



Nowy inicjujący materiał wybuchowy — chloran(VII) - μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedź(II)

MARCIN NITA, STANISŁAW CUDZIŁO, MACIEJ CELIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Chemii,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Otrzymano związek kompleksowy chlorku miedzi(II) z chloranem(VII) 4-amino-1,2,4-triazolu. Wykonano analizy składu pierwiastkowego, badania spektrofotometryczne w podczerwieni, analizy termiczne oraz badania wrażliwości i zdolności inicjowania detonacji w prasowanym pentrycie. Stwierdzono, że otrzymany związek to koordynacyjny polimer, zbudowany z kationów miedzi powiązanych podwójnymi mostkami chlorkowymi oraz pojedynczym mostkiem tworzonym przez chloran(VII) 4-amino-1,2,4-triazolu. Nowy związek jest inicjującym materiałem wybuchowym o właściwościach zbliżonych do właściwości azydki ołowiu.

Słowa kluczowe: 4-amino-1,2,4-triazol, kompleks miedzi(II), inicjujący materiał wybuchowy

Symbole UKD: 662.1/4

1. Wstęp

Azydek ołowiu $Pb(N_3)_2$, piorunian rtęci $Hg(ONC)_2$ oraz trinitrorezorcynian ołowiu $C_6H(NO_2)_3O_2Pb \cdot H_2O$ to najczęściej stosowane inicjujące materiały wybuchowe (IMW). Związki te w czystej postaci lub w formie mieszanin stanowią ładunki pierwotne różnych spłonek, zapłonników i zapalników. Charakteryzują się dużą wrażliwością i wysoką zdolnością inicjującą i dzięki temu wyroby je zawierające działają niezawodnie. To sprawia, że są stosowane niezmiennie od wielu dziesięcioleci.

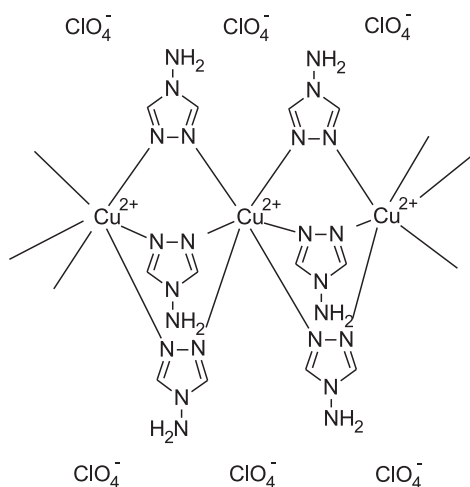
Tradycyjne IMW nie są jednak pozbawione wad. Po pierwsze zawierają jony metali ciężkich, a zatem są toksyczne i uciążliwe dla środowiska. Ponadto są nadmiernie wrażliwe na bodźce mechaniczne, niedostatecznie odporne na oddziaływanie czynników atmosferycznych, a także wchodzi w reakcje z metalami, z których wykonuje się korpusy środków inicjujących.

Z powyższych względów w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie prowadzone są badania, których celem jest otrzymanie nowych IMW o lepszych właściwościach użytkowych od obecnie stosowanych substancji. Uzyskane dotychczas wyniki wskazują, że związki kompleksowe metali przejściowych zawierające aniony kwasu chlorowego(VII) lub azotowego(V) oraz ligandy bogate w azot są często doskonałymi inicjującymi materiałami wybuchowymi [1-7].

Pierwszymi zbadanymi związkami z tej grupy były chlorany(V) i (VII) aminametyli. Jednak z powodu zbyt dużej wrażliwości i małej trwałości materiały te nie znalazły praktycznego zastosowania [8, 9]. Późniejsze badania wykazały, że zastąpienie amoniaku hydrazyną powoduje zmniejszenie wrażliwości i wzrost trwałości kompleksów, bez pogorszenia ich właściwości inicjujących. Przykładem może być chloran(VII) trihydrazynaniklu(II), którego wrażliwość i parametry detonacyjne plasują go raczej w grupie materiałów kruszących, a nie inicjujących [10].

