

Identifikace výbušnin

Michal Langer

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Langer**
Osobní číslo: **A14334**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Identifikace výbušnin**
Téma anglicky: **The Identification of Explosives**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte základní informace o výbušninách.
2. Popište látky používané pro přípravu improvizovaných nástražných systémů - IED.
3. Vypracujte přehled moderních metod pro identifikaci výbušnin. Zaměřte se na spektroskopické metody.
4. Z dostupných zdrojů shromážděte Ramanova spektra výbušnin a látek používaných pro přípravu improvizovaných nástražných systémů.
5. Spektroskopicky proměřte látky dostupné pro přípravu IED.
6. Zpracujte získaná spektra do databáze Ramanových spekter.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. TUREČEK, Jaroslav. Policejní pyrotechnika. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2014, 282 s. ISBN 978-80-7380-510-4.
2. BEER, Stanislav, Jan KOMENDA, Bohumil PLÍHAL a Zdeněk FIŠERA. Vojenské výbušniny. 1. vyd. Brno: Vojenská akademie, 2001, 270 s. JACQUELINE AKHAVAN. The chemistry of explosives. 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2011. ISBN 978-184-9733-304.
3. CHALMERS, John M, Howell G EDWARDS a Michael D HARGREAVES. Infrared and Raman spectroscopy in forensic science. 1st pub. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2012, 618 s., (34) s. obr. příl. ISBN 978-0-470-74906-7.
4. OTIENOALEGO, Vincent. Some forensic applications of a combined microRaman and scanning electron microscopy system. Journal of Raman Spectroscopy, 2009, 40.8: 948-953.
5. IZAKE, Emad L. Forensic and homeland security applications of modern portable Raman spectroscopy. Forensic science international, 2010, 202.1: 1-8.
6. JACQUELINE AKHAVAN. The chemistry of explosives. 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2011. ISBN 978-184-9733-304.
7. KOLEKTIV, Luděk Lukáš a. Bezpečnostní technologie, systémy a management III: (Teorie a praxe ochrany majetku a fyzické bezpečnosti). 1. vyd. Zlín: VeRBuM, 2013. ISBN 978-808-7500-354.

Vedoucí diplomové práce:

Mgr. Hana Vašková, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

5. února 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

16. května 2016

Ve Zlíně dne 5. února 2016



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

Jméno, příjmení: Michal Langer

Název bakalářské/diplomové práce: Identifikace výbušnin

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s tím, že vyrovnaní případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne: 5. 5. 2016


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Diplomová práce poskytuje základní informace o výbušninách a zaměřuje se na studium jejich identifikace pomocí Ramanovy spektroskopie. Čtenář je nejprve seznámen se základní terminologií a parametry výbušnin. Postupně získává obecný přehled o identifikaci i dělení výbušných materiálů, metodách jejich chemické analýzy a fyzikálních principech těchto metod. Samostatnou částí je kapitola o improvizovaných výbušných zařízeních, které lze do jisté míry považovat za závažný fenomén současnosti. Praktická část práce je zaměřena na experimentální měření vzorků výbušnin. K tomuto měření byla použita metoda Ramanovy spektroskopie, která umožňuje rychle získat charakteristická spektra odrážející chemickou strukturu látky. Hlavním přínosem práce je vytvoření databáze Ramanových spekter výbušnin a prekurzorů používaných při jejich výrobě.

Klíčová slova:

Výbušniny, trhaviny, IED, Ramanova spektroskopie, spektrometrie, Semtex.

ABSTRACT

The master's thesis provides general information about an explosives and aims on their identification using Raman spectroscopy. At first a reader gets some knowledge of basic terminology and parameters of explosives. Gradually reader acquires general overview about explosives identification and classification, and about chemical analyzes of explosives and theirs physical principles. Improvised explosive devices could be considered as serious actual phenomenon and have an independent chapter in this work. The practical part is focused on experimental measurement of samples of explosives. Raman spectroscopy which allows fast acquisition of characteristics spectra, that reflect chemical structure of substance, was used for this purpose. The main benefit of this thesis consists in creation of Raman spectra database of explosives and their precursors.

Keywords:

Explosives, high explosives, IED, Raman spectroscopy, spectrometry, Semtex.

V první řadě bych chtěl poděkovat paní Ing. Haně Vaškové, Ph. D. za odborné vedení a skutečně obětavý přístup při tvorbě zejména praktické části této práce. Dále panu doc. Ing. Zdeňkovi Jalovému Ph. D. z Univerzity Pardubice za laskavý a vstřícný přístup při zajišťování měření vzorků výbušnin a vyřizování příslušných náležitostí.

Rovněž bych chtěl poděkovat pánům Ing. Schmidtovi, Ing. Jiráskovi a panu doktoru Velehradskému ze společnosti Explosia a.s. za užitečnou pomoc a přátelský přístup.

Nakonec bych chtěl vyjádřit svůj vděk své rodině a přátelům, kteří mě během celého studia pevně podporovali.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 VÝBUŠNINY	11
1.1 SOUČASNÝ VÝVOJ A TRENDY VE VÝBUŠNINÁŘSTVÍ.....	11
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY VZTAHUJÍCÍ SE K VÝBUŠNINÁM.....	12
1.2.1 Iniciece	12
1.2.2 Výbuch	13
1.2.3 Chemická výbušná přeměna	14
1.2.4 Tlaková vlna.....	14
1.3 PARAMETRY VÝBUŠNIN.....	15
1.3.1 Citlivost	15
1.3.2 Detonační rychlost	16
1.3.3 Brizance.....	16
1.3.4 Kyslíková bilance.....	16
1.3.5 Kritický průměr	16
1.3.6 Trvanlivost	17
1.4 IDENTIFIKACE VÝBUŠNIN	17
1.5 DĚLENÍ VÝBUŠNIN.....	18
1.5.1 Česko a Slovensko	19
1.5.2 Anglosaské země.....	19
1.6 DEGRADACE VÝBUŠNIN.....	20
1.7 VLIV VÝBUŠNIN NA ŽIVÉ ORGANISMY A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	21
1.7.1 Sanace zamořeného území	22
1.8 NEJZNÁMĚJŠÍ VÝBUŠNINY	23
1.8.1 Chemicky jednotné trhavy	23
1.8.2 Směsné trhavy	24
2 IMPROVIZOVANÉ NÁSTRAŽNÉ SYSTÉMY - IED	27
2.1 IMPROVIZOVANÉ VÝBUŠNINY	27
3 METODY IDENTIFIKACE VÝBUŠNIN	29
3.1 SPEKTROSKOPICKÉ METODY.....	29
3.1.1 Infračervená spektroskopie	30
3.1.2 Ramanova spektroskopie	32
3.1.3 Terahertzová spektroskopie	33
3.1.4 Hmotnostní spektrometrie.....	34
3.1.5 Jaderná magnetická rezonanční spektroskopie	36
3.2 OSTATNÍ METODY	37
3.2.1 Analýza s použitím činidel.....	37
3.2.2 Mikroskopie – mikrotaganty	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
4 RAMANOVA SPEKTRA VÝBUŠNIN	40

4.1	OKOLNOSTI MĚŘENÍ A POŽADAVKY	40
4.2	INSTRUMENTACE	41
4.2.1	Spektroskopický přístroj i-Raman [®] Plus	41
4.2.2	Optický mikroskop	42
4.2.3	Sonda BAC 102	43
4.3	POPIS MĚŘENÍ	44
4.3.1	Měření na půdě Univerzity Pardubice	45
4.4	MĚŘENÉ VZORKY VÝBUŠNIN	45
4.5	ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVA ZÍSKANÝCH DAT	47
4.5.1	Srovnání spekter různých výbušnin	48
4.5.2	Měření s pomocí mikroskopu a sondy	48
4.5.3	Univerzalita spekter	49
4.6	DATABÁZE SPEKTER	50
4.6.1	Práce s databází	51
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
	SEZNAM OBRÁZKŮ	58
	SEZNAM TABULEK	59

ÚVOD

Účelem diplomové práce je podat stručnou a jasnou představu o výbušninách, jejich dělení, vlastnostech, významu pro moderní svět a dalších souvisejících pojmech. Práce se také okrajově zabývá tématem improvizovaných výbušnin a výbušných zařízení (IED), které jsou velmi často používány teroristy. Popisuje účel nástražných zařízení jejich obvyklou strukturu a typy výbušnin v nich používaných.

Schopnost identifikovat výbušný materiál má velký význam pro bezpečnostní pracovníky, vyšetřovatele a v neposlední řadě i hasiče. Znalost výbušniny použité na místě činu přispívá k objasnění případu a dopadení pachatelů. Hasiči, kteří dokáží spolehlivě identifikovat nebezpečné látky, mohou podniknout správná a hlavně včasná opatření, díky kterým se předchází neštěstí. Přesné spektroskopické přístroje jsou bezpečnostním pracovníkům a hasičům v tomto směru velmi nápomocny.

Metody analýzy výbušnin respektive jejich funkční principy jsou jednoduše vysvětleny v závěru teoretické části. Rozhodně se nejedná o úplný výčet, nýbrž spíše o ukázkový výběr ze značného množství metod. Podstatná část třetí kapitoly je věnována nedestruktivním spektroskopickým metodám, jako jsou například infračervená nebo Ramanova, které jsou prakticky využitelné pro identifikaci výbušných materiálů a to přímo na místě jejich nálezu. Oproti tomu nukleární magnetická spektroskopie nebo hmotnostní spektrometrie vyžadují laboratorní vybavení, prostředí i přípravu. Dále jsou jmenovány dvě další metody, kde první se zabývá identifikací látky pomocí její chemické reakce s činidly a druhá je zaměřena na hledání a identifikaci drobných částic tzv. mikrotagantů. V praxi je doporučeno kombinovat více metod využívajících různé principy.

Praktická část popisuje metodu a prezentuje dosažené výsledky při praktickém experimentu, kdy byla získána Ramanova spektra téměř 30 druhů výbušnin a jejich prekurzorů. Následně byly údaje zpracovány a vloženy do databáze vytvořené na Ústavu elektroniky a měření na Fakultě aplikované informatiky, UTB ve Zlíně. Tato spektra mohou v budoucnosti sloužit jako referenční data při analýze neznámé látky a jsou tedy cenná.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝBUŠNINY

Za výbušninu lze označit v podstatě jakoukoli látku, schopnou výbušné přeměny. Obvykle je tím ale myšlena látka schopná v relativně malém množství vysokého vývinu energie (teplo, objem plynů a jejich tlak) a to ve zlomcích sekund. V takovém případě hovoříme o chemických výbušninách. [1]

Každá známá výbušnina obsahuje ve své molekule některou z explosoforních skupin. To je funkční skupina, která dává látce výbušninářské vlastnosti. Pokud se tedy pomocí chemické analýzy podaří takovou skupinu v molekule odhalit, můžeme s velkou pravděpodobností zařadit látku mezi výbušniny. Známými funkčními skupinami jsou: [1]

- nitroskupina $-\text{NO}$,
- nitroskupina $-\text{NO}_2$,
- peroxidová skupina $-\text{O}-\text{O}-$ a další.

Pouhá přítomnost explosoforní skupiny ale nemusí nutně znamenat, že je zkoumaná látka skutečně výbušninou, velmi důležitý je i způsob vazby této skupiny k molekule a koncentrace takové skupiny v molekule. [1]

Někdy je možné se setkat s označením energetický materiál. Takové označení je částečně zavádějící a utváří relativně mylnou představu o výjimečném obsahu energie skrývajícím se ve výbušnině. Např. fosilní paliva obsahují někdy i několika násobně více energie než výbušnina o stejné hmotnosti. Charakteristickou vlastností výbušnin je uvolnění energie v krátkém čase a jsou tedy navrhované spíše pro vysoký výkon. [1]

1.1 Současný vývoj a trendy ve výbušninářství

Těžiště současné produkce sice tkví ve výbušninách nalézajících uplatnění v civilním sektoru, avšak paradoxně vyšší finanční prostředky jsou vynakládány ve výzkumu vojenských výbušnin. Obecně se výzkum soustřeďuje na materiály s vysokým výkonem. Ve vojenství je výkon vyjádřen vysokými hodnotami detonační rychlosti a detonačního tlaku. Oproti tomu jsou při civilním využití upřednostňovány parametry jako vysoká pracovní schopnost, bezpečnost při manipulaci a cena. Nezanedbatelný pro výzkum je rovněž tlak na ekologičnost výbušnin i jejich výroby. Nahrazují se toxické komponenty nebo jsou vyvíjeny úplně nové látky. Mezi ekologicky přívětivější třaskaviny (tzv. „green primers“) patří např. Dinol nebo draselná sůl (KDNP). [2]

Vojenskou výbušninou s velmi dobrým poměrem cena/výkon je Oktogen (HMX), který je stále široce využíván. Intenzivního zájmu se u vojenských výbušnin dostává výkonným a méně citlivým trhavinám LOVA (např. FOX – 7) a trhavinám s klecovou strukturou molekuly vyznačujícím se vysokou hustotou (HNIW a další). [2]



Obr. 1: TNT je postupně nahrazován výkonnějšími trhavinami. [3]

V případě průmyslových trhavin se globálně ustupuje od dynamitů ve prospěch trhavin amonoledkových (ANFO), jež jsou připravovány na místě spotřeby. Hojně se v těžbě používají trhaviny s obsahem vody tzv. „slurry“, které mohou být používány jednak samostatně nebo v kombinaci s ANFO (Heavy ANFO - HANFO). [2]

1.2 Základní pojmy vztahující se k výbušninám

V této části jsou stručně objasněny některé pojmy z oblasti výbušninářství, kterým není věnována samostatná kapitola nebo její část.

1.2.1 Iniciace

Proces přivedení výbušnin k explozi. Ke spuštění výbuchové přeměny je nutné dodat dostatečné množství počáteční energie ve vhodné podobě v závislosti na citlivosti výbušniny. Energetický impuls (aktivační energie) musí zajistit reakci výbušniny tak, aby dále mohla přeměna probíhat již samovolně, dokud není výbušnina spotřebována. Správná iniciace je rozhodující pro správnou funkci nálože, proto je zapotřebí zvolit správný iniciační prvek (např. rozbuška). [1]

Aktivační energie může být vytvořena: [1]

- rázovou vlnou,
- nárazem,
- třením,
- nápichem,
- jiskrou,
- plamenem
- nebo chemicky.

