارش این

3- Hypervelocity

۱- کارشناس ارشد پیشرانه

۲- دانشیار شیمی تجزیه

- کاهش دقت (افزایش مسافت بین نقطه هدف مورد نظر و نقطه برخورد پرتابه).

- افزایش پراکندگی (باعث ایجاد اختلاف بیشتر بین نقطه برخورد در یک دسته از شلیک می شود).

- پرواز نامنظم پرتابه (باعث می شود که نزدیک شدن یا اصابت پرتابه به هدف صحیح نباشد).

- آسیب رساندن به اجزاء حساس پرتابه (مانند تجهیزات الکترونیکی، سنسورها و سیستم‌های هدایت).

- ایجاد نقص در سطح داخلی لوله و محافظه احتراق (تسریع شکست خستگی در لوله).

با این وجود، این اثرات برای خدمه توپ چندان خطرناک نیست، اما برای سایر افرادی که در نزدیکی هدف مورد نظر قرار دارند؛ می تواند خطرناک باشد. در سلاح‌های با کالیبر بزرگ، لوله توپ بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ شلیک را در طول مدت عمر خود می تواند انجام دهد. به علاوه، تعویض لوله توپ در سلاح‌های با کالیبر بزرگ هزینه ای در حدود ۱۰۰۰۰۰ دلار در بر خواهد داشت. شکل (۱) فرسایش را بر حسب تعداد شلیک نشان می دهد. با توجه به شکل، توافق خوبی بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی و آزمایشگاهی وجود دارد، به طوری که با افزایش تعداد شلیک، فرسایش لوله نیز افزایش یافته است [۱۱]. به همین دلیل، به منظور عملکرد مناسب سلاح و جلوگیری از خسارات احتمالی جانی و مالی، شناخت تئوری‌ها، مکانیسم‌های حاکم بر سایش و فرسایش لوله در سلاح و ارائه روش‌های مناسب برای کاهش یا حذف این پدیده نامطلوب ضروری است.

۲- تئوری سایش لوله

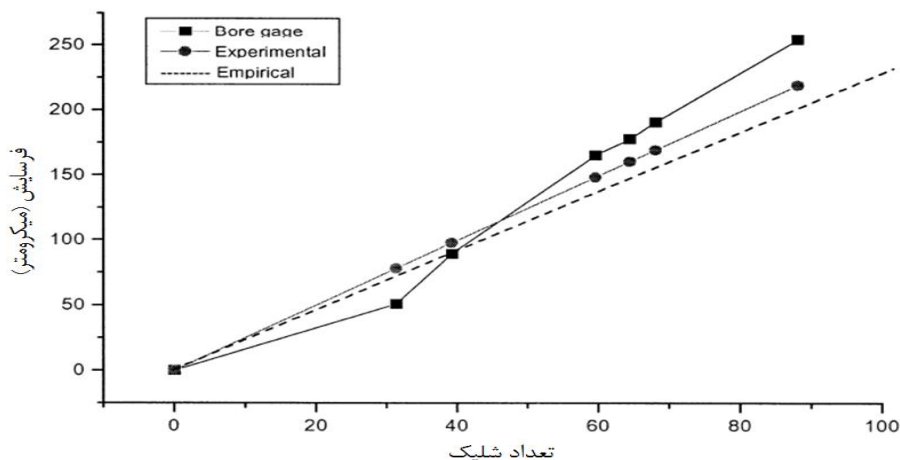
تئوری سایش لوله بر پایه تئوری‌های سایش فیننی^۲ می‌باشد. مطابق این تئوری، ذرات تولید شده گازی تحت یک زاویه برخورد با سطح فلز در تماس می‌باشند. در سال‌های بعد، این تئوری توسط لاتون توسعه یافت.

تحقیقات در سال ۱۹۸۸ منتشر شد [۲]. براساس این مطالعات، سایش لوله توپ به دو شکل مشکل ایجاد می‌کند؛ اولاً جایگزین کردن لوله‌ی سلاح هزینه بر است و ثانیاً بر عملکرد سلاح اثر گذار خواهد بود. عموماً سایش لوله توپ به علت جریان تند گازهای حاصل از احتراق، شوک‌های حرارتی لوله و همچنین عمل مکانیکی پرتابه ایجاد می‌شود [۳]. اساساً در پیشران‌های تفنگی در هنگام شلیک، پیشران سوخته شده و موجب افزایش دما (۲۵۰۰ K - ۸۰۰) و افزایش فشار (۸۰۰-۲۰۰ psi) می‌شود. حجم بالای گازهای حاصل از احتراق پیشران، موجب به جلو راندن پرتابه می‌شود و سرعت دهانه‌ی مورد نیاز را فراهم می‌کند [۴]. از طرفی گازهای CO, CO₂, H₂O, H₂, N₂ اجزاء اصلی گازهای حاصل از احتراق پیشران می‌باشند، که مقدار و نسبت آنها بر سایش بسیار موثر است [۵]. یکی از اهداف طراحان پیشران‌ها، افزایش ایمپتوس^۱ (ثابت نیرو) است. در پیشران‌های تفنگی ایمپتوس طبق رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$I = RT_f = RT_f / M \quad (1)$$

که در این رابطه I ایمپتوس، T_f دمای شعله، R ثابت جهانی گازها و M جرم مولکولی گازهای پیشران است. طبق این رابطه، آسانترین راه برای افزایش ایمپتوس، افزایش دما با استفاده از مواد پرنرژی است [۶]. اما دمای شعله بالا، سایش بسیار زیادی را در لوله تفنگ‌ها و توپ‌ها ایجاد می‌کند، زیرا عموماً سایش به دمای گازهای احتراق وابسته است [۷]. بنابراین، بهترین راه برای افزایش ایمپتوس، افزایش تعداد مول‌های گازی به وسیله کاهش جرم مولکولی میانگین گازهای احتراق است. این موضوع مهم‌ترین عامل توسعه پیشران‌های نیترا‌مینی بوده است. با این وجود، این پیشران‌ها قابلیت سایش بسیار زیادی دارند [۸]. در گذشته تصور بر این بود که پیشران‌های داغ تر، قابلیت سایش بیشتری دارند، اما این موضوع عمومیت ندارد. موارد زیادی گزارش شده اند که سایش با افزایش دمای شعله، افزایش نیافته است و حمله شیمیایی به سطح داخلی لوله تفنگ، مهم‌ترین عامل ایجاد سایش بوده است [۹]. با توجه به موارد ذکر شده، به طور کلی، اثرات سایش در لوله توپ شامل موارد زیر می‌باشد [۱۰]:

- کاهش سرعت دهانه (کاهش مسافت شلیک پرتابه یا کاهش اثرگذاری نهایی).



