



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONSTRUKCE KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

CRANKSHAFTS DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stanislav Tetour

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Šopík

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Stanislav Tetour
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Šopík
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce klikových hřídelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvořit přehled konstrukce klikových hřídelí, výrobních postupů a používaných materiálů. Popsat metody vyvažování soudobých klikových hřídelí.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Konstrukce klikových hřídelí řadových a víceválcových automobilových motorů
- 2) Výroba klikových hřídelí, materiály a povrchová úprava
- 3) Příčiny nevyváženosti a jejich vyvažování
- 4) Závěr

Seznam literatury:

HEISLER, H. Advanced Engine Technology. SAE International, First edition, 1995. ISBN 1-5609-734-2.

KOVAŘÍK, L., FERENCEY, V., SKALSKÝ, R., ČÁSTEK, L. Konstrukce vozidlových spalovacích motorů. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1992. ISBN 80-206-0131-7.

Kolektiv VÚNM a ČKD. Naftové motory čtyřdobé, 1 díl. Druhé vydání. Praha: STNL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962. L123-B3-IV-41/2490.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním provedením klikových hřídelí u spalovacích motorů a porovnáním jednotlivých konfigurací automobilových motorů. Dále se věnuje technologii výroby a povrchovým úpravám klikových hřídelí s přehledem materiálů pro dané účely. Práce popisuje příčiny nevyváženosti motoru a jejich možné vyvažování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kliková hřídel, vyvážení, spalovací motor, klikový mechanismus

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with construction design of crankshafts for combustion engines and comparison of individual configurations of automobile engines. The thesis also discusses technology of manufacturing and surface finishing of crankshafts with list of material for given purposes. The thesis describes reasons for imbalance of engine and possibilities of their balancing.

KEYWORDS

Crankshaft, balancing, combustion engines, crank mechanism



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TETOUR, S. *Konstrukce klikových hřidelí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Šopík.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Šopíka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Stanislav Tetour



PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli Ing. Lukáši Šopíkovi za odborné vedení, vstřícný přístup a cenné rady při vypracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.



OBSAH

Úvod	10
1 Konstrukce klikových hřídelí automobilových motorů	11
1.1 Hlavní součásti klikového mechanismu	12
1.1.1 Píst	12
1.1.2 Ojnice	14
1.1.3 Kliková hřídel	14
1.1.4 Setrvačnick	15
1.1.5 Torzní tlumič	16
1.2 Řadové motory	16
1.2.1 Řadový dvouválec	16
1.2.2 Řadový tříválec	17
1.2.3 Řadový čtyřválec	18
1.2.4 Řadový pětiválec	19
1.2.5 Řadový šestiválec	20
1.3 Vidlicové motory	20
1.3.1 Vidlicový šestiválec	21
1.3.2 Vidlicový osmiválec	21
1.3.3 Vidlicový desetiválec	22
1.3.4 Vidlicový dvanáctiválec	22
1.3.5 Motor VR6	23
1.4 W motory	24
1.4.1 W8	24
1.4.2 W12, W16	25
1.5 Motory Boxer	26
1.5.1 Čtyřválcový boxer	26
1.5.2 Šestiválcový boxer	26
2 Výroba a materiály klikových hřídelí	27
2.1 Výroba klikových hřídelí	27
2.1.1 Odlévané klikové hřídele	27
2.1.2 Kované klikové hřídele	28
2.1.3 Skládané klikové hřídele	28
2.1.4 Celobráběné klikové hřídele	29
2.2 Materiály klikových hřídelí	30
2.2.1 Materiály odlévaných klikových hřídelí	30
2.2.2 Materiály kovaných klikových hřídelí	31



2.2.3	Materiály skládaných hřídelí	33
2.2.4	Materiály celoobráběných hřídelí	33
2.3	Povrchová úprava	33
2.3.1	Indukční kalení čepů.....	34
2.3.2	Kalení plamenem.....	34
2.3.3	Nitridování.....	34
2.3.4	Elektrolytické chromování	35
3	Příčiny nevyváženosti a jejich vyvažování.....	36
3.1	Setrvačné síly a momenty	36
3.2	Vyvažování setrvačných sil a momentů	37
3.2.1	Vyvažování setrvačných sil rotujících součástí.....	37
3.2.2	Vyvažování setrvačných sil posuvných součástí.....	38
3.2.3	Vyvažování momentů setrvačných sil rotujících součástí.....	41
3.2.4	Vyvažování momentů setrvačných sil posuvných součástí I. a II. řádu.....	42
3.3	Vyvažovací součásti a stroje.....	43
3.3.1	Protizávaží klikových hřídelí.....	43
3.3.2	Vyvažovací hřídele	44
3.3.3	Statické vyvažování	45
3.3.4	Dynamické vyvažování	45
	Závěr.....	46
	Seznam použitých zkratk a symbolů	50



ÚVOD

Kliková hřídel je nedílnou součástí každého pístového stroje. V automobilovém a dopravním průmyslu mají pístové spalovací motory většinové zastoupení. Konstrukce klikových hřídelí závisí na odlišných požadavcích, jako je hmotnost, cena a povrchová úprava.

Cílem práce je vytvoření přehledu konstrukce klikových hřídelí, výrobních postupů a používaných materiálů, popsat příčiny nevyváženosti a jejich vyvažování.

