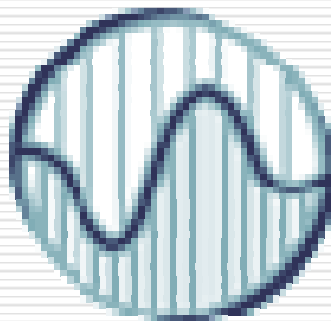




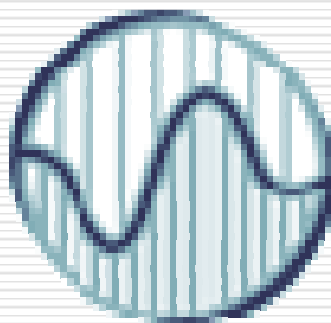
Висока школа електротехнике и
рачунарства струковних студија

МОТОРИ СУС

Процес сабијања

**Процеси формирања смеше и
сагоревања**

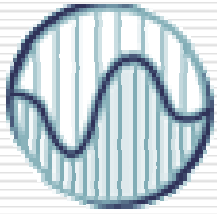
**Сагоревање код мотора са
спољним упаљењем смеше**



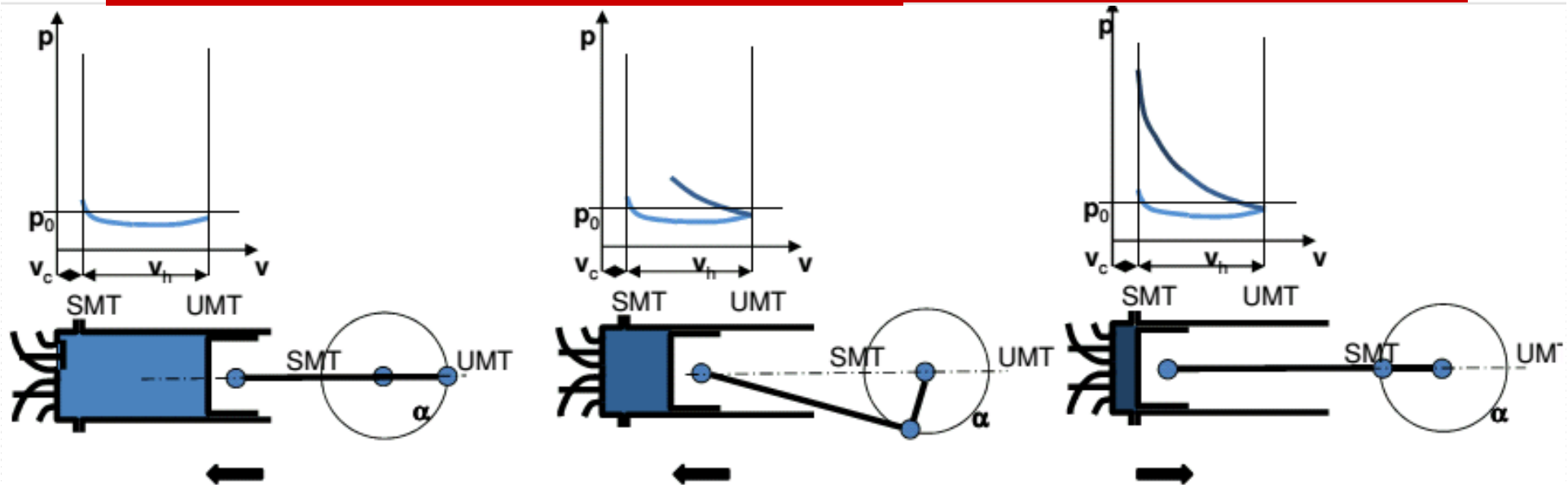
Висока школа електротехнике и
рачунарства струковних студија

МОТОРИ СУС

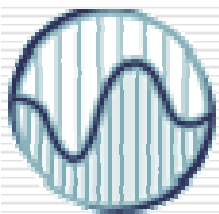
Процес сабијања



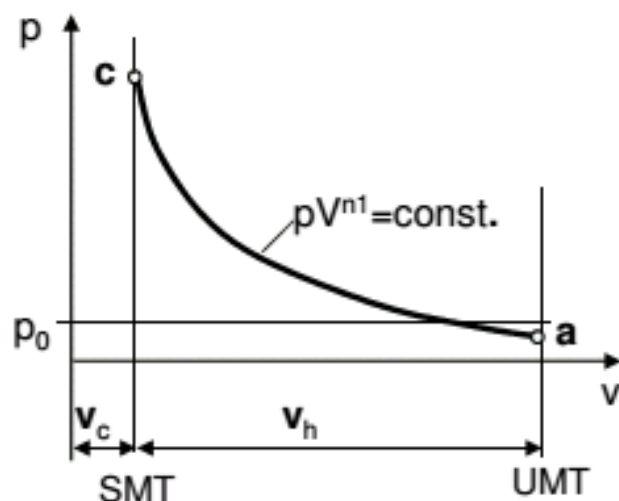
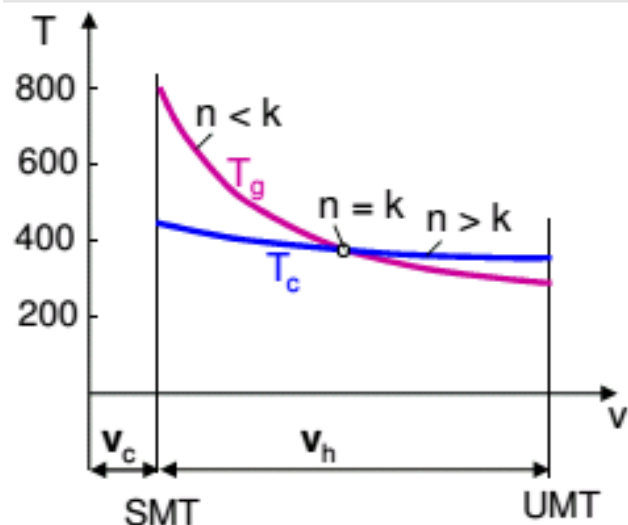
Основне карактеристике процеса сабијања



1. Стварни процес сабијања код мотора није изентропски ни адијабатски.
2. Постоји размена топлоте са зидовима радног простора,
3. Постоји размена масе у почетном делу процеса (док је уисни вентил још увек отворен после УМТ).
4. У завршном делу почиње процес сагоревања (ослобађање топлоте током претварања хемијске енергије горива у топлотну енергију).
5. Постоји губитак масе услед непотпуне заптивености радног простора (пропуштање гаса) који зависи од степена незаптивености радног режима



Основне карактеристике процеса сабијања



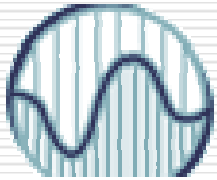
1. Основни утицај је размена топлоте са зидовима радног простора при чему топлотни флуks мења смер.
2. У почетном делу сабијања је температура гаса нижа о температуре зида ($T_g < T_c$) – смер преноса топлоте је са гаса на цилиндар.
3. Услед пораста температуре, смер преноса топлоте се мења ($T_g > T_c$) Укупни биланс топлоте током сабијања – доминантан је губитак топлоте.