شکل ۱- فرسایش لوله بر حسب تعداد شلیک در لوله سلاح با کالیبر بزرگ [۱۱].

پیشراندهای تفنگی را می‌توان اندازه‌گیری کرد. نتایج تجربی به دست آمده از این وسیله برای تعیین سایش و عمر تفنگ‌ها و توپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا شرایط در این وسیله، به شرایط لوله واقعی در هنگام شلیک بسیار شبیه است [۱۳].

۳- مکانیسم‌های سایش لوله توپ

۳-۱- مکانیسم سایش شیمیایی

مکانیسم شیمیایی به ترکیب شدن با کربن یا واکنش اکسیداسیون در سطح داخلی لوله توپ مربوط می‌شود. بر طبق این مکانیسم، گازهای حاصل از احتراق پیشرانده به داخل سطح فولاد توپ نفوذ کرده و موجب ایجاد سایش لوله می‌شوند. همواره احتراق پیشراندهای جامد به تولید مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن، بخار آب و نیتروژن منجر می‌شود که نسبت این ترکیبات به فرمولاسیون پیشرانده وابسته است [۱۴]. بنابراین، با اصلاح ترکیب پیشرانده جامد، امکان کنترل سایش وجود دارد، زیرا سایش شیمیایی به ترکیب گازهای پیشرانده وابسته است. تحقیقات نشان می‌دهد که گاز مونوکسید کربن در محصولات احتراق با سد انرژی بسیار کوچک مورد تجزیه قرار می‌گیرد و در سطح فولاد منتشر می‌شود و در نهایت موجب وقوع پدیده کربوراسیون می‌شود [۱۵]. کربوراسیون باعث تغییر فولاد به چدن و نیز کاهش دمای ذوب سطح فولاد در حدود 300K می‌شود [۱۶].

اساساً مدل سایش لوله شامل سه عامل بسیار مهم می‌باشد؛ که عبارتند از بیشینه دمای سطح، سختی سطح و ترکیب پیشرانده. این عوامل به ترتیب، نشان دهنده عوامل حرارتی، عوامل متالورژیکی^۱ و عوامل شیمیایی می‌باشند. مطالعات نشان می‌دهد که کاهش جرم مواد در لوله توسط دستگاه اندازه‌گیری سایش لوله بر طبق رابطه (۲) می‌تواند بیان شود [۱۲].

$$m_1 = A \exp(1.5 T_{\max}/B_0) \quad (2)$$

که m_1 کاهش جرم لوله در طی شلیک، A ضریب قابلیت سایش پیشرانده، T_{\max} بیشینه دمای سطح داخلی لوله و B_0 ضریب سختی داغ^۲ مواد می‌باشد. در این رابطه A به ترکیب پیشرانده و T_{\max} به عوامل بسیار زیادی که تعیین کننده بار حرارتی^۳ لوله هستند، وابسته می‌باشند. به علاوه B_0 به تغییر سختی سطح لوله (H) در طول حرارت دهی وابسته می‌باشد و طبق رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$H = H_0 \exp(-T/B_0) \quad (3)$$

در این رابطه H_0 سختی ذاتی سطح لوله، T دمای سطح لوله و B_0 برای فولاد توپ حدود (10^4C) است. برای بررسی این اثرات بر سایش لوله تفنگ‌ها و توپ‌ها، برخی از وسایل اندازه‌گیری سایش لوله توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال در یکی از این وسایل، با توزین لوله قبل از شلیک و بعد از شلیک می‌توان کاهش جرم سائیده شده از لوله را محاسبه کرد. بنابراین با استفاده از کاهش جرم لوله، قابلیت سایش

1 - Metallurgical
2 - Hot hardness
3 - Heat load

مقداری بالاتر باشد، اما در عمل، مطابق جدول (۱) از سایش کمتری برخوردار است. چنین اثری برای پیشرانه نیترا آمینی IHGP-300 نیز مشاهده شده است. این پیشرانه دارای ۷۵٪ RDX، نیتروسولوز و نرم کننده DANPE (۵۱-دی آزیدو-۳-نیترازا پنتان) می‌باشد. مطابق جدول (۱)، علی‌رغم چهار برابر بودن نسبت CO/CO₂ برای پیشرانه IHGP-300 در مقایسه با پیشرانه M8، مقدار کاهش جرم در پیشرانه IHGP-300 در مقایسه با پیشرانه M8، از نصف هم کمتر است [۱۹]. در پیشرانه‌های با نیتروژن بسیار بالا در کنار سطح داخلی لوله، نیتریده شدن اتفاق می‌افتد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد، که نیتروژن یک اثر محافظ بر سطح لوله ایجاد می‌کند و این پدیده از تجزیه مونوکسیدکربن و بنابراین از سایش شیمیایی جلوگیری می‌کند. به علاوه نیتریده شدن سطح لوله، با اشغال نمودن سایت‌ها مانع از انتشار کربن آزاد در سطح فولاد شده و بنابراین از توسعه سایش لوله جلوگیری می‌کند [۲۰].

به علاوه، هیدروژن نیز به عنوان ترد کننده برخی از آلیاژها عمل می‌کند، که این قضیه به رشد میکرو ترک‌ها و حذف مواد از سطح لوله نسبت داده می‌شود. همچنین اتم‌های کربن با نفوذ به داخل ساختار شبکه‌ای مواد در لوله توپ‌ها به ایجاد تنش‌های موضعی باقیمانده نامطلوب کمک می‌کنند [۱۷]. به علاوه، در پیشرانه‌های با نیتروژن بسیار بالا، در سطح داخلی لوله و در طول شلیک، نیتریده شدن اتفاق می‌افتد [۱۸]. با این حال تحقیقات گسترده‌ای در جهت درستی این فرضیه در حال انجام شدن است. جدول (۱) نسبت محصولات احتراق، دمای شعله و میزان سایش چند پیشرانه را به خوبی نشان می‌دهد. همه نتایج به دست آمده وجود فرضیه کربوراسیون را تایید می‌کنند. طبق جدول (۱) در دمای شعله آدیاباتیک تقریباً مشابه، در پیشرانه نیترا آمینی TGD-002 نسبت CO/CO₂ در مقایسه با پیشرانه M8 حدود ده برابر بالاتر است. با در نظر گرفتن تنها مکانیسم کربوراسیون، پیش بینی می‌شود که سایش پیشرانه TGD-002 از پیشرانه M8

جدول ۱- برخی از پیشرانه‌های انتخاب شده و میزان کاهش جرم حاصل از این پیشرانه‌ها [۱۹].