Úvod se zabývá základním rozdělením pístových spalovacích motorů a jejich klikovým mechanismem, který je hlavní částí motoru pro přeměnu tepelné energie na mechanickou. Dále jsou podrobněji popsány víceválcové automobilové motory, převážně z hlediska konstrukčního provedení klikových hřídelí a nevyváženosti chodu motoru.

Druhá část práce vytváří přehled dostupných postupů při výrobě klikových hřídelí, jejich využití v automobilovém průmyslu jak z ekonomického, tak i z praktického hlediska. Seznam materiálů pro jednotlivé postupy výroby a jejich mechanické vlastnosti. Dále souhrn technologie pro úpravu povrchu klikových hřídelí hlavně klikových čepů, které jsou provozně nejvíce namáhány.

Konec práce se věnuje působení setrvačných sil a momentů setrvačných sil na klikový mechanismus. Pro jejich vyvažování je vytvořen souhrn postupů částečných a úplných vyvážení. Na závěr je uveden popis vyvažování v praxi pomocí vývažků a strojních vyvažovaček.



1 KONSTRUKCE KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ AUTOMOBILOVÝCH MOTORŮ

Kliková hřídel spolu s ojnicí převádí přímočarý vratný pohyb na rotační. Klikový mechanismus využíváme u spalovacích motorů, kde se přeměňuje tepelná energie ze spalování paliva na mechanickou práci. Spalovací motor slouží například k pohonu osobních a nákladních automobilů, motocyklů, stavebních strojů, letadel, lodí atd.

Základní rozdělení spalovacích motorů [1]:

podle způsobu přeměny tepelné energie v mechanickou:

- pístové
- turbínové
- proudové

podle způsobu přívodu tepelné energie:

- motory s vnějším spalováním
- motory s vnitřním spalováním.

Rozdělení pístových spalovacích motorů [1]:

podle skupenství použitého paliva:

- plynové motory
- motory na kapalná paliva
- vícepalivové motory

podle způsobu plnění válce:

- s přirozeným sáním
- s vyplachováním
- přeplňované

podle způsobu zapálení směsi:

- zážehové
- vznětové

podle způsobu chlazení:

- kapalinou
- vzduchem

podle pohybu pístu:

- přímočarý vratný pohyb
 - dvoudobé
 - čtyřdobé
- rotační (Wankelův motor)



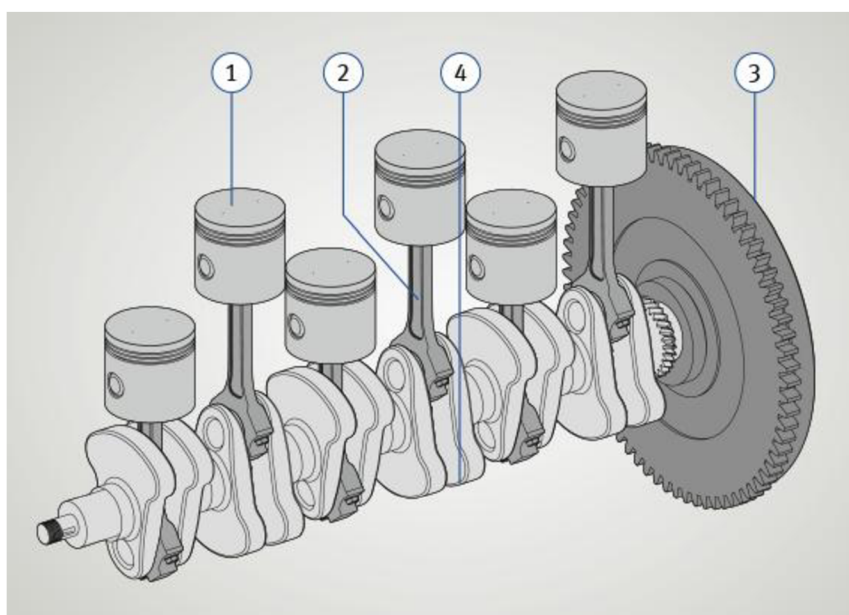
podle uspořádání válců:

- jednořadé (R)
- dvouřadé
 - vidlicové (válcové do V)
 - s protilehlými válci (Boxer motory)
 - s válci do U
- víceřadé
 - s válci do W
 - s válci do H
 - hvězdicové.

Dále se práce zabývá čtyřdobými spalovacími motory v automobilovém průmyslu. Nejčastěji se setkáme s motory řadovými, vidlicovými, s protilehlými válci a s válci do W. S hvězdicovým motorem se setkáme v leteckém průmyslu.

1.1 HLAVNÍ SOUČÁSTI KLIKOVÉHO MECHANISMU

Klikový mechanismus slouží ke změně přímočarého pohybu na rotační a naopak. Mezi hlavní části patří píst, ojnice a kliková hřídel. Na klikové hřídele se umisťují setrvačník a torzní tlumič ke zlepšení chodu mechanismu.



