

TECHNIKI BADANIA CIĄGU KOMPOZYCJI NANOTERMITOWYCH I BAZUJĄCYCH NA NICH KOMPOZYCJI NANOTERMITOWYCH

M. Maciuch¹, J. Iksal¹, A. Gilicki¹, M. Polis²

¹ Katedra Fizykochemii i Technologii Polimerów, Politechnika Śląska, Gliwice, Poland

² Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Przemysłu Organicznego, Grupa Badawcza

Technik Wybuchowych, Warsaw, Poland

mateusz.polis@ipo.lukasiewicz.gov.pl

Wstęp

Nanotermity są stosunkowo niedawno odkrytą grupą materiałów wysokoenergetycznych. Są one również nazywane metastabilnymi kompozytami międzycząsteczkowymi - MIC (z ang. metastable intermolecular composite) [1].

Termit definiujemy jako kompozycję pirotechniczną [2], składającą się typowo z wolnego metalu, będącego paliwem (reduktorem) np. Al, Mg, Ti, B [3], oraz utleniacza, którym typowo jest tlenek taki jak CuO, Fe₂O₃, Bi₂O₃, ale również utleniaczem może być sól, taka jak KClO₄ czy KMnO₄ [4]. Nanotermity charakteryzują się tym, że co najmniej jeden ze składników kompozycji musi cechować się rozdrobnieniem nanometrycznym, tj. co najmniej jeden wymiar charakterystyczny cząsteczek musi być mniejszy niż 100 nm [3]. Przykładowe kompozycje nanotermitowe wymieniono w Tabeli 1.

Tabela 1 Przykładowe składy kompozycji nanotermitowych i typu NSTEMX.

Reduktor	Utleniacz	Dodatek	Źródło
Al	WO ₃	RDX	[5]
Al	Fe ₂ O ₃	RDX	[6]
Al	CuO	NC	[7]
Al	Bi ₂ O ₃	NC	[7]
Al	CuO	CL-20	[8]
Si	NaClO ₄	-	[9]
Al	CuSO ₄ ·5H ₂ O	-	[9]

Zmiana rozmiaru ziaren zarówno paliwa, jak i utleniacza wpływa znacząco na przebieg reakcji redoks w porównaniu do termitów przygotowanych z wykorzystaniem mikrometrycznych surowców [10]. Ze względu na nanometryczne rozmiary, cząstki takie charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą czego efektem jest ich niezwykle wysoka reaktywność. Zmniejszenie rozmiarów cząstek skutkuje również wyższym stopniem homogenizacji kompozycji. Podsumowując, zastosowanie nanometrycznych surowców umożliwia polepszenie kontaktu paliwo/utleniacz oraz skrócenie dystansu między reagentami co prowadzi do zmniejszenia odległości dyfuzji dla transportu masy i ciepła. Efektem tego jest podwyższona reaktywność tego typu kompozycji i wykazywanie przez nie nieoczywistych parametrów wysokoenergetycznych.

Nanotermity wyróżniają się następującymi właściwościami: dużą wrażliwością na zewnętrzne bodźce inicjujące, wysoką liniową prędkością spalania, bardzo wysoką adiabatyczną temperaturą reakcji, obniżoną temperaturą zapłonu w odniesieniu do analogicznych w składzie kompozycji, przygotowanych jednak z mikrometrycznych surowców. Możliwe jest tworzenie kompozycji hybrydowych z innymi materiałami wysokoenergetycznymi, co skutkuje otrzymaniem kompozycji o właściwościach pośrednich pomiędzy wyjściowymi składnikami. Przykładowe zastosowania

nanotermitów to między innymi mikrosilniki, zapalniki, detektory, układy służące do spawania i zgrzewania [9].