پیشرانه	نوع	محفظه		دهانه				
		دما (کلوین)	نیرو (گرم/ژول)	دما (کلوین)	CO/CO ₂	N ₂ /CO	فرسایش (میلی‌گرم)	
JA ₂	دوپایه	۳۴۵۰	۱۱۵۲	۲۵۶۹	۲/۵۳	۰/۳۵	۰/۱۲۶	۹۰
TGD-9/2/9	نیترا آمینی	۳۴۱۰	۱۲۹۱	۲۳۷۵	۱۹/۵۵	۰/۷۷	۰/۳۰۰	۸۰
TGD-019	نیترا آمینی	۳۲۶۸	۱۲۹۶	۲۲۹۸	۱۵/۵۹	۰/۸۶	۰/۲۹۴	۴۰
TGD-036	نیترا آمینی	۳۱۹۱	۱۲۸۰	۲۲۳۸	۱۸/۲۶	۰/۸۴	۰/۲۹۲	۵۷
TGD-035	نیترا آمینی	۳۱۸۱	۱۲۷۳	۲۲۲۶	۲۴/۴۰	۰/۸۱	۰/۲۹۵	۶۶
M ₄₃	(LOVA) نیترا آمینی	۳۱۰۰	۱۱۸۶	۲۲۰۱	۷/۷۴	۰/۶۶	۰/۲۳۷	۲۷
M ₃₀	سه پایه	۳۰۳۵	۱۰۸۰	۲۱۹۰	۳/۱۰	۱/۰۸	۰/۲۸۰	۲۱
TGD-021	نیترا آمینی	۲۷۹۵	۱۱۶۴	۱۹۹۵	۲۲/۲۷	۰/۹۱	۰/۳۰۵	۵
TGD-009	نیترا آمینی	۲۵۷۷	۱۰۷۲	۱۸۹۸	۲۰/۲۶	۰/۶۷	۰/۲۵۷	۲۱
M8	دوپایه	۳۷۶۸	۱۱۶۸	۲۹۲۲	۱/۴۴	۰/۴۹	۰/۱۴۶	۲۴۱
JA ₂ /RPD351	دوپایه	۳۷۴۳	۱۱۷۲	۲۸۹۲	۱/۵۰	۰/۴۸	۰/۱۴۳	۲۵۱
TGD-002	نیترا آمینی	۳۷۱۸	۱۳۵۴	۲۶۴۳	۱۴/۸۸	۰/۸۴	۰/۳۲۴	۱۹۳
IHGP-300	نیترا آمینی	۳۷۲۵	۱۳۳۳	۲۷۳۰	۴/۱۳	۰/۸۹	۰/۲۸۴	۱۱۴

۳-۲- مکانیسم سایش حرارتی

به طور کلی در دمای بالا، اثرات حرارتی بر سطح داخلی لوله تفنگ، مهمترین عامل سایش لوله توپ می‌باشد. در هنگام شلیک، از گازهای ناشی از احتراق پیشرانه و نیز اصطکاک بین پرتابه در حال حرکت و سطح داخلی لوله، انتقال حرارت ایجاد می‌شود [۲۱]. این انتقال حرارت، صرفاً در حد چند میلی ثانیه رخ می‌دهد، که اختلاف دمایی بسیار شدیدی را در مسیر شعاعی لوله^۱ ایجاد می‌کند. بیشینه دمای سطح داخلی لوله می‌تواند به $1300 - 600$ °C برسد، بیشترین قسمت حرارت تولید شده از گازهای داغ پیشرانه به سطح داخلی لوله منتقل می‌شود. نوعاً شار حرارتی در پیشرانه های متداول پرنرزی، ممکن است در حدود 1 J/mm^2 باشد [۲۲]. دمای شعله پیشرانه‌های پرنرزی بالا در حدود 3900 °C است، که این دما برای بهبود عملکرد توپ مفید است. با این وجود، چنین دمای بالایی غیر قابل قبول است چرا که سایش لوله را به شدت تشدید می‌کند. در سلاح‌های با کالیبر کوچک و مسلسل‌ها بعد از چند شلیک بسیار سریع، لوله سلاح سرخ شده که بایستی بلافاصله شلیک‌ها را متوقف کرد تا لوله خنک شود. اساساً، مکانیسم سایش حرارتی شامل تغییر فاز سطح داخلی لوله توپ، نرم شدن، ذوب شدن و ترک خوردگی به علت انبساط و انقباض در حین چرخه گرمایی است. سایش حرارتی عموماً به کیفیت گرما و راندمان انتقال آن به سطح داخلی لوله وابسته است. به نظر می‌رسد، فاکتور حرارتی زمانی که با فاکتور شیمیایی و مکانیکی همراه شود، نقش قابل توجهی را در سایش لوله ایفا می‌کند. اما به طور مجزا، عامل حرارتی به نرم شدن سطح داخلی لوله و انتقال فاز گرما به سطح داخلی لوله و نهایتاً ذوب شدن سطح لوله منجر می‌شود [۲۳]. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که پیشرانه‌ها با گازهای احتراقی با دمای بالاتر، قابلیت سایش بالاتری دارند. گزارشات علمی نشان می‌دهد که در پیشرانه‌های حاوی RDX با وجود کاهش دمای شعله، سایش افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که سایش پیشرانه با پایه RDX اصولاً بیشتر با مکانیسم شیمیایی پیش برده می‌شود تا حرارتی. به عنوان مثال پیشرانه سه پایه M30 سایش کمتری در مقایسه با

پیشرانه^۲ (LOVA-M43) دارد، هر چند که پیشرانه M30 دارای دمای شعله بالاتری است.