Pro iniciaci třaskavin stačí obvykle velmi málo energie a využívají se tak pro přivedení méně citlivých trhavin k explozi. U trhavin typu DAP (směsi dusičnanu amonného s palivem), které jsou na vnější podněty ještě méně citlivé, musí být použita tzv. počínová nálož, kterou lze přirovnat k vícestupňovému iniciačnímu procesu: rozbuška – trhavina – DAP trhavina. [1]

1.2.2 Výbuch

Synonymum exploze. Lze definovat jako proces, kdy je uvolněno v krátkém čase velké množství energie. Vzniklá energie se spotřebovává utvářením tlakových vln, přesunováním materiálu, tepelným a v případech jaderných výbuchů i ionizujícím zářením. Výbuchy dělíme do tří kategorií: [1, 4]

Chemické – k uvolnění energie dochází chemickou reakcí, kdy se složitější molekula rozpadne na stabilní menší molekuly (CO_2 , H_2O , N_2 apod.). Reakce je exotermická, po iniciaci probíhá zcela samovolně, rychle, a bývá doprovázena vývinem plyných zplodin. Většina chemických výbušnin v základu obsahuje kyslík s dusíkem (skupiny NO , NO_2 a NO_3) a oxidovatelné prvky (paliva) jako vodík a uhlík. Výjimkou jsou azidy a sloučeniny dusíku trijodoamin (NI_3) a azoimid (NH_3NI_3), které kyslík neobsahují. [1, 4]

Fyzikální – může nastat u zařízení pracujících s vysokými tlaky a tak je obvykle zmiňován v souvislosti s pneumatickými a hydraulickými systémy (parní kotle, expanzní nádoby, tlakové nádoby). Hlavním rozdílem od chemického výbuchu je, že uvolňující se plyn (příp. kapalina) nevzniká chemickou reakcí, nýbrž již existuje – dochází pouze k náhlé přeměně potenciální energie v kinetickou. Fyzikální výbuch může být zapříčiněn i jinými mechanismy např. teplotní roztažností. [1, 4]

Jaderné – podstatně výkonnější a ničivější než předchozí případy. Rázové vlny jsou podobné těm, vznikajícím při explozích chemických výbušnin, trvají však déle. Produktem jaderného výbuchu je i intenzivní infračervené a ultrafialové záření. [1]

1.2.3 Chemická výbušná přeměna

Podle způsobu přeměny dělíme následovně:

Explozivní hoření – teplo vznikající chemickou reakcí v reakční zóně je přenášeno na další následující vrstvy vzniklými zplodinami. Explozivní hoření se šíří materiálem pomaleji, vzácně rychlostí vyšší než 10 cm/s. Zásadní vliv na rychlost hoření má tlak. Obecně výbušná přeměna probíhá rychleji při vyšším tlaku, čehož se využívá mimo jiné i u palných zbraní. Explozivní hoření není na rozdíl od „obyčejného“ hoření závislé na kyslíku z atmosféry (výbušnina obsahuje jak palivo, tak okysličovadlo). [1, 5]



Obr. 2: Střeliviny jsou charakteristické explozivním hořením. [6]

Detonace – zde je reakce přenášena na zbytek materiálu pomocí rázové vlny šířící se rychlostí vyšší než rychlost zvuku v místních podmínkách. Rychlost výbušné přeměny závisí na druhu výbušnin a panujících podmínkách, pohybuje se v intervalu 1 až 9 km/s. Detonace je charakteristická vlastnost trhavin. [5]

1.2.4 Tlaková vlna

Tlaková vlna způsobuje ve svém okolí postupnou změnu tlaku a prostředím se šíří podobně jako akustická vlna. Pokud po explozi vznikne čelo rázové vlny tzv. diskontinuita, pozorujeme přechod tlakové vlny na vlnu rázovou (extrémní tlaková vlna). Diskontinuita tvoří hranici mezi oblastí, ve které panují relativně běžné podmínky s oblastí, kde panuje vlivem exploze vysoký tlak a teplota. Za čelem postupující rázové vlny tedy dochází ke skokové změně podmínek. Rázová vlna postupně ztrácí energii a přechází až na vlnu

akustickou. Na šíření a účinek tlakové vlny má zásadní vliv tvar okolí (rozmístění budov, pevné překážky). Pokud je okolí exploze nepoddajné (např. v tunelu), tlaková vlna má více energie a šíří se intenzivněji zbývajícím volným prostorem. [1]

1.3 Parametry výbušnin

O výběru výbušniny pro daný účel rozhodují její vlastnosti, přitom výkon nemusí být často prvořadý. Důležitými parametry u průmyslových trhavin jsou bezpečnost, vysoká pracovní schopnost, kyslíková bilance a samozřejmě cena. Úprava vlastností se provádí přidáním dalších komponent (např. chemický stabilizátor) nebo speciálním výrobním postupem (např. vytvoření tzv. horkých jader pro zvýšení citlivosti). Rozlišovaných parametrů je mnoho, uvedeny jsou jen některé z nejdůležitějších.

1.3.1 Citlivost

Vlastnost vyjadřující typ a míru podnětu potřebného k iniciaci dané výbušniny. Důležitý údaj z pohledu manipulační bezpečnosti i zajištění spolehlivé funkce. Citlivost výbušniny lze vhodnými prostředky měnit. Má – li být zvýšena, hovoří se o zcitlivění (senzibilizaci). V opačném případě se hovoří o flegmatizaci. Úpravu citlivosti je možné provést cestou chemickou (výbušninářsky aktivní látky) nebo cestou fyzikální (výbušninářsky neaktivní látky). [1, 7]

Možné podněty iniciace jsou: [8]

- tepelný,
- mechanický (náraz, tření),
- elektrostatická jiskra.

Senzibilizace – chemické zvýšení citlivosti je možno provést přidáním výbušniny s vyšší citlivostí na konkrétní iniciační podnět. Přidání citlivější výbušniny nemusí znamenat zvýšení výkonnostních parametrů vzniklé směsi. Fyzikální cestou lze citlivost brizantní krystalické výbušniny obecně zvýšit přidáním látky, která je relativně tvrdá a jejíž částice mají ostré hrany, např. drcené sklo. [1, 7]

Flegmatizace – proces znečitlivění výbušniny. Flegmatizovat lze buď látkou výbušninářsky neaktivní (vosky) nebo jinou výbušninou (TNT). V případě použití vosků se obvykle jedná o množství v řádech několika procent. Současným trendem je nahrazování vosků polymery, které dokázaly odstranit problémy s tvarovou nestálostí za vyšších teplot,

nízkou mechanickou pevností apod. Snížení citlivosti k mechanickým podnětům je žádoucí ve speciálních případech, například předejít exploze bojové náplně urychlované munice nebo nežádoucí exploze výbušniny po zásahu střelou. Některé výrobní metody, při nichž se výbušniny zpracovávají, se bez flegmatizace neobejdou (lisování náloží). [1, 7]

1.3.2 Detonační rychlost

Jeden z nejdůležitějších údajů pro hodnocení výkonu výbušniny je detonační rychlost, udávaný obvykle v m/s. Závisí hlavně na typu a jakosti výbušniny a jejím zpracování. Dalšími ovlivňujícími faktory jsou: hustota, senzibilizátory, teplota, způsob laborace, okolí výbuchu, typ a průměr iniciátoru, uskladnění, rozměry nálože. [9]

Metody měření: Dautericheova, fotografická, TDR systém, metoda s využitím optických vláken a další. [9]

1.3.3 Brizance

Ničivý účinek iniciované výbušniny na své nejbližší okolí. Brizance přímo souvisí s detonační rychlostí a hustotou. Se vzrůstající hustotou vzrůstá i koncentrace energie na jednotku objemu a tím i účinek. U výbušnin s vysokou detonační rychlostí se dá očekávat i vysoká brizance. Vysoká brizance je žádoucí při důlních pracích (odpaly velkých objemů materiálu) a jejichmi nejvyššími hodnotami disponují zejména vojenské trhaviny. [10, 11]

1.3.4 Kyslíková bilance

Parametr detonujících výbušnin udávající poměr mezi množstvím oxidovadla a paliva. Poměr mezi těmito složkami má vliv na výkon, trvanlivost a toxicitu zplodin. Přebytek nebo nedostatek kyslíku je vyjádřen váhovým procentem. Z pohledu minimalizace toxicity je obecně vhodná kladná hodnota blízká nule, avšak určení skutečného složení zplodin je velmi náročné a jejich odhad pomocí údaje o kyslíkové bilanci je pouze orientační. Kyslíková bilance se netýká výbušnin neobsahujících kyslík. [1]

U důlně bezpečných trhavin je důležitá kladná bilance (např. Ostravit C +3,5 %) aby nedošlo k zahoření po smísení horkých zplodin a vzduchu. [1]

1.3.5 Kritický průměr

Minimální průměr nálože, kdy po iniciaci ještě dochází k detonaci. Pokud je průměr pod touto hranicí, jsou ztráty energie potřebné pro přenos reakce na další vrstvy materiálu příliš vysoké a k detonaci nedochází. U litých náloží je kritický průměr vyšší než u náloží

lisovaných. Je – li ve výbušnině jemně rozptýlen plyn (vznikají plynové inkluze), dochází ke snížení kritického průměru. Obecně platí, že se zvyšující se citlivostí výbušniny klesá její kritický průměr. [1, 10]

1.3.6 Trvanlivost

Vyjadřuje schopnost výbušniny odolávat chemickým látkám a dalším vnějším vlivům. Hlavními faktory ovlivňujícími dobu trvanlivosti je jakost výbušniny a podmínky panující ve skladovacích prostorech. Faktorem, který značně snižuje dobu použitelnosti je vysoká teplota. Běžné trhavin (např. TNT, RDX) vykazují při správném skladování životnost v řádech desetiletí. [8]

Na základě některých dlouhodobých výzkumů byly stanoveny „poločasy rozpadu“ některých hojně používaných výbušnin (TNT, RDX, HMX) v zalesněném prostředí mírného pásu. Tyto byly smíchány s půdou a zakopány několik cm pod úroveň povrchu. Průběžnými kontrolami se zjistilo, že po 20 letech více než 70 % HMX a RDX přetrvalo v původní podobě. V případě TNT přetrvalo pouze 10 %. Na základě získaných poznatků byly odhadnuty poločasy rozpadu následovně: TNT 1 rok, RDX 36 a HMX 39 let. [8]

1.4 Identifikace výbušnin

Metody identifikace výbušnin a jejich složek nacházejí své místo v průmyslu (nakládání s odpady), forenzních vědách i ochraně životního prostředí. Z pohledu identifikace trhavin je důležité jejich dělení na chemicky jednotné a směsné. Chemicky jednotnou trhavinou (individuální) rozumíme takovou, která je ve své „čisté“ formě, resp. neobsahuje žádné jiné látky upravující její vlastnosti. V čisté formě se trhavin používají jen zřídka a příkladem je např. tritol, který bývá bez příměsí laborován do vojenské munice. [7]

Forenzní identifikace skýtá velké možnosti a nabývá na významu i v souvislosti s aktuálním děním. Mezi pyrotechnické stopy řadíme povýbuchové zplodiny a úlomky nebo střepiny vybuchlého pyrotechnického objektu. Fragmenty objektu jsou zkoumány defektoskopicky a metalograficky a můžou vypovědět o druhu použité výbušniny. Množství a kvalita povýbuchových zplodin závisí na výkonu výbušniny. Při iniciaci často výbušná přeměna dosahuje tak vysokých hodnot, že jsou nezreagované (avšak velmi malé) množství výbušniny rozptýleny v okolí výbuchu. Vysoká teplota během výbuchu může vést i k odpaření a následné kondenzaci zbytků výbušniny na okolních předmětech, kde mohou být detekovány a následně analyzovány. Při sběru pyrotechnických stop jsou

odebírány vzorky z místa výbuchu (kráter), na stěně kráteru, na odvalu a z okolí centra výbuchu. [12]

Určení použité průmyslově vyrobené výbušniny z forenzních stop je důležité pro zjištění výrobce a výrobních podrobností (šarže, datum výroby atd.). V tomto směru byl učiněn pokrok prostřednictvím značkování výbušnin během výroby. Výrobce přidává do svých produktů vhodné látky, které napomáhají nejen detekci, ale i jednoznačné identifikaci. Pro povýbuchovou identifikaci se jako reálně použitelná metoda jeví přimíchávání množství mikroskopických částic tzv. microtaggants. Částice vyrobené z odolných plastických hmot po výbuchu ulpívají na objektech v okolí. Po jejich detekování na místě exploze a mikroskopickým zkoumání podávají informace o výbušnině, které mohou být pro objasnění případu hodnotné. [12]

Směsné trhavinny se na rozdíl od individuálních dají přizpůsobovat a odpovídají svým složením účelu použití. Důvodů pro výrobu je několik: [7]

- Úprava citlivosti výbušniny (senzibilizace, flegmatizace),
- příprava litých náloží,
- upřednostnění jistých vlastností výbušniny (např. zvýšení trhavého účinku),
- potřeba mechanicky odolných náloží,
- potřeba plastických náloží,
- nahrazení základních trhavin v případech mimořádné spotřeby pro laboraci.

1.5 Dělení výbušnin

Klasifikace výbušnin často vychází ze zažitých zvyklostí a národ od národu se může hodně lišit. Problém v pyrotechnické praxi však nevzniká, jelikož i v odlišných přístupech je problematika obsažena v celé šíři (dochází maximálně k prolínání nebo sloučení pojmů). Výbušniny lze dělit například z hlediska: [1]

- použití,
- chemické struktury,
- počet složek,
- konzistence,
- místa použití.

1.5.1 Česko a Slovensko

Základním hlediskem pro dělení je hledisko použití, které rozlišuje výbušniny na střeliviny, třaskaviny, trhaviny a pyrotechnické slože. [1, 6]

Střeliviny – používány jako výmetné náplně v nábojích, hnací hmoty raket a pyrogenerátory. Podle počtu komponent se dělí na jednosložkové (obvykle nitrocelulóza), dvousložkové a vícesložkové. Zrna mohou být vyráběna ve formě kuliček, destiček, válečků, trubiček, pásků atd. Střeliviny bývají iniciovány teplem a procesem jejich přeměny je explosivní hoření. [1, 6]

Třaskaviny – kategorie látek vysoce citlivých na náraz, tření, teplo, jiskru, vyžadují tak opatrnou manipulaci. Slouží zejména pro iniciaci méně citlivých trhavin, neboť snadno přecházejí od explosivního hoření v detonaci. Jsou schopné detonovat i ve velmi malých množstvích. Uplatnění nachází v rozbuškách a zápalkách nábojů. Známými třaskavinami jsou: azid olovnatý, fulminát stříbrný, třaskavá rtuť. [1, 6]

Trhaviny – látky středně citlivé k iniciačním podnětům schopné detonace až od větších rozměrů nálože (kritický průměr). Hlavní rozdíl od třaskavin tkví ve způsobu iniciace, kde trhaviny vyžadují vznik silné rázové vlny vyvolané rozbuškou, jinou výbušninou či jiným dostatečně silným podnětem. Místo nalézají při destrukčních pracích, v těžbě i ve speciálních odvětvích průmyslu. Výkonově přesahují třaskaviny. [1, 6]

Pyrotechnická slož – homogenizovaná směs okysličovadla, paliva a přídavných látek. Částice směsi mohou být vyrobeny a použity jako zrna, vločky nebo jemné prášky nebo mohou být slisovány. Funkcí slože je vytvoření záblesků světla, zvukových efektů, dýmu nebo plynu eventuelně kombinace. Základními typy složí jsou: střelný prach, bleskový prach, kouřové kompozice, zpoždovací slože a další. [1]

1.5.2 Anglosaské země

Stejně jako v případě ČR, SR a dalších jsou výbušniny děleny podle různých kritérií. Nejznámějším způsobem je dělení podle typu výbušné přeměny, tedy na výbušniny deflagující (low explosives) a detonující (high explosives). [13]

Low explosives – obvykle směs okysličovadla s palivem. Za normálních podmínek deflagují (explosivně hoří), v utěsněném stavu nebo za vysokého tlaku mohou přecházet v detonaci. Používané jsou převážně jako hnací směsi. Do této kategorie spadá i vybraná

pyrotechnika (např. dýmovnice, osvětlovací slože), z tuzemského pohledu skupina slučuje střeliviny a určitou část pyrotechnických složí. [13]



Obr. 3: Dýmovnice je jedním z mnoha typů pyrotechnických složí. [14]

High explosives – podstatně výkonnější látky používané v průmyslu, vojenství atd. s detonační rychlostí 1000 až 9000 m/s. Dále se dělí podle jejich citlivosti na: [13]

Primary explosives – velmi citlivé na vnější podněty. Odpovídá kategorii třaskavin.

