

תגובת בעירה בחומרי נפץ ודפלגרציה

Deflagrate:

- Flagrate "to burn"
- De "down" or away

1

נמשיך בניסיון להגדיר מהו חומר נפץ ?

- חומר כימי תערובת או תרכובת אשר ניתן להצית באמצעות בחום, הלם, חיכוך או בשילוב כמה דרכים יחד.
- לאחר היזימה החומר עובר תגובת פירוק כימית
- תוצרי תגובת הפירוק הינם חום רב ותוצרים גזיים בעלי עוצמה מספקת לפרוץ כוחות מעטפת.

2

תהליכי שחרור האנרגיה בתגובת פירוק חומר נפץ

- רסיסי סלע
- תזוזת סלע
- ויברציות קרקע
- הדף אוויר

3

תגובות בעירת חומרי נפץ

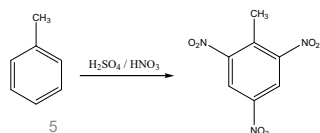
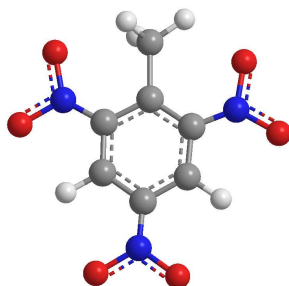
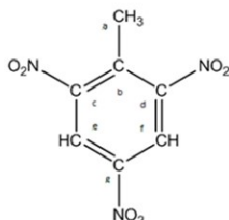
- $C_xH_yN_wO_z$
- $2N \rightarrow N_2$
- $2H + O \rightarrow H_2O$
- $C + O \rightarrow CO$
- $CO + O \rightarrow CO_2$
- נוסחה אמפירית נפוצה
 - היווצרות גז חנקן מאטומי חנקן
 - החמצן נשרף ליצירת מים
 - עודפי חמצן אחרי יצירת מים משמשים לשריפת פחמן
 - עודפי חמצן שנותרים הופכים פחמן חד חמצני לפחמן דו $CO + O \rightarrow CO_2$
 - חמצני
 - עודפי אטומי חמצן נותרים כגז חמצן
 - היווצרות שאריות של חנקן חד ודו חמצני



4

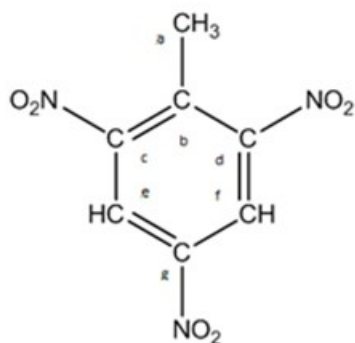
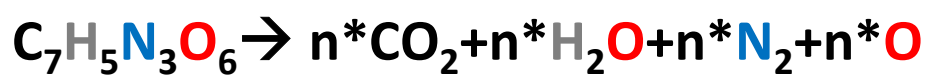
תגובת בעירת חומרי נפץ

חומר נפץ מסוג TNT:



תגובת בעירת חומרי נפץ

דוגמא למשוואת פירוק חומר נפץ מסוג TNT:



6

Typical CPK color assignments include:

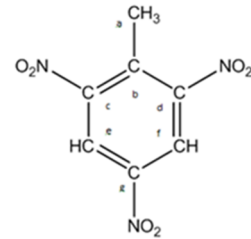
hydrogen (H)	white
carbon (C)	black
nitrogen (N)	blue
oxygen (O)	red
fluorine (F), chlorine (Cl)	green
bromine (Br)	dark red
iodine (I)	dark violet
noble gases (He, Ne, Ar, Xe, Kr)	cyan
phosphorus (P)	orange
sulfur (S)	yellow
boron (B), most transition metals	beige
alkali metals (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr)	violet
alkaline earth metals (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra)	dark green
titanium (Ti)	grey
iron (Fe)	dark orange
other elements	pink

תגובת בעירת חומרי נפץ

איזון משוואת התגובה לחמצון המגיבים לתוצרים CO₂, H₂O, N₂

איזון משוואת התגובה:

- $C_7H_5N_3O_6 \rightarrow n CO_2 + n H_2O + n N_2 +$
- $C_7H_5N_3O_6 \rightarrow \underline{7} CO_2 + n H_2O + n N_2 +$
- $C_7H_5N_3O_6 \rightarrow \underline{7} CO_2 + 2.5 H_2O + n N_2 +$
- $C_7H_5N_3O_6 \rightarrow \underline{7} CO_2 + 2.5 H_2O + 1.5 N_2 +$
- $C_7H_5N_3O_6 \rightarrow \underline{7} CO_2 + 2.5 H_2O + 1.5 N_2 - 10.5 O$



7

מאזן חמצן

הגדרה:

מאזן חמצן (באחוזים) בין הדלק והמחמצן בחומר.