۳-۳- مکانیسم سایش مکانیکی

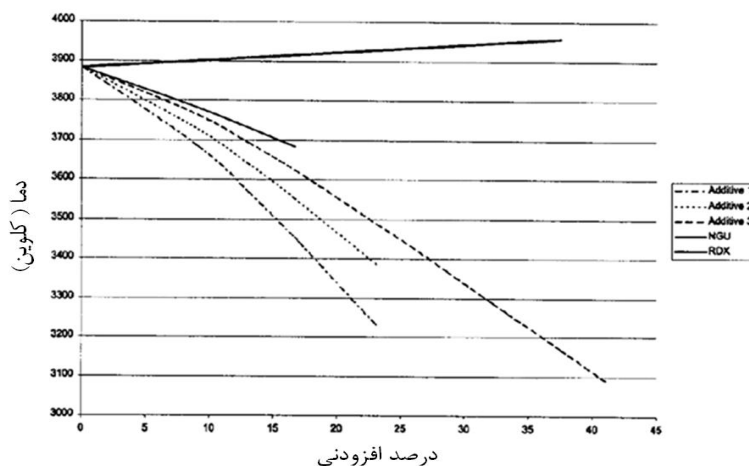
سایش مکانیکی بیشتر در دماهای پایین که حرارت برای ایجاد سایش شیمیایی و حرارتی کافی نیست، اتفاق می‌افتد. اثرات سایش مکانیکی هنگامی که سطح لوله با پوشش‌های مقاوم حرارتی از قبیل کروم آبکاری شده پوشیده شده باشد، موجب نرم شدن و ذوب شدن سطح داخلی لوله می‌شود. به علاوه، فرسایش، نوعی اثر مکانیکی است که نتیجه بر هم کنش بین لوله توپ و پرتابه در حال حرکت از سطح داخلی لوله است [۲۴]. با این حال به نظر می‌رسد، این نوع مکانیسم در مقایسه با مکانیسم های حرارتی و شیمیایی از اهمیت کمتری برخوردار باشد.

۴- روش‌های کاهش سایش لوله توپ

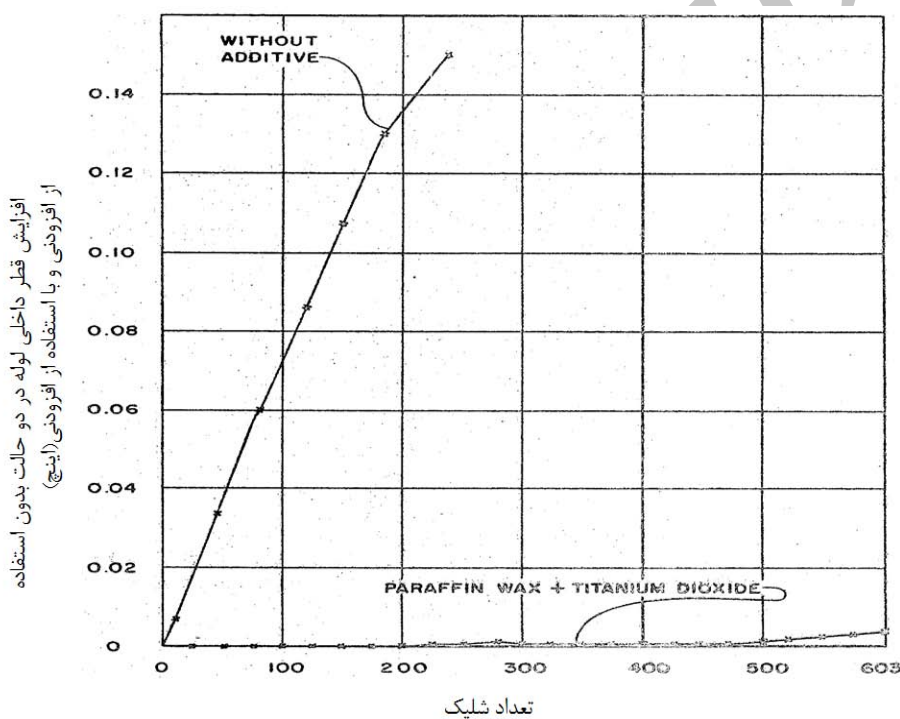
در بخش‌های قبل تئوری و مکانیسم‌هایی که مطابق با آن سایش لوله اتفاق می‌افتد، به اختصار شرح داده شد. درک این مکانیسم‌ها به روش‌هایی برای کنترل سایش لوله توپ منجر می‌شود. به طور کلی چهار روش برای کنترل سایش لوله توپ وجود دارند، که به شرح آنها پرداخته می‌شود.

۴-۱- استفاده از افزودنی‌ها

یکی از روش‌های کاهش سایش لوله توپ، به کاربردن افزودنی‌ها در خرج های پیشرانه است. در طول سال‌های اخیر انواع متنوعی از افزودنی‌ها در خرج پیشرانه‌ها به منظور کاهش سایش لوله مورد استفاده قرار گرفته اند [۲۵]. افزودنی مناسب اساساً بایستی دو شرط داشته باشد، اولاً بایستی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن به گونه ای باشد که هیچ ماده ای در آن دمای گازهای پیشرانه را افزایش ندهد، ثانیاً یک لایه مقاوم در برابر دما و سایش در سطح داخلی لوله ایجاد نماید.



شکل ۲- دمای شعله پیش‌رانه نیتروسولولز- نیتروگلیسرین (۴۰/۶۰) بر حسب درصد استفاده از افزودنی‌های مختلف [۲۷].



شکل ۳- افزایش قطر داخلی لوله در دو حالت بدون افزودنی و با افزودنی دی‌اکسید تیتانیم + واکس (بر حسب اینچ) [۲۸].