Obr 1. Hlavní součásti klikového mechanismu: 1 – píst, 2 – ojnice, 3 – setrvačník, 4 – kliková hřídel [2]

1.1.1 PÍST

Píst ve spalovacím motoru přenáší síly na ojnici, které vznikají tlakem ze spalování paliva ve spalovacím prostoru válce. Dále má za úkol utěsnit prostor válce a umožnit jednotlivé fáze pracovního oběhu. Píst patří k nejvíce namáhaným součástem motoru. Je zatížen jak tepelně, tak i mechanicky. Pracuje při velkých rychlostech a ne vždy při dostatečném mazání. [3]



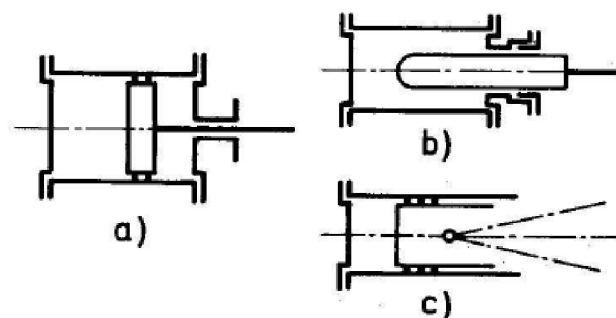
Důsledkem působení sil musí být píst dostatečně pevný a přitom lehký, aby nezatěžoval klikový mechanismus a umožnil vysoké otáčky. Při utěšňování prostoru válce nesmí být píst zdrojem pasivních odporů, jinak by zhoršoval mechanickou účinnost, výkon a spotřebu motoru. [3]

Základní požadavky kladené na píst:

- dostatečná pevnost, tvrdost
- dobrá tepelná vodivost
- nízká hmotnost
- dobré kluzné vlastnosti
- malá tepelná roztažnost.

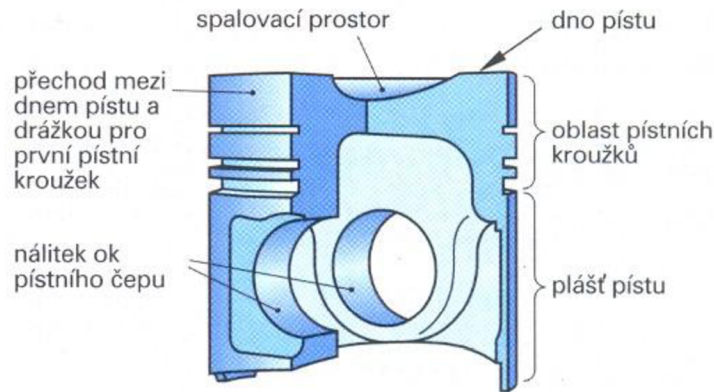
Podle tvaru pístu rozdělujeme písty do tří základních skupin dle obr. 2 [4]:

- kotoučové písty
- plunžrové písty
- trubkové písty.



Obr. 2 Kotoučový píst (a), plunžrový píst (b) a trubkový píst (c) [4]

Trubkové písty se používají u spalovacích motorů. Píst se skládá z hlavy a pláště. Hlava pístu je tvořena dnem a kroužkovou částí (obr. 3). Kroužková část slouží k uložení těsnících pístních kroužků, které utěšňují pracovní prostor válce, a pístního stírajícího kroužku. Na dno pístu působí síly působící ve spalovacím prostoru. Plášť slouží k vedení pístu ve válci, dále zachycuje boční síly a také přenáší síly ze dna pístu do oka pístního čepu. Pro vyšší tuhost pístu bývá jeho plášť vyztužen žebry. [4]

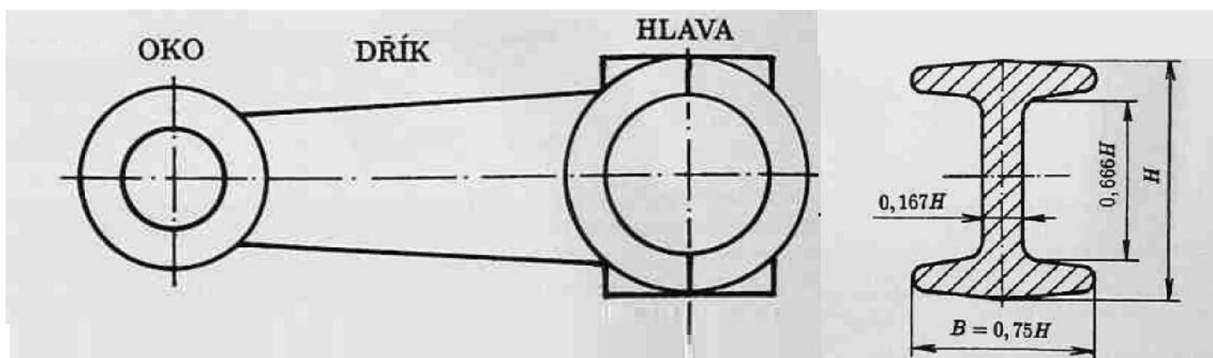


Obr. 3 Popis částí pístu [5]

1.1.2 OJNICE

Ojnice spojuje píst a klikovou hřídel. Pomocí pohybu ojnice se převádí přímočarý vratný pohyb na rotační. Ojnice musí být dostatečně pevná při zachování malé hmotnosti.