Secondary explosives – méně citlivé. Mohou být přidávány do rozbušek a jiných iniciátorů pro zesílení exploze. Řadí se sem např. TNT, RDX, PETN apod.

Tertiary explosives (blasting agents) – kategorie výbušnin necitlivých k běžným iniciačním prostředkům. Pro dosažení jejich výbuchu je zapotřebí vyšší energie, proto jsou iniciovány menšími náložemi trhavin. Nejznámějším zástupcem je ANFO. Z tuzemského pohledu se jedná o trhaviny typu DAP.

1.6 Degradace výbušnin

Degradace (rozklad) je v této podkapitole rozdělena na tepelnou, fotochemickou, hydrolytickou a mikrobiální. Mezi další faktory ovlivňující stabilitu se řadí např. radiace, tlak, přítomnost rozpouštědel a nečistot. Produkty očekávaného způsobu rozkladu (exploze) jsou závislé na chemickém složení a panujících podmínkách, kde hlavně teplota při výbuchu hraje důležitou roli. Konkrétní zdroje, ze kterých bylo čerpáno, se zabývaly rozklady známých výbušnin, jako jsou TNT, RDX či HMX. [8]

Tepelná – během detonace trhaviny (TNT, RDX, HMX) za obvyklých podmínek dochází ke vzniku iontů uhlíku, kyslíku, dusíku, oxidů dusíku a uhlíku, kyanovodíku, vody a dalších látek. Většina takových meziproduktů mezi sebou dále reaguje a vznikají finální produkty, což jsou dusík, oxid uhličitý, uhelnatý a voda. Jiné výbušniny vykazují podobný trend. [8]

Fotochemická (fotolytická) – v případě vystavení trhaviny přímému slunečnímu svitu nebo ultrafialovému záření dochází k jejímu rozkládání. Rozklad je ovlivněn expozičním časem a vzdáleností od zdroje záření. Například roztoky vody s obsahem TNT vystavené slunečnímu záření poměrně rychle degradují. Výsledným produktem (meziproduktem) může být tzv. „růžová voda“ (pozn. překlad). [8]



Obr. 4: Tzv. „růžová voda“ je znamením znečištění prostředí TNT. [15]

Hydrolytická – rozkladné reakce při kontaktu s vodou. Důležitá je hodnota kyselosti. [8]

Mikrobiální – cílem některých vědeckých pokusů v minulosti bylo odhalení a zdokumentování interakcí mezi mikroorganismy a výbušninami. Obecně se jednalo o identifikaci produktů degradace ve snaze získat a ohodnotit možné metody pro likvidaci zamoření způsobených výbušninami (nejčastěji TNT). Bylo experimentováno s mnoha druhy bakterií (rod *Pseudomonas*, rod *Veillonella*, *Escherichia coli*) i hub. V některých případech byl zkoumán vliv kyslíku nebo podpůrných látek (např. substance z kukuřice) na reakci. Při pokusech s půdní mikroflórou nebylo v případě TNT dosaženo úplného rozkladu. [8]

1.7 Vliv výbušnin na živé organismy a životní prostředí

Významným problémem spojeným s využíváním výbušnin je kontaminace půdy a podzemních vod. S kontaminací se můžeme setkat v dolech, na vojenských střelnicích, ve vrtech a samozřejmě provozech zpracovávajících výbušninu. Nelze také opomenout globální zátěž životního prostředí plynoucí z minulých konfliktů (válek). [4]

Až do poloviny 80. let 20. století byl přebytečný a nepoužitelný energetický materiál celosvětově likvidován neuváženě a neekologicky. Nepoužitelné střeliviny (střelné prachy, hnací hmoty), stará munice a podobný odpad byl často likvidován spalováním na volném prostranství, odpalováním nebo jednoduše končil vhozen do moře. Takové metody byly levné, efektivní a relativně bezpečné, nikoli však ekologické. [4]

Postupně však tlak na omezení nebo úplné zakázání těchto nevhodných metod vzrůstal z důvodů ochrany lidského zdraví a životního prostředí. Snahy jsou dělat výbušniny i jejich výrobu ekologičtější nahrazováním chemikálií nutných pro jejich výrobu těmi méně škodlivými. Vhodnou cestou je rovněž recyklace, která je dobře aplikovatelná v případě směsí na bázi tritolu. Směs je roztavena pomocí horké lázně, tritol se poté nechá ztuhnout a opět se použije (neaplikovatelné pro trhavinu spojené polymery). [4]

Kontakt s TNT a produkty jeho neexplozivního rozkladu může způsobit vážné zdravotní komplikace. Zasažení lidé trpí křečemi, bolestmi hlavy, někdy i poruchami dýchání. Při dlouhodobém kontaktu dochází k poškození kůže (začervenání, popraskání), poruchám krve tvorby a poškození jater. Ve velmi vážných případech se může vyvinout onemocnění aplastická anémie, které bývá často smrtelné. [16]

1.7.1 Sanace zamořeného území

Výbušniny jsou z valné většiny toxické sloučeniny, představující ekologickou zátěž (hlavně spodní vody) a velké zdravotní riziko. Vzhledem k těmto skutečnostem existují a jsou vyvíjeny metody pro obnovení území zamořených zbytky výbušnin, produkty rozkladu nebo prekurzory. Zasažená území jsou v okolí továren, ve vojenských prostorech, dolech i skladištích. [16]

Sanace půd – nejpoužívanější jsou v této oblasti zřejmě rotační spalovací pece. Kontaminovaná půda se vloží do první komory pece, kde se vystaví teplotě 430 – 650 °C. Při otáčení komory se půda promíchává a v závislosti na otáčkách se mění čas, po který je půda vystavena teplotě. Plyny vzniklé v první komoře jsou přečerpány do druhé komory, kde jsou zahřáty na teplotu až 2000 °C, při které jsou zlikvidovány zbývající nebezpečné látky. Již nezávadné plyny jsou po opuštění druhé komory zchlazeny a filtrovány. [17]

Sanace vod – častou dnes používanou metodou je adsorpce na aktivním uhlí. Metoda spočívá v aplikaci granulí aktivního uhlí, které jsou schopné na sebe znečišťující látku navázat a tak ji z vody odstranit. Další metodou je ozářování vod ultrafialovým světlem,

které navíc dokáže látky rozkládat, čímž se liší od aktivního uhlí, které ve své podstatě plní úlohu média. Metoda s využitím UV ale zdaleka není tak zavedená jako aktivní uhlí. [17]



Obr. 5: Granule aktivního uhlí. [18]

V praxi fungují i další významné metody sanace např. využití rostlinných hybridů (fytosanace) nebo kompostování. Ve hře jsou i metody zahrnující vodní bioreaktory s mikroorganismy nebo speciální houby. [17]

1.8 Nejznámější výbušniny

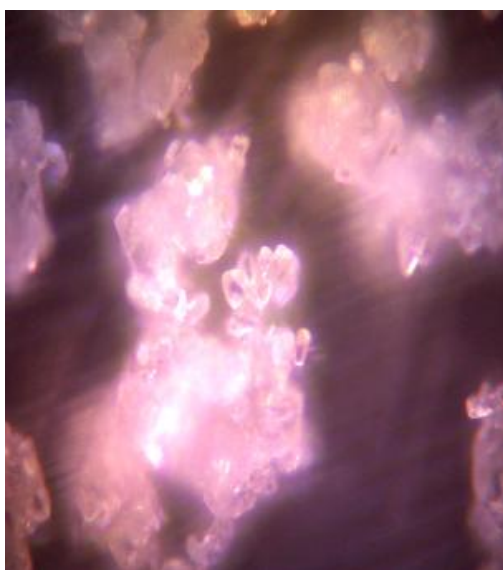
Každá kategorie výbušnin od prachů až po trhaviny obsahuje relativně velké množství zástupců. Jednoznačně historicky nejvýznamnějším byl černý prach, jehož složení ze síry, dusičnanu draselného a dřevěného uhlí je známé již od počátku středověku. Moderní nástupci v podobě bezdýmných prachů také zauímají nenahraditelnou pozici ve vývoji společnosti a stále tvoří významné části výrob specializovaných podniků (např. Explosia a.s.). V této kapitole jsou vyjmenováni patrně nejznámější zástupci kategorie trhavin.

1.8.1 Chemicky jednotné trhaviny

Tritol ($C_7H_5N_3O_6$) – rovněž TNT, Trotyl, Tolite, trinitrotoluen. Krystalická látka nažloutlé barvy s teplotou tání 80,9 °C (čistý). Vyskytuje se v podobě šesti isomerů, stabilní a obvykle používaná je modifikace 2, 4, 6 - α trinitrotoluen. Vysoce stabilní středně výkonná trhavina s nízkou citlivostí k mechanickým podnětům. Pro svou dobrou stabilitu za vyšších teplot se velmi často používá jako litelné médium během laborace (tvoří suspenzi, např. s hexogenem (hexolity), oktogenem (oktoly), pentritem (pentolity)). S běžnými kovy, dusičnany, chloristany nereaguje. V kontaktu se zásadami a oxidy alkalických kovů vznikají nestálé sloučeniny. V případě správného skladování vydrží

desetiletí bez měřitelných změn. Hlavní nevýhodou je tzv. vycpování, které může vést k selhání nebo neplánované explozi. Trinitrotoluen je toxický. [4, 6, 7]

Hexogen ($C_3H_6N_6O_6$) – ekvivalentně Cyklonit, RDX. Bezbarvá krystalická látka tající při teplotě 204 °C. Rozpustnost ve vodě je nízká, v acetonu dostatečná. Termicky je velmi stabilní, rozkládat se začíná od teploty 160 °C. V čistém stavu je citlivý na vnější podněty – úder, tření. Flegmatizován je obvykle syntetickým voskem, olejem nebo tukem. V současné době považován za nejvýznamnější trhavinu pro laborování munice. Také bývá často míchán s tritolem pro vytvoření litelné směsi. [4, 7]



Obr. 6: Mikroskopický snímek krystalků RDX. Foto autor.

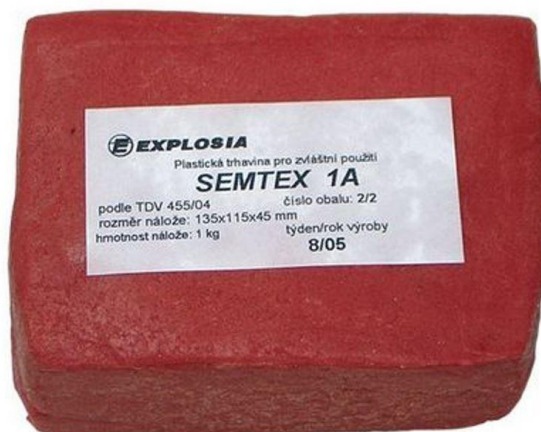
Pentrit ($C_5H_8N_4O_{12}$) – také jako PETN, nitropenta (hlavně v Německu). Bezbarvá krystalická látka s bodem tání 142 °C, nad touto teplotou dochází k rozkladu. Nerozpustný ve vodě, částečně rozpustný v alkoholu, dobře v acetonu. Za běžných teplot je velmi stabilní. Nevýhodou je vysoká citlivost na mechanické podněty. Zvláštní zacházení vyžaduje hlavně, když je suchý a tak se pro snížení citlivosti zvlhčuje vodou. Zřídka se ale používá čistý, častěji bývá smíchán s nitrocelulózou nebo syntetickou gumou (výroba travin pojených polymery). Používá se v rozbuškách, vojenských plastických travinách, v litelných směsích s tritolem jako počinové i hlavní nálože. Velmi často používanou směsnou výbušninou s obsahem pentritu je Pentolit. [4, 7]

1.8.2 Směsné trhaviny

Semtex – legendární československá plastická trhavina vyráběná od konce 50. let (vyvinuta 1954) doposud. Ve světě je často jméno Semtex synonymum pro jakoukoli

plastickou trhavinu. Bohužel i díky tomuto faktu, bývá mnohdy neoprávněně spojován s terorismem. [19]

Výkonově se příliš neliší od ostatních výbušnin stejné kategorie, hlavní rozdíl je ve složení plastifikátoru. Své využití nalézá jak v civilním (zpevňování kovů výbuchem, těžba) tak vojenském sektoru (reaktivní pancéřování - ERA). Od poloviny 90. let je do trhaviny přidávána speciální odpařovací příměs, která usnadňuje její detekci. Z hlediska povýbuchové identifikace je Semtex problematický. [19, 20]



Obr. 7: Známa česká trhavina firmy Explosia a.s. [21]

Základními aktivními složkami jsou jednotné výbušniny pentrit a hexogen. Semtex je použitelný v širokém rozmezí teplot, údajně -40 až $+60$ °C v závislosti na jeho typu. Semtex je vyráběn v několika barevných variantách, kde každá má své specifické složení i účel použití. Např. červený pro použití při těžbě, krémově hnědý pro ERA atd. [19, 20, 22]

C-4 – známá americká vojenská výbušnina s úplným názvem Composition C – 4, vyvinutá v roce 1954 stejně jako Semtex. Hlavní složkou je RDX 91 %, zbytek tvoří neexplosivní plastifikátor (polyisobutylem, motorový olej a dioktylsebakát). Špinavě bílá až světle hnědá plastická výbušnina tvarovatelná v rozsahu teplot -56 °C až 77 °C. Univerzální výbušnina využívaná armádou (USA) při demolicích, odstraňování překážek, jako bojová náplň v munici apod. V případě správného skladování a nevystavování výbušniny extrémnímu teplotu je doba skladovatelnosti v podstatě neomezená. [22, 23]