شکاف‌های سطح لوله، مساحت سطح در معرض سایش را کاهش می‌دهد و بنابراین انتظار می‌رود که با بالا رفتن عمر خستگی، طول عمر لوله افزایش یابد. با این وجود برخی از این افزودنی‌ها ممکن است نتایج چندان رضایت بخشی نداشته باشند و حتی به مشکلاتی مانند تشکیل مواد باقیمانده با اثرات بالستیکی غیر قابل پیش بینی و یا ایجاد دود منجر شوند. شکل (۲) نتایج استفاده از چند افزودنی را در

متداولترین افزودنی‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از دی‌اکسید تیتانیم (TiO_2)، تالک، واکس^۱، پلی‌اورتان و یا ترکیبی از این ترکیبات می‌باشد [۲۶]. اساساً در بین محققین یک اجماع کلی در ارتباط با این مساله وجود دارد که دی‌اکسید تیتانیم با کاهش انتقال حرارت در لوله، سایش را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. به علاوه این افزودنی با اندازه ذره در حدود ۵ تا ۱۰ میکرون، با پر کردن

1 - Wax

کونوری معیار پوشش دهی موفق را به شرح زیر بیان نمود [۳۱]:

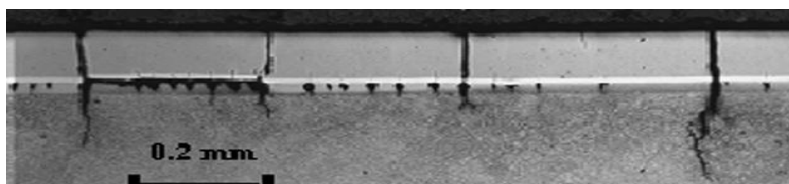
- پوشش با گازهای پیشرانه نباید واکنش بدهد.
- پوشش بایستی مواد پایه را از بار حرارتی عایق کند، حرارت را توزیع کند و خود به سایش حرارتی مقاوم باشد.
- پوشش بایستی به سایش مکانیکی حاصل از عبور پرتابه مقاوم باشد.
- پوشش باید به مواد پایه به خوبی چسبیده شود.
- پوشش باید ضریب انبساط حرارتی مشابه با مواد پایه برای جلوگیری از شکست ناشی از ترک خوردگی داشته باشد.
- مواد پوشش دهنده و روش کار آنها باید مقرر به صرفه باشد.

اخیراً برای استفاده در لوله توپ‌های جدید، تلاش می‌شود از پوشش تانتالوم و آستر سرامیکی SiAlON استفاده شود. اساساً دمای ذوب بالا و سختی زیاد مواد پوشش دهنده سبب ایجاد پایداری در مقابل حرارت مستقیم و سایش مکانیکی و شیمیایی می‌شود. به عنوان مثال دمای ذوب کروم، بسیار بالاتر از دمای سطح داخلی لوله تفنگ است. برای بررسی کارایی، این سه پوشش تحت شرایط واقعی در معرض تست شلیک قرار گرفتند. آسیب حرارتی در نزدیکی سطح داخلی لوله و رفتار رشد ترک خوردگی با متالوگرافی مقطع عرضی لوله تعیین می‌شود، که در شکل (۴) و (۵) به خوبی نشان داده شده است. از این رو ویژگی‌های کلیدی، نظیر آسیب و ترک خوردگی در لوله‌های با قطر داخلی ۱۲۰ میلی‌متر در مقایسه با پوشش‌های آبکاری کروم به خوبی قابل مقایسه است. در پوشش‌های تانتالوم و کروم، عمق ترک‌های عمودی نوعاً به وسیله ۰/۱ میلی‌متر از این پوشش‌های کنترل می‌شود، در حالی که برای سرامیک SiAlON این مقدار فقط ۰/۰۳ - ۰/۰۲ میلی‌متر است. ترک‌های چند رشته‌ای^۱ در پوشش تانتالوم در شکل (۴) به خوبی قابل مشاهده است، در حالی که در شکل (۵) ویژگی ترک خوردگی هیدروژنی باعث ایجاد ترک‌های عمودی در آستر سرامیکی SiAlON می‌شود. به علاوه تفاوت اساسی دیگر در ترک‌های پوشش‌های کروم و تانتالوم در مقایسه با سرامیک، ماهیت ترک‌های موازی است، به طوری که در پوشش‌های کروم و تانتالوم بخش نسبتاً کوچکی از پوشش‌ها توسط این نوع ترک‌ها از بین می‌رود، در حالی که ترک‌های موازی در سرامیک SiAlON، بخش نسبتاً بزرگی را از آستر سرامیکی از بین می‌برد [۳۲].

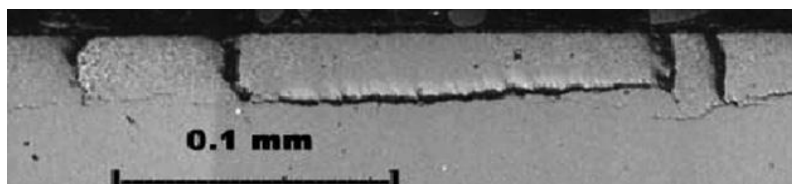
پیشرانه دویاپه نیتروسلولز - نیتروگلیسرین (۴۰/۶۰) نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲) استفاده از افزودنی‌ها موجب کاهش دمای شعله به طور قابل توجهی می‌شود، هرچند که برخی از افزودنی‌ها نسبت به دیگر افزودنی‌ها به طور موثرتری دمای شعله را کاهش می‌دهند. به علاوه برخی از محققین معتقدند که در افزودنی دی‌اکسید تیتانیم + واکس اکسیژنی را که از تفکیک دی‌اکسید تیتانیم حاصل می‌شود، با هیدروژن و مونوکسید کربن واکنش می‌دهد و آب و دی‌اکسید کربن تولید می‌کند و بنابراین تردی هیدروژنی و ترکیب شدن با کربن سطح داخلی لوله را کاهش می‌دهد [۲۷]. شکل (۳) اثر افزودنی دی‌اکسید تیتانیم + واکس را بر قطر داخلی لوله تانک ۱۰۵ میلی‌متری در مقایسه با حالتی که از افزودنی استفاده نمی‌شود را نشان می‌دهد. نتیجه مهمی که از این شکل می‌توان گرفت این است که با استفاده از این افزودنی، قطر داخلی لوله در حدود ۶۰۳ شلیک، بسیار کم افزایش یافته است. این در حالی است که زمانی که از افزودنی استفاده نمی‌شود، در حدود ۲۰۰ شلیک، به مقدار بسیار زیادی قطر داخلی لوله افزایش می‌یابد که این موضوع اثر نامطلوبی بر دقت سلاح در حین شلیک ایجاد می‌کند [۲۸].