W latach 80. XX w. Lavrenova i in. zaproponowali wykorzystanie pochodnych triazolu jako ligandów w związkach koordynacyjnych metali przejściowych [11-14]. 4-Amino-1,2,4-triazol (4-AT) wydaje się być szczególnie atrakcyjnym ligandem z punktu widzenia optymalizacji właściwości wybuchowych kompleksów z jego udziałem. Jest bowiem substancją trwałą, zawierającą aż 66,6% azotu. Może tworzyć jedno- i wielordzeniowe (w tym o budowie polimerowej) związki koordynacyjne. Znane są, na przykład, trzy różne sole kompleksowe miedzi(II) z 4-AT [14]. Jednym z nich jest polimer koordynacyjny $\{[\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)_3](\text{ClO}_4)_2\}_n$ o strukturze przedstawionej na rysunku 1.

W poprzedniej pracy [15] opisano syntezę tego związku oraz przedstawiono wyniki badań jego właściwości wybuchowych. Stwierdzono, że detonuje od pło-



Rys. 1. Polimeryczna struktura kompleksu chloranu(VII) miedzi(II) z 4-amino triazolem w roli ligandu mostkującego

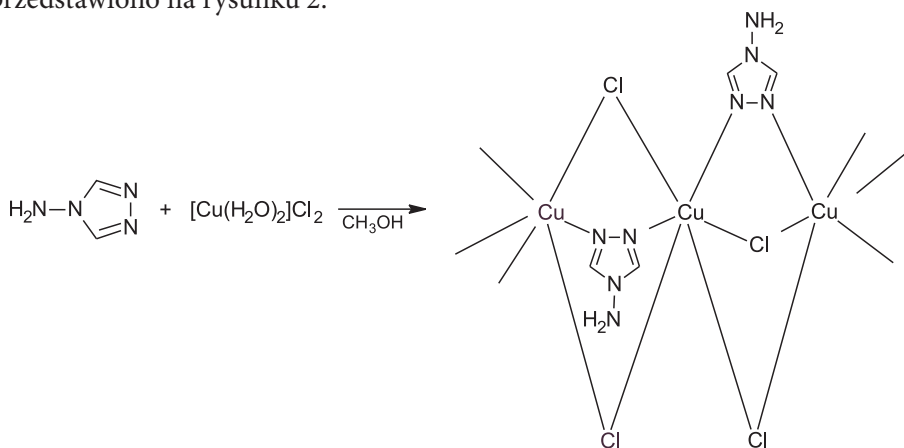
mienia, charakteryzuje się przy tym wysoką odpornością termiczną (do ok. 310°C), względnie małą wrażliwością na tarcie (10 N) i dużą zdolnością inicjującą (graniczny ładunek niezbędny do pobudzenia prasowanego pentrytu ma masę ok. 200 mg). Jednak skład pierwiastkowy chloranu(VII) μ -tri(4-amino-1,2,4-triazol) miedzi(II) nie jest optymalny z punktu widzenia maksymalizacji efektu cieplnego przemiany wybuchowej. Jego bilans tlenowy wynosi ok. 31,1%. Wyższe parametry detonacyjne i w konsekwencji poprawę zdolności inicjującej można uzyskać, gdy materiał wybuchowy ma bilans tlenowy zbliżony do zera.

W niniejszej pracy podjęto próbę otrzymania nowego IMW o strukturze podobnej do chloranu(VII) μ -tri(4-amino-1,2,4-triazol)miedzi(II), ale o korzystniejszym bilansie tlenowym. W tym celu otrzymano polimeryczny kompleks chlorku miedzi(II) z jedną cząsteczką 4-amino-1,2,4-triazolu $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)]_n$ [13, 14]. Następnie otrzymany związek poddano działaniu 25% kwasu chlorowego(VII) w celu utworzenia odpowiedniej soli amoniowej (z cząsteczką kwasu przyłączoną do grupy aminowej 4-amino-1,2,4-triazolu). Skład chemiczny i strukturę otrzymanego związku potwierdzono na podstawie wyników analiz elementarnych oraz widm w podczerwieni. Badania właściwości wybuchowych obejmowały określenie wrażliwości na tarcie, odporności termicznej (technikami analizy termicznej TG/DTA), zdolności inicjującej oraz pomiar prędkości detonacji.

2. Część eksperymentalna

2.1. Synteza kompleksu μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichlormiedź(II)

Schemat syntezy i strukturę polimeru koordynacyjnego $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)]_n$ przedstawiono na rysunku 2.