Ojnice se skládá z oka ojnice, které spojuje ojnici s pístem pomocí pístního čepu. Dále z hlavy ojnice, která spojuje klikový čep u klikové hřídele s ojnici. Ojniční hlavy bývají dělené nebo nedělené. Nedělené ojnice se dají použít u skládaných klikových hřídelí. Oko a hlava ojnice je spojená dříkem ve tvaru písmene I nebo H (obr. 4). [6]



Obr. 4 Schéma ojnice a její průřez [6]

1.1.3 KLIKOVÁ HŘÍDEL

Síly od tlaků plynů přenášené přes ojnici se rozkládají v ojničním čepu klikové hřídele a vytváří točivý moment. Ten vstupuje do převodovky a poté k hnaným kolům automobilu. Kliková hřídel je uložena v kluzných ložiskách, do kterých je přiváděn tlakový olej k zajištění mazání. Pomocí vrtaných kanálů je dále olej přiváděn k ojničním čepům pro zajištění mazání ojničních ložisek.

Kliková hřídel se skládá z přední části pro připevnění řemenice pro pohon vedlejších agregátů, hlavních čepů, ramen kliky a ojničních (klikových) čepů. Zadní část slouží pro



připojení setrvačníku. Popis klikové hřídele je na obr. 5, na ramenech kliky bývají umístěny protizávaží k vyvažování klikové hřídele.

Klikové čepy jsou rozděleny podle počtu válců a uspořádání zážehů ve válcích motoru. Pro nejrovnoměrnější chod motoru je potřeba, aby zážehy motoru následovaly pravidelně. U dvoudobého motoru dojde k zážehu ve válci každé otočení klikové hřídele, tj. 360° . Rozdíl u čtyřdobého motoru je, že k zážehu ve válci dochází každé druhé otočení klikové hřídele, tj. 720° . Aby docházelo k pravidelným zážehům, musí pro úhly mezi klikami hřídele platit rovnice (1) a (2). Pořadí zážehů se volí tak, aby zážehy následovaly co nejdál od sebe. S větším počtem válců narůstá počet variant pořadí zážehů motoru, záleží na výrobcu motoru. Na obr. 5 je kliková hřídel se čtyřmi klikovými čepy, rozdělenými po 180° . [6]

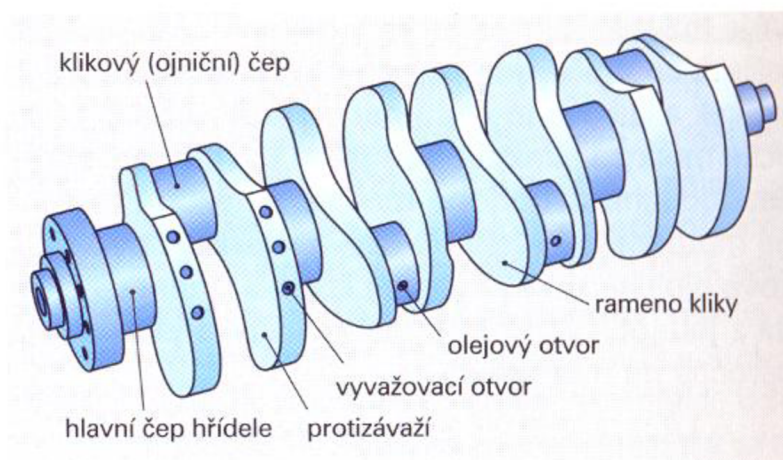
Rovnice pro úhel mezi klikami hřídele dvoudobého motoru [6]:

$$\varphi_{(2)} = \frac{320}{i} [^\circ], \quad (1)$$

kde i je počet válců motoru.

Rovnice pro úhel mezi klikami hřídele čtyřdobého motoru [6]:

$$\varphi_{(4)} = \frac{720^\circ}{i} [^\circ]. \quad (2)$$



Obr. 5 Popis částí klikové hřídele [5]

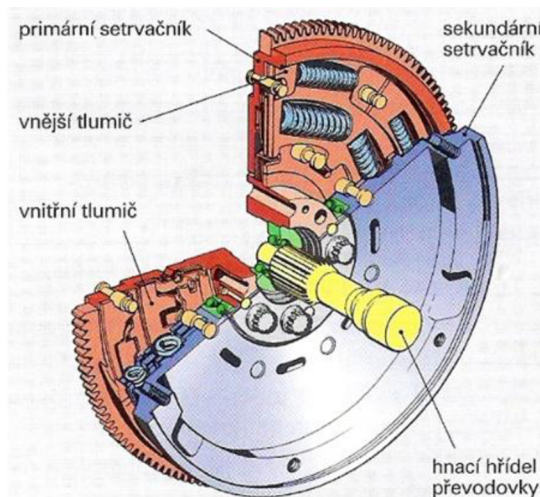
1.1.4 SETRVAČNÍK

Setrvačník svou hmotou akumuluje přebytek kinetické energie a při nedostatku kinetické energie ji zase dodává. To zabraňuje nerovnoměrnému chodu motoru. Podle vyváženosti chodu motoru se volí velikost setrvačníku. Hmotnost setrvačníku ovlivňuje i kmitání hřídele. S růstem hmotnosti setrvačníku se snižují vibrace klikové hřídele. [3]

Setrvačník bývá umístěn na konci klikové hřídele, kde se dále nachází spojka a převodovka. Klasický setrvačník je litinový nebo ocelolitinový kotouč. Setrvačník má ozubený věnec, který je nalisován na obvodu. Do věnce při spuštění motoru zabírají zuby startéru. Modernější