השפעת מאזן חמצן:

תגובת בעירה מאוזנת (מאזן חמצן 0%) מאפשרת חימצון

כל המגיבים לתוצרי פחמן דו חמצני, מים וחנקן ללא עודף

או חוסרים של חמצן.

8

מאזן חמצן

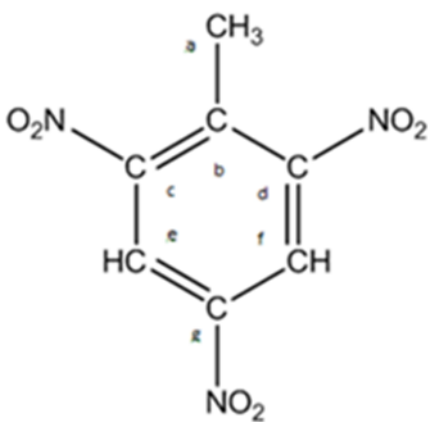
דרך א לחישוב מאזן חמצן – סטוכיומטריה (איזון כמויות וריכוזים)

שלבי החישוב

- איזון המשוואה
- חישוב מסה מולקולרית כוללת של חומר הנפץ
- חישוב אחוז החמצן במסה המולקולרית הכוללת.

מאזן חמצן

- כתיבת משוואת התגובה - הרכב מולקולת חומר נפץ TNT



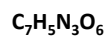
? - C
? - H
? - N
? - O

מאזן חמצן

- חישוב משקל מולקולרי של מולקולת TNT

C=12	מסה פחמן
H=1	מסה מימן
N=14	מסה חנקן
O=16	מסה חמצן

מסת מולקולת TNT



$$\text{TNT} = (7 \times 12) + (5 \times 1) + (3 \times 14) + (6 \times 16) = 227 \text{ g/mol}$$

- חישוב משקל סה"כ מולקולות החמצן לאחר איזון

$$\text{O} = -10.5 \times 16 = -168 \text{ g/mol}$$

- אחוז החמצן במולקולת ה-TNT:

$$\frac{-168}{227} = -74\%$$

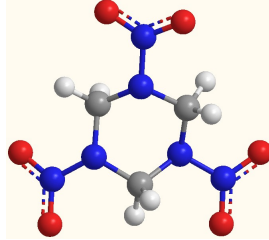
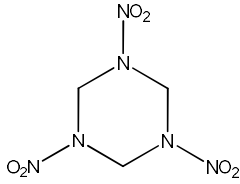
מאזן חמצן

דרך ב לחישוב מאזן חמצן – משוואת מאזן חמצן

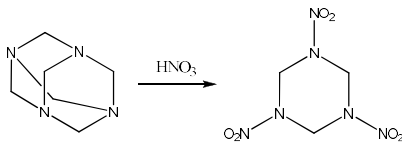
שלבי החישוב

- כתיבת נוסחה כימית
- חישוב משקל מולקולרי כללי של חומר הנפץ
- הצבה במשוואה

מאזן חמצן



חומר נפץ מסוג RDX:

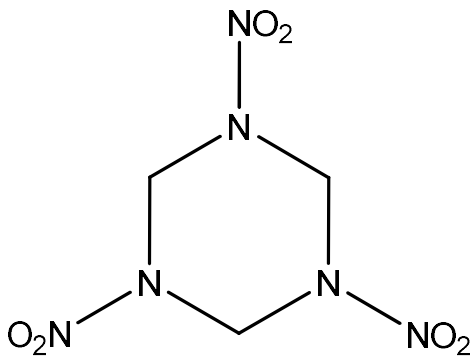


13



מאזן חמצן

• כתיבת משוואת התגובה - הרכב מולקולת חומר נפץ RDX



? - C

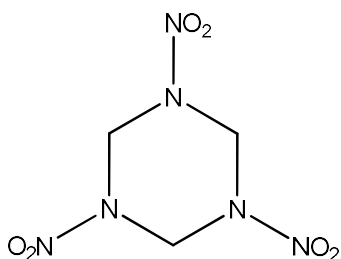
? - H

? - N

? - O

14

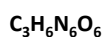
מאזן חמצן



• חישוב משקל מולקולרי של מולקולת RDX

C=12	מסה פחמן
H=1	מסה מימן
N=14	מסה חנקן
O=16	מסה חמצן

מסת מולקולת RDX



$$\text{RDX}_{\text{MW}} = (3 \times 12) + (6 \times 1) + (6 \times 14) + (6 \times 16) = 222 \text{ g/mol}$$