ANFO – skládá se ze dvou základních komponentů a to dusičnanu amonného ve formě porézních zrn a kapalného paliva (např. nafta či jiné uhlíkaté palivo), přičemž žádný z nich není výbušninou sám o sobě. Dalšími komponenty mohou být práškový hliník nebo

ferosilikon pro zvýšení hustoty. Ideální váhový poměr je 94,5 % dusičnanu amonného a 5,5 % paliva, avšak pro dosažení vysoké účinnosti reakce je v praxi používaný poměr 94 % a 6 %. Při nedostatku kyslíku (záporná kyslíková bilance – nedostatečné množství dusičnanu amonného) vzniká více nežádoucího oxidu uhelnatého, při jeho přebytku vznikají spíše oxidy dusíku. [24]

Nejvíce co do množství vyráběná průmyslová výbušná směs, jež díky své bezpečnosti nahrazuje dynamity při použití v těžbě a stavitelství. V případě těžby může být ANFO připraveno k přímému použití výrobcem a to v PE pytlích či lepenkových trubcích, nebo může být připravováno v tzv. nabíjecích vozech až na místě spotřeby. [24]



Obr. 8: ANFO je významná trhavina v těžebním průmyslu. [25]

Výhodami jsou vysoká bezpečnost, jednoduchost přípravy a nízká cena v porovnání s dynamity. Při zvolení správného poměru komponent je také možnost použití jako důlně bezpečné trhaviny. Jistou nevýhodou je dostupnost základních surovin a z toho plynoucí nebezpečí zneužití např. teroristy. [24]

2 IMPROVIZOVANÉ NÁSTRAŽNÉ SYSTÉMY - IED

Jedná se o podomácku vyrobenou bombu určenou k ničení, zabíjení, vyřazení z činnosti, obtěžování nebo odvrácení pozornosti. Může se jednat o velmi primitivní zařízení (př. trubková bomba) nebo naopak o velmi propracované s potenciálem způsobit velké škody. Obvykle je pojem spojován s teroristy, povstalci a sebevražednými atentátníky. IED nemá danou podobu, ale základní komponenty jsou vždy stejné: iniciátor, nálož výbušniny, nějaký druh spínače, zdroj energie a obvykle i vlastní obal. K tomuto základu mohou být pro zvýšení účinků přidány další prvky jako skleněné střepy, ocelové kuličky a hřebíky, méně často nebezpečné látky, chemické nebo biologické zbraně eventuelně radioaktivní látky. Bomba tohoto typu může být na místo činu nesena, vezena, hozena nebo je jednoduše nastražena do míst s pohybem cílového subjektu. [26]

K výrobě lze použít v podstatě běžně dostupné prostředky. Úlohu výbušniny může plnit umělé hnojivo (dusičnan amonný a palivo, ANFO), střelný prach nebo peroxid vodíku (peroxid + palivo). Účinek IED závisí hlavně na velikosti nálože, druhu použité výbušniny, konstrukci a umístění. Zařízení lze umístit do dopisů, poštovních balíků, osobních a nákladních vozů, mohou mít formu trubkové bomby. [26]

Tab. 1: Některé zdokumentované bombové útoky s účastí IED.

Případy použití IED		
Výbušnina	Původní účel	Použito při útoku
ANFO	těžba surovin	Oklahoma City 1995
TATP	běžně se nepoužívá	Londýn 2005
C – 4	vojenské účely	útoky organizace IRA
EGDN	těžba, složka dynamitů	Los Angeles 1999
Dusičnan močoviny	umělé hnojivo	New York City 1993
Bezdýmný prach	střelivo	Atlanta 1996

2.1 Improvizované výbušniny

Vyrábí se chemicky jednotné i směsné improvizované výbušniny a to buď nadšenci, nebo pachatelé. Druh výbušniny a úroveň jejího zpracování závisí na znalostech výrobce. Tyto výbušniny ovšem bývají připravovány obvykle laikem v domácích podmínkách, proto se dá očekávat jejich vysoká citlivost a nestabilita. Spektrum vyráběných improvizovaných výbušnin bývá u laiků či pachatelů menší a značně závisí na dostupnosti surovin, jednoduchosti přípravy a znalostech. [1]

Výbušniny používané pro výrobu IED můžeme dělit do pěti kategorií: [27]

1. Průmyslově vyrobené vojenské výbušniny, charakteristické vysokou stabilitou, pevně stanovenou citlivostí a s hustotou nad $1,5 \text{ g/cm}^3$.
2. Průmyslové výbušniny používané v civilní sféře. Někdy mohou být smíchány s vojenskými trhavinami, např. dusičnan amonný s TNT. Jejich obvyklá hustota se pohybuje mezi $0,9$ až $1,2 \text{ g/cm}^3$. Výbušnina nebo její část má původ v oficiální továrně a může obsahovat značkovače usnadňující detekci.
3. Výbušniny nenáročné na výrobu, vyrobené z dobře dostupných látek. Vzhledem k vysokému kritickému průměru použitých komponent jsou nálože objemově větší. Často jsou těsně baleny, aby se předešlo odpařování kapalných složek a prodloužila se jejich životnost. Hustotou $0,8$ až $1,1 \text{ g/cm}^3$ jsou velmi podobné ostatním organickým látkám.
4. Výbušniny vyrobené v domácích podmínkách lidmi s přístupem k vojenským výbušninám a dalším látkám (chlореčnany, dusičnany, hliníkový prach apod.).
5. Improvizované výbušniny, jež jsou vyráběny z široce dostupných materiálů, často je to TATP (triaceton triperoxid) nebo HMTD (Hexamethylentriperoxid diamin). Vybuchují již v malých množstvích. Značnou nevýhodou je jejich nestabilita.

Tab. 2: Amatol může být řešením při nedostatku výkonné trhaviny. [1]

Směsi dusičnanu amonného a TNT (Amatoly) (dusičnan amonný/TNT)			
Trhavina	Hustota [g/cm^3]	Detonační rychlost [m/s]	Brizance [% TNT]
TNT	1,56	6 825	100
Amatol 50/50	1,55	6 430	88,5
Amatol 60/40	1,50	5 760	86,5
Amatol 80/20	1,50	5 100	74

Mezi asi nejvýznamnější a nejčastěji vyráběné improvizované třaskaviny řadíme TATP a HMTD. Za improvizované jednotné trhaviny považujeme např. erythritol tertanitrat (ETN) a nitrometan. V případě směsí jsou významné trhaviny na bázi dusičnanu amonného, peroxidu vodíku a chlореčnanů. [1]

3 METODY IDENTIFIKACE VÝBUŠNIN

Identifikace výbušnin spadá především do oboru chemické analýzy a teoreticky použitelných metod je proto značné množství. V této části je uveden pouze stručný výčet a popis takových metod, které jsou v současné době pro tento účel prakticky použitelné.

Velký potenciál v tomto směru skýtají spektroskopie infračervená a Ramanova, jelikož jsou nedestruktivní, relativně velmi rychlé a spolehlivé a k analýze stačí i velmi malé množství vzorku. Nadto jsou dnes k dispozici i přenosné nebo ruční IR a Ramanovy spektrometry, jež jsou využívány nejen bezpečnostními sbory pro identifikaci nebezpečných látek.



Obr. 9: Ruční spektrometr určený pro identifikaci nebezpečných látek. [28]

Je však nutné dodat, že žádná z metod chemické analýzy není dokonalá a všespásná. Pro jednoznačnou identifikaci je vhodné metody kombinovat, např. kombinace GC – MS (plynová chromatografie – hmotnostní spektrometrie).

3.1 Spektroskopické metody

Spektroskopie je vědní obor s počátky ve 20. století studující interakce mezi látkami (hmotou) a elektromagnetickým zářením. Spektrální metody jsou založeny na interakci záření a hmoty a jejich hlavní dělení je na absorpční a emisní. [29]

Absorpční metody zkoumají množství (frekvence eventuelně vlnočty) konkrétního druhu záření pohlcovaného materiálem vzorku. Výstupem je spektrum, kde je vyjádřena závislost absorbance (nebo transmitance) na frekvenci či vlnočtu. Metody emisní spočívají v dodání energie vzorku, kdy dojde k přechodu částic (atomy nebo molekuly) do nestabilního energetického stavu – excitace. Tyto částice mají tendenci vrátit se do stabilního (nižšího)

energetického stavu a tak musí přebytečnou část energie vyzářit. Vyzářené vlnové délky tvoří uspořádaný soubor – emisní spektrum. Absorpční či emisní spektrum je pro danou látku jedinečné. [29]

Další dělení spektroskopie z pohledu: [29]

1. použitého elektromagnetického záření:
 - a. radio – spektroskopie,
 - b. mikrovlnná,
 - c. terahertzová,
 - d. optická (IR, Ramanova a UV VIS),
 - e. rentgenová,
 - f. spektroskopie gama záření,
2. studovaných látek:
 - a. elektronová,
 - b. atomová,
 - c. molekulová,
3. charakteru spektra:
 - a. emisní,
 - b. absorpční.

3.1.1 Infračervená spektroskopie

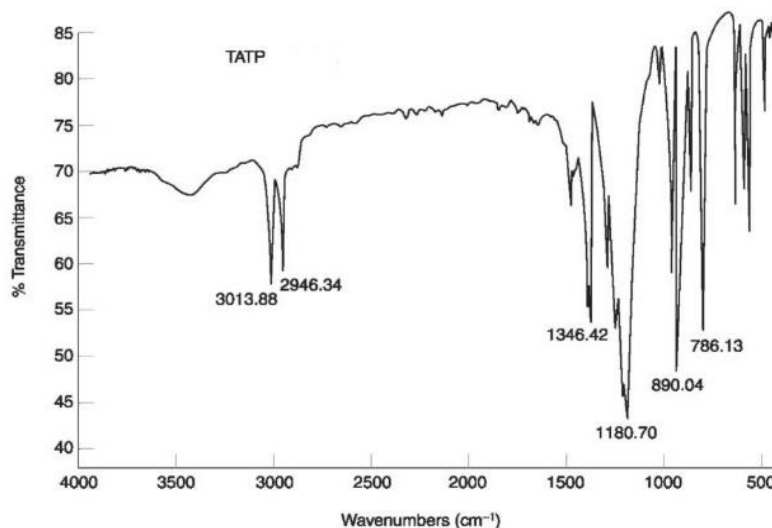
Infračervená molekulová absorpční/emisní spektroskopie je nedestruktivní analytická technika sloužící mimo jiné pro identifikaci organických i anorganických látek. Používaný rozsah vlnových délek je 0,8 μm až 1000 μm , který se dělí na záření v blízké oblasti NIR (0,8 až 2,5) μm , záření ve střední oblasti MIR (2,5 až 50) μm a záření v daleké oblasti FIR (50 až 1000) μm . Nejpoužívanějším a z pohledu identifikace a určování struktury látek i nejvýznamnějším rozsahem je MIR. Výběrem vhodné techniky IR spektroskopie lze měřit široký rozsah látek ve všech skupenstvích. [30]

IR spektroskopie je založena na interakci záření a vzorku, přičemž existují dvě základní měřicí techniky. Pokud je vyzářený foton pohlcen, jedná se o absorpční IR spektroskopii, když je foton hmotou naopak vyzářen, hovoří se o emisní IR spektroskopii. [31]

Princip absorpční IR spektroskopie spočívá v měření a vyhodnocování absorpčních spekter látky vzorku. Jestliže má látka teplotu vyšší než 0 K její atomy resp. části molekul vibrují. Taková vibrace odpovídá určitému vibračnímu stavu, který lze ovlivnit působením

vhodného záření. Při interakci IR záření s látkou se určité jeho části (kmitočty) absorbují a dochází ke změnám vibračních popř. vibračně-rotačních stavů molekuly. Z pohledu klasické fyziky je vibračním stavem míněno zvětšení amplitudy vibrace molekuly a rotačním stavem zrychlení její rotace. Oblasti absorpce se nazývají absorpčními pásy. Poloha absorpčního pásu ve spektru je přímo závislá na druhu atomu, druhu vazby a geometrií molekuly. Studium IR spektra je tak možné odhalit funkční skupiny a vazby v molekule. Rovněž platí, že mají-li dvě různé molekuly stejnou funkční skupinu, poloha a intenzita pásu takové skupiny ve spektrech obou látek není příliš rozdílná. Tento fakt umožnil sestavení tabulek charakteristických vibrací významných skupin a vazeb, které se využívají pro identifikační účely. Ve vztahu k látkám potenciálně výbušným pak hledáme funkční skupiny pro takové látky předvídatelné jako např. $-\text{NO}$, $-\text{NO}_2$, $-\text{N}=\text{N}=\text{N}$ apod. [30, 31, 32]

IR spektrometry jsou dostupné už od 40. let 20. století. Prvními byly přístroje pracující na principu rozkladu světla (disperzní), ty však byly obtížně použitelné pro pevné vzorky. Výrazným pokrokem bylo vyvinutí spektrometrů založených na Fourierově transformaci (FT – IR). FT – IR spektrometry měří interferogram svazku záření po průchodu vzorkem – princip interference spektra. FT-IR také rozšiřuje možnosti reflektanční IR spektroskopie. [30, 32]



Obr. 10: IR spektrum třaskaviny TATP, často improvizovaně vyráběné výbušniny. [33]

V infračerveném spektru se sledují čtyři hlavní veličiny: poloha a tvar pásů, počet pásů a jejich intenzita. Samotná identifikace se provádí porovnáním získaného spektra s knihovnou spekter známých sloučenin. V detailech je IR spektrum pro danou látku jedinečné a prakticky neexistují dvě sloučeniny se stejným IR spektrem. Je – li nalezena

úplná shoda a dodržena stejná technika se stejnými parametry jako u spektra referenčního, můžeme měřenou látku spolehlivě určit. [30, 31]

Ovšem obdobně jako u ostatních metod vystupují i u IR spektroskopie faktory negativně ovlivňující výsledné spektrum. Mezi těmito faktory např. jsou: kombinační pásy, Fermiho rezonance a vodíkové vazby. Proto je vhodné pro účely zjištění úplné struktury molekuly metodu kombinovat s další. [30]

3.1.2 Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie je nedestruktivní analytická technika vibrační molekulové spektroskopie objevená roku 1928 C. V. Ramanem, založená na nepružném rozptylu světla. Metoda je velmi univerzální a s její pomocí můžeme získávat Ramanova spektra pevných, kapalných i plynných látek a to v mnoha oborech, průmyslu i vědě. Identifikační schopnost je srovnatelná s IR spektroskopií. Spektra obou metod poskytují informace o vibračních a rotačních stavech a tedy i o struktuře molekuly. Rozdíl tkví v tom, že v IR spektrech mají intenzivní pásy polární funkční skupiny (změna dipólového momentu, např. OH, $-\text{NO}_2$ a další.), kdežto v Ramanových jsou intenzivní pásy symetrických vibrací a vibrací ve fázi (změna polarizovatelnosti, např. vazby $-\text{C}=\text{C}-$, $-\text{N}=\text{N}-$ a další). [29, 34, 35]

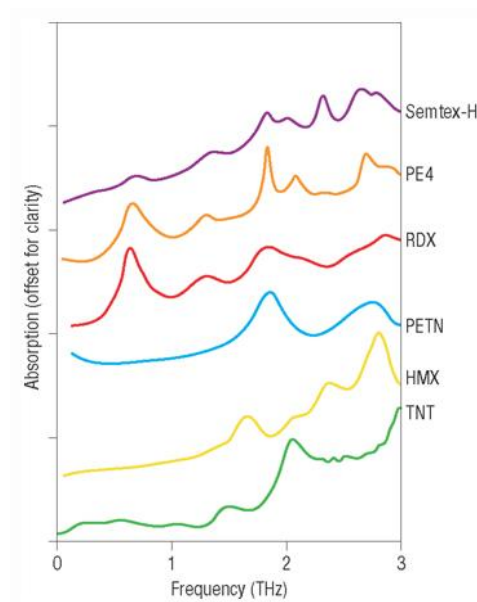
Ramanův spektrometr pracuje s rozptýleným zářením, které se skládá z pružného tzv. Rayleighova rozptylu (tvoří podstatnou většinu) a nepružného tzv. Ramanova rozptylu. K pružnému rozptylu dojde, když je při návratu excitované molekuly do stabilního energetického stavu emitováno záření se stejnou energií, jakou mělo záření excitační. Jelikož zde není rozdíl v energiích fotonů, chybí analytická informace a je nutné Rayleighův rozptyl odfiltrovat. Nepružný rozptyl mírně odlišnou vlnovou délku oproti budícímu záření a tvoří jej Stokesův (nižší frekvence – ztráta energie) a anti-Stokesův rozptyl (vyšší frekvence – došlo k zisku energie). Výstupem měření je závislost intenzit na Ramanově posunu (rozdíl vlnočtu budícího a rozptýleného záření) neboli Ramanovo spektrum. Nejčastěji bývá měřeno v rozsahu $100 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. Vzorek je ozařován laserovým paprskem s vlnovými délkami v oblasti ultrafialové až blízké infračervené. Obvykle jsou Ramanovy spektrometry osazeny lasery s vlnovými délkami 532, 785 nebo 1064 nm. [29, 34, 35]

Ramanova spektroskopie je výborným prostředkem pro analýzu výbušnin. Neznámou látku je možné měřit téměř bez přípravy, ve velmi malých množstvích a přes vrstvu obalového materiálu.