НАПОМЕНА:

- Температура зида цилиндра (цилиндарска кошуљица) је променљива – временски (током циклуса) и локално (услед локалне промене услова преноса топлоте). У првом приближењу, температура цилиндра се може сматрати константном јер је промена занемарљива у односу на промену температуру гаса током циклуса.

1. Сабијање се може сматрати политропским процесом са променљивим експонентом политропе:
 $n = n(\alpha, \lambda, p_c, T_g, T_c, \alpha_w \dots)$
2. Када гас прима топлоту од зида $n > k$ а када одаје топлоту зиду $n < k$.
3. Прво приближење: уместо променљивог експонента политропе може се користити експонент политропе константне вредности ($n_1 = 1.32 - 1.38$)

$$p_c = p_a \left(\frac{V_a}{V_c} \right)^{n_1} = p_a \epsilon^{n_1}; \quad T_c = T_a \epsilon^{n_1-1}$$



Утицајни чиниоци, ограничења и специфичности

Утицајни чиниоци:

1. Пренос топлоте
 - Средњи експонент политропе сабијања n_1 зависи од ефеката преноса топлоте – што је одавање топлоте (и уопште енергетски губитак) већег интензитета то је n_1 мањи и обрнуто.
2. Термодинамичке особине радне материје
 - Експонент политропе n_1 је нижи за смешу горива и ваздуха (случај бензинских мотора, $n_1 = 1.32-1.34$), а већи код сабијања чистог ваздуха (случај дизел мотора, $n_1 = 1.36-1.38$).

Ограничења у вредностима степена сабијања:

3. Механичко оптерећење делова (покретни и непокретни делови мотора)
4. Термичко напрезање делова (клип, цилиндарска глава, цилиндарска кошуљица, вентили)

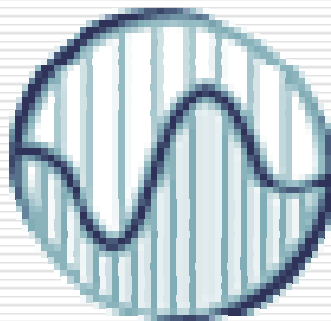
□ Специфични захтеви у погледу врсте горива и процеса сагоревања:

1. **Бензински мотори** (упаљење смеше помоћу варнице) – температура на крају сабијања мора бити нижа од температуре самопаљења горива (T_{sp}) због опасности од детонантног сагоревања.

$$T_c^{oto} = T_{sp}^{benz.} - (50 - 100); \quad T_{sp}^{benz.} = 800 - 850K$$

$$T_c^{diz.} = T_{sp}^{diz.} + (200 - 300); \quad T_{sp}^{diz.} = 700 - 750K$$

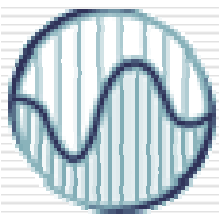
2. **Дизел мотор** (упаљење смеше помоћу високог притиска и температуре) – ради остварења самопаљења температура мора знатно да прелази температуру самопаљења дизел горива.



Висока школа електротехнике и
рачунарства струковних студија

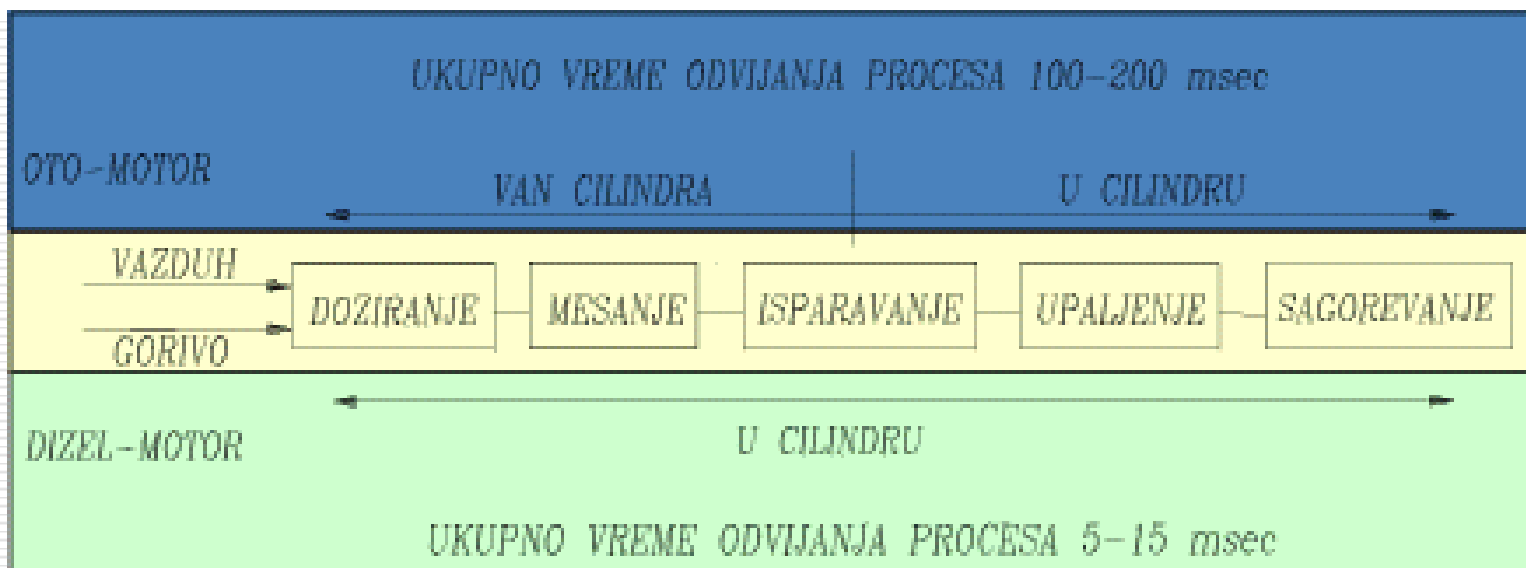
МОТОРИ СУС

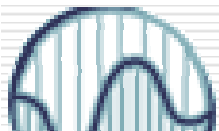
**Процеси формирања смеше и
сагоревања**