מאזן חמצן

• משוואת מאזן חמצן כללית:

$$O.B = \frac{\left[d - (2a) - \left(\frac{b}{2}\right) \right] \times 1599.940}{MW}$$



• הצבה במשוואה עבור RDX:

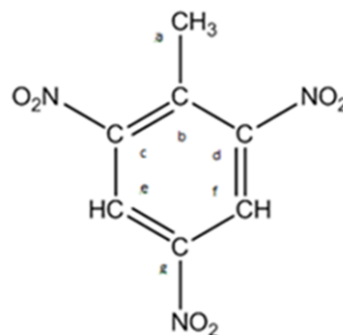
$$O.B = \frac{\left[6 - (2 \times 3) - \left(\frac{6}{2}\right) \right] \times 1599.940}{222} = -21.6\%$$

מאזן חמצן

בדיקה השוואתית עם חישוב באמצעות איזון התגובה:

איזון משוואת התגובה עבור RDX :

- $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6 \rightarrow n \text{CO}_2 + n \text{H}_2\text{O} + n \text{N}_2$
- $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6 \rightarrow \underline{3} \text{CO}_2 + n \text{H}_2\text{O} + n \text{N}_2$
- $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_6\text{O}_6 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + \underline{3} \text{H}_2\text{O} + n \text{N}_2$
- $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_6\text{O}_6 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} + \underline{3} \text{N}_2$
- $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_6\text{O}_6 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{N}_2 - \underline{3} \text{O}$

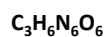


17

מאזן חמצן

- חישוב משקל מולקולרי של מולקולת RDX

C=12	מסה פחמן
H=1	מסה מימן
N=14	מסה חנקן
O=16	מסה חמצן



$$\text{RDX} = (3 \times 12) + (6 \times 1) + (6 \times 14) + (6 \times 16) = 222 \text{ g/mol}$$

- משקל סה"כ מולקולות החמצן לאחר איזון

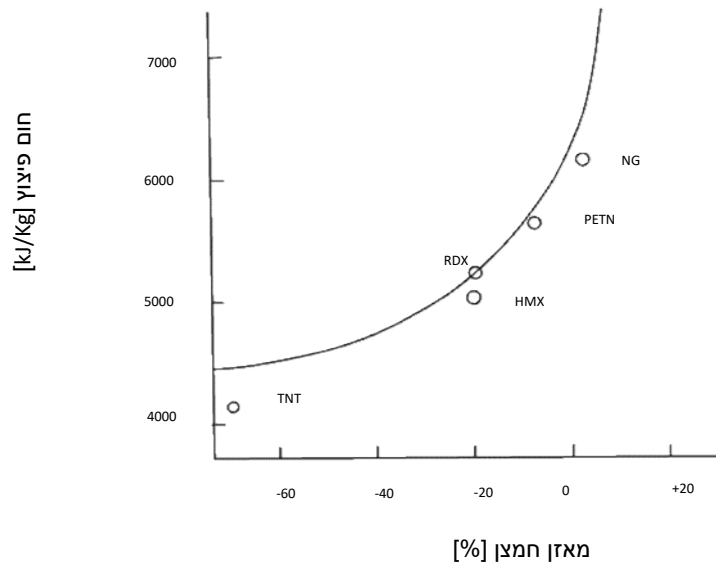
$$\text{O} = -3 \times 16 = -48 \text{ g/mol}$$

- מאזן חמצן במולקולה:

$$\frac{-48}{222} = -21.6 \%$$

18

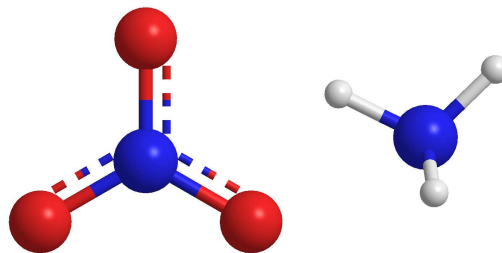
מאזן חמצן



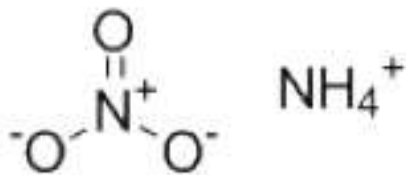
19

מאזן חמצן

אמוניום ניטרט:



NH_4NO_3



20

מאזן חמצן

- כתיבת נוסחת מולקולת Ammonium nitrate

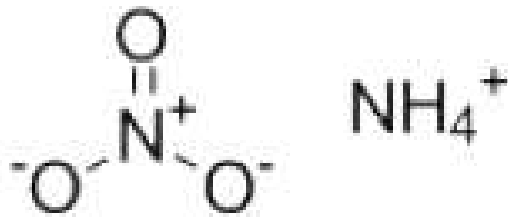


? - C

? - H

? - N

? - O

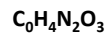


21

מאזן חמצן

- חישוב משקל מולקולרי Ammonium nitrate

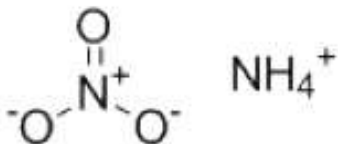
C=12	פחמן
H=1	מימן
N=14	חנקן
O=16	חמצן



$$\text{Ammonium nitrate}_{\text{MW}} = (a \cdot 12) + (b \cdot 1) + (c \cdot 14) + (d \cdot 16) =$$

$$(0 \cdot 12) + (4 \cdot 1) + (2 \cdot 14) + (3 \cdot 16) =$$

$$80 \text{ g/mol}$$



22

מאזן חמצן

הצבה במשוואת מאזן חמצן כללית:

$$O.B = \frac{\left[d - (2a) - \left(\frac{b}{2}\right) \right] \times 1599.940}{MW}$$

$C_a H_b N_c O_d$

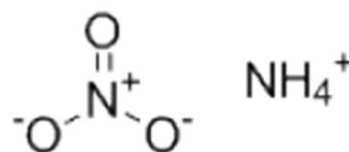
$C_0 H_4 N_2 O_3$

$$O.B = \frac{[3 - (2 \times 0) - (\frac{4}{2})] \times 1600}{80} = +20\%$$

מאזן חמצן

• איזון משוואת תגובת פירוק אמוניום ניטרט:

- $C_0 H_4 N_2 O_3 \rightarrow n CO_2 + n H_2O + n N_2$
- $C_3 H_4 N_2 O_3 \rightarrow \underline{0} CO_2 + n H_2O + n N_2$
- $C_3 H_4 N_2 O_3 \rightarrow 0 CO_2 + \underline{2} H_2O + n N_2$
- $C_3 H_4 N_2 O_3 \rightarrow 0 CO_2 + 2 H_2O + \underline{2} N_2$
- $C_3 H_4 N_2 O_3 \rightarrow 0 CO_2 + 2 H_2O + 2 N_2 + \underline{1} O$

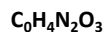


מאזן חמצן

- חישוב משקל מולקולרי של מולקולת ammonium nitrate

C=12	מסה פחמן
H=1	מסה מימן
N=14	מסה חנקן
O=16	מסה חמצן

מסת מולקולת AN



$$\text{AN}_{\text{MW}} = (0 \times 12) + (4 \times 1) + (2 \times 14) + (3 \times 16) = 80 \text{ g/mol}$$

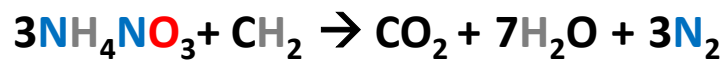
משקל סהכ מולקולות החמצן לאחר איזון

$$\text{O} = +1 \times 16 = 16 \text{ g/mol}$$

$$\frac{16}{80} = 20 \%$$

מאזן חמצן

- איזון משוואת תגובת פירוק אמוניום ניטרט על ידי הוספת דלק:



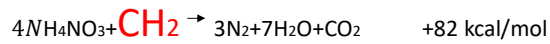
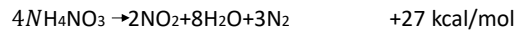
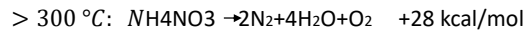
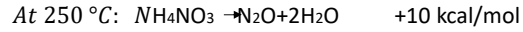
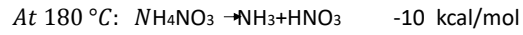
Ammonium nitrate = 80 g/mol

Diesel fuel = 14 g/mol

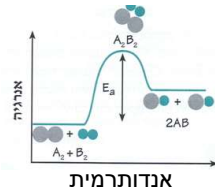
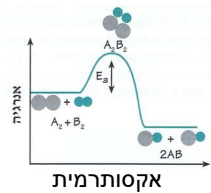
- חישוב אחוז הדלק במאזן חמצן:

$$\frac{14}{(3 \times 80) + 14} = \frac{14}{254} = 5.5\%$$

תגובת בעירה אמוניום ניטרט ותוסף דלק

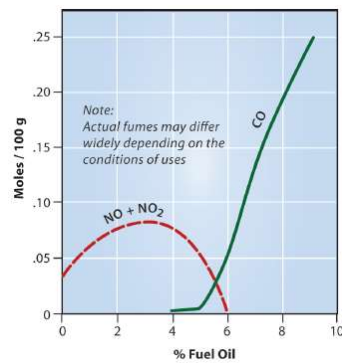
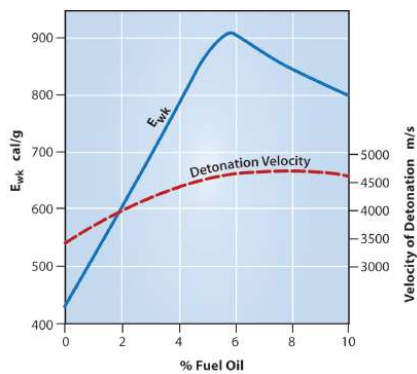