3.1.3 Terahertzová spektroskopie

Nedestruktivní metoda pracující s frekvencemi mezi MIR oblastí a mikrovlnami (100 GHz a 10 THz), která je využitelná pro spolehlivou identifikaci látek. Založena je na stejných principech jako IR spektroskopie jen s využitím jiného frekvenčního rozsahu a jeho výhod.

Tedy interakce mezi molekulou (danou látkou) a zářením je jedinečná, přirovnatelná k otisku prstu. Stejně jako v předchozích, rozlišujeme THz spektroskopii na absorpční a emisní. Emisní technika je v praxi (včetně PKB) použitelnější, lze s ní měřit spektra netransparentních materiálů, nevyžaduje složitou přípravu vzorku a manipulaci s potenciálně nebezpečným materiálem. THz spektroskopie je velmi citlivá na přípravu vzorku. Jeho strukturní změny a obsažené nečistoty mohou výsledné spektrum zkreslit, což je z hlediska forenzního výzkumu nevýhodné (spektrum je obtížně porovnatelné s knihovními). [36]



Obr. 11: THz spektra známých trhavín. [37]

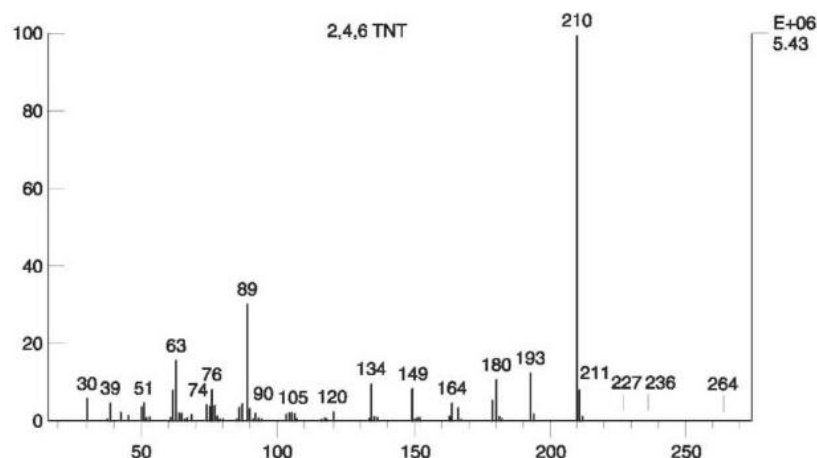
Energie THz vln je nižší, výkon laseru je rovněž nižší (ve srovnání s Ramanovou spektroskopií) a pravděpodobnost vzniku tepelně indukovaných změn ve vzorcích tak klesá. Záření emitované laserem není ionizující a je tak bezpečnější pro živé organismy na rozdíl od záření rentgenového. Naopak kovy, voda a další polární kapaliny (včetně jejich

par) jsou překážkou. Zkreslení spektra ovlivňuje i přítomnost některých plynů (CO, O₃, N₂O apod.) a prachových částic, obzvláště těch s velikostí okolo 300 μm. [36]

Při analýze výbušnin je THz emisní spektroskopie užitečná hlavně díky schopnosti poskytovat kvalitní spektra pro identifikační účely a také schopnosti měřit přes určité překážky (obaly, fólie, tkaniny). Emisní pásy chemicky jednotných výbušnin jsou ve spektrech dobře rozeznatelné, naopak příměsi a další neexplosivní látky se projevují jen málo. Můžou být tak identifikovány směsné trhavy skládající se z více individuálních trhavin jako např. Semtex H (PETN, RDX). Ovšem některé trhavy jako např. dusičnan amonný nemají v intervalu 0,1 až 4 THz významné pásy. Jeho přítomnost v analytu lze pouze odhadnout na základě jeho vysoké schopnosti pohlcovat THz záření. [36]

3.1.4 Hmotnostní spektrometrie

Cenný nástroj pro provádění chemických analýz neznámých látek a to nejen ve forenzní vědě. Spektrometrie dokáže identifikovat molekuly látky na základě poměru m/z (molekulární hmotnost/elektrický náboj). Metoda je destruktivní, avšak k analýze stačí velmi malý vzorek a to v řádech mikrogramů. Existuje řada typů hmotnostních spektrometrů, všechny ale pracují relativně podobným způsobem. Obvyklý přístroj se skládá ze vstupu (vzorek obvykle přechází do přístroje z chromatografu), ionizační komory (vznik nabitých iontů), hmotnostního analyzátoru (urychlování a separace iontů) a detektoru, který získané informace převádí na vizuální výstup. [34]



Obr. 12: Hmotnostní spektrum α TNT (elektronová ionizace). [33]

Ionizace – hmotnostní spektrometr manipuluje s látkami magnetickým (příp. elektrickým) polem, je tak nezbytné vytvořit elektricky nabitě částice - ionty. Při využití metody elektronové ionizace jsou molekuly za účelem vytvoření manipulovatelných kationtů

bombardovány elektrony. Technik pro vytváření iontů je však více (CI, API techniky) a je nutné zvolit tu nejvhodnější pro danou látku v souladu s jejími vlastnostmi (těkavost, molekulová hmotnost, tepelná stabilita apod.). [34]

Poté co je vzorek rozdělen pomocí chromatografu na jednotlivé složky, musí být ionizován v ionizační komoře, aby jej bylo možné zpracovat analyzátozem. [34, 38]

Hmotnostní analyzátoz – součást, kde jsou ionty urychlovány a separovány. Dochází zde k dělení iontů v plynné fázi. V analyzátozu je vytvořeno magnetické pole, ve kterém jsou urychlené ionty na stejnou pohybovou energii vychylovány z drah v závislosti na jejich hmotnosti. Ionty s nižší hmotností jsou vychylovány snadněji a putují po jiných trajektoriích než ty hmotnější. Vzniklý poměr hmotnosti a náboje je pro daný iont charakteristický, a pokud má analyzátoz schopnost pracovat se silou magnetického pole, může být za jeho pomoci detekován konkrétní hledaný iont. Analyzátozů je opět více druhů, např. kvadrupólový, TOF, s magnetickými sektory apod. [34, 38]

Detekce – zde jsou oddělené paprsky postupně směřovány do kovového zařízení známého jako Faradayova klec. Dopadající ionty vytvářejí v kleci elektrický proud přímo úměrný jejich počtu. Tudíž čím více stejných iontů ze vzorku vzejde, tím vyšší bude elektrický proud a tím silnější bude i odezva jedné konkrétní chemikálie ze směsi. Výsledkem procesu je graf – hmotnostní spektrum, kde jsou vyobrazeny všechny jednotlivé složky přítomné ve vzorku s jejich relativním množstvím v podobě tzv. „píků“. Látka nejvíce zastoupená ve vzorku je základní pík, vůči kterému se vyjadřuje množství ostatních přítomných látek. [34]

Proto, aby mohla být daná látka identifikována, je zapotřebí knihovny spekter. Dostupné a rozsáhlé jsou knihovny se spektry získanými při využití elektronové ionizace. Pro účely srovnání bylo nutné standardizovat energii elektronu (urychlující energii) na 70 eV. [38]

Při využití elektronové ionizace může mít proud elektronů někdy dost energie nejen k vyrážení elektronů pro tvorbu iontů, ale může i rozbíjet molekuly na menší části – fragmenty (které mohou být samy o sobě identifikátory). Vzniklé fragmenty mají stejnou hmotnost s mnoha naprosto odlišnými molekulami, což vede ke vzniku iontů se stejným poměrem m/z a to se negativně projevuje na hmotnostním spektru. Píky fragmentů získané měřením a z databáze spekter jsou však zřídka stejné a je tak možné je odhalit a vyřadit. [34]

3.1.5 Jaderná magnetická rezonanční spektroskopie

Opět nedestruktivní metoda pro kvantitativní i kvalitativní analýzu především organických sloučenin, v současnosti považována za nejsilnější nástroj pro studium struktury látek. V principu funguje obdobně jako IR a Ramanova spektroskopie neboť pro zjištění atomů, jejich vzájemných vazeb a funkčních skupin využívá interakce elektromagnetického záření (konkrétně absorpce) se vzorkem. NMR využívá vysokofrekvenčního záření v desítkách až stovkách MHz (rádiové vlny) a je použitelná pro vzorky v řádech miligramů. [39, 40]

Analyzovaná látka je vložena do kyvety a následně je kyveta umístěna do silného indukovaného magnetického pole. Na vzorek pak působí elektromagnetické záření a měří se závislost absorbovaného záření na frekvenci. Měřitelnými jádry jsou izotopy veškerých prvků s nenulovým jaderným spinem (atomy s lichým nukleonovým číslem), avšak nejvíce se v NMR využívá atomů vodíku, jelikož je se v organických sloučeninách vyskytuje hojně. Pokud jádro vodíku absorbuje ze záření dostatek energie, dohází k přechodu paralelní orientace o energetickém stavu E_1 , v antiparalelní o stavu E_2 . Rozdíl mezi energetickými stavy ($E_2 - E_1$) odpovídá tzv. rezonanční frekvenci. [39, 40]

Jádra vodíku v molekulách jsou obklopena elektrony svými a elektrony dalších atomů tvořících s ním vazbu ke zbytku molekuly. Takové elektrony odstiňují jádro a mění rezonanční frekvenci takovým způsobem, že je různá pro každou vazbu nebo funkční skupinu. Absorpční pásy ve výsledném NMR spektru představují naměřené hodnoty rezonančních frekvencí. [39, 40]

NMR spektrum lze také získat při konstantní hodnotě frekvence a měnící se hodnotě indukce magnetického pole. Aby bylo možné látku identifikovat metodou srovnání se spektrem známé látky, musí být vypočítána relativní rezonanční frekvence neboli chemický posun. Ten se vztahuje k určitému smluvnímu standardu např. tetramethylsilan. [39, 40]

Kvalitních výsledků je možné u NMR dosáhnout v případě analýzy výbušnin ještě před jejich přeměnou, pro analýzu povýbuchových residuí metoda příliš vhodná není z důvodu vysoké kontaminace vzorku. Použitelnost metody je omezena i z důvodů vysoké pořizovací ceny NMR spektrometrů. [39, 40]

3.2 Ostatní metody

V podkapitole je popsána metoda využívající chemických reakcí mezi speciálními činidly a studovanou látkou a metoda zařaditelná do oblasti mikroskopie, kde jde o nalezení mikroskopických částec a identifikaci jejich barevného kódu.

3.2.1 Analýza s použitím činidel

Pro potřeby rychlé (forenzní) identifikace nebo zjištění přítomnosti výbušné látky jsou k dispozici metody využívající činidel. Ty v kontaktu s látkou vyvolávají charakteristickou reakci např. zbarvení. Jako příklad uvedu sadu PIR 1. Tato je výhodná z hlediska nižší časové náročnosti a možnosti použití v terénu. Určitou nevýhodou je omezená rozlišovací schopnost (např. pentrit a hexogen mají stejnou barevnou kombinaci.) [41]

Tab. 3: Ze srovnávací tabulky (uvedena je pouze její část) je patrné, že sada PIR 1 slouží spíše pro orientační identifikaci výbušnin. [41]

Výbušnina	Barevná reakce s činidly		
	R + A	R + B	R + B + C ₁ + C ₂
Černé prachy	modrá	–	–
Bezdymné prachy	modrá	–	malinová
Hornické výbušniny s TNT	modrá	červená	malinová
Oktofen	modrá	–	malinová
Pentrit	modrá	–	malinová
Tetryl	modrá	oranžová	malinová
Semtex (1, 10, H)	modrá	–	malinová
TNT	–	sytě červená	–
Nitrocelulóza	modrá	–	malinová

Sadu tvoří několik lahviček s činidly, univerzální rozpouštědlo výbušnin a tzv. kapkovací destička. Získaný vzorek se rozdělí a vloží do tří důlků v destičce. Nejprve je zapotřebí aplikovat na všechny vzorky univerzální rozpouštědlo. Do prvního důlku poté přidáme činidlo A, do druhého činidlo B a do posledního postupně činidla B, C₁ a C₂. Výsledkem

je kombinace reakcí (barev) zkoušené látky, rozpouštědla a činidel. Výsledek je nakonec porovnán s tabulkou výrobce sady. [41]



Obr. 13: Sada PIR 1 určená k identifikaci výbušnin. [41]

3.2.2 Mikroskopie – mikrotaganty

Možnou metodou identifikace výbušniny je mikroskopické zkoumání residuí nalezených na místě výbuchu. To platí hlavně pro produkty obsahující mikrotaganty. [42]

Mikrotaganty představují mikroskopické částičky odolného plastu, které se již při výrobním procesu přidávají do výbušnin. Mají sloužit k přesné před i povýbuchové identifikaci a jsou schopny nést informace o výbušnině i výrobci. Existují taganty identifikační nesoucí zakódované informace a detekční pozvolna uvolňující detekční látku. Vyvíjí se i částice schopné fluorescence pod UV světlem nebo s obsahem feromagnetických látek, které je pak snadnější na místě činu nalézt (sesbírají se magnetem). [42]



Obr. 14: V posloupnosti barevných vrstev je zakódována informace. [43]

Mezi nevýhody patří nárůst výrobních cen, změny výkonnostních parametrů výbušniny, potenciální negativní vliv na lidské zdraví či životní prostředí a nebezpečí zneužití. [42]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 RAMANOVA SPEKTRA VÝBUŠNIN

Cílem praktické části bylo získání cenných experimentálních dat v podobě Ramanových spekter výbušnin. Podařilo se naměřit téměř tři desítky vzorků a to z každé kategorie od střelivin až po trhaviny. Podstatnou část seznamu tvoří výbušniny průmyslové, ale jsou obsaženy i druhy používané ve vojenství. Úspěšně byla získána i cenná spektra několika dnes často používaných improvizovaných výbušnin a jejich prekurzorů.