NSTEX (z ang. nanostructured thermites and explosives) są to mieszaniny nanometrycznych termitów i materiałów wysokoenergetycznych [11]. Przykładowe hybrydowe kompozycje nanotermitowe wymieniono w Tabeli 1. Wykorzystanie w kompozycji dodatkowego materiału wysokoenergetycznego pozwala uzyskać odmienne właściwości w stosunku do kompozycji nanotermitowych. Przykładowo, dodatek RDX do kompozycji nanotermitowej Al/Fe₂O₃ podnosi maksymalne ciśnienie w stosunku do nanotermitu Al/Fe₂O₃ z około 0,25 MPa do 1,05 MPa w teście z wykorzystaniem bomby manometrycznej. Z kolei dodatek RDX do kompozycji Al/WO₃ podnosi prędkość propagacji procesu wysokoenergetycznego do około 3000 m/s w stosunku do 170 m/s dla czystego nanotermitu [5]. Dodatek CL-20 do kompozycji nanotermitowej Al/CuO powoduje bardziej gwałtowne spalanie, objawiające się znacznie jaśniejszym i większym płomieniem [12]. Kompozycja Al/CuO/TNT cechuje się podwyższonym ciepłem wybuchu, tj. 1213 J/g w stosunku do 520 J/g dla czystego TNT [13]. Połączenie nanotermitów z materiałami wybuchowymi skutkuje również zmianą ich wrażliwości na bodźce inicjujące. Na przykład kompozycja Al/Fe₂O₃/RDX [6] wykazuje większą wrażliwość na tarcie, ale jednocześnie mniejszą wrażliwość na uderzenie w stosunku do czystego RDX. Dodanie 10% NC do kompozycji Al/KClO₄/GO powoduje zwiększenie energii potrzebnej do zapłonu impulsem laserowym o długości fali równej 532 nm z 1 mJ do 8,96 mJ [14]. Należy jednak pamiętać o złożonym mechanizmie zapłonu z wykorzystaniem promieniowania elektromagnetycznego i szeregu efektów jakie należy brać pod uwagę.

NSTEX znajdują zastosowanie w mikroukładach elektromechanicznych typu MEMS (z ang. Micro Electronic Mechanical Systems) [15] oraz w bazujących między innymi na nich mikrosilnikach raketowych [16]. Hybrydowe kompozycje nanotermitowe mogą również zastąpić inicjujące materiały wybuchowe takie jak TNRO w konstrukcji inicjatorów [17]. Znane są również inne konstrukcje układów inicjujących bazujących na tych kompozycjach [18].

Celem niniejszej pracy jest krótki przegląd literaturowy dotyczący metod badania ciągu kompozycji nanotermitowych oraz bazujących na nich kompozycji hybrydowych. Badanie ciągu dla powyższych materiałów jest istotne, ze względu na ich stosowanie w mikrosilnikach raketowych. Konstrukcje tego typu, są stosowane w układach napędowych i układach sterowania pocisków raketowych czy satelit. Dla tego typu konstrukcji, kluczowe jest zapewnienie powtarzalnych parametrów silnika oraz niezwykle krótkich czasów zapłonu, gdzie wymagania te mogą spełnić konstrukcje wykorzystujące nanotermity i NSTEX-y w roli materiału wysokoenergetycznego.

Siła ciągu

Siła ciągu jest jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących materiały pędne. Jest to siła wynikająca bezpośrednio z III zasady mechaniki Newtona [19]. Ciąg kompozycji nanotermitowej typowo reagującej głównie w fazie ciekłej i stałej [20], można gwałtownie poprawić poprzez jej modernizację do kompozycji hybrydowej, dodając np. wtórny materiał wybuchowy taki jak azotan(V) celulozy [21], CL-20, RDX czy HMX [12, 22].

Tabela 2 Siły ciągu kompozycji nanotermitowych Al/KClO₄ o różnej zawartości tlenku grafenu (GO) zbadane metodą mikrosilnika raketowego z dyszą zbieżno-rozbieżną dla gęstości równej 20% TMD [23].