אמוניום ניטרט:
 התכה 169°C
 רתיחה 210°C
 התפרקות בקירוב 230 °C
 דפלגרציה 325 °C ומעלה
 דטונציה 260 °C מעלות ומעלה
 בתנאים מתאימים של קצב בעירה



27

תגובת בעירה אמוניום ניטרט ותוסף דלק



28

תגובת בעירה אמוניום ניטרט ותוסף דלק

Level	Typical Appearance
Level 0 No NOx gas	
Level 1 Slight NOx gas	
1A Localised	
1B Medium	
1C Extensive	
Level 2 Minor yellow/orange gas	
2A Localised	
2B Medium	
2C Extensive	
Level 3 Orange gas	
3A Localised	
3B Medium	
3C Extensive	
Level 4 Orange/red gas	
4A Localised	
4B Medium	
4C Extensive	
Level 5 Red/purple gas	
5A Localised	
5B Medium	
5C Extensive	

29

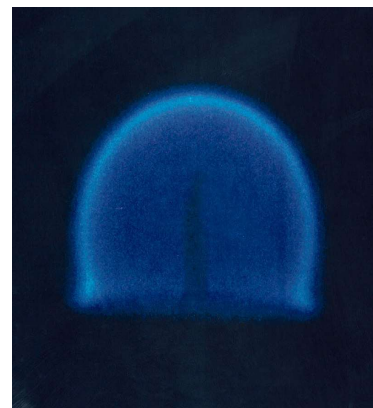
סוגי בעירה

בעירה דיפוזיבית

בעירה בה מקור החמצן הינו מחוץ לחומר .



30



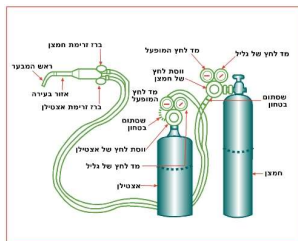
סוגי בעירה

בעירה דיפוזיבית

בעירה בה מקור החמצן הינו מחוץ לחומר.



שריפת יער



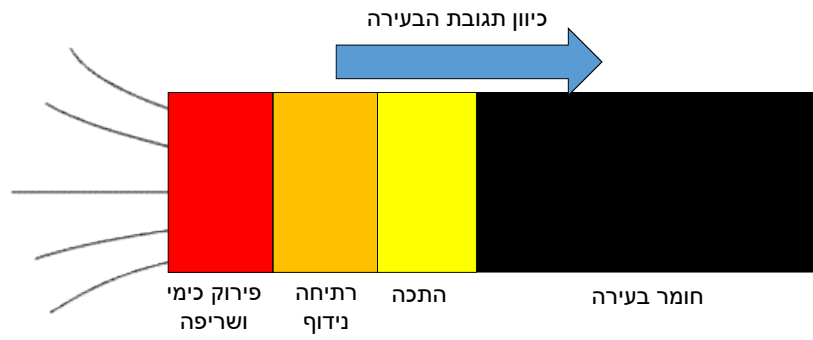
ריתוך להבה

סוגי בעירה

בעירה פירוטכנית

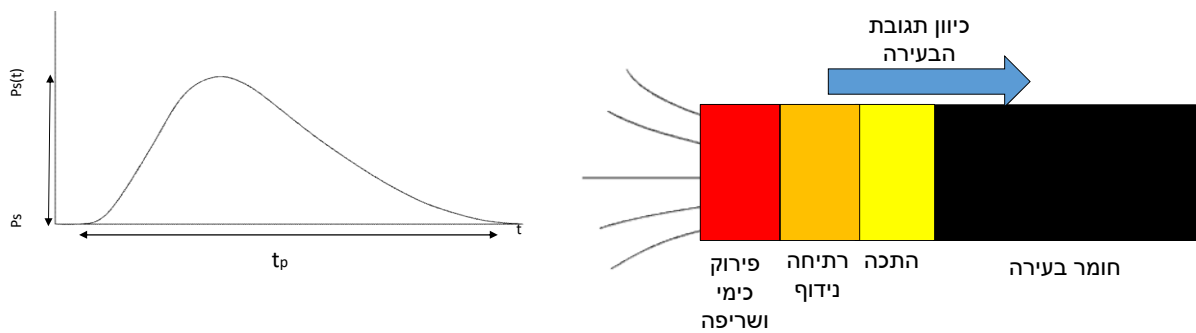
- תגובת בעירה – חומר עם חמצן
- תגובה המתקדמת בפנים תוך החומר
- מנגנון התקדמות התגובה הינו העברת חום באמצעות קרינה
- תגובה שבה הדלק והמחמן נמאים שניהם בתוך החומר או במגע בין שני חומרים או במולקולה בודדת.