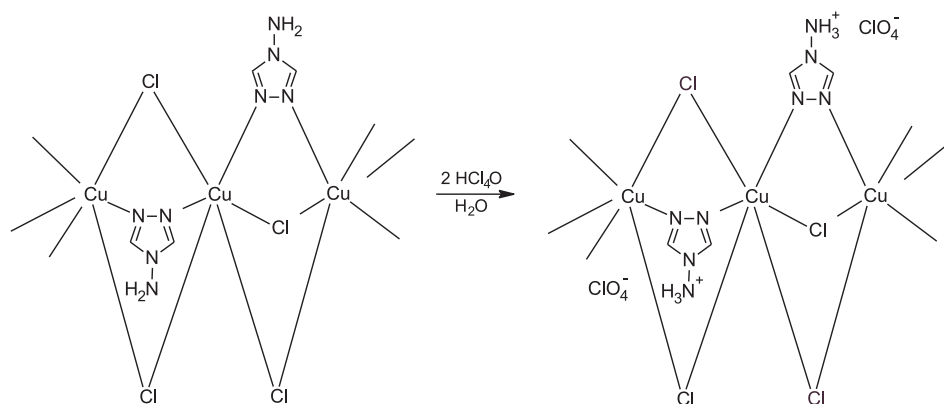
Rys. 2. Schemat syntezy i struktura koordynacyjnego polimeru $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)]_n$

W kolbie kulistej o pojemności 250 ml, zaopatrzonej w mieszadło, umieszczono ok. 8,2 g chlorku diakwamiedzi(II) (0,05 mola) (Sigma-Aldrich, nr kat. 307483) oraz 120 ml (2,96 mola) alkoholu metylowego. Do uzyskanego roztworu dodano porcjami, w ciągu ok. 15 min, ok. 4,0 g (0,05 mola) 4-amino-1,2,4-triazolu (Fluka, nr kat. 09550). Reakcję prowadzono w temperaturze pokojowej przez kolejne 2,5 godziny. Mieszaninę poreakcyjną wylano na lejek z dnem porowatym i odsączono pod obniżonym ciśnieniem. Pozostały na sączku osad przemyto metanolem, a następnie wysuszono w temperaturze ok. 40°C. Otrzymano ok. 9,8 g produktu w formie jasnozielonego proszku, co stanowi ok. 95% wydajności teoretycznej w przeliczeniu na użyty 4-amino-1,2,4-triazol.

2.2. Otrzymywanie chloranu(VII) μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedzi(II)

Drugi etap syntezy polegał na przekształceniu otrzymanego polimeru metaloorganicznego w odpowiednią sól kwasu chlorowego(VII).

W zlewce o pojemności 50 ml, zaopatrzonej w mieszadło, umieszczono 20 ml 25% kwasu chlorowego(VII), a następnie dodano ok. 1,0 g $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)]_n$. Zawartość zlewki mieszano w temperaturze pokojowej przez 30 min, po czym wylano na lejek z dnem porowatym. Produkt odsączono, przemyto metanolem i wysuszono w temperaturze 40°C. Otrzymano ok. 0,85 g jasnozielonego proszku, a zatem wydajność reakcji, zapisanej schematem z rysunku 3, wynosi ok. 57%.



Rys. 3. Schemat syntezy i struktura chloranu(VII) μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedzi(II)

2.3. Metodyka badań

Analizy składu pierwiastkowego wykonano analizatorem CHNS Vario EL III firmy Elementar Analysensysteme (Niemcy). Zawartość miedzi oznaczono tech-