Kompozycja	Siła ciągu [N]	Czas spalania [ms]	Popęd siły [mN*s]	Impuls właściwy [s]
Al/ClO ₄	49,27 ± 3,17	0,11 ± 0,01	5,42 ± 0,18	92,18 ± 2,34
Al/ClO ₄ /2,5%GO	42,56 ± 2,73	0,16 ± 0,03	6,81 ± 0,21	115,82 ± 1,86
Al/ClO ₄ /5%GO	39,86 ± 1,68	0,22 ± 0,02	8,77 ± 0,15	149,15 ± 2,91
Al/ClO ₄ /8,5%GO	15,07 ± 0,84	0,42 ± 0,6	6,33 ± 0,23	107,65 ± 1,94
Al/ClO ₄ /10%GO	9,29 ± 0,68	0,65 ± 0,05	6,04 ± 0,13	102,72 ± 1,67

Do charakterystycznych parametrów, możliwych do określenia w trakcie typowego badania należą m.in.:

popęd siły - jest to wielkość opisująca działanie siły dla danego przedziału czasu. Oblicza się go korzystając z zależności:

$$I_t = \int_{t_1}^{t_2} F dx$$

F- siła [N]

t₁, t₂ - granice przedziału czasu [s].

Impuls właściwy - parametr ten definiujemy jako stosunek zmiany pędu (popędu siły) odniesiony do masy paliwa zużytej na ten cel [24]. Impuls właściwy możemy określić wzorem:

$$I_s = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F dt}{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m} dt}$$

F- siła ciągu [N]

\dot{m} - całkowity przepływ masowy paliwa [kg/s]

g₀ przyspieszenie grawitacyjne ziemi [m/s²]

Możliwe jest również uwzględnienie stałej przyspieszenia ziemskiego, co pozwala na określenie wartości impulsu właściwego na poziomie ziemi i wyrażenie tego parametru w sekundach.

Dla pewnych warunków [24], powyższy wzór można uprościć do postaci:

$$I_s = \frac{F \Delta t}{\Delta m}$$

F - siła ciągu [N]

Δt - czas pracy silnika [s]

Δm - masa zużytego paliwa [kg]

Efektywna prędkość wylotowa - definiowana jest poniższym wzorem:

$$c = I_s g_o$$

c - efektywna prędkość wylotowa [m/s]

I_s - impuls właściwy [s]

g₀ - przyspieszenie grawitacyjne [m/s²]

Jednostką impulsu właściwego w powyższym równaniu jest [s]. Powyższy wzór zakłada dwuwymiarowy model przepływu i dalej - jednolitą prędkość przepływu gazów w całym przekroju dyszy.

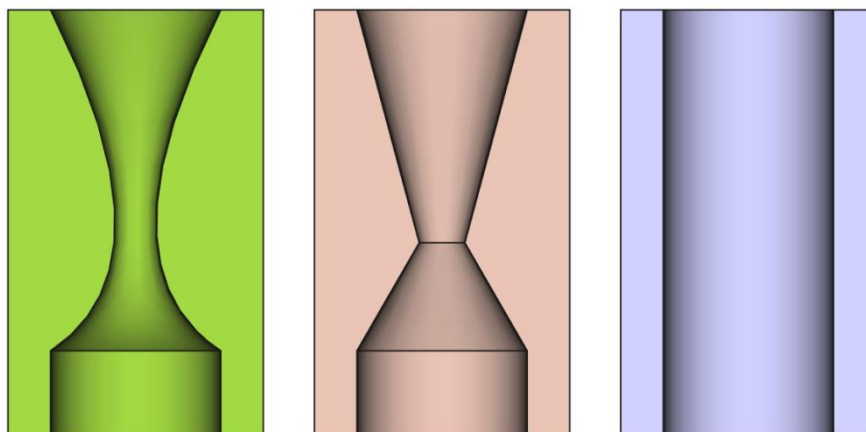
Metody badania siły ciągu

Metody w jaki można dokonać pomiaru siły ciągu generowanej w wyniku spalania materiału nanotermitowego podzielić można na dwie podstawowe kategorie, tj. na metody bezpośrednie i pośrednie. Ideą pomiarów bezpośrednich jest pomiar siły generowanej w trakcie spalania materiału w modelowym układzie i rejestrowanie jej w czasie rzeczywistym. Ich zaletą niewątpliwie jest fakt, że stanowiska pomiarowe nie muszą mieć skomplikowanej budowy, jednak rozdzielczość pomiarów jakie można na nich osiągnąć znajdują się w przedziale mN do N [25]. Przykładem tego typu konstrukcji jest większość hamowni rakietowych.