דפלגרציה



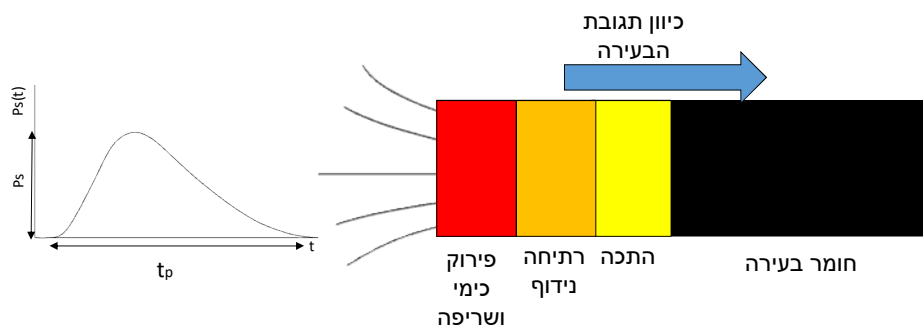
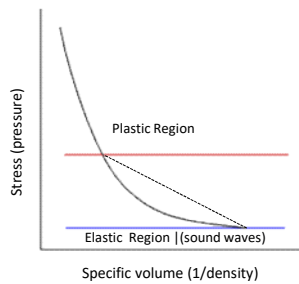
33

דפלגרציה



34

דפלגרציה



35

חומרי נפץ הודפים

הגדרה:

חומר נפץ אשר בוער בתהליך מבוקר ללא דטונציה

מלווה ביצירת נפח גזים חמים גדול.

36

חומרי נפץ הודפים

שימושים:

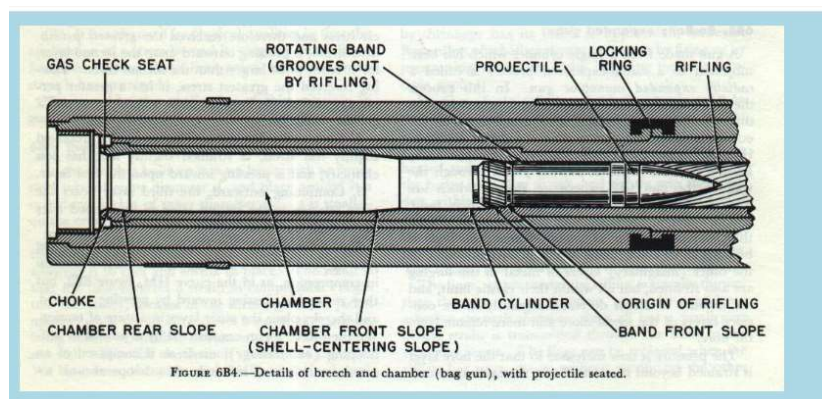
- הדיפת קליעים (בעירה תוך קנית)
- הדיפת טילים (מנועים רקטיים)
- גז גנרטור להפעלת טורבינות מסוגים שונים
- בוכנות פירוטכניות
- כריות אויר
- ועוד.



37

חומרי נפץ הודפים

שימושים בבליסטיקה פנימית



38

חומרי נפץ הודפים

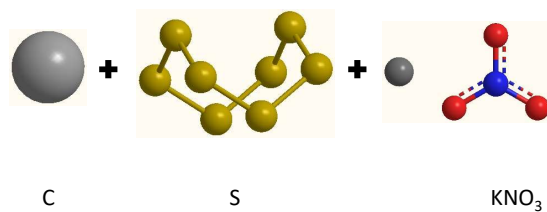
שימושים בבליסטיקה פנימית



39

חומרי נפץ הודפים

אבק שריפה שחור



40

חומרי נפץ הודפים

TABLE II. Granulation

Class	Retained on United States (U.S.) standard sieve		Passing through U.S. Standard sieve	
	Sieve No.	Max. percent	Sieve No.	Max. percent
1	4	8	8	5
2	6	3	12	5
3	8	3	16	5
4	16	3	30	5
5	16	3	40	5
6	20	3	50	5
7	40	3	100	7
8	100	5	270	50
9 a				