řešení setrvačníku je dvoumotový setrvačník (obr. 6). Jeho hlavním úkolem je snížení torzních kmitů do převodového ústrojí. Dvoumotový setrvačník se skládá ze dvou pružně spojených částí. [3]



Obr. 6 Popis částí dvoumotového setrvačníku [5]

1.1.5 TORZNÍ TLUMIČ

Torzní tlumič redukuje torzní vibrace na klikové hřídeli. Z pravidla se montuje na volný konec klikové hřídele, kde bývají torzní výchylky největší. Tlumič se skládá obecně z pružné části a hmoty, jejíž pohyb bývá tlumen. [6]

Podle funkce se torzní tlumiče dělí [6]:

- třecí tlumiče – kinetická energie se mění v teplo,
- rezonanční tlumiče – část kinetické energie se mění v teplo a torzní kmitání klikové hřídele se tlumí rezonancí tlumiče,
- dynamické tlumiče – kinetická energie se kompenzuje pomocným torzním systémem, podobně jako u setrvačníku.

1.2 ŘADOVÉ MOTORY

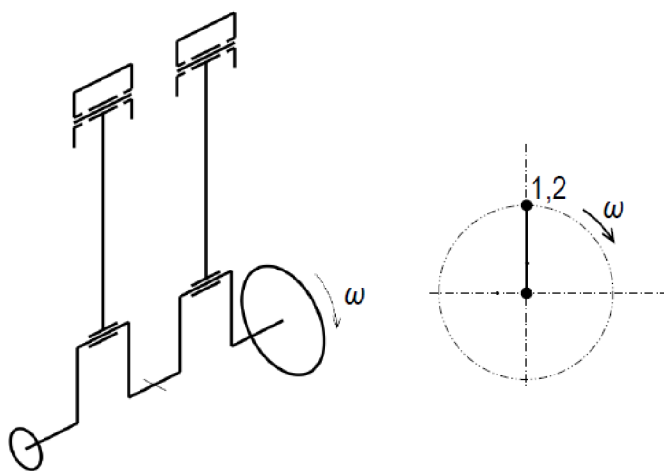
Řadové motory mají válce v jedné řadě. Motory se také označují písmenem R a za ním číslem označující počet válců. Tato varianta není optimální při vysokém počtu válců z hlediska stavební délky motoru a jeho zástavby v motorovém prostoru.

1.2.1 ŘADOVÝ DVOUVÁLEC

U řadového motoru běží písty synchronně s rozstupem o dvě doby (obr. 7). K zážehu dochází každé otočení klikové hřídele, tzn. že vibrace budou dvakrát silnější než u jednoválce. Směr vibrací je převážně dolů a nahoru. [7]



Pro klidnější chod motoru je potřeba vyvažovací hřídel, výsledná cena malého motoru určeného pro malá, levná vozidla ovšem roste. Používaly se jen u nejlevnějších malých automobilů, jako Fiat 128, počáteční verze Fiat Cinquecento a Honda Today atd. Dnes se setkáme s řadovým dvouválcem například u Tata Nano s objemem 0,65 litru a výkonem 28 kW nebo Fiat 500 TwinAir s objemem 0,9 litru a výkonem 44–77 kW podle modelu motoru. [7]



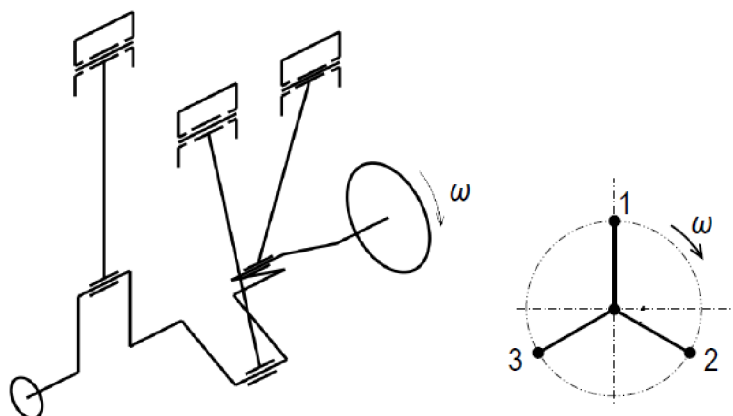
Obr. 7 Schéma klikového mechanismu pro čtyřdobý řadový dvouválec [8]

1.2.2 ŘADOVÝ TŘÍVÁLEC

V dnešní době se stále více setkáváme s motory o nižším zdvihovém poměru, výhodou je nižší spotřeba a snížení emisí. Objem motoru se pohybuje od 0,55 do 1,5 litrů a výkon motoru je 20–85 kW. Tříválec je konstrukcí více podobný šestiválci než čtyřválcí. Tříválec má klikovou hřídel rozdělenou po 120° , stejně to bývá u šestiválce. Rozdíl u čtyřválcí je kliková hřídel, která je rovinná, tj. po 180° . [6]