Утицајни чиниоци, ограничења и специфичности

- ❑ Ток процеса сагоревања битно зависи од начина формирања смеше горива и ваздуха.
 - ❑ Процес формирања смеше и сагоревања одређује принцип рада мотора
- НАПОМЕНА:**
- ❑ Осим бензинског и дизел мотора као два карактеристична и најчешћа случаја (принципа рада), постоје и бројни други случајеви у којима се карактеристике ова два принципа рада преплићу и комбинују.
 - ❑ **Пример 1:** бензински мотори са директним убризгавањем горива у цилиндар
 - ❑ **Пример 2:** HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) – мотори са самопаљењем хомогене смеше





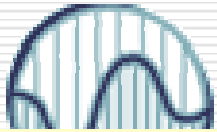
Начелан приступ проблему формирања смеше

БЕНЗИНСКИ МОТОРИ

1. **Место формирања смеше:** формирање смеше започиње ван цилиндра, у уписном каналу
2. **Фаза циклуса:** формирање смеше почиње пре сагоревања током процеса уписавања
3. **Резултат:** хомогенизована смеша ваздуха и горива (горивих пара)
4. **Начин упаљења:** страни извор (варница)
5. **Захтеви:** избећи услове самопаљења (степен сабијања, температура, притисак, локално термичко оптерећење делова)
6. **Карактеристике процеса сагоревања (ослобађања топлоте):** брзо и контролисано сагоревања простирањем пламена кроз комору коначном брзином, не сме се дозволити тренутно сагоревање (начелно могуће)

ДИЗЕЛ МОТОРИ

1. **Место формирања смеше:** формирање смеше започиње у цилиндру,
2. **Фаза циклуса:** формирање смеше почиње непосредно пред почетак сагоревања
3. **Резултат:** хетерогена смеша (хомогенизована смеша бисагорела тренутно по запремини коморе)
4. **Начин упаљења:** спонтано упаљење (самопаљење) страни извор (варница)
5. **Захтеви:** обезбедити услове самопаљења (степен сабијања, температура, притисак)
6. **Карактеристике процеса сагоревања (ослобађања топлоте):** динамика сагоревања одређена је динамиком процеса формирања смеше – убризгавањем, атомизацијом, мешањем и испаравањем (дифузно сагоревање)



Радна материја

Састав радне материје:

БЕНЗИНСКИ МОТОРИ

Током усусавања:

1. Ваздух и гориво,
2. Ваздух, гориво и продукти сагоревања уведени у уисни систем преко уређаја за контролу рецикулације издувних гасова (ЕГР*) или преструјавањем из цилиндра/цилиндара

Током сабијања:

1. Ваздух, гориво и продукти сагоревања (ЕГР, преструјавање, заостали продукти)
- ☐ **Проблем:** утицај регулационог органа (лептир) на пригушење и коефицијент заосталих продуката сагоревања

ДИЗЕЛ МОТОРИ

Током усусавања:

1. Ваздух
2. Ваздух и продукти сагоревања уведени у уисни систем преко уређаја за контролу рецикулације издувних гасова или преструјавањем из цилиндра/цилиндара

Током сабијања:

1. Ваздух и продукти сагоревања (ЕГР* преструјавање, заостали продукти)
- ☐ **Проблем:** емисија NOx
 - ☐ Рецикулација продуката сагоревања се користи за смањење енергетског нивоа радне материје и индиректно смањење емисије NOx

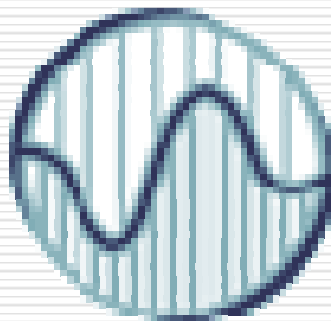
ЗАХТЕВИ:

- ☐ Обезбедити велику брзину сагорвања (ослобађања топлоте) – резултат анализе идеалних термодинамичких циклуса

Пример конвенционалног бензинског мотора:

- ☐ Трајање сагоревања: сса. 50°KV
- ☐ Број обртаја: 3000 min⁻¹

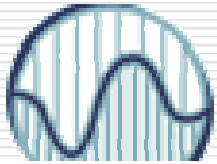
$$t_s = \frac{\alpha_s}{6 \cdot n} = \frac{50}{6 \cdot 3000} = 0.00277 [s]$$



Висока школа електротехнике и
рачунарства струковних студија

МОТОРИ СУС

**Сагоревање код мотора са
спољним упаљењем смеше**



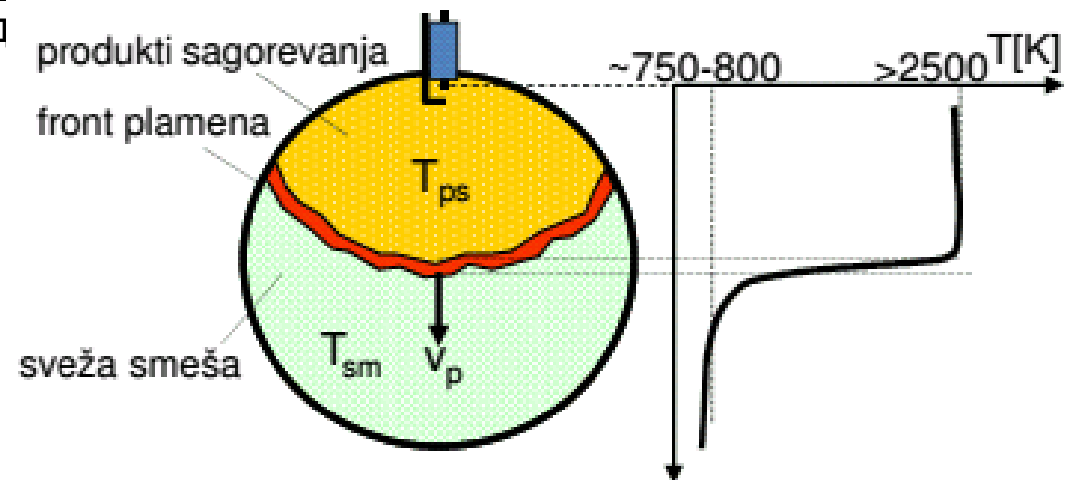
Језгро и фронт пламена

Формирање језгра пламена

1. Прескакање електричне варнице на електродама свећице
2. Температура ел. Лука је **4-6000 К**
3. Услов – постојање упаливе смеси у непосредној околини електрод свећице
4. Почетна фаза – мала брзина процеса

Формирање фронта пламена

1. Убрзање процеса услед иницијалног повећања температуре и притиска
2. Простирање фронта пламена коначном брзином v_p .
3. Фронт пламена – уска зона хемијске реакције оксидације (сагоревања) свежје смеси која је праћена ослобађањем одговарајуће количине топлоте
4. Облик фронта пламена: сферичан (начелно, у теоријским разматрањима), реално знатно одступа од ове претпоставке (утицај броја, облика и положаја усисних канала, облика коморе и клипа, положај свећице).