הודפים לשיגור קני - אבש"ש

Constituent	Classes 1 through 7 and class 9 percent	Class 8 only
Potassium nitrate	74.0 plus or minus 1.0	74.0 plus 1.0 minus 2.0
Sulfur	10.4 plus or minus 1.0	10.4 plus 1.5 minus 1.0
Charcoal	15.6 plus or minus 1.0	15.6 plus 1.5 minus 1.0

חומרי נפץ הודפים

הודפים לשיגור קני - אבש"רים

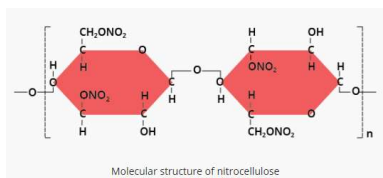


אבש"רים

- חד בסיסי
- דו בסיסי
- תלת בסיסי

צורות גיאומטריות – כדורים, פתיתים, רצועות, או צינורות בגדלים החל ממספר

מילימטרים ועד סנטימטרים בודדים.



Stabilizer (click for spec sheet)	Type	Specification
2,4-Dinitrotoluene (DNT)	Single-Base	MIL-D-204
2-Nitrodiphenylamine (2-NDPA)	Double-Base	MIL-N-3399
Akardite II	Multi-Base	DOD-M-64040
Diphenylamine (DPA)	Single-Base	MIL-D-98
Ethyl Centralite	Multi-Base	MIL-E-255
Methyl Centralite	Multi-Base	MIL-M-19719
N-Methyl-p-Nitroaniline (MNA)	Solid Fuel	MIS-35107



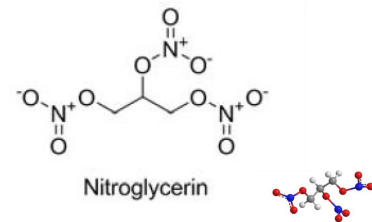
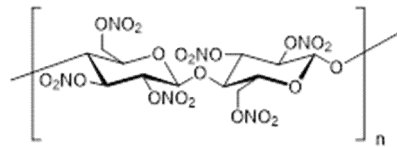
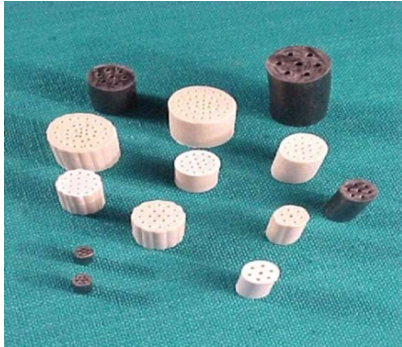
2,4 Dinitrotoluene (DNT) is a single-base propellant stabilizer for NC-based propellants.

חומרי נפץ הודפים

אבש"ר דו בסיסי -

ניטרוצלולוזה המשמשת כמצע לניטרוגליצרין

ריכוז NC גבוהה יוצר חום רב וקורוזיה



45

חומרי נפץ הודפים

אבש"ר תלת בסיסי -

• ניטרוצלולוזה המשמשת כמצע לניטרוגליצרים וניטרוגואנידין

• ריכוז NC גבוהה יוצר חום רב וקורוזיה

• תכולת אנרגיה גבוהה יותר פחות הבהק וארוזיה של קנים



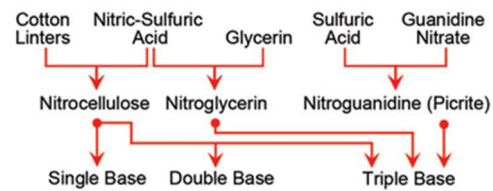
46

חומרי נפץ הודפים



תוספים

- מייצבים
- מרככים
- חומרי קירור
- מדכאי הבהק
- מדכאי ריאקציות נחושת

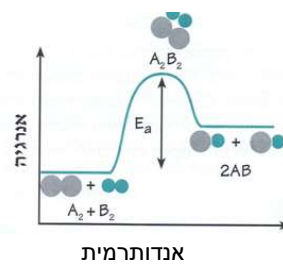
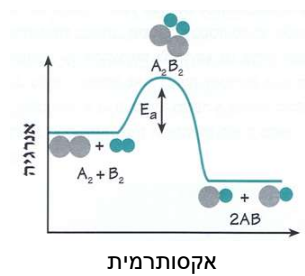


47

חומרי נפץ הודפים

מנגנון הבעירה של אבש"רים

- שלב הצתה – השקעת אנרגיה (שלב אנדותרמי)
- שלב בעירה – פליטת חום (שלב אקסותרמי)