Výhody u řadového tříválce jsou menší velikost, hmotnost a třecí ztráty, které klesají s nižším počtem ložisek, pístů atd. a tím se snižuje spotřeba motoru. Nevýhodou u tříválce jsou vibrace motoru z důsledku rozdílných sil na jednotlivých stranách. Při nižších otáčkách jsou vibrace silnější, protože zážeh nastává jen při každých 240° otáčky hřídele. Pořadí zážehu je 1-2-3, jako je ukázáno na obr. 8. Pro zlepšení chodu motoru se používá vyvažovací hřídel, nevýhodou je ale složitější konstrukce a cena motoru, proto se častěji setkáváme s vyvažováním momentů¹ setrvačných sil rotujících součástí a posuvných součástí vývažky na klikové hřídeli. Velikost motoru dovoluje snadnější manipulaci v motorovém prostoru než v případě víceválcových motorů. [7]

¹O vyvážení momentů setrvačných sil pojednává kapitola 3.2.3-4

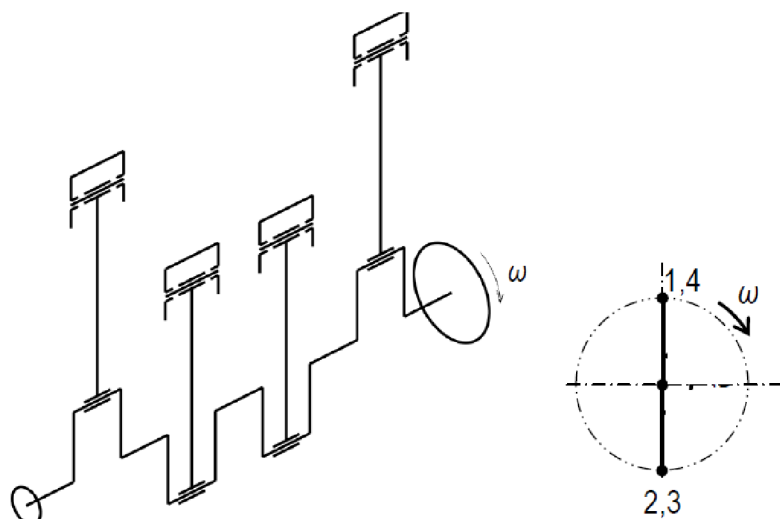


Obr. 8 Schéma klikového mechanismu pro řadový tříválec [8]

1.2.3 ŘADOVÝ ČTYŘVÁLEC

Řadový čtyřválcový motor je nejpoužívanější pohonná jednotka v moderních automobilech. Motor je pomyslným středem, co se týče velikosti, hmotnosti, vyváženosti chodu a průběhu výkonu. Výkon a vibrace jsou lepší než u tříválce. Objemem se pohybuje od 0,8 litru do 3,2 litrů a výkon v rozmezí 22–155 kW. Jeden z největších objemů u moderních automobilů má Porsche 944 S2 a Porsche 968 s objemem 3 litrů. [7]

V automobilu může být umístěn jak podélně, tak i napříč. Kliková hřídel je rovinná, rozdělená po 180°. Prostřední dva písty mají stejný cyklus a krajní písty zase opačný, pořadí zážehu je 1-3-4-2 nebo 1-2-4-3 (obr. 9). Taková konstrukce přirozeně vyvažuje setrvačné síly rotujících součástí a tím i vibrace motoru, které by způsoboval tlak plynu působící na píst. Nejsou přirozeně vyváženy setrvačné síly posuvných součástí II. řádu, proto u řadových čtyřválců je potřeba vyvažovacích hřídelí pro úplné vyvážení. Z ekonomického hlediska se ne vždy používají. Vyvažovací hřídele se otáčejí proti sobě a mají dvojnásobnou rychlost vůči klikové hřídeli. Čtyřválec nevibruje podélně, jako je to u tříválce, protože na obou stranách působí stejně velké síly a ty se vyruší. [7][9]

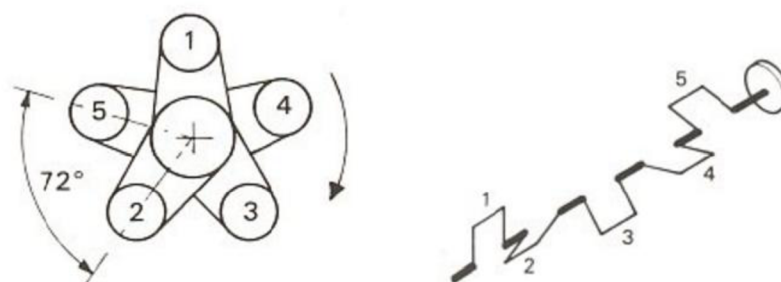


Obr. 9 Schéma klikového mechanismu pro řadový čtyřválec [8]

1.2.4 ŘADOVÝ PĚTIVÁLEC

Motor není v automobilovém průmyslu tak používaný, nalézt ho můžeme například v automobilech značky Audi s objemem 2,2 a 2,3 litru, Honda Acura TL, Volvo s objemem 2,3 turbo a 2,4 litrů. Výkon motoru je v rozmezí 60–230 kW s objemem 1,8–3,7 litrů. [7]