Cíle diplomové práce:

1. Nastudujte základní informace o výbušninách.
2. Popište látky používané pro přípravu improvizovaných nástražných systémů – IED.
3. Vypracujte přehled moderních metod pro identifikaci výbušnin. Zaměřte se na spektroskopické metody.
4. Z dostupných zdrojů shromážděte Ramanova spektra výbušnin a látek používaných pro přípravu improvizovaných nástražných systémů.
5. Spektroskopicky proměřte látky dostupné pro přípravu IED.
6. Zpracujte získaná spektra do databáze Ramanových spekter.

4.1 Okolnosti měření a požadavky

Pro vytvoření vlastní databáze Ramanových spekter výbušnin a zároveň dodržení všech zákonných požadavků, bylo nutné navázat spolupráci se subjektem majícím oprávnění nakládat s výbušninami. V tomto smyslu byly osloveny organizace Explosia a.s. a Fakulta chemicko – technologická Univerzity Pardubice. Obě organizace ochotně poskytly pomoc.

Explosia a.s. poskytla řadu vzorků střelivin pro malorážové střelivo a několik vzorků také pro dělostřelecké ráže. Fakulta chemicko – technologická Univerzity Pardubice umožnila naměření přibližně 25 vzorků výbušnin.

Proces měření se odehrál na konci měsíce dubna tohoto roku na půdě již zmíněné Fakulty chemicko – technologické v Pardubicích. Měření vzorků se uskutečnilo pod dohledem zkušených profesionálů, kteří poskytli školení nutné k manipulaci s výbušninami. Na místo byl dopraven mobilní Ramanův spektrometr i-Raman[®] Plus s příslušenstvím ve vlastnictví Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a základní laboratorní vybavení.

4.2 Instrumentace

Veškeré použité přístroje a pomůcky byly majetkem Fakulty aplikované informatiky, UTB ve Zlíně a byly na místo měření dopraveny. Základem byl notebook s operačním systémem Windows a programovým vybavením. Měřicí komplet od firmy B&W TEK, Inc. tvořila jednotka i-Raman[®] Plus, Ramanův mikroskop BAC 151A a sonda BAC 102.



Obr. 15: Měřicí komplet i-Raman[®] Plus. Foto autor.

4.2.1 Spektroskopický přístroj i-Raman[®] Plus

Tělo přístroje je osazeno konektory v přední a zadní části. Optické konektory v přední části slouží pro připojení sondy, konektory v zadní části pro připojení kabelu síťového napájení a USB kabelu pro případ užití mikroskopu. Obsahuje laser třídy 3b s vlnovou délkou 785 nm a maximálním výkonem 350 mW, který lze měnit v rozsahu 1 až 100%. Rozsah vlnočtu je 65 až 3200 cm⁻¹. Další vybrané technické parametry jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4: Technické parametry přístroje.

i-Raman[®] Plus (model BWS465-785S)	
Fyzické parametry	
Rozměry a hmotnost	17 x 34 x 24 cm, do 3 kg
Rozsah prac. teplot	0 – 35 °C
Detektor	
Typ	CCD s vysokou kvantovou účinností
Počet pixelů	2048
Digitální rozlišení	16 bit (65 535:1)
Napájení	
Síť	100 – 240 V, 50 – 60 Hz
Baterie	Ano

4.2.2 Optický mikroskop

Součástí měřicí soustavy je přenosný mikroskop typ BAC 151A s videokamerou a manuálním stolkem umožňujícím posun ve všech osách. Hlavními částmi jsou vzorkovací mikroskopické tělo, objektiv (v našem případě 20x), hlava mikroskopu, skleněný vzorkovací podstavec a propojovací kabeláž.

Tab. 5: Technické parametry mikroskopu a kamery.

Mikroskopický systém BAC 151B	
Fyzické parametry	
Rozměry	243 x 208 x 376 mm
Váha	Do 5 kg
Kamera (BAC 151A)	
Čip	1/4", barevný
Rozlišení	1280 x 1024



Obr. 16: Sonda připojená ke kameře mikroskopu. Foto autor.

V zadní části těla a hlavy (kamera BAC 151 B) mikroskopu jsou umístěny konektory pro napájení a USB konektor pro připojení k řídicímu počítači. Na pravé straně je umístěn pákový přepínač, kterým lze volit mezi vlnovými délkami excitačního laseru 532 nm nebo 785 nm (u této verze je instalován pouze laser o vlnové délce 785 nm). Na levé straně hlavy mikroskopu je instalován port pro připojení sondy. Mikroskop obsahuje i malou osvětlovací LED diodu, jež se aktivuje kolébkovým spínačem na pravé straně těla.

4.2.3 Sonda BAC 102

Sondu je možné upevnit pomocí krátkého adaptéru na mikroskop nebo na stativ (s kamerou systému BAC 151B) nebo pomocí dlouhého adaptéru s optikou na speciální stoličce. Délka kabelů – vláken u této sondy je standardně 1,5 m, existuje však možnost prodloužení. Součástí sondy je bezpečnostní klapka, kterou se přerušuje laserový paprsek.

Tab. 6: Technické parametry sondy a jejího příslušenství.

Sonda BAC 102	
Základní parametry	
Excitační vlákno	105 μm jádro, konektor FC/PC
Sběrné vlákno	200 μm jádro, konektor SMA 905
Pracovní teplota	80 °C nebo 150 °C (pro průmysl)
Adaptér (dlouhý)	
Průměr adaptéru	9,42 mm
Materiál adaptéru	Nerezavějící ocel
Materiál optiky (sklíčko)	Křemík, umělý safír
Pracovní vzdálenost	5,4 mm (zajišťuje distanční koncovka)



Obr. 17: Sonda s dlouhým adaptérem a distanční koncovkou. Foto autor.

Kabely sondy se připojují k předním konektorům na přístroji i-Raman[®] Plus a samotná sonda může být instalována (např. k již zmíněnému mikroskopu) nebo s ní může být volně manipulováno při nasazení distanční koncovky. Distanční koncovka zajišťuje optimální vzdálenost sklíčka od analyzované látky a používá se společně s dlouhým adaptérem.

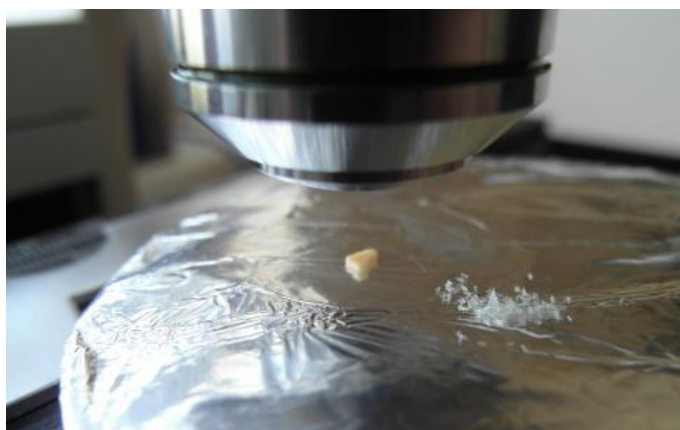
4.3 Popis měření

Po sestavení a zprovoznění celého měřicího kompletu (notebook a přístroj i-Raman[®] s mikroskopem) byl na počítači spuštěn spektroskopický program BWSpec 4, pomocí kterého byl po celou dobu spektrometr ovládán. Vzorky jednotlivých výbušnin byly odebírány laboratorní lžící z původních obalů (skleněných lahviček), které U. Pardubice využívá pro skladování takových látek. V případě odebírání nitrometanu bylo použito laboratorní kapátko. Množství výbušniny v každém měřeném vzorku bylo v řádech mg.



Obr. 18: Skleničky s měřenými trhavinami. Foto autor.

Skleněný vzorkovací podstavec náležející k mikroskopu byl před měřením obalen běžnou potravinářskou hliníkovou fólií z důvodu jeho ochrany. Na podstavec byly pokládány vzorky výbušnin, které se postupně proměřovaly. Před nabráním každého nového vzorku byly použité nástroje důkladně očištěny.



Obr. 19: Vzorky na podstavci: vlevo šupinkový TNT, vpravo krystalický. Foto autor.

Vzhledem k malým objemům potřebného analytu bylo možné provádět měření více látek na jedné hliníkové fólii, aniž by došlo ke vzájemné kontaminaci. Po ukončení měření byly zbytky vzorků výbušnin zlikvidovány v acetonu.

4.3.1 Měření na půdě Univerzity Pardubice

Vzorky jednotlivých výbušnin byly umístovány na vzorkovací podstavec mikroskopu. Poté byl pomocí kamery a posuvů stolku mikroskopu laser zacílen na vhodné místo (např. krystalek). Nastavení parametrů měření začínalo na nižších hodnotách doby expozice a hlavně výkonu laseru tak, aby se předešlo znehodnocení vzorku nebo jiné nežádoucí situaci. Množství akumulací (10) bylo pro všechny vzorky konstantní. Počáteční hodnotou při všech měřeních byla doba expozice 1 s a výkon laseru 20 % (70 mW). Postupně se navyšoval výkon laseru na hodnoty 50 % (175 mW) a 80 nebo 100 % (350 mW). Mezi navyšováním byl vzorek průběžně kontrolován přes okno náhledu kamery, aby se zjistily případné změny na ozařovaném povrchu. Většina vzorků byla světlejší barvy, tak nedocházelo k pálení nebo zřetelným deformacím povrchu vlivem tepla. S postupným navyšováním výkonu až na maximum byla získávána spektra s výraznějšími píky, tedy s větším podílem signálu oproti šumu (dosažení vyšší relativní intenzity).

Samotné měření každého vzorku trvalo průměrně 30 sekund. Do této doby je započítáno získání nezbytného temného pozadí, ukládání a další práce s počítačem. Spektrum bylo ukládáno jako soubor .txt se vzorem pojmenování: výbušnina_doba excitace_množství akumulací_výkon laseru na disk počítače.

4.4 Měřené vzorky výbušnin

Seznamy měřených výbušnin jsou uvedeny v přehledných tabulkách a to na základě zavedeného dělení z hlediska použití. K jednotlivým položkám jsou doplněny základní údaje.

Tab. 7: Měřené třaskaviny se základními údaji. [4]

Třaskaviny					
Název	Zkratka	Sumární vzorec	Hustota [g/cm ³]	Detonační rychlost [m/s]	Citlivost k nárazu [J]
Hexamethylentriperoxid diamin ^{2*}	HMTD	C ₆ H ₁₂ N ₂ O ₆	1,60	5 100 (1,15 ³)	0,4 – 0,6
Triaceton triperoxid ^{2*}	TATP	C ₉ H ₁₈ O ₆	1,27	5 300 (1,18 ³)	0,3 – 3,1

Pozn.: ¹ triviální název, ² chemický název, ³ hustota

* patří do skupiny improvizovaných třaskavin

Tab. 8: Měřené chemicky jednotné a směsné trhaviny se základními údaji.

Chemicky jednotné trhaviny					
Název	Zkratka	Sumární vzorec	Hustota [g/cm ³]	Detonační rych. [m/s]	Brizance [% TNT]
2, 4 – dinitrotoluen ²	DNT	C ₇ H ₆ N ₂ O ₄	1,52	≈ 4 000 (?)	–
Erytritol tetranitrát ^{2*}	ETN	C ₄ H ₆ N ₄ O ₁₂	1,83	7 940 (1,65 ³)	–
Oktožen ¹	HMX	C ₄ H ₈ N ₈ O ₈	1,91	9 100 (1,90 ³)	113 – 126
Kyselina pikrová ¹	TNF	C ₆ H ₃ N ₃ O ₇	1,77	7 350 (1,70 ³)	101 – 107
Nitrometan ^{1*}	NM	CH ₃ NO ₂	1,14	6 100 (1,28 ³)	105
Pentrit ¹	PETN	C ₅ H ₈ N ₄ O ₁₂	1,78	8 350 (1,73 ³)	131
Hexogen ¹	RDX	C ₃ H ₆ O ₆ N ₆	1,82	8 850 (1,80 ³)	125
Dusičnan amonný ²	AN	NH ₄ NO ₃	1,73	3 580 (0,75 ³)	20 – 24
2, 4, 6 – trinitrotoluen	TNT	C ₇ H ₅ N ₃ O ₆	1,65	6 900 (1,60 ³)	100
Tetryl ¹	–	C ₇ H ₅ N ₅ O ₈	1,73	7 850 (1,71 ³)	113
Směsné trhaviny					
Obchodní název	Druh	Konzistence	Hustota [g/cm ³]	Detonační rych. [m/s]	Brizance Hess [mm]
Danubit Geofex	Speciální	Plastická	1,55	6 400	19
Ostravit	Důlní	Poloplastická	1,20	1 900	5
Permon 10	Povrchov	Prášek	1,05	4 000	15
Permon GS	–	–	–	–	–
Permonex V 19	D. skalní	Prášek	1,05	4 400	18
Perunit 28 E	Důlní	Plastická	1,48	6 000	20
Semtex 1 A (červený)	Speciální	Plastická	<1,43	7 200	21
Semtex 1 H (žlutý)	Speciální	Plastická	1,43	7 400	22
Semtex S 30	Speciální	Prášek	>1,10	2 200	10
A – IX – 1	Speciální	Šupinky	≈1,80	8 450 (1,68 ³)	–

Pozn.: ¹ triviální název, ² chemický název, ³ hustota

(–) údaj nezjištěn, * patří do skupiny improvizovaných trhavin



Obr. 20: Vzorky střelivin. Zleva: D 055, NDT – 3 a D 380. Foto autor.

U běžných malorážových střelivin bylo měření komplikované. Důvodem byla jejich tmavá barva, která neposkytovala dostatečně silný rozptyl a možná také luminiscence. Nadto se povrch některých prachových zrn ve výrobě „pokovuje“ což mělo další negativní vliv na měření (kovy nejsou Ramansky aktivní).

Při pokusech se zvýšeným výkonem laseru docházelo ke vznícení a znehodnocení vzorku.

Tab. 9: Naměřené prekurzory s chemickými vlastnostmi.