Pomiary pośrednie z kolei skupiają się na pomiarze innych parametrów, np. wychylenia wahadła w wyniku działania gazów opuszczających dyszę i określeniu z ich wykorzystaniem wartość generowanej siły ciągu. Układy pomiarowe tego typu są zazwyczaj bardziej złożone niż te wykorzystywane w metodach bezpośrednich, jednak umożliwiają rejestrację ciągu o sile rzędu pojedynczych μN [25].

Wśród metod należących do pomiarów bezpośrednich kluczową rolę pełni metoda wykorzystująca badawcze silniki rakietowe (często mikrosilniki). Polega ona na pomiarze siły generowanej w trakcie spalania w badanym silniku ściśle określonej ilości materiału. Silniki stosowane w tej metodzie wykonane mogą być z różnych materiałów, takich jak np. stal nierdzewna czy tworzywa sztuczne [14].

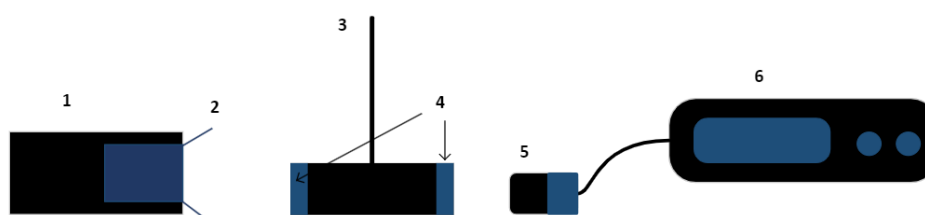
Modelowy silnik badawczy składa się z dwóch głównych elementów, tj. korpusu (typowo cylindrycznego) w którym znajduje się badany materiał wysokoenergetyczny oraz zamykającej go dyszy. Jej konstrukcja i geometria bezpośrednio wpływają na sposób, w jaki gazy opuszczają układ, co przekłada się na zwiększenie lub zmniejszenie generowanej siły ciągu [26]. Typowo, stosuje się dysze cylindryczne oraz dysze de Laval (Rysunek 1), pozwalające na gwałtowne zwiększenie efektywności silnika i paliwa. Konstrukcja dyszy de Laval cechuje się zbieżno-rozbieżnym przekrojem. Konstrukcja ta pozwala na wykorzystanie podstawowych praw hydrodynamiki i zwiększenie prędkości przepływu, a przez to zwiększenie siły ciągu.



Rysunek 1 Ideowe przekroje dyszy silników badawczych, kolejno dwie dysze de Laval o różnej konstrukcji oraz dysza cylindryczna.

Прикладовий układ pomiarowy składa się z czujnika siły (np. piezoelektrycznego) połączonego z silnikiem badawczym [27], który umożliwia pomiar siły generowanej przez pracujący silnik. Dane typowo rejestrowane są przez sprzężony z czujnikiem oscyloskop lub system DAQ. Często praktyką jest również równoczesny pomiar pracy silnika z wykorzystaniem kamery szybkoobrotowej lub fotodetektorów, co pozwala na rejestrację dodatkowych parametrów związanych z zachodzącym procesem spalania [16, 28].

Wśród pomiarów pośrednich na uwagę zasługuje bardzo prosty w budowie i użyciu układ, w którym mierzy się zmianę kąta odchylenia wahadła skrętnego wywołaną działaniem na nie gazów spalinowych. Układ taki składa się z mikrosilnika raketowego, wahadła skrętnego, czujnika Halla oraz aparatury rejestrującej. Schemat aparatury znajduje się na Rysunku 2.



Rysunek 2 Schemat układu pomiarowego, w którym mierzy się zmianę odchylenia kąta wahadła. Zbudowany jest z: 1 - komory spalania, 2 - dyszy, 3 - komory spalania, 4 - magnesów, 5 - czujnika Halla, 6 - oscyloskopu.