K zážehu dochází každých 144° pootočení klikové hřídele. Jako v případě řadového tříválce jsou přirozeně vyváženy setrvačné síly² rotujících a posuvných součástí. Mezi nejpoužívanější pořadí zážehů patří 1-2-4-5-3. Kliková hřídel je rozdělena po 72° dle obr. 10. Dochází tu podobně jako u tříválce k podélným vibracím. Motor lze vyvážit jako u řadového tříválce tím, že se ke klikové hřídeli přidají dvě protiběžné vyvažovací hřídele nebo jedna protiběžná vyvažovací hřídel spolu s vývažky na klikové hřídeli. Pro jednodušší a levnější konstrukci se vyvažuje částečně pouze vývažky na klikové hřídeli. Motor není tak dlouhý a lze ho uložit příčně do automobilu. [7]



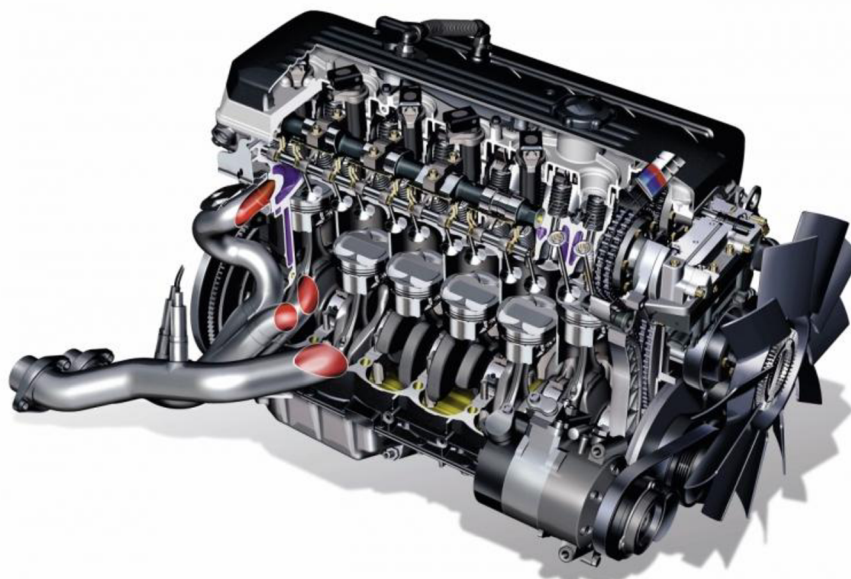
Obr.10 Schéma klikové hřídele pro řadový pětiválec [7]

² O vyvážení setrvačných sil pojednává kapitola 3.2.1–2



1.2.5 ŘADOVÝ ŠESTIVÁLEC

Řadový šestiválcový motor je jeden z nejlépe vyvážených motorů, i bez protizávaží na klikové hřídeli. Motor rychle reaguje na plyn a rychle získává otáčky. Řadový šestiválec byl nejlepším klasickým motorem v automobilovém průmyslu. Byl součástí Rolls-Royce Silver Ghost, Bentley Speed Six, Mercedes SSK a dalších. Nyní používá řadový šestiválec například firma BMW (obr. 11). Objem motorů je v rozmezí přibližně od 2 do 5 litrů s výkonem od 80 do 260 kW. [7]



Obr. 11 Řadový šestiválcový motor BMW [10]

U řadového šestiválcového motoru jsou tři páry pístů a ty se pohybují synchronně. Kliková hřídel je jako u tříválcového motoru rozdělena po 120° . Díky dvojnásobnému počtu válců oproti tříválcovému motoru nastává zážeh každých 120° otáčky klikové hřídele, a tím se vyruší setrvačné síly jak rotujících součástí, tak i posuvných součástí. Proto není potřeba vyvažovacích hřídelí. Další výhodou je, že motor má jen jedno ventilové ústrojí na rozdíl od šestiválcového vidlicového motoru. Nevýhodou šesti válců v řadě je délka motoru a nižší tuhost bloku motoru. Motor musí být většinou uložen podélně a pohání zadní kola. [6]

1.3 VIDLICOVÉ MOTORY

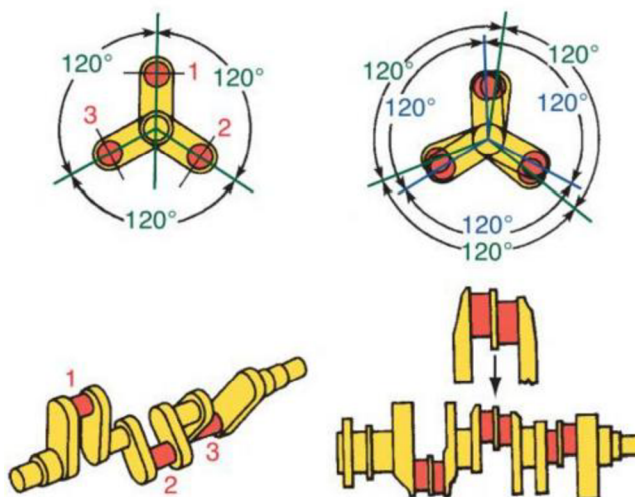
U motorů s větším počtem válců se používá vidlicové uspořádání. Vidlicové motory mají dvě řady válců s osami válců uspořádané ve tvaru „V“. Proto se označují písmenem V, za kterým se uvádí číslo s počtem válců. Dva sousední válce sdílejí jeden klikový čep. Rozevření válců je od 60° do 90° . Úhel rozevření válců určuje tvar klikové hřídele. Pro snížení polohy těžiště agregátu se používá vyšší úhel rozevření válců. Samostatnou skupinou jsou motory s úhlem rozevření válců 180° .