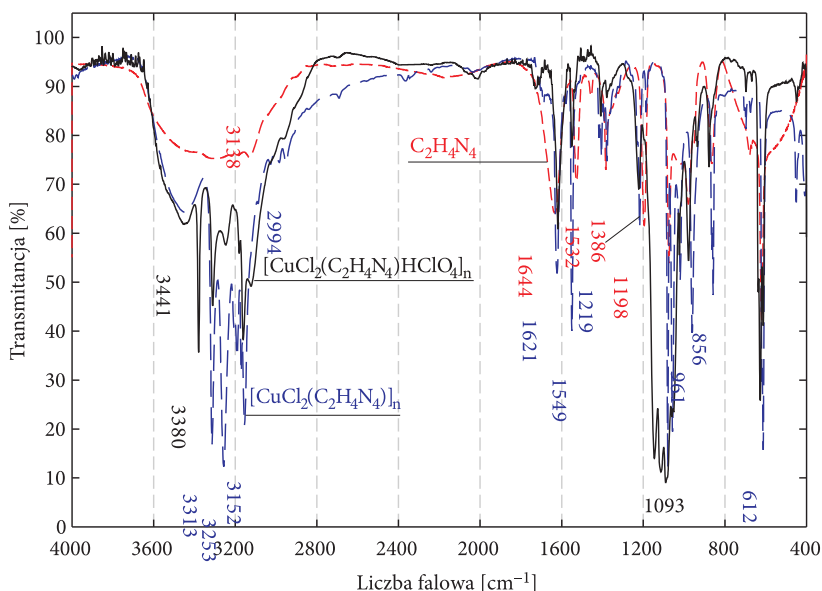
niką optycznej spektrometrii atomowej w plazmie sprężonej indukcyjnie za pomocą spektrometru emisyjnego Spektroflame-ICP M firmy Spectro Analytical Instruments (Niemcy). Próbkę o masie ok. 0,0100 g roztwarzano w 1 cm³ HNO₃. Parametry pracy przyrządu były następujące: moc 1,1 kW, częstotliwość 27,12 MHz, nebulizer koncentryczny typu Meinhard 2,4 bara, ilość dozowanej próbki 1 cm³/min, linia analityczna miedzi 327,396 nm. Widma absorpcyjne w zakresie podczerwieni zarejestrowano za pomocą spektrofotometru Nicolet iS10 firmy ThermoScientific, w pastylkach KBr zawierających ok. 0,7% analizowanego związku. Badania odporności termicznej wykonano na aparacie LabSys-TG/DTA-DSC firmy SETARAM. Próbkę o masie ok. 1,0 mg umieszczano w otwartym aluminiowym naczyniu i ogrzewano z szybkością 5°C/min. Atmosferę pieca stanowił azot podawany z natężeniem 50 ml/min. Wrażliwość na tarcie zbadano za pomocą aparatu tarcowego Petersa. Pomiar został przeprowadzony zgodnie z normą PN-C-86019 (1994). Zdolność do detonacji od impulsu ogniowego oraz zdolność inicjowania detonacji w kruszącym materiale wybuchowym określano, badając specjalnie przygotowane zapalniki zawierające ok. 0,3 g badanego IMW w roli ładunku pierwotnego i ok. 1 g pentrytu, zaprasowanego do gęstości ok. 1 g/cm³ jako ładunek wtórny. Zapalniki testowe ustawiono na płytkach stalowych o grubości 1 mm i pobudzano standardową elektryczną spłonką zapalającą. Wynik próby klasyfikowano jako detonację, jeżeli płytka uległa pełnej perforacji. Prędkość detonacji mierzono metodą elektryczną. Wykorzystywano elektroniczny miernik czasu, którego włączenie i wyłączenie następowało w chwili przzerwania przez falę detonacyjną czujników wykonanych z drutu miedzianego o grubości 50 μm. Długość baz pomiarowych wynosiła ok. 50 mm. Ładunki miały gęstość usypową i były umieszczone w rynienkach duralowych o przekroju 10 × 8 mm.

3. Wyniki i dyskusja

Zawartość miedzi, węgla, azotu i wodoru w chloranie(VII) μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedzi(II) [CuCl₂(C₂H₄N₄) · HClO₄]_n jest następująca: Cu — 19,92%, C — 7,53%, N — 17,56%, H — 1,58%. Uśrednione wyniki analiz składu pierwiastkowego były równe odpowiednio: 20,35 ± 0,8; 8,12 i 19,40 i 1,19%. Wyznaczone eksperymentalnie zawartości miedzi, węgla i azotu są nieco wyższe od obliczonych. Może to oznaczać, że μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedzi(II) nie został całkowicie zobojętniony kwasem chlorowym (VII) (tzn. nie wszystkie grupy aminowe uległy protonowaniu). Wynik oznaczenia zawartości wodoru jest obciążony większym błędem z powodu trudności w znalezieniu wzorców zawierających również mało wodoru jak badany związek.