W omawianym układzie wylot dyszy skierowany jest na ramię wahadła skrętnego. Pęd gazów powoduje zmianę pozycji wahadła, co rejestrowane jest przez czujnik Halla. Na podstawie zmiany pozycji wahadła w funkcji czasu określany jest przebieg siły ciągu badanego układu [16, 29].

Do metod badania ciągu kompozycji nanotermitowych możemy zaliczyć również technikę w której silnik połączony jest bezpośrednio z ramieniem wahadła, a ruch wahadła może zachodzić zarówno wertykalnie jak i horyzontalnie.

Pierwszy wariant, konstrukcyjnie zbliżony do wahadła balistycznego polega na tym, że silnik jest połączony z zawieszonym wertykalnie ramieniem wahadła. Układ składa się z ramy, na której podwieszony jest wahadło z silnikiem i oprzyrządowania, na przykład optycznego czujnika położenia [30] lub miernika momentu obrotowego [31]. Praca badanego silnika powoduje odchylenie ramienia wahadła co pozwala na rejestrację siły ciągu badanego materiału, np. kompozycji nanotermitowej [32].

Drugi z opisanych wariantów pomiaru z wykorzystaniem wahadła wykorzystuje wahadło którego ruch jest możliwy tylko w płaszczyźnie horyzontalnej. Przykładowy układ tworzy wahadło umiejscowione na łożyskowanym wale, wyposażonym w czujnik momentu obrotowego. Silnik badawczy, umieszczony na końcu ramienia w trakcie pracy wprawia wahadło w ruch obrotowy. Możliwy jest zarówno pomiar z wykorzystaniem czujników momentu obrotowego, położenia jak i z wykorzystaniem metod optycznych [33].

Interesującą technikę pomiarową przedstawiono w pracy [34]. Autorzy przygotowali mikrorakiety techniką druku 3D-FDM, wykorzystując w roli materiału pędnego nanotermit $AL/Cu(IO_3)_2$. Pomiar polegał na zapaleniu złoża nanotermitu i rejestracji ruchu rakiety w płaszczyźnie horyzontalnej. Na podstawie analizy zdjęć

zarejestrowanych z wykorzystaniem kamery szybkoklatkowej autorzy określili parametry badanych kompozycji.

Wnioski i podsumowanie

Podsumowując, nanothermity oraz bazujące na nich kompozycje hybrydowe wykazują grupę interesujących właściwości, takich jak wysoka reaktywność, złożony mechanizm reakcji czy szeroki zakres wrażliwości na bodźce inicjujące.

Cechy tych kompozycji, szczególnie szeroki zakres regulacji ich właściwości wysokoenergetycznych poprzez regulację składu pozwalają na dostosowanie kompozycji do danego zastosowania, np. jako materiału pędnego mikrosilnika. Charakterystyki pracy tego typu układów, mogą być zbadane szeregiem zróżnicowanych technik. Każda z opisanych technik wykazuje pewne zalety, jednakże kompleksowa charakteryzacja zjawisk wymaga bardzo często zastosowania kilku technik pomiarowych. Z tego względu, oprócz najprostszyc pomiarów bezpośrednich występują techniki złożone oraz będące wypadkową kilku technik prostych.

WYKAZ SKRÓTÓW

CL-20 - 2,4,6,8,10,12-heksanitro-2,4,6,8,10,12-heksaazaizowurcytan

GO - tlenek grafenu

HMX - 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyklooktan; oktogen

MEMS - mikroukład elektromechaniczny (ang. micro eletromechanical system)

NC - azotan(V) celulozy

NSTEX - mieszanina nanometrycznych termitów i materiałów wybuchowych

RDX - 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazacykloheksan; heksogen

TMD - teoretyczna gęstość maksymalna; [g/cm³]

TNRO - 2,4,6-trinitrobenzeno-1,3-diolan ołowiu(II)

TNT - 2,4,6-trinitrotoluen; trotyl

Bibliografia

1 Sherif Elbasuney, M Gaber Zaky, Mostafa Radwan, and Sherif F Mostafa. Stabilized super-thermite colloids: a new generation of advanced highly energetic materials. *Applied Surface Science*, 419:328–336, 2017.