Анализа тока сагоревања у ото мотору

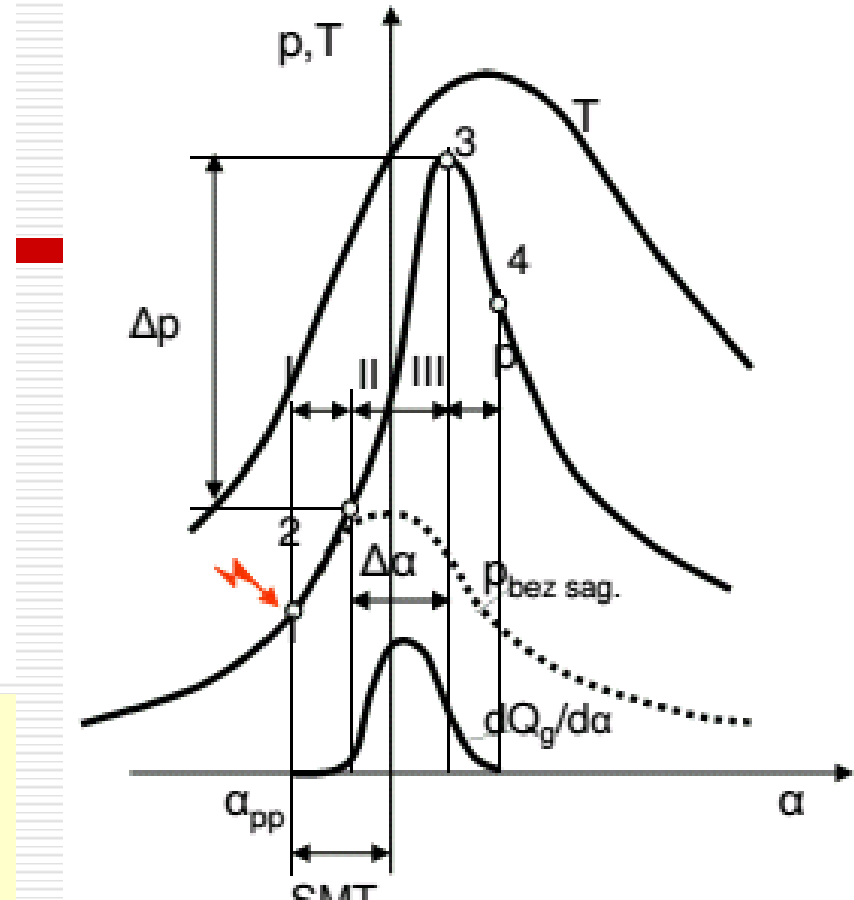
- ❑ Процес сагоревања започиње прескакањем варнице у тачки 1 (угао α_{pp} пре CMT)
- ❑ Разлог за позиционирање угла прескакања варнице пре доласка клипа у CMT:
 - ❑ главни део сагоревања треба обавити у непосредној околини CMT (најповољнији услови, термодинамичка анализа)

Фазе процеса сагоревања:

- ❑ **I фаза** – период притајеног сагоревања
- ❑ **II фаза** – период главног сагоревања
- ❑ **III фаза** – период догоревања

I ФАЗА – ПЕРИОД ПРИТАЈЕНОГ САГОРЕВАЊА

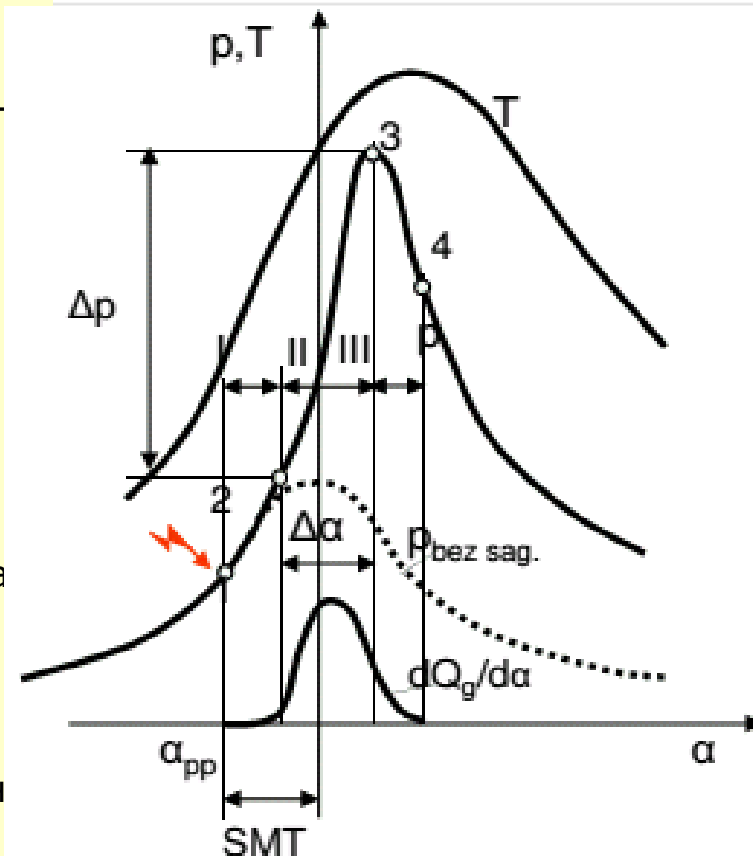
- ❑ период формирања стабилног језгра пламена у околини свећице.
- ❑ сагоревање је релативно споро (ослобођена топлота се троши на загревање околне смеше и дисипацију ка хладним зидовима)
- ❑ пораст унутрашње енергије гаса мали
- ❑ нема видног пораста притиска у односу на линију без сагоревања.
- ❑ период притајеног сагоревања (ППС).