Widma IR 4-amino-1,2,4-triazolu, μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedzi(II) i jego soli z kwasem chlorowym(VII) przedstawiono na rysunku 4. W zakresie

krótkofalowym (powyżej 3000 cm^{-1}) występują szerokie pasma absorpcji odpowiadające drganiom walencyjnym wiązań N—H i C—H. W przedziale $1700\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ obecne są wszystkie charakterystyczne pasma drgań walencyjnych i deformacyjnych pierścienia triazolowego i grupy aminowej, tzn. deformacyjne drgania grupy NH_2 (ok. 1644 cm^{-1}), walencyjne drgania pierścienia triazolowego (ok. 1532 i 1386 cm^{-1}), walencyjne drgania egzocyklicznego wiązania N—N (ok. 1198 cm^{-1}) i deformacyjne drgania pierścienia triazolowego (612 cm^{-1}).



Rys. 4. Widma absorpcji 4-amino-1,2,4-triazolu ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4$), μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedzi(II) ($[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)]_n$) i jego soli z kwasem chlorowym(VII)

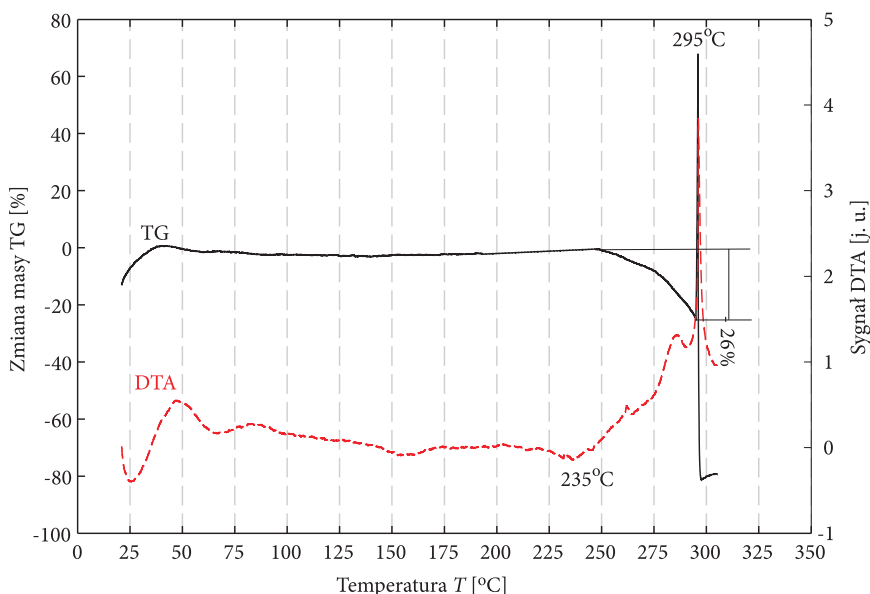
W widmie kompleksu $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)]_n$, pasma absorpcji 4-amino-1,2,4-triazolu zmieniają swe położenie. W stronę wyższych częstotliwości przesuwają się pasma drgań walencyjnych pierścienia i wiązania N—N pomiędzy pierścieniem i grupą aminową, natomiast absorpcja będąca wynikiem walencyjnych i deformacyjnych drgań grupy aminowej pojawia się przy niższej częstotliwości.

Takie zmiany widma IR potwierdzają, że 4-amino-1,2,4-triazol jest didentnie koordynowany poprzez atomy azotu N1N2 z pierścienia triazolowego. Cząsteczki ligandu ulegają wówczas polaryzacji (elektrony przesuwają się w stronę kationu Cu^{2+}), a to powoduje zwiększenie stałej siłowej wiązań w pierścieniu i wiązania grupy aminowej z pierścieniem. Jednocześnie maleje energia wiązań N—H w grupie aminowej.

Po transformacji kompleksu $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4)]_n$ w sól kwasu chlorowego(VII), pojawia się szeroki i intensywny pik absorpcji anionu ClO_4^- w zakresie

1200-1000 cm^{-1} . Położenie pasm odpowiadających drganiom pierścienia triazolowego nie ulega zmianie, natomiast walencyjne drgania wiązań N—H w grupie aminowej mają większą energię.

Typowy termogram $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4) \cdot \text{HClO}_4]_n$ przedstawiono na rysunku 5. Próbkę o masie ok. 1 mg, ogrzewaną z szybkością $5^\circ\text{C}/\text{min}$ w otwartych tyglach wykonanych z aluminium, wybuchają w temperaturze ok. 295°C .