2 Ernst-Christian Koch and Sebastian Knapp. *Thermite—versatile materials*, 2019.

3 Shruti Kabra, Swaroop Gharde, Prakash M Gore, Sunil Jain, Vrushali H Khire, and Balasubramanian Kandasubramanian. Recent trends in nanothermites: Fabrication, characteristics and applications. *Nano Express*, 1(3):032001, 2020.

4 Marc Comet, Cédric Martin, Fabien Schnell, and Denis Spitzer. Nanothermites: A short review. factsheet for experimenters, present and future challenges. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 44(1):18–36, 2019.

5 Marc Comet, Cédric Martin, Martin Klaumünzer, Fabien Schnell, and Denis Spitzer. Energetic nanocomposites for detonation initiation in high explosives without primary explosives. *Applied Physics Letters*, 107(24), 2015.

6 Qingping Luo, Xinpeng Long, Fude Nie, Guixiang Liu, and Mingshui Zhu. The safety properties of a potential kind of novel green primary explosive: Al/Fe₂O₃/RDX nanocomposite. *Materials*, 11(10):1930, 2018.

7 Clay S Staley, Kristofer E Raymond, Rajagopalan Thiruvengadathan, Steven J Apperson, Keshab Gangopadhyay, Sean M Swaszek, Robert J Taylor, and Shubhra Gangopadhyay. Fast-impulse nanothermite solid-propellant miniaturized thrusters. *Journal of Propulsion and Power*, 31(1):483–483, 2015.

- 8 Ying Zhu, Xiang Zhou, Jianbing Xu, Xiaoxia Ma, Yinghua Ye, Guangcheng Yang, and Kaili Zhang. In situ preparation of explosive embedded CuO/Al/Cl₂O nanoenergetic composite with enhanced reactivity. *Chemical Engineering Journal*, 354:885–895, 2018.
- 9 Mateusz Polis, Agnieszka Stolarczyk, Karolina Glosz, and Tomasz Jarosz. Quo vadis, nanothermite? a review of recent progress. *Materials*, 15(9):3215, 2022.
- 10 Haiyang Wang, Guoqiang Jian, Garth C Egan, and Michael R Zachariah. Assembly and reactive properties of Al/CuO based nanothermite microparticles. *Combustion and Flame*, 161(8):2203–2208, 2014.
- 11 Mateusz Polis. Mixtures of nanometric thermites and secondary explosives versus primary explosives. *Materiały Wysokoenergetyczne*, 14, 2022.
- 12 Lihong Chen, Chengbo Ru, Hongguo Zhang, Yanchun Zhang, Zhiwei Chi, Haoyuan Wang, and Gang Li. Assembling hybrid energetic materials with controllable interfacial microstructures by electrospray. *ACS Omega*, 6(26):16816–16825, 2021.
- 13 M Gaber Zaky, Ahmed M Abdalla, Rakesh P Sahu, Ishwar K Puri, Mostafa Radwan, and Sherif Elbasuney. Nanothermite colloids: A new prospective for enhanced performance. *Defence Technology*, 15(3):319–325, 2019.
- 14 Ahmed Fahd, Alex Baranovsky, Charles Dubois, Jamal Chaouki, and John Z Wen. Superior performance of quaternary nc/go/al/kclo₄ nanothermite for high speed impulse small-scale propulsion applications. *Combustion and Flame*, 232:111527, 2021.
- 15 Carole Rossi, Kaili Zhang, Daniel Esteve, Pierre Alphonse, Philippe Tailhades, and Constantin Vahlas. Nanoenergetic materials for mems: a review. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16(4):919–931, 2007.
- 16 Jianbing Xu, Jiangtao Zhang, Fuwei Li, Shiyi Liu, Yinghua Ye, and Ruiqi Shen. A review on solid propellant micro-thruster array based on mems technology. *FirePhysChem*, 2023.
- 17 DB Ni, PY Dang, GQ Yu, and EY Chu. An initiator integrated the Al/MoO₃ multilayer nanothermite and bridge-wire electrode plug. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1507, page 042011. IOP Publishing, 2020.
- 18 Johannes M Grobler, Walter W Focke, Shepherd M Tichapondwa, and Yolandi C Montgomery. Pyrotechnic alternatives to primary explosive-based initiators. *Nano and Micro-Scale Energetic Materials: Propellants and Explosives*, 2:499–540, 2023.
- 19 Forman Arthur Williams, Marcel Barrère, NC Huang, et al. Fundamental aspects of solid propellant rockets, volume 116. Technivision services Slough, England, 1969.
- 20 KT Sullivan, NW Piekielek, C Wu, S Chowdhury, ST Kelly, TC Hufnagel, K Fezzaa, and MR Zachariah. Reactive sintering: An important component in the combustion of nanocomposite thermites. *Combustion and Flame*, 159(1):2–15, 2012.
- 21 Clay S Staley, Kristofer E Raymond, Rajagopalan Thiruvengadathan, Jackson J Herbst, Sean M Swaszek, Robert J Taylor, Keshab Gangopadhyay, and Shubhra Gangopadhyay. Effect of nitrocellulose gasifying binder on thrust performance and high-g launch tolerance of miniaturized nanothermite thrusters. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 39(3):374–382, 2014.
- 22 Chengbo Ru, Fei Wang, Jianbing Xu, Ji Dai, Yun Shen, Yinghua Ye, Peng Zhu, and Ruiqi Shen. Superior performance of a mems-based solid propellant microthruster (spm) array with nanothermites. *Microsystem Technologies*, 23:3161–3174, 2017.