1.3.1 VIDLICOVÝ ŠESTIVÁLEC

U vidlicového šestiválce je stejné rozložení klikové hřídele jako u řadového šestiválce, tj. po 120° . Z důvodu pravidelnosti zážehu je u každého čepu vytvořené přesazení dle obr. 12. Při přesazení o úhel 30° jsou válce od sebe pootočené o 90° . Další z možností je přesazení o 60° , pak jsou válce od sebe také 60° . Objem má rozpětí 1,8–5 litrů s výkonem 60–280 kW. Motor byl používán například u Alfa Romeo GTV6 s objemem 2,5 litrů. Dnes je motor velmi používaný mezi automobilkami. [7][11]

Výhodou vidlicového šestiválce je jeho délka, oproti řadovému šestiválci je zástavbový prostor menší a tuhost bloku válců vyšší. Je to náhrada řadového čtyřválce, při lepším objemu a vyšším výkonu ve stejně velkém prostoru. Nevýhodou motoru je složitější konstrukce například výfukové svody na obou stranách motoru nebo dvojí ventilové ústrojí. Motor je také těžší a to zhoršuje jízdní vlastnosti při umístění před přední nápravu. Pro lepší chod motoru se používají vyvažovací hřídele. [6]



Obr. 12 Kliková hřídel šestiválce bez přesazení (vlevo), s přesazením ojničních čepů (vpravo) [11]

1.3.2 VIDLICOVÝ OSMIVÁLEC

Ve sportovních automobilech luxusních značek se uplatňují motory s větším počtem válců, které mají při konstrukci do V vysoký výkon a malou stavební délku. Zpravidla je motor uložen podélně. Většina motorů má řady válců od sebe pootočené o 90° až na pár výjimek například Ford Taurus SHO s objemem 3,4 litrů má rozvěření válců 60° a automobilka TVR s motorem AJP8 má rozvěření válců 75° . Motory mají objem od 3 do 8 litrů a s výkonem od 80 do 380 kW [7]

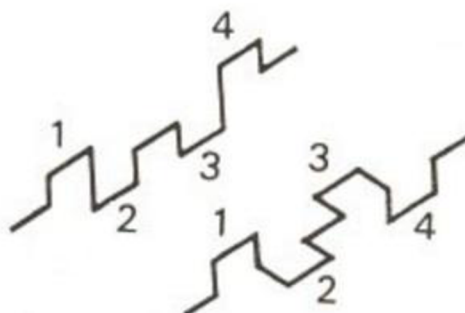
Kliková hřídel je převážně prostorová, tedy rozdělena po 90° (obr. 6). U prostorové klikové hřídele dochází k zážehu každých 90° otáčky hřídele a válce jsou od sebe pootočené rovněž o 90° . U motoru vznikají momenty setrvačných sil rotujících součástí a posuvných součástí I. řádu. [9]

Druhá varianta je rovinná kliková hřídel, která je rozdělena po 180° (obr. 13). U rovinné klikové hřídele nevznikají momenty setrvačných sil jako u prostorové klikové hřídele, ale



vznikají vibrace od setrvačných sil posuvných součástí II. řádu. Motory s rovinnou klikovou hřídelí se převážně používají u sportovních automobilů. [9]

Nevýhodou u osmiválcových vidlicových motorů je dvojí ventilové ustrojí, údržba a třecí ztráty v motoru z důvodu většího počtu pohybujících se součástí.



Obr. 13 Schéma klikové hřídele rovinné (vlevo) a prostorové (vpravo) [7]

1.3.3 VIDLICOVÝ DESETIVÁLEC

Vidlicový desetiválcový motor je tvořen dvěma řadovými pětiválci. Každé dva vedlejší válce mají stejný klikový čep. Kliková hřídel je rozdělena po 72° a k zážehu motoru dochází také každých 72° potočení klikové hřídele, proto je chod motoru hladký. Motor se oproti osmiválci lépe dostává do otáček při stejném objemu díky menším pístům. Kvůli složitosti, hmotnosti a velikosti není tolik používán. Dále v motoru vznikají podélné vibrace, a proto motor potřebuje dvě vyvažující hřídele k vyvažování setrvačných sil a momentů posuvných součástí. Objem motoru se pohybuje od 4,8 do 8,5 litrů a výkon od 220 do 480 kW. [9]

1.3.4 VIDLICOVÝ DVANÁCTIVÁLEC

Motor je tvořen dvěma řadovými šestiválci na jedné klikové hřídeli. Proto je vidlicový dvanáctiválec dokonale vyvážený a má hladký chod. Každých 60° potočení klikové hřídele dochází k zážehu, to přispívá k jemnosti provozu. Kliková hřídel je tedy rozdělena po 120° . Převážně se používá v luxusních a sportovních automobilech. Ve srovnání s desetiválcem je nástup otáček ještě rychlejší, ale velikost, složitost a cena jsou větší. Objem válců se pohybuje od 4 do 8 litrů s výkonem 150–700 kW [9]

Kliková hřídel je u všech vidlicových dvanáctiválců stejná. Nejčastěji se používá rozevření válců 60° , i když Ferrari preferuje 65° (obr. 14). [7]