- ❑ **p** – притисак у цилиндру
- ❑ **T** – средња температура у цилиндру
- ❑ **$dQ_g/d\alpha$** – брзина ослобађања топлоте (количина топлоте ослобођена сагоревањем по °KB)
- ❑ **α_{pp} угао претпаљења** (термин “претпаљење” јер је паљење скоро увек пре CMT)

Анализа тока сагоревања у ото мотору

- ❑ ПС траје до видљивог одвајања линије притиска са сагоревањем у односу на линију без сагоревања (тачка 2). У току овог периода сагори приближно 2 - 5% смеше, али је из наведених разлога његово временско и угаоно трајање знатно.
- ❑ Проблеми: гашење (хладни околни зидови, сиромашна смеша, недовољна енергија варнице, појава је позната као "мисфуре" – изостанак упаљења).
- ❑ Утицајни чиниоци на његову дужину су следећи:
 1. Састав смеше – За упаљење богатије и нарочито сиромашније смеше потребна је већа енергија варнице. Најлакше упаљење и најкраћи ППС је са благо богатом смешом ($\lambda \sim 0.9$).
 2. Коефицијент заосталих гасова γ_r , односно количина инертних гасова заосталих из претходног циклуса. Пораст γ_r , који је карактеристичан за мало оптерећење мотора (притворен лептир), значајно продужава ППС. То је последица отежаног контакта честица горива и кисеоника, смањења топлотне моћ такве радне смеше и непотребног трошења развијен топлоте на загревање инертних гасова.
 3. Интензивно струјање у околини свећице је непожељно јер повећава одавање топлоте зидовима и тиме продужава ППС.
 4. Повећана температура смеше у тренутку паљења (која расте са порастом степ. сабијања e , смањењем интензитета хлађења, предгревањем смеше, смањењем апп) поспешује упаљење и скраћује ППС.
 5. Повећање енергије варнице и повољна конструкција врха свећице поспешују упаљење и скраћују ППС.
 6. Врста горива утиче на потрону минималну енергију за упаљење (мада је она за комерцијална угљоводонична горива приближно иста)



- ❑ p – притисак у цилиндру
- ❑ T – средња температура у цилиндру
- ❑ $dQ_g/d\alpha$ – брзина ослобађања топлоте (количина топлоте ослобођена сагоревањем по $^\circ\text{KB}$)
- ❑ α_{pp} **угао претпаљења** (термин "претпаљење" јер је паљење скоро увек пре СМТ)

Анализа тока сагоревања у ото мотору

II ФАЗА–ПЕРИОД ГЛАВНОГ САГОРЕВАЊА или ПЕРИОД ПРОСТИРАЊА ПЛАМЕНА

Фронт пламена се простира кроз комору сагоревања захватајући нове количине свеже смеше

У овој фази сагори највећи део смеше (90-95 %)

Средњи градијент пораста притиска у II фази $\Delta p / \Delta \alpha$ је при нормалном сагоревању око 2.5 – 3. bar/°KB.

Проблем: непотпуно сагоревање у периферним деловима коморе услед дисипације топлоте (до око 5%).

III фаза је ПЕРИОД ДОГОРЕВАЊА

непожељна је јер је ослобађање топлоте у току ширења неефикасно.

Трајање II и III фазе:

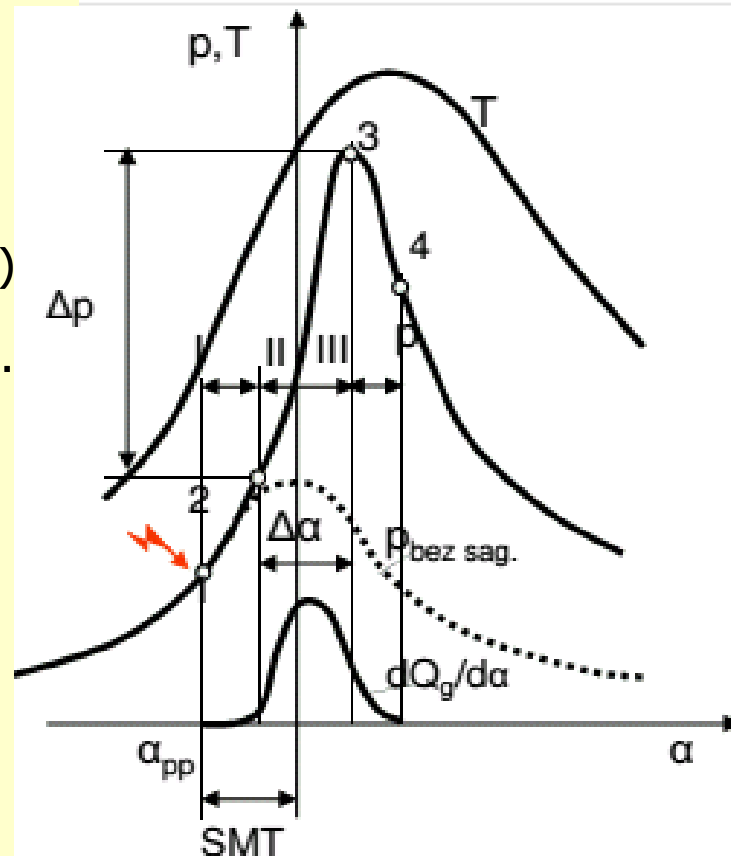
II фаза главног сагоревања траје до постизања мах. притиска циклуса (тачка 3).

III фаза догоревања приближно до достизања мах. средње температуре гасова (тачка 4)..

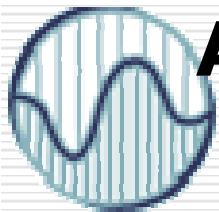
УТИЦАЈНИ ЧИНИОЦИ НА ПЕРИОД ГЛАВНОГ САГОРЕВАЊА

1. Састав смеше – л не само да утиче на регуларност упаљења већ битно утиче на брзину простирања пламена. Највећа брзина простирања пламена је кроз благо богату смешу са $\lambda \sim 0.9$.

Међутим, и са повољним саставом смеше, брзина пламена је у мирној средини врло мала и недовољна за благовремено сагоревање.