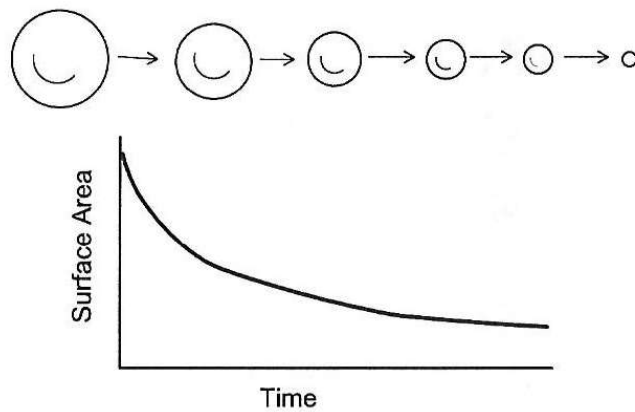


48

חומרי נפץ הודפים

קצב הבעירה של אבש"ר –

תופעת פני שטח של תגובת הבעירה המוגדרת כנסיגת החומר המוצק



49

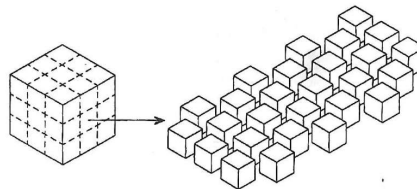
חומרי נפץ הודפים

השפעת שטח הפנים על קצב הבעירה

קצב שינוי מסת ההודף המוצק dm/dt תלוי בגורמים הבאים:

- שטח הפנים הרגעי $A(t)$
- צפיפות ההודף
- קצב הבעירה R

$$\frac{dm}{dt} = A_t * R * \rho$$



$$R = a * P^n$$

- R – קצב הבעירה
- P – לחץ גזים מעל אזור הבעירה
- a – מקדם בעירה
- n – מקדם בעירה

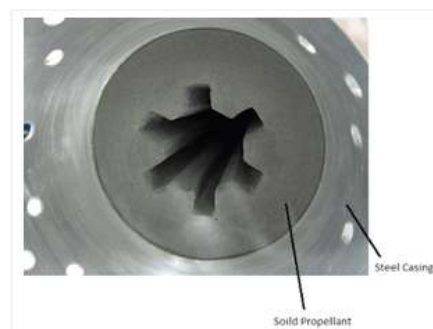
50

חומרי נפץ הודפים

הודפים למנועים רקטיים

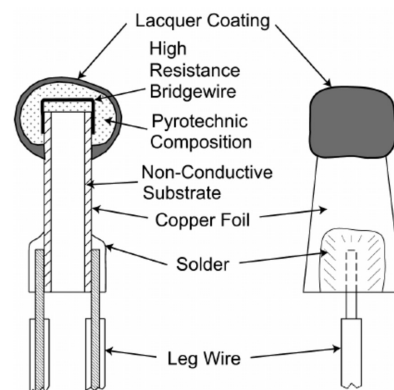


Ingredient	Function	Formula	% per mass
Ammonium Perchlorate	Oxidizer	NH_4ClO_4	68
Aluminum	Fuel	Al	20
HTPB	Fuel-Binder	$\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$	11.5
Isoforon diisocyanat 5.1	Curative	$\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_2$	0.5



חומרי נפץ הודפים

מדליקים פירוטכניים



	חומר בעירה שאינו חומר נפץ	חומר בעירה פירוטכני
1	הצתה בלהבה, ניצוץ, טמפרטורה גבוהה	הצתה בלהבה, ניצוץ, טמפרטורה גבוהה הלם מכאני
2	לא ניתן להצתה בתנאי רטיבות	לא ניתן להצתה בתנאי רטיבות
3	נדרש מקור אספקת חמצן חיצוני	מקור החמצן לבעירה מצוי בתוך החומר עצמו
4	בעירה עם להבה ללא רעש	רעש עמום ולחשה
5	בעירה עם תוצרי גזים יחסית מעטים	תוצרי גז רבים (משמש בהודפים להנעה רקטית)
6	מהירות בעירה נמוכה	קצב התגובה מתחת למהירות הקול בתוך החומר
7	התקדמות מבוססת על הולכת חום בקרינה	התקדמות מבוססת על הולכת חום בקרינה
8	קצב הבעירה עולה עם עליית הלחץ מעל אזור הבעירה	קצב הבעירה גובר עם עלייה בלחץ בסביבת הבעירה
9	אינה מושפעת מחוזק המעטפת	אינה מושפעת מחוזק המעטפת
10	אינה תלויה בגודל החומר הדליק	הבעירה אינה מושפעת מגודל החומר הפירוטכני
11	לעולם אינה עוברת תהליך מעבר לדפלגרציה או דטונציה	עשויה לעבור לתגובת דטונציה בתנאים מתאימים