Prekurzory			
Název	Sumární vzorec	Hustota [g/cm ³]	Min. množství / měřené [% hm]
Nitrometan	CH ₃ NO ₂	1,14	30/97
Peroxid vodíku	H ₂ O ₂	1,45	30/30
Dusičnan amonný	NH ₄ NO ₃	1,73	16/99,9

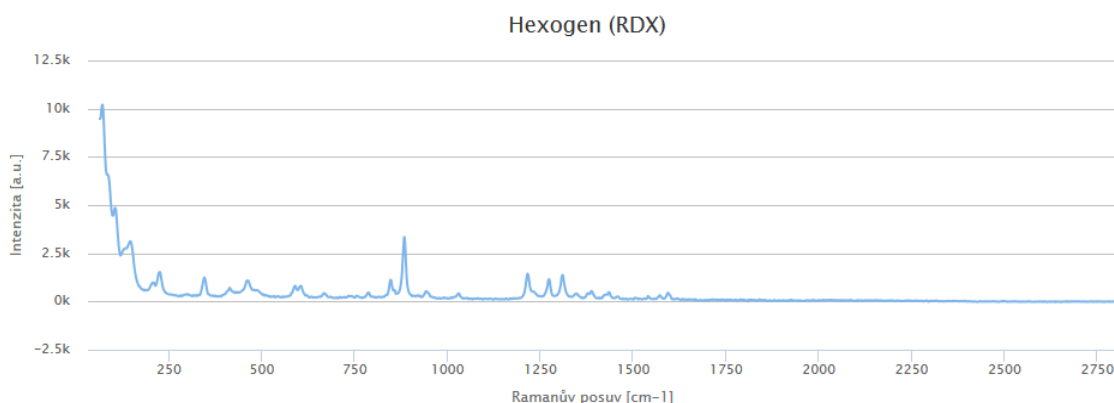
Pozn.: Mezi prekurzory se řadí i nitrometan, který je současně improvizovanou trhavinou. Stejným případem je i dusičnan amonný.

4.5 Zpracování a úprava získaných dat

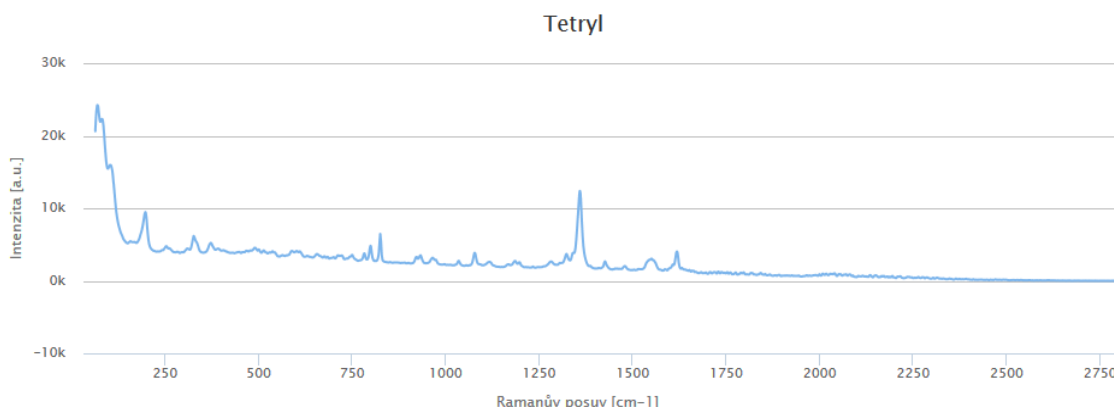
Soubory se spektrálními daty bylo pro přenesení do databáze zapotřebí dodatečně upravit. Databáze sice umožňuje nahrávání souborů typu .txt, avšak textový soubor vyexportovaný programem BWSpec 4 nebyl pro nahrání připraven, potřeboval podstatně zjednodušit.

4.5.1 Srovnání spekter různých výbušnin

Pro účinnou identifikaci neznámé látky prostřednictvím srovnání jejího spektra se spektry knihovními je nezbytné, aby každá z látek měla své unikátní Ramanovo spektrum. Na ukázkou je zobrazena dvojice různých výbušnin, která byla v rámci diplomové práce změřena. V obou případech se jedná o výkonné chemicky jednotné trhaviny.



Obr. 21: Ramanovo spektrum RDX.



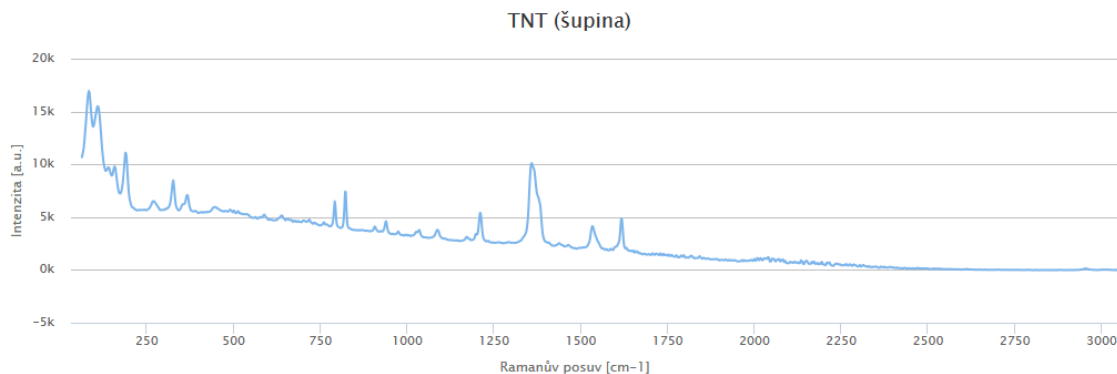
Obr. 22: Ramanovo spektrum Tetrylu.

Z vyobrazených spekter RDX a Tetrylu jasně vidíme, že každá z výbušnin má své charakteristické píky (ostatně všechny látky mají své charakteristické spektrum). Například v okolí bodu 1250 cm^{-1} osy x ve spektru Hexogenu se nachází trojice píků, které nejsou ve spektru Tetrylu nijak výrazné a naopak Tetryl má v okolí 1620 cm^{-1} svoji charakteristickou dvojici. Tato spektra jsou unikátní a látky se nedají zaměnit.

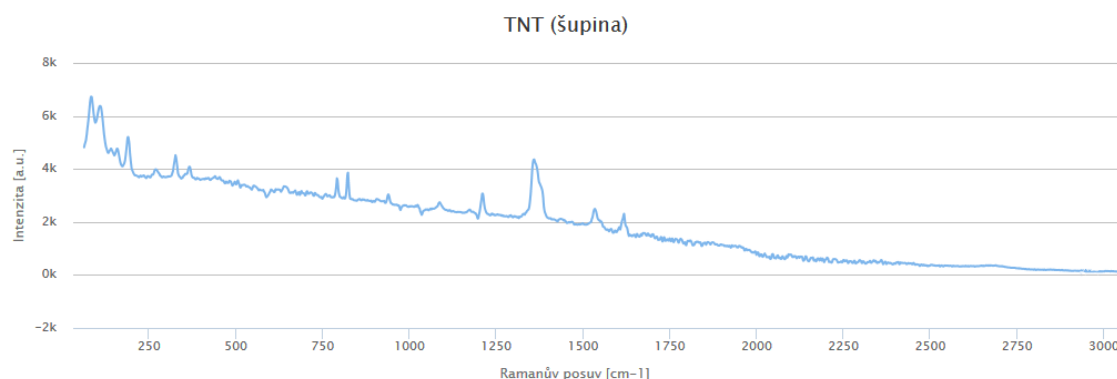
4.5.2 Měření s pomocí mikroskopu a sondy

Další nespornou výhodou Ramanovy spektroskopie je fakt, že lze provádět měření neznámé látky i přes tenký obalový materiál. První vyobrazené spektrum (Obr. 22) patří

trinitrotoluenu ve formě šupin, které bylo pořízeno pomocí mikroskopu. Druhé (Obr. 23) náleží rovněž šupinkovému trinitrotoluenu, avšak toto spektrum je pořízeno pomocí sondy BAC 102 s dlouhým adaptérem a distanční koncovkou.



Obr. 23: TNT ve formě šupin měřený pomocí mikroskopu.



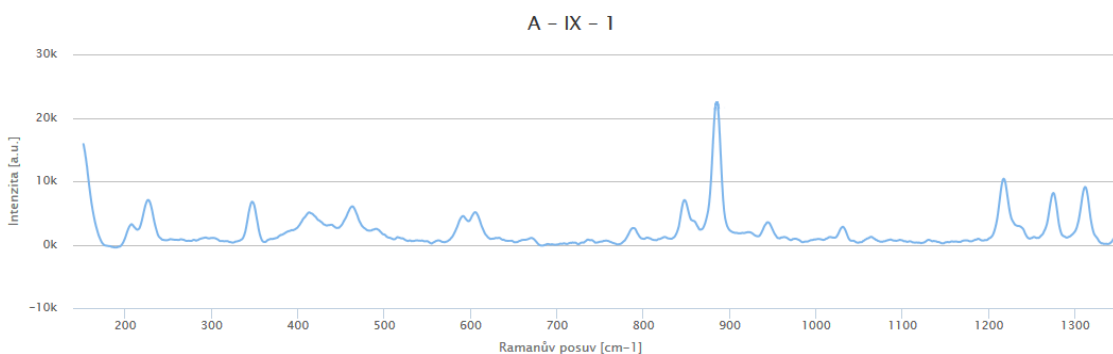
Obr. 24: TNT ve formě šupin měřený pomocí sondy s koncovkou.

Mezi spektry jsou vidět nepatrné odlišnosti, jedná se však o stejná spektra (respektive spektra stejné látky).

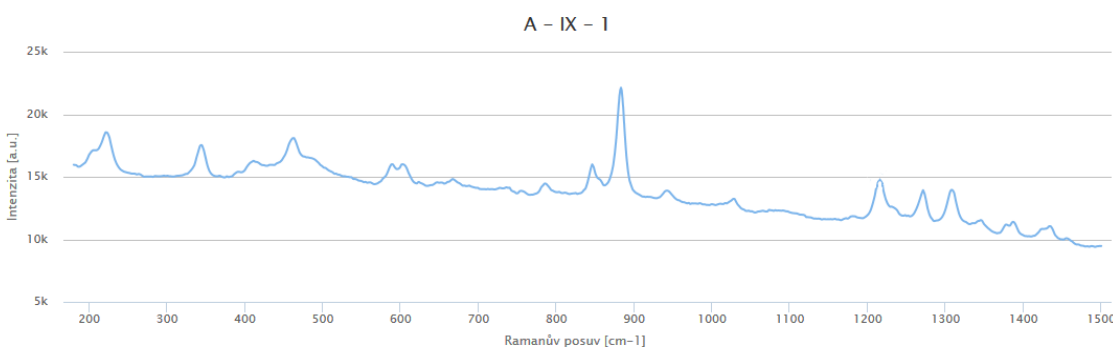
4.5.3 Univerzalita spekter

Základem úspěšnosti identifikace je nalezení dostatečného množství společných píků a to pokud možno bez ohledu na typ použitého Ramanova spektrometru (ovšem s ohledem na stejné parametry měření a podmínky). Spektrum na Obr. 24 bylo pořízeno na stabilním Ramanově přístroji inVia Basis Raman Microscope, Renishaw s laserem vlnové délky 514 nm a parametry 1 – 30 – 50 (doba expozice [s] – počet akumulací – výkon laseru [%]), umístěném v laboratoři Fakulty aplikované informatiky UTB ve Zlíně.

Druhé spektrum bylo měřeno pomocí přístroje i-Raman[®] Plus s laserem o vlnové délce 785 nm a s nastavením základních parametrů 1 – 10 – 100.



Obr. 25: Spektrum pořízené přístrojem InVia Basis Raman Microscope, Renishaw.



Obr. 26: Spektrum pořízené mobilním přístrojem i-Raman[®] Plus.

I přes odlišnosti v použitých laserech a parametrech měření je u obou spekter možno nalézt společné píky.

Abychom vždy dosáhli co možná nejlepší shody, je nejlepší vytvořit na daném Ramanově spektrometru vlastní databázi spekter a tu dále využívat pro účely identifikace.

4.6 Databáze spekter

Naměřená Ramanova spektra výbušnin byla nahrána do online databáze spekter, která byla vytvořena na Fakultě aplikované informatiky, UTB ve Zlíně. Celkem bylo do databáze přidáno 27 spekter.

Práce v databázi je intuitivní a rychlá. Pro založení nové karty (vlození vzorku) stačí zvolit možnost **Vzorky** v levém menu a kliknout na tlačítko **Vložit**. Otevře se formulář, kam zadáme nezbytné údaje jako název, název v angličtině, chemickou značku apod. Tyto údaje zadány být musí jinak nelze kartu uložit. Dále zadáme informace dle svých potřeb do

pole **Popis**. Jakmile máme všechna pole vyplněna, můžeme přistoupit k samotnému nahrání souboru.

				Langer	Výbušniny
2, 4 - dinitrotoluen (DNT)	Dinitrotoluene	C7H6N2O4	UTB	Langer	Výbušniny
2, 4, 6 - trinitrotoluen (TNT)	Trinitrotoluene	C7H5N3O6	UTB	Langer	Výbušniny
Hexogen (RDX)	Cyclonite, hexogen	C3H6O6N6	UTB	Langer	Výbušniny
Octogen (HMX)	Octogen	C4H8N8O8	UTB	Langer	Výbušniny
Erythritol tetranitrát (ETN)	Erythritol tetranitrate	C4H6N4O12	UTB	Langer	Výbušniny
Tetryl	Tetryl	C7H5N5O8	UTB	Langer	Výbušniny
Pentrit (PETN)	Pentrite	C5H8N4O12	UTB	Langer	Výbušniny
Kyselina pikrová (TNF)	Picric acid	C6H3N3O7	UTB	Langer	Výbušniny
Triaceton triperoxid (TATP)	Triacetone triperoxide	C9H18O6	UTB	Langer	Výbušniny
Hexamethylenetriperoxid diamin (HMTD)	Hexamethylene triperoxide diamine	C6H12N2O6	UTB	Langer	Výbušniny
Danubit Geofex	---	---	UTB	Langer	Výbušniny
Ostravit	---	---	UTB	Langer	Výbušniny
Permon 10	---	---	UTB	Langer	Výbušniny
Permon GS	---	---	UTB	Langer	Výbušniny
Permonex V19	---	---	UTB	Langer	Výbušniny
Perunit 2BE	---	---	UTB	Langer	Výbušniny
Semtex 1A	Semtex 1A	---	UTB	Langer	Výbušniny
Semtex 1H	Semtex 1H	---	UTB	Langer	Výbušniny
Semtex S 30	Semtex S 30	---	UTB	Langer	Výbušniny

Obr. 27: Náhled do databáze výbušnin.

Pod polem **Popis** vybíráme zdroj dat, kde zatrhneme možnost **Ze souboru**. Pomocí tlačítka **Choose File** vyhledáme soubor a potvrdíme. Založení karty vzorku stačí už jen potvrdit tlačítkem **Uložit**.