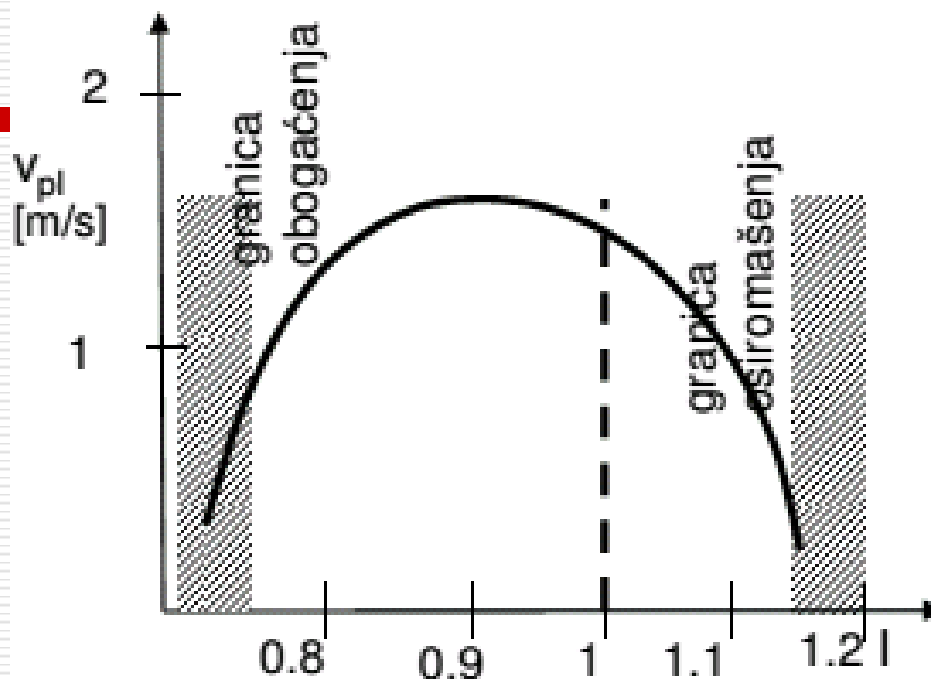


- p – притисак у цилиндру
- T – средња температура у цилиндру
- $dQ_g/d\alpha$ – брзина ослобађања топлоте (количина топлоте ослобођена сагоревањем по °KB)
- α_{pp} угао претпаљења (термин "претпаљење" јер је паљење скоро увек пре CMT)



Анализа тока сагоревања у ото мотору

Утицајни чиниоци на период главног сагоревања



1. Састав смеше

- ☐ утиче на регуларност упаљења
- ☐ утиче на брзину простирања пламена. Највећа брзина простирања пламена је кроз благо богату смешу са $\lambda \sim 0.9$.
- ☐ Проблем 1: са повољним саставом смеше, брзина пламена је у мирној средини врло мала и недовољна за благовремено сагоревање.
- ☐ Проблем 2: мала брзина пламена у области богате смеше (доња граница упаљења, неекономичан рад)
- ☐ Проблем 3: мала брзина пламена у области сиромашне смеше (потенцијално интересантна област због повољног састава смеше са аспекта емисије токсичних компонената и термодинамичке анализе)

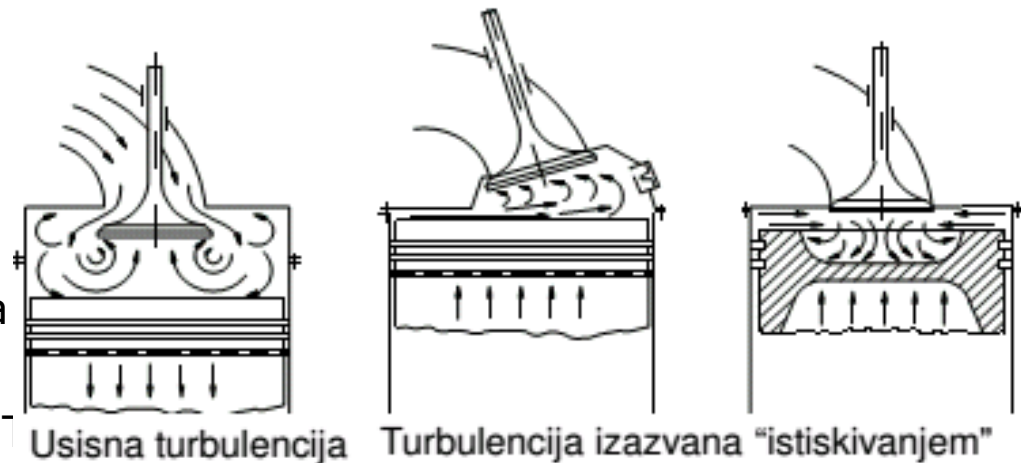
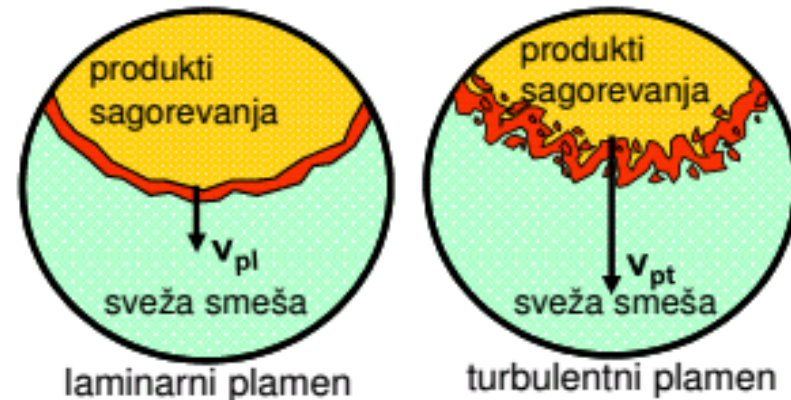
Анализа тока сагоревања у ото мотору

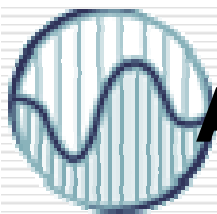
2. Турбуленција у комори сагорев.

- Брзина простирања v_{pt} је далеко већа (за ред величине).
- У условима турбулентног струјања смеше фронт пламена се цепа и разуђује тако да је његова површина захватања свеже смеше далеко већа а такође и пренос топлоте у зону несагореле смеше далеко интензивнији.