Rys. 5. Wynik analizy TG/DTA chloranu(VII) μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichloromiedzi(II) $[\text{CuCl}_2-(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4) \cdot \text{HClO}_4]_n$

W warunkach pomiaru zauważalny rozkład próbki obserwuje się dopiero po przekroczeniu 235°C . Wybuch następuje po powolnym etapie rozkładu, w którym próbka traci ok. 26% masy.

Badania wrażliwości na tarcie wykazały stuprocentową skuteczność pobudzeń $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4) \cdot \text{HClO}_4]_n$ przy obciążeniu stempla wynoszącym 9,8 N. W tych warunkach czysty azydek ołowiu zachowuje się identycznie.

Badany materiał z łatwością ulega zapaleniu od impulsu ogniowego generowanego elektryczną spłónką zapalającą, a palenie natychmiast przechodzi w wybuch zarówno w przestrzeni ograniczonej, jak i otwartej. Ładunki o gęstości usypowej (ok. $1,8 \text{ g}/\text{cm}^3$), umieszczone w otoczkach wykonanych z duralu o przekroju $10 \times 8 \text{ mm}$, detonują z prędkością ok. 1900 m/s .

Ostatecznym sprawdzianem przydatności otrzymanego związku jako IMW jest próba skuteczności działania w roli ładunku pierwotnego w spłónkach deto-

nujących pobudzanych płomieniem. W trzech próbach stwierdzono, że ładunki $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4) \cdot \text{HClO}_4]_n$ o masie 0,3 g i gęstości usypowej, pobudzone elektryczną spłonką zapalającą, pewnie inicjują detonację pentrytu zaprasowanego do gęstości ok. 1 g/cm^3 , nawet w otoczkach papierowych. W każdym przypadku detonacja testowego zapalnika ustawionego pionowo na stalowej płycie o grubości 1 mm spowodowała jej przebicie.

4. Podsumowanie

Otrzymano nowy, nieopisany dotychczas w literaturze, związek koordynacyjny o wzorze $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4) \cdot \text{HClO}_4]_n$. Związek ten ma strukturę polimeru koordynacyjnego i jest zbudowany z kationów miedzi powiązanych między sobą dwoma mostkami tworzonymi przez aniony chlorkowe oraz jednym mostkiem w postaci chloranu(VII) 4-amino-1,2,4-triazolu.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że otrzymany związek posiada wszystkie cechy inicjującego materiału wybuchowego. Poddany działaniu bodźców termicznych lub mechanicznych ulega wybuchowi nawet w ładunkach o masie ok. 1 mg. Charakteryzuje się stosunkowo dużą trwałością i odpornością termiczną. Podczas ogrzewania z szybkością $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ulega powolnemu rozkładowi dopiero po przekroczeniu 235°C i wybucha w temperaturze ok. 295°C . Wstępne testy wykazały, że zdolność inicjująca $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4) \cdot \text{HClO}_4]_n$ jest co najmniej wystarczająca. Ładunki o masie 0,3 g pewnie pobudzają do detonacji prasowany pentryt, pomimo tego że korpus zapalnika był wykonany z papieru, a ładunek pierwotny miał gęstość usypową.

Synteza $[\text{CuCl}_2(\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_4) \cdot \text{HClO}_4]_n$ nie nastrocza żadnych trudności. Przebiega w środowisku metanolu, w pokojowej temperaturze, a substratami są tanie, powszechnie dostępne substancje.

Wykorzystanie dwóch anionów chlorkowych i tylko jednej cząsteczki chloranu(VII) 4-amino-1,2,4-triazolu w roli ligandów mostkujących pozwoliło uzyskać IMW, którego skład chemiczny powinien sprzyjać maksymalizacji parametrów detonacyjnych (bilans tlenowy ok. -10%). Didentne wiązanie ligandów przyczynia się do dużej trwałości kompleksu (oderwanie ligandu wymaga zerwania dwóch wiązań), a całkowite zapełnienie sfery koordynacyjnej jonu centralnego uniemożliwia przyłączanie cząsteczek wody, co powoduje, że związek nie jest higroskopijny.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt rozwojowy nr O R00 0011 06.

Artykuł wpłynął do redakcji 15.10.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2009 r.