۴-۲- استفاده از پوشش‌ها و آسترها

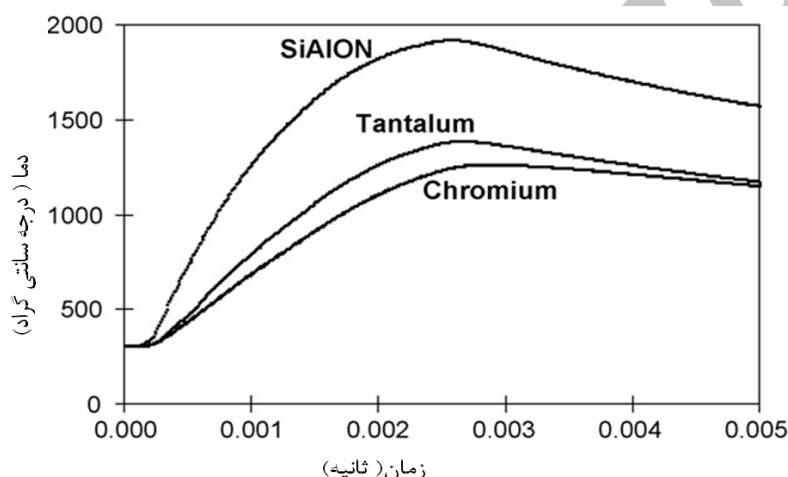
برای اولین بار پوشش‌ها و آسترها برای حفاظت از لوله توپ‌های با کالیبر بزرگ در جنگ دوم جهانی مورد استفاده قرار گرفتند، با این حال، امروزه برای توسعه آنها تلاش‌های زیادی در سراسر جهان در حال انجام شدن است. برخی مطالعات نشان می‌دهد که کاهش سایش لوله توپ به وسیله استفاده از پوشش‌ها می‌تواند موجب کاهش عملکرد شود [۲۹]. عموماً پوشش‌های آبکاری کروم به طور گسترده‌ای در اغلب لوله‌های توپ استفاده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که اگر در لوله‌های پوشش داده شده با کروم، سایش آغاز شود با سرعت بیشتری نسبت به لوله بدون پوشش پیشروی می‌کند [۳۰]. به عنوان مثال در زمان ساخت در روی سطح پوشش‌های کروم، میکرو ترک‌هایی وجود دارد که فشار و سیکل‌های حرارتی در هنگام شلیک، سبب رشد عمق این میکرو ترک‌ها شده و در نهایت میکرو ترک‌هایی به بستر مواد گسترش پیدا می‌کنند و این ترک‌ها عرضی موجب تشکیل شبکه‌ای از ترک‌ها می‌شود.



شکل ۴- بررسی ساختار درونی فلز در منطقه نزدیک به سطح با پوشش تانتالوم در لوله ۱۲۰ میلیمتری به دنبال ۸۴ شلیک [۳۲].



شکل ۵- بررسی ساختار درونی فلز در منطقه نزدیک به سطح داخلی لوله با آستر سرامیکی SiAlON در لوله ۱۲۰ میلیمتری به دنبال ۱۲ شلیک شبیه سازی شده [۳۲].



شکل ۶- میانگین دما در طول عمق ترک با تغییر زمان برای سه پوشش مختلف در سطح داخلی لوله در ۰/۶ متری از لوله تانک ۱۲۰ میلیمتر [۳۲].

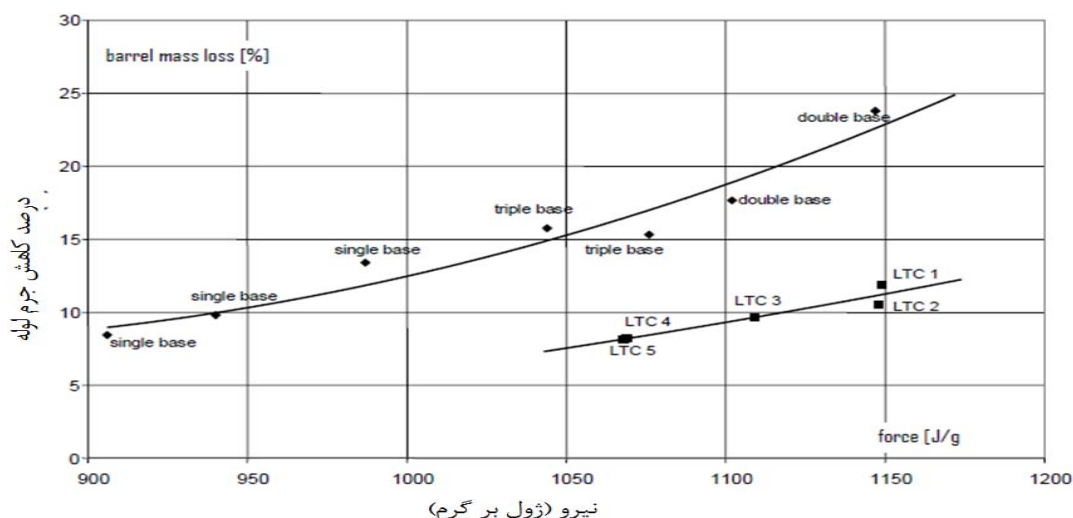
می‌اندازند. جایگزینی پوشش‌های جدید مانند سرامیک‌ها یا فلزات نسوز مانند مولیبدن، نایوبیوم، تانتال، وانادیوم و تنگستن با پوشش‌های کروم در لوله‌های توپ به منظور کاهش یا حذف فرسایش، مستلزم تحقیقات بیشتری است.

۴-۳- استفاده از مواد اصلاح شده به منظور استفاده در

لوله تفنگ

از هنگام ریخته‌گری موفقیت آمیز لوله‌های فولادی در قرن نوزدهم، فولاد به عنوان بهترین ماده برای استفاده در لوله‌های توپ‌های با کالیبر بزرگ و کوچک شناخته شده است. با این وجود، در سال‌های بعد ترکیب آن اصلاح شد، اما تاکنون هیچ جایگزین مناسبی برای آن یافت نشده است.