Начини формирања турбулентног струјног поља у комори:

- 1. Струјањем преко усисног вентила (тзв. усисна турбуленција)
 - Висок почетни интензитет струјања, постепено слаби током процеса сабијања
 - Зависи од брзинског режима (броја обртаја мотора) која је интензивна али делимично слаби у току сабијања.
- 2. Истискивањем (**Squish**)
 - Настаје пред крај процеса сабијања када се из уске зоне (2-3 mm) између равног дела главе и чела клипа при приближавању клипа СМ смеша истискује према комори при чему се стварају вртлози.
 - Интензитет расте са повећањем зоне истискивања и бројем обртаја



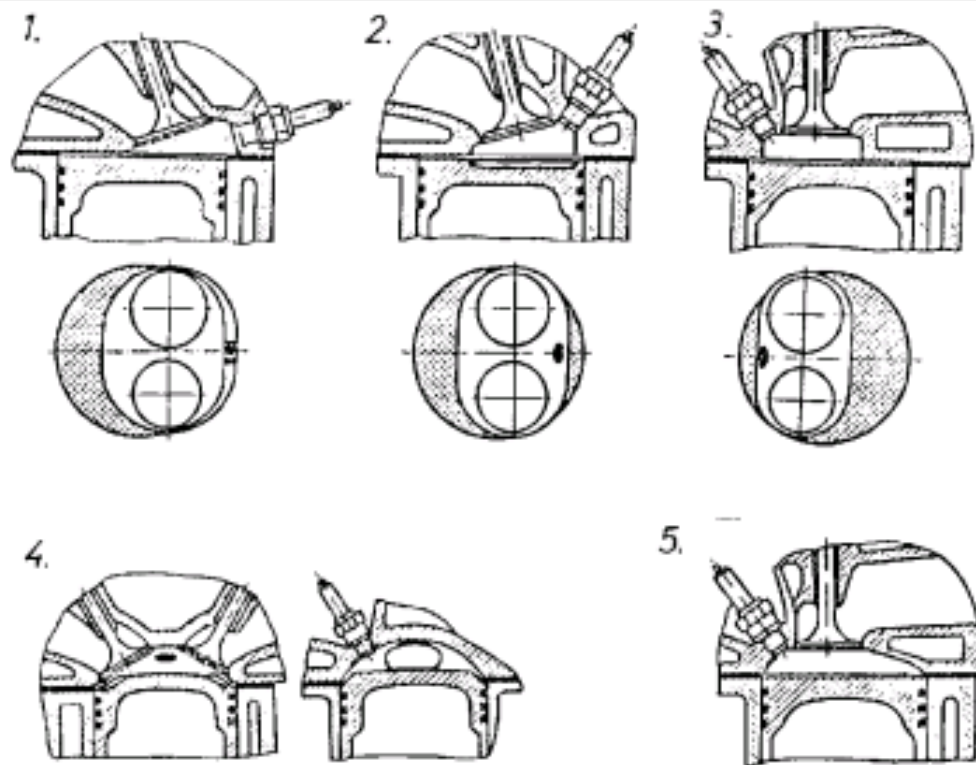


Анализа тока сагоревања у ото мотору

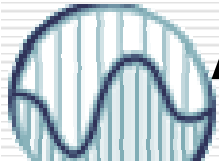
3. Конструкција коморе сагорев.

□ добра комора сагоревања треба да задовољи следеће опште принципе/захтеве:

- а) Да је компактна и концентрисана око свећице. Тиме се смањују топлотни губици и омогућава развој фронта пламена веће површине као и скраћење пута фронта пламена до најудаљенијих делова коморе.
- б) Да својим обликом омогући стварање интензивне турбуленције ефектом истискивања.
- в) Да обликом и положајем омогући смештај релативно великих вентила и повољан приступ усисног канала (без већег ломљења струје) како би се остварио добар коефицијент пуњења



- 1. Клиналаста
- 2. Полуклиналаста
- 3. Равна
- 4. Полусферна
- 5. Отворена



Анализа тока сагоревања у ОТО мотору

4. Положај свећице

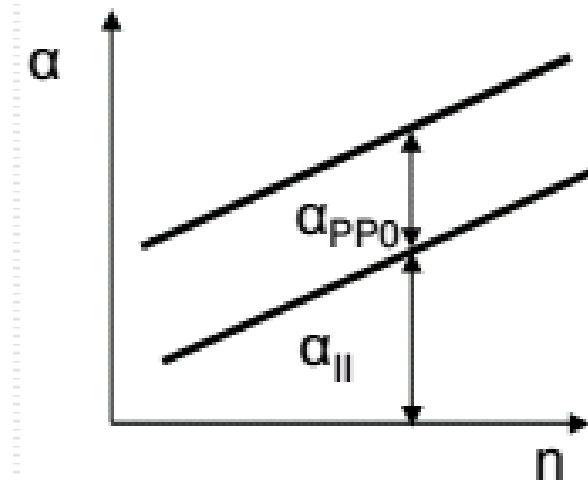
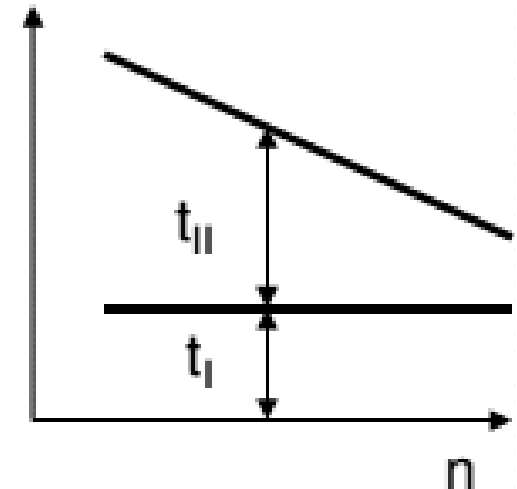
- Да би пут фронта пламена до најудаљенијих делова коморе био што краћи свећица треба да је лоцирана што ближе центру коморе. Понекад се, посебно код већих цилиндарских запремина, користе две свећице.

5. Температура несагореле смеше

- зависи од степена сабијања, температуре околине, предгревања смеше, интензитета хлађења, материјала клипа и главе.
- Већа температура омогућава брже загревање несагореле смеше и простирање пламена.
- Доминантан утицај на I фазу,
- Турбулентно струјно поље доминантно утиче на II фазу