LITERATURA

- [1] V. P. SIDNITSKY, A. E. FOGELZANG, *Energetic materials based on co-ordination compounds*, Russian Journal of Chemistry, 41, 78, 1997 (in Russian).
- [2] M. A. ILUSHIN, I. V. TESLYNSKY, *Primary explosives, the present and prospects*, Russian Journal of Chemistry, 41(4), 3, 1997 (in Russian).
- [3] M. H. V. HUYNH, M. A. HISKEY, T. J. MEYER, M. WETZLER, *Green primaries: Environmentally friendly energetic complexes*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 103, 5409, 2006.
- [4] M. A. ILUSHIN, I. V. TESLYNSKY, *Energetic metal complexes in primer detonators*, Russian Journal of Chemistry, 45(1), 72, 2001 (in Russian).
- [5] M. B. TALAWAR, A. P. AGRAWAL, S. N. ASTHANA, *Energetic co-ordination compounds: synthesis, characterization and thermolysis studies on bis-(5-nitro-2H-tetrazolato-N²)tetraammine cobalt(III) perchlorate (BNCP) and its new transition metal (Ni/Cu/Zn) perchlorate analogues*, Journal of Hazardous Materials, A120, 25, 2005.
- [6] M. B. TALAWAR, R. SIVABALAN, T. MUKUNDAN, H. MUTHURAJAN, A. K. SIKDER, B. R. GANDHE, A. SUBHANANDA RAO, *Environmentally compatible next generation green energetic materials (GEMs)*, Journal of Hazardous Materials, 161, 589, 2009.
- [7] A. E. FOGELZANG, V. P. SIDNITSKY, V. Y. EGORSHEV, V. V. SERUSHKIN, *Effect of structure of energetic materials on burning rate*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 418, 151, 1996.
- [8] T. URBAŃSKI, *Chemistry and Technology of Explosives*, 3, Pergamon Press, Oxford, 1965.
- [9] W. PAWŁOWSKI, A. RADOMSKI, *Inicjujące materiały wybuchowe jako istotne składniki samodzielnych urzędzeń wybuchowych*. Problemy kryminalistyki, 251, 2006, 18-33.
- [10] T. URBAŃSKI, *Chemistry and Technology of Explosives*, Pergamon Press, Oxford, 4, 1984, 497.
- [11] L. G. LAVRENOVA, S. V. LARIONOV, S. A. GRANKINA, *The metal complexes with 4-amino-1,2,4-triazole*, Изв. СО АН СССР Сер. хим., 5, 88, 1979 (in Russian).
- [12] V. P. SIDNITSKY, V. I. SOKOL, A. E. FOGELZANG, M. D. LUTOV, V. V. SERIUSHKIN, M. A. PORAY--KOSHITZ, B. C. SVIETLOV, *Vibration spectra and structure of coordination compounds with 4-amino-1,2,4-triazole as didentate ligand*, Russian Journal of Inorganic Chemistry, 32(8), 1950, 1987 (in Russian).
- [13] JING-JING LIU, XIANG HE, MIN SHAO, MING-XING LI, *Syntheses, crystal structures and characterizations of the three new copper(II) azide coordination polymers with 1,2,4-triazole ligands*, Journal of Molecular Structure, 919, 189, 2009.
- [14] J. G. HAASNOOT, *Mononuclear, oligonuclear and polynuclear metal coordination compounds with 1,2,4-triazole derivatives as ligands*, Coordination Chemistry Reviews, 131, 2000, 200-202.
- [15] S. CUDZIŁO, M. NITA, *Synteza, struktura i właściwości wybuchowe kompleksu dichloranu(VII) miedzi(II) z 4-amino-1,2,4-triazolem w roli ligandu mostkującego*, Biul. WAT, 58, 4, 2009, 239-247.

M. NITA, S. CUDZIŁO, M. CELIŃSKI

New primary explosive — chlorate(VII) μ -4-amino-1,2,4-triazol- μ -dichlorocopper(II)

Abstract. Chlorate(VII) of copper(II) coordination polymer with 4-amino-1,2,4-triazole and two chloride anions as bridging ligands was prepared and characterized by elemental analyses, IR spectra and TG/DTA analyses. Sensitivity, *detonation velocity* and detonator tests were also performed. The compound has a 1D chain structure in which Cu(II) ions are linked by triazole N1,N2 and Cl⁻ bridges. It is a detonat with initiating performance close to that of lead azide.

Keywords: 4-amino-1,2,4-triazole, complex cooper compound, primary explosive

Universal Decimal Classification: 662.1/.4