23 Ahmed Fahd, Alex Baranovsky, Charles Dubois, Jamal Chaouki, Sherif Elbasuney, and Shady Shokry. Thrust characteristics of nano-carbon/al/oxygenated salt nanothermites for micro-energetic applications. *Defence Technology*, 2023.

24 George P Sutton and Oscar Biblarz. *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons, 2016.

25 MH Liu, JW Sun, YL Chen, et al. The thrust measurement for micro thrusters. *Mechanics in Engineering*, 25(3):9–14, 2003.

26 Steven J Apperson. *Characterization and MEMS applications of nanothermite materials*. University of Missouri-Columbia, 2010.

27 Raghav Ramachandran, Vasant S Vuppuluri, Trevor J Fleck, Jeffrey F Rhoads, Ibrahim E Gunduz, and Steven F Son. Influence of stoichiometry on the thrust and heat deposition of on-chip nanothermites. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 43(3):258–266, 2018.

28 Trevor J Fleck, Raghav Ramachandran, Allison K Murray, Whitney A Novotny, George T-C Chiu, I Emre Gunduz, Steven F Son, and Jeffrey F Rhoads. Controlled substrate destruction using nanothermite. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 42(6):579–584, 2017.

29 Long-Fei Ma, Jian-Wu He, Sen-Wen Xue, Li Duan, and Qi Kang. A microthrust measurement system with two-wire torsion balance; []. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, 39(4):948 – 954, 2018.

30 C Montag, G Herdrich, and T Schönherr. From development to measurements: a high sensitive vertical thrust balance for pulsed plasma thrusters. In *5th Sp. Propuls. Conf*, pages 1–11, 2016.

31 Manuel Gamero-Castaño, Vlad Hruby, and Manuel Martínez-Sánchez. A torsional balance that resolves sub-micro-newton forces. In *27th international electric propulsion conference*, Pasadena, CA, pages 15–19, 2001.

32 Anuscheh Nawaz, Monika Auweter-Kurtz, Georg Herdrich, and H Kurtz. Investigation and optimization of an instationary mpd thruster at irs. In *International Electric Propulsion Conference*, Princeton, USA, 2005.

33 T Frieler and R Groll. A torsional sub-milli-newton thrust balance based on a spring leaf strain gauge sensor. *Review of Scientific Instruments*, 89(7), 2018.

34 Mkhitar Hobosyan, Karen S Martirosyan, and Sergey Edward Lyshevski. Design and evaluations of 3d-printed microthrusters with nanothermite propellants. In *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pages 478–482. IEEE, 2018.