6. Број обртаја мотора

- Директно утиче на интензитет турбулентног струјања у комори и тиме на брзину простирања пламена.
- скраћује се временско трајање II фазе процеса сагоревања t_{II}
- II – трајање I фазе t_I не мења.
- Већа температура омогућава брже загревање несагореле смеше и простирање пламена.
- Доминантан утицај на I фазу,
- Турбулентно струјно поље доминантно утиче на II фазу



$$\alpha = 6 \cdot n \cdot t$$



Анализа детонантног сагоревања

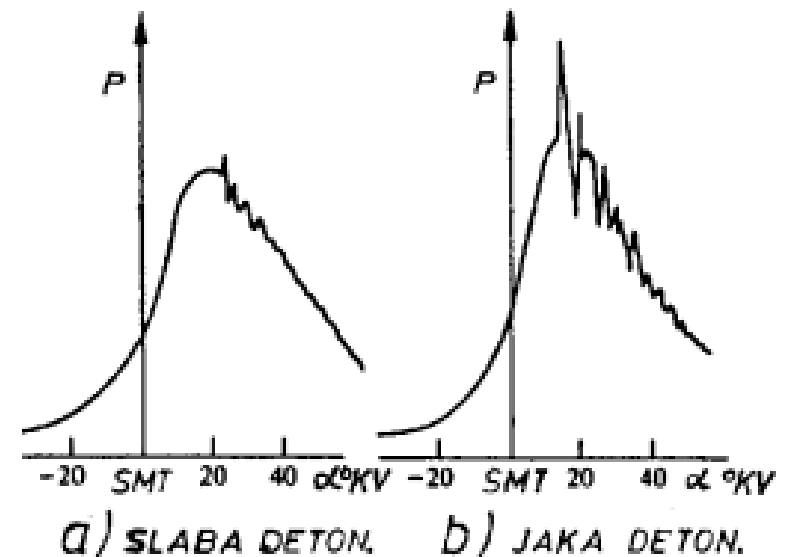
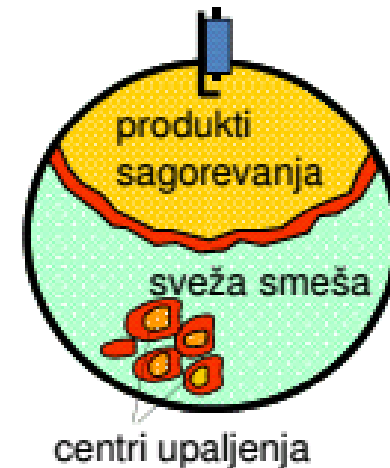
- ❑ **Нормално сагоревање** – динамику ослобађања топлоте диктира простирање пламена кроз несагорелу смешу.
- ❑ **Детонација** је вид нерегуларног сагоревања који се у одређеним условима може јавити у комори мотора са хомогеном смешом и упаљењем помоћу варнице.

Феномен:

- ❑ Јавља се када један део несагореле смеше испред фронта пламена запремински тренутно сагорева.

Карактеристике:

- ❑ Нагло ослобађање велике количине топлоте
- ❑ Нагли пораст притиска
- ❑ Нагли пораст температуре
- ❑ Услови за настанак детонације: локално достизање услова за настанак самопаљења смеше горива
- ❑ До загревања смеше испред фронта пламена долази из следећих разлога:
 1. Сабијања услед кретања клипа према СМТ.
 2. Сабијања под дејством фронта пламена, тј. ширењазоне продуката сагоревања, која има знатно вишу температуру, на рачун зоне несагореле смеше.
 3. Преноса топлоте из зоне реакције (фронта пламена) на смешу испред фронта пламена.
 4. Локалног загревања услед јако врелих места у комори





Анализа детонантног сагоревања

- При нормалном сагоревању простирањем фронта пламена пораст притиска је умерен (2.5-3.5 бар/°KV) и равномеран у целом радном простору. При детонацији је пораст притиска локално висок и немогуће је обезбедити хомогено поље притиска. Јављају се таласи притиска који се простиру кроз радни простор, одбијају о зидове и суперпонирају, што се манифестује високофреквентним осциловањем притиска.

- Проблеми:**

1. Појава ударних оптерећења и пораст сила у клипном механизму
2. Разарање уљног (мазајућег) филма на додирним површинама и међусобног удара металних површина (карактеристични метални звук).

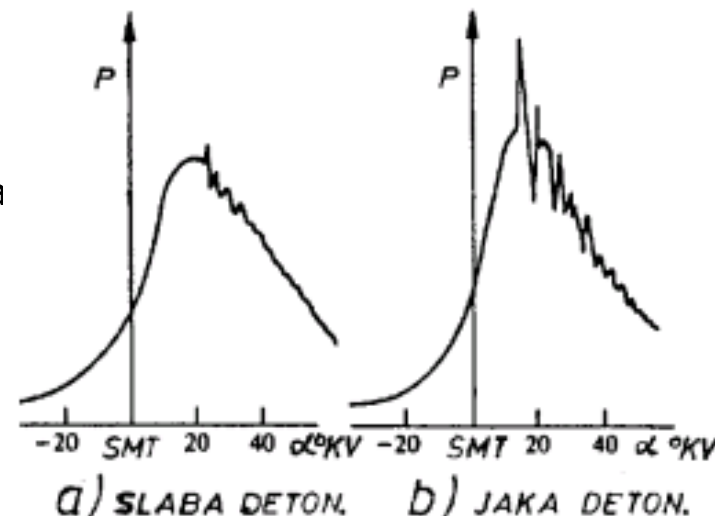
- Спољње манифестације детонантног сагоревања:**

1. Матални звук
2. Вискофреквентне осцилације притиска у цилиндру се могу регистровати индицирањем
3. Појава високофреквентних вибрација блока мотора које се такође могу регистровати давачем вибрација (акцелерометри).
4. При јаче израженој детонацији долази и до тенденције прегревања мотора као и пада снаге и економичности мотора.

- Ефекти детонације:**

1. Детонација ниског интензитета – слабо изражени ефекти
2. Детонација високог интензитета – доводи до тешких оштећења и разарања неких делова мотора.

- Детонација ниског интензитета, уколико се не отклони узрок, има тенденцију појачања.





Анализа детонантног сагоревања

- Утицајни фактори на појаву детонације се могу сврстати у три групе:

1. Фактор горива

- Отпорност горива према детонацији, која се изражава октанским бројем (ОБ).
- Гориво са већим октанским бројем има дужи индукциони период претпламених реакција,
- време од постизања температуре самопаљења до бурног сагоревања је дуже.
- Утицај структуре молекула горива и односа појединих група угљоводоника.

2. Конструктивни фактори се односе на конструкцију мотора

2.1 Степен сабијања

2.2 Конструкција коморе сагоревања.

- а) Компактност коморе
- б) Положај свећице
- ц) Комора интензивне турбуленције
- д) Прегрејана места

2.3 Материјал клипа и главе.

2.4 Врста хлађења мотора.

3. Радни и регулациони фактори

3.1 Угао претпаљења.

3.2 Састав смеше.

Најсклонија детонацији је благо богата смеша $\lambda \sim 0.9$ која има најкраћи индукциони период претпламених реакција.

3.3 Режим рада мотора

- Најопаснији је режим пуног оптерећења а смањеног броја обртаја (када је нормално сагоревање успорено због смањене турбуленције).