Databáze se nalézá na adrese: <http://raman.php5.cz/www/sign/in>. Pro vstup jsou vyžadovány přihlašovací údaje.

4.6.1 Práce s databází

Databáze nabízí běžné funkce jako editování, export dat, zobrazení nebo smazání záznamu. Samozřejmě nabízí i možnost filtrace výsledků např. podle názvu či jména zadavatele.

Při prohlížení záznamu máme k dispozici i spektrum. Po najetí kurzorem myši na křivku spektra se nám zobrazí aktuální hodnota vlnočtu. Můžeme tak velmi rychle zkontrolovat hodnoty významných píků.

ZÁVĚR

Cílem první kapitoly teoretické části bylo uvést čtenáře do problematiky výbušnin. Stručným způsobem jsou vysvětlovány základní informace o výbušninách, jejich dělení, vlastnosti, způsoby jejich výbušné přeměny a mnoho dalších pojmů. Menší část práce popisuje nejvýznamnější druhy trhavin, mezi které bezpochyby patří vojensky využívaný TNT nebo průmyslově dnes již nepostradatelné ANFO.

S pojmem výbušniny se často pojí slovo terorismus. Teroristické skupiny využívají obzvláště zákeřné způsoby boje, mezi nimiž zaujímají zvláštní místo improvizovaná výbušná zařízení. Druhá kapitola popisuje konstrukci (základní společné prvky) takových zařízení a výbušniny, které je možné pro jejich výrobu použít. Shrnuje druhy a složení improvizovaných výbušnin.

Pro účely vyšetřování událostí, při kterých byly použity výbušniny, je přesná identifikace explozivní látky velmi důležitá. V práci je jmenováno a stručně popsáno několik metod využitelných pro identifikaci. Jmenovány jsou zejména metody spektroskopické, které jsou skutečně mocným prostředkem chemické analýzy. Ze zmíněných metod funguje velmi dobře např. Ramanova spektroskopie. V současnosti se využívá velmi praktických ručních spektrometrů např. u jednotek hasičů nebo policie. Stručně popsána je perspektivní metoda pracující s mikrotaganty.

Praktická část se věnuje experimentálnímu měření vzorků výbušnin. Byla provedena řada měření a to střelivin, třaskavin, trhavin a prekurzorů (včetně dusičnanu amonného) pomocí mobilního Ramanova spektrometru. Provedeným měřením se získalo téměř 30 Ramanových spekter, která mohou být dále využívána pro analýzu. Dalším podrobně popsáním krokem v praktické části je zpracování získaných spekter, která byla úspěšně uložena do online databáze Univerzity Tomáše Bati. Databáze je přístupná oprávněnému uživateli po zadání přihlašovacích údajů. Pro zachování maximálního množství informace byla na spektra aplikována pouze funkce odstranění vlivu temného pole.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TUREČEK, Jaroslav. *Policejní pyrotechnika*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2014. ISBN 978-80-7380-510-4.
- [2] ZEMAN, Svatopluk. *Chemické Listy, vol. 104: Energetické materiály - současnost a trendy vývoje výbušnin* [online]. 2010, **2010** [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2010_08_791-797.pdf.
- [3] Tritolová náložka 200g - školní. *Sbírka materiálu ČSLA, AČR, LM, PS, CO* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://carlossbirka.blog.cz/galerie/zbrane-munice-a-pyrotechnika-vcetne-prislusenstvi/obrazek/95359736>.
- [4] AKHAVAN, Jacqueline. *The chemistry of explosives*. 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2011. ISBN 978-184-9733-304.
- [5] Vlastnosti výbušnin. *PyroExpert.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <http://www.pyroexpert.cz/vlastnosti-vybusnin/>.
- [6] Významné výbušniny a jejich užití v praxi. *ELUC* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2516>.
- [7] BREBERA, Stanislav. *Vojenské trhaviny a technologie výroby trhavinových náloží: učební texty k předmětu*. Vyd. 1. Pardubice: Univ. Pardubice, 2001. ISBN 80-719-4360-6.
- [8] BECKER, Naomi M. *Fate of selected high explosives in the environment: A literature review* [online]. 1995 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <https://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00276619.pdf>.
- [9] TETE, Aruna D., A.Y. DESHMUKH a R.R. Yerpude. *Velocity of detonation (VOD) measurement techniques practical approach* [online]. Nagpur, 2013 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/1023/817>.
- [10] MEYER, Rudolf, Josef KÖHLER a Axel HOMBURG. *Explosives*. 5th, completely rev. ed. / . Weinheim: Wiley-VCH, 2002. ISBN 35-273-0267-0.
- [11] SIEGEL, Jay A. *Forensic chemistry: fundamentals and applications*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 2015. ISBN 978-111-8897-720.
- [12] STRAUS, Jiří, Jaroslav SUCHÁNEK a Viktor PORADA. Kriminální stopy obsahující informaci o vlastnostech vnitřní stavby (struktury) nebo vnitřního

- složení objektu. *Soudní inženýrství* [online]. 2004, **15**(3), 136 - 138 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-03-131-145.pdf>.
- [13] Explosive material. *New World Encyclopedia* [online]. 2013 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Explosive_material.
- [14] Imitační prostředky - Dýmavnice DA 25. *UTON.cz* [online]. UTON, 2011 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.uton.cz/pyro/dymavnice/pyro-dymavnice-da-25/>.
- [15] Health concern and pollution created by TNT. *Unam* [online]. 2011 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://2011.igem.org/Team:Bilkent_UNAM_Turkey/Project_Description.
- [16] BEDNAŘÍK, Karel. *Toxicita trinitrotoluenů a produktů jejich biotransformací* [online]. Brno, 2004 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-1655-6.pdf>. VUT v Brně.
- [17] *FRTR, Remediation Technologies Screening Matrix: and Reference Guide, V 4.0* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: https://frtr.gov/matrix2/top_page.html.
- [18] 11 home remedies for spider bites on legs, arm, and face. *VKool* [online]. Milpitas: VKool, 2014 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://vkool.com/home-remedies-for-spider-bites/>.
- [19] *Explosia: Stručná historie plastické trhaviný Semtex* [online]. Pardubice, 2003 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: <http://www.explosia.cz/?show=semtex>.
- [20] Chemie, pyrotechnika, trhaviný: Semtexy 1A a H. *P.X.D. Exxperts* [online]. 2001 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/vybusnin/PXD/cl/semtex.htm>.
- [21] V rámci zbraňové amnestie přinesla žena na policejní služebnu Semtex!. *Centrum news c.z.* [online]. 2014 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.centrumnews.cz/krimi/v-ramci-zbranove-amnestie-prinesla-zena-na-policejni-sluzebnu-semtex-103247>.
- [22] Utajená kuchyně. Tady se vaří démonizovaný semtex. *Aktuálně.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: <http://zpravy.aktualne.cz/domaci/kuchyne-kde-se-vari-semtex/r~4e52a894640f11e49bec0025900fea04/>.

- [23] HEIVILIN, Donna. *Production, Distribution, and Storage of C-4 Explosive* [online]. 1990 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.gao.gov/assets/90/88774.pdf>.
- [24] Explosives - ANFO (Ammonium Nitrate - Fuel Oil). *GlobalSecurity.org* [online]. 2011 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/explosives-anfo.htm>.
- [25] ANFO. *Maxam Anadolu* [online]. 2012 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.maxam.com.tr/en/yemleme-duyarli-patlayici/11/kar-anfo>.
- [26] IED Attacks: Improvised Explosive Devices. *Homeland Security* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/prep_ied_fact_sheet.pdf.
- [27] SCHUBERT, Hiltmar. a Andrey. KUZNETSOV. *Detection and disposal of improvised explosives*. Dordrecht: Springer, c2006. ISBN 9781402048876.
- [28] Ruční raman spektrometr PROGEMY ResQ. *BAS Rudice s.r.o.* [online]. Rudice [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.bas.cz/raman-spektrometr-res-q-progeny-1064-nm/raman-progeny-resq.php>.
- [29] NOVOTNÁ, Radka, Tomáš ŠILHA a Zdeněk TRÁVNÍČEK. *Spektrální metody studia chemických látek* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://agch.upol.cz/userfiles/file/pdf/Spektralni_metody.pdf. U. Palackého v Ol..
- [30] MILATA, Viktor a Peter SEGĽA. *Spektrálne metódy v chémii*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004. Edícia vys. učebníc. ISBN 80-227-2049-6.
- [31] Infračervená spektrometrie. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf>.
- [32] Infračervená spektroskopie. *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>.
- [33] Analysis. *What-When-How: In Depth Tutorials and Information* [online]. The-Crankshaft Publishing [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://what-when-how.com/forensic-sciences/analysis/>.

- [34] *The forensics library: Mass spectrometry* [online]. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://aboutforensics.co.uk/mass-spectrometry/>.
- [35] DENDISOVÁ, Marcela, Pavel ŽVÁTORA a Pavel MATĚJKA. *Ramanova spektrometrie* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/anl/lach2/RAMAN.pdf>. Vysoká škola chemicko - technologická v Praze.
- [36] CHALMERS, John M., Howell G. M. EDWARDS a Michael D. HARGREAVES. *Infrared and Raman spectroscopy in forensic science*. Hoboken: Wiley, 2012. ISBN 9780470749067.
- [37] Terahertz spectroscopy: Signatures and fingerprints. *Nature Photonics* [online]. Macmillan Publishers Ltd., 2008 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.nature.com/nphoton/journal/v2/n9/fig_tab/nphoton.2008.174_F1.html.
- [38] *Molekulová spektrometrie* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2016 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://holcapek.upce.cz/vyuka-molekul-spektrometrie.php>.
- [39] OPEKAR, František. *Základní analytická chemie pro studenty, pro něž analytická chemie není hlavním studijním oborem*. Praha: Karolinum, 2002. ISBN 978-80-246-0553-1.
- [40] SZALA, Mateusz a Leszek SZYMANCZYK. *Analysis of Common Explosives in Different Solvents by Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* [online]. Warsaw, 2014 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.wydawnictwa.ipw.waw.pl/cejem/Vol-1-Number-1-2014/Szala.pdf>. Military University of Technology, Faculty of New Technologies and Chemistry.
- [41] Testy pro drogy a výbušniny. 2 *Theta: Analytical standards and equipment* [online]. Český Těšín: 2 Theta ASE s.r.o. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.2theta.cz/testy>.
- [42] Taggants in Explosives. *Office of Technology Assessment Archive* [online]. Washington D. C.: U.S. Government Printing Office, 1980 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://ota.fas.org/reports/8017.pdf>.
- [43] Taggant Technologies. *Microtrace* [online]. Microtrace, LLC., 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.microtracesolutions.com/taggant-technologies/>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ANFO	Ammonium Nitrate Fuel Oil
API	Atmospheric Pressure Ionization
CI	Chemical Ionization
EGDN	Ethylene glycol dinitrate
ERA	Explosive reactive armour
FIR	Far Infra Red
FT – IR	Fourier Transformation – Infra Red
FOX – 7	Diaminodinitroethylene
GC – MS	Gas Chromatography – Mass Spectrometry
HANFO	Heavy ANFO
HNIV	Hexanitrohexaazaisowurtzitane
IED	Improvised Explosive Device
IR	Infra Red
J	Joule
K	Kelvin
MIR	Middle Infra Red
mW	mili Watt
NIR	Near Infra Red
NMR	Nuclear Magnetic Resonation
TDR	Time Domain Reflectometer
TOF	Time – Of – Flight
UV	Ultra Violet

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: TNT je postupně nahrazován výkonnějšími trhavinami. [3]</i>	12
<i>Obr. 2: Střeliviny jsou charakteristické explozivním hořením. [6]</i>	14
<i>Obr. 3: Dýmavnice je jedním z mnoha typů pyrotechnických složí. [14]</i>	20
<i>Obr. 4: Tzv. „růžová voda“ je znamením znečištění prostředí TNT. [15]</i>	21
<i>Obr. 5: Granule aktivního uhlí. [18]</i>	23
<i>Obr. 6: Mikroskopický snímek krystalků RDX. Foto autor.</i>	24
<i>Obr. 7: Známa česká trhavina firmy Explosia a.s. [21]</i>	25
<i>Obr. 8: ANFO je významná trhavina v těžebním průmyslu. [25]</i>	26
<i>Obr. 9: Ruční spektrometr určený pro identifikaci nebezpečných látek. [28]</i>	29
<i>Obr. 10: IR spektrum třaskaviny TATP, často improvizovaně vyráběné výbušniny. [33]</i>	31
<i>Obr. 11: THz spektra známých trhavin. [37]</i>	33
<i>Obr. 12: Hmotnostní spektrum a TNT (elektronová ionizace). [33]</i>	34
<i>Obr. 13: Sada PIR 1 určená k identifikaci výbušnin. [41]</i>	38
<i>Obr. 14: V posloupnosti barevných vrstev je zakódována informace. [43]</i>	38
<i>Obr. 15: Měřicí komplet i-Raman[®] Plus. Foto autor.</i>	41
<i>Obr. 16: Sonda připojená ke kameře mikroskopu. Foto autor.</i>	42
<i>Obr. 17: Sonda s dlouhým adaptérem a distanční koncovkou. Foto autor.</i>	43
<i>Obr. 18: Skleničky s měřenými trhavinami. Foto autor.</i>	44
<i>Obr. 19: Vzorky na podstavci: vlevo šupinkový TNT, vpravo krystalický. Foto autor.</i>	44
<i>Obr. 20: Vzorky střelivin. Zleva: D 055, NDT – 3 a D 380. Foto autor.</i>	47
<i>Obr. 21: Ramanovo spektrum RDX.</i>	48
<i>Obr. 22: Ramanovo spektrum Tetrylu.</i>	48
<i>Obr. 23: TNT ve formě šupin měřený pomocí mikroskopu.</i>	49
<i>Obr. 24: TNT ve formě šupin měřený pomocí sondy s koncovkou.</i>	49
<i>Obr. 25: Spektrum pořízené přístrojem InVia Basis Raman Microscope, Renishaw.</i>	50
<i>Obr. 26: Spektrum pořízené mobilním přístrojem i-Raman[®] Plus.</i>	50
<i>Obr. 27: Náhled do databáze výbušnin.</i>	51

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Některé zdokumentované bombové útoky s účastí IED.....	27
Tab. 2: Amatol může být řešením při nedostatku výkonné trhaviny. [1]	28
Tab. 3: Ze srovnávací tabulky (uvedena je pouze její část) je patrné, že sada PIR 1 slouží spíše pro orientační identifikaci výbušnin. [41]	37
Tab. 4: Technické parametry přístroje.	41
Tab. 5: Technické parametry mikroskopu a kamery.	42
Tab. 6: Technické parametry sondy a jejího příslušenství.....	43
Tab. 7: Měřené třaskaviny se základními údaji. [4]	45
Tab. 8: Měřené chemicky jednotné a směsné trhaviny se základními údaji.....	46
Tab. 9: Naměřené prekurzory s chemickými vlastnostmi.	47