به علاوه، مطالعات نشان می‌دهد که دمای نزدیک سطح داخلی لوله در هنگام استفاده از این پوشش‌ها بسیار متفاوت است. شکل (۶) تفاوت دمایی را در نزدیک سطح داخلی لوله را برای هر یک از این سه پوشش به خوبی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، این دما برای سرامیک SiAlON برابر 1900 K و برای پوشش‌های کروم و تانتالوم به ترتیب معادل 1250 K و 1400 K است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که این دمای بالا برای سرامیک به علت قابلیت هدایت پایین آن می‌باشد. به علاوه بالا بودن این دما برای تانتالوم در مقایسه با کروم به ظرفیت حرارتی پایین تانتالوم نسبت داده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که وجود ترک‌های ابتدایی ناشی از تراکم حرارتی در پوشش‌های کروم و تانتالوم اجتناب ناپذیر است، با این وجود، این پوشش‌ها فرسایش را در لوله‌های توپ و تفنگ به خوبی به تاخیر



شکل ۷ - مقایسه قابلیت سایش چند نوع از پیشرانه های LTC با پیشرانه های متداول (نیرو بر حسب کاهش جرم لوله) [۳۷].

پیشرانه حاوی مقادیر زیادی از RDX است [۳۴]. هر چند مطالعات نشان می‌دهد که این پیشرانه سایش بیشتری را در مقایسه با پیشرانه های متداول از خود نشان می‌دهد، با این حال در پیشرانه تفنگی جدید موسوم به پیشرانه تفنگی با ضریب دمایی پایین^۲ (LTC) که دارای فرمولاسیون جدید^۳ (DNDA57-RDX-NC) می‌باشد، قابلیت سایش پایین تری را در مقایسه با پیشرانه‌های متداول پایینتر از خود نشان می‌دهد، که به نظر می‌رسد به دمای شعله پایین این پیشرانه جدید مربوط می‌باشد [۳۵]. در شکل (۷) تفاوت قابلیت سایش پیشرانه LTC با دیگر پیشرانه های متداول (تک پایه، دو پایه و سه پایه) مقایسه شده است. شکل (۷) پیشرانه LTC را در چندین فرمولاسیون مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷)، پیشرانه های LTC با فرمولاسیون جدید، در نیروی بسیار زیاد، قابلیت سایش پایینی را از خود نشان می‌دهد. بنابراین، به نظر می‌رسد به همراه استفاده از روش هایی نظیر استفاده از افزودنی‌ها و پوشش‌ها، با اصلاح فرمولاسیون پیشرانه‌ها امکان کاهش قابلیت سایش پیشرانه‌های تفنگی وجود دارد [۳۶].

۵- نتیجه گیری

سایش لوله توپ پدیده فیزیکی پیچیده ای است که به دلیل عوامل شیمیایی، حرارتی و مکانیکی ایجاد می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد

در دماهای بالا اگر سطح داخلی لوله فولادی توسط پوشش‌ها یا آسترهای با نقطه ذوب بالاتر از فولاد حفاظت شود، همچنان می‌توان از فولاد استفاده نمود. در سال‌های ۱۹۴۵-۱۹۴۰ م یکی از مهم ترین کارهایی که در زمینه اصلاح ترکیب لوله تفنگ انجام شد، توسعه استیلیت^{۲۱} بود، که آلیاژی بر پایه کبالت است و مقاومت آن در برابر سایش بسیار عالی است. اما متأسفانه عیب اصلی آن نقطه ذوب پایین آن (۱۲۸۰ °C) است، به طوری که هنگامی که در پیشرانه‌های دوپایه مورد استفاده قرار می‌گیرد، چندان با موفقیت همراه نیست.

۴-۴- اصلاح فرمولاسیون پیشرانه‌ها

یکی از بهترین راه‌های کاهش سایش لوله توپ، اصلاح فرمولاسیون‌های پیشرانه‌ها است. تحقیقات نشان می‌دهد که با اصلاح فرمولاسیون پیشرانه و تغییر در وزن ملکولی گازها و دمای شعله می‌توان سایش لوله توپ را اصلاح کرد [۳۳]. به طور ساده در غیاب اثر هدایت حرارتی، پیشرانه ای که گاز با وزن ملکولی پایین تولید نماید، از نقطه نظر سایش مطلوب تر است.

تحقیقات نشان می‌دهد که زمانی که در پیشرانه گاز N₂ افزایش یابد، به کاهش دمای شعله و کاهش سایش لوله تفنگ منجر می‌شود. پیشرانه های LOVA محصول چنین تلاش‌های است که به منظور افزایش ایمپتوس و کاهش آسیب پذیری توسعه یافته است. این

2 - Low temperature coefficient (LTC)

3 - Dinitro diaza alkane (DNDA) (New Plasticizer)

1 - Stellite 21

یکی از بهترین روش‌ها، استفاده از افزودنی‌هایی نظیر دی اکسید تیتانیم است که انتقال حرارت را در حدود 300 K کاهش می‌دهد، هرچند روش‌های جدیدی نظیر اصلاح فرمولاسیون پیش‌رانه، موثرترین و اقتصادی‌ترین روش کنترل سایش لوله توپ می‌باشد. با این وجود سایش لوله توپ همچنان یک مشکل اساسی است، لذا کنترل بهتر این پدیده مستلزم تحقیقات بیشتری است.

که قابلیت سایش پیش‌رانه، تابعی از ترکیب فرآورده‌های احتراقی پیش‌رانه است. از این رو، امروزه تلاش‌های زیادی در جهت توسعه پیش‌رانه‌های پراورزی با فرآورده‌های احتراقی با دمای شعله پایین، صورت می‌گیرد. سایش لوله توپ توسط افزایش مقاومت حرارتی سطح داخلی لوله به وسیله استفاده از پوشش‌ها، آسترها، افزودنی‌ها و اصلاح فرمولاسیون‌های پیش‌رانه‌ها، کنترل می‌شود. به نظر می‌رسد که

مراجع

- [1]. Buckingham, A.C. Modeling of Gun Barrel Surface Erosion: Historic Perspective. پ. Center for Advanced Fluid Dynamic Applications, Physics & Space Technology Directorate, California, 1996.
- [2]. Sopok, S. Rickard; C. Dunn, S. Thermal-Chemical-Mechanical Gun Bore Erosion of An Advanced Artillery System Part Two: Modeling and Predictions 2005, 258,671-683.
- [3]. Ahmad, I. The Problem of Gun Barrel Erosion-AN Overveiw. پ. Gun Propulsion Technology, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington DC, United States, 1988,109,311-355.
- [4]. Jussila, J. Wound ballistic simulation: Assessment of the legitimacy of law enforcement firearms ammunition by means of wound ballistic simulation. پ. The Second Department of Surgery, University of Helsinki, Finland and Police Technical Centre, Helsinki, Finland, 2005, 1-111.
- [5]. Woodley, C; Critchley, R; Wallington, D. QinetiQ Studies on Wear and Erosion in Gun Barrels. پ. Physics & Space Technology Directorate, 2004,107,1-12.
- [6]. Akhavan, J. The Chemistry of Explosives. پ. 2nd Edition, Royal Society of Chemistry, (Great Britain), pp 1-20 and 149-154, 2004.
- [7]. Walsh, C; Leverit, C. Reduced Erosion for A Propelling Charge. پ. US Patent 6,984,275, 2006.
- [8]. Hordijk, C.A; Bakker, M. Propellant and Propellant Erosivity. پ. 23RD International Symposium on Ballistic, Spain, pp 449-456, 2007.
- [9]. Montgomery, R.S. Sautter, F.K. A Review of Recent American Work on Gun Erosion and its Control. پ. U.S. Army Armament, Munitions and Chemical Command, Armament Research and Development Center, 1984,103,193-199.
- [10]. Hasenbein, R. G. Wear and Erosion in Large Caliber Gun Barrels. پ. Armament Engineering & Technology Center, 2004.
- [11]. Yoon Chung, D; Kong, H. A study on the precision wear measurement for a high friction and high pressurized gun barrel by using a diamond indenter. پ. 1999,101,1258-1263.
- [12]. Jaramaza, S; Mickovi, D; Eleka, P. Determination of Gun Propellants Erosivity: Experimental and Theoretical Studies. پ. Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, 11000 Belgrade, Serbia, January, 2010.
- [13]. Arisawa, H; Kimura, J. Application of The Hydrogen Gas Erosion Theory to Conventional Gun Propellants. پ. 19th International Symposium of Ballistics, 2001, 155-162.
- [14]. Walsh, C; Leverit, C. Reduced Erosion for A Propelling Charge. پ. US Patent 6,984,275, 2006.
- [15]. Cote, P.J; Richard, C. Gas- Metal Reaction Products in The Erosion of Chromium-Plated, Gun Bores, Wear. پ. 20th International Symposium of Ballistics, 2000, 101, 17-25.
- [16]. Hirvonen, J.K; Derek Demaree, J; Marble, D.K; Conroy, P. Gun Barrel Erosion Studies Utilizing Ion Beams. پ. Surface & Coatings Technology, 2005, 98, 167-171.
- [17]. Kimura, J. Hydrogen Gas Erosion of High Energy Lova Propellant, 16 International Symposium on Ballistic. پ. 1966.
- [18]. Klaputke, T; Stierstorfer, J. High- Nitrogen Compounds for Use in Low-Erosivity Gun Propellants. پ. Department of Chemistry and Biochemistry, Energetic Materials Research, 2008, 87. 1-6.
- [19]. Conroy, P.J; Leveritt, C. S. The Role of Nitrogen in Gun Tube Wear and Erosion. پ. ARL-TR-3795, 2006.

- [20]. Turley, D.M ; Cumming, G. A Metallurgical Study of Erosive Wear in a 105 mm Tank Gun Barrel. پ. Wear 176, pp 9-17, 1994.
- [21]. Bin, W; Gang, C; Wei, X. پ. Heat transfer in a 155 mm Compound Gun Barrel with Full Length Integral Midwall Cooling Channels. پ. Applied Thermal Engineering, 2008, 28, 881-888.
- [22]. Bin Wu. پ. Barrel Cooling: A Key Technology for Improving Gun Performance. پ. Journal of Battlefield Technology, 2005, 8, 231-236.
- [23]. Lawton, B. Termao-Chemical Erosion in Gun Barrel. پ. 2001, 251, 827-837.
- [24]. Kerwien, S. پ. Considerations of Material Selection for Small-Caliber Gun Barrels. پ. US Army, 2010.
- [25]. Niemeijer, H; Netherlands, G. پ. Erosion Control. پ. U.S. Patent 3,077,054, 1993.
- [26]. Roth, M. پ. Additive for Reduction of Gun Wear. پ. U.S patent 3,282,215, 1966.
- [27]. Desgardin, N. پ. Perut, C. پ. Additive for Gun Propellants to Impetus and Decrease Erosion. پ. Center De Researches Du Bouchet, France, 2000, 79, 1-13.
- [28]. Jacobson, D. پ. Wear Redction Additives. پ. U.S patent 3,397,636, 1968.
- [29]. Bertram, R ; Adams, W. پ. Reducing Gun Erosion By Transfer and Diffusion Coating. پ. U.S patent 4,378,256, 1983.
- [30]. Julien, G. پ. Gun Barrel. پ. U.S patent 5,856,631, 1999.
- [31]. Conory, P.J. پ. Erosion Modeling of Cracks and Coating. پ. Wear and Erosion in Gun Barrels, Australia, 2000
- [32]. Underwood, J.H; Vigilante, G.N. پ. Mulligan, C.P. پ. Review of Thermo-Mechanical Cracking and Wear Mechanisms in Large Caliber Guns. پ. 2007, 263, 1616-1621.
- [33]. Conory, P.J; Nusca, M.J. پ. Parametric Erosion Investigation: Propellant Adiabatic Flame Temperature. پ. Defence Science Journal, 2002, 52, 77-85.
- [34]. Hordjik, A. پ. Gun Barrel Erosion - Comparison of Conventional and LOVA Gun Propellants, Gun Tube Defence, 2005.
- [35]. Mueller, D.; Langlotz, W. پ. LTC Gun Propellants for use in Machine Gun Ammunition. پ. Proceed of The 36th International Conference of ICT & 32nd international pyrotechnics seminar, Karlsruhe, Germany, 2005.
- [36]. Bohn, M ; Mueller, D. پ. Insensitivity Aspects of NC Bonded and DNDA Plasticizer Containing Gun Propellants. پ. Fraunhofer-Institut F. Chemische Technologie (ICT), Germany, 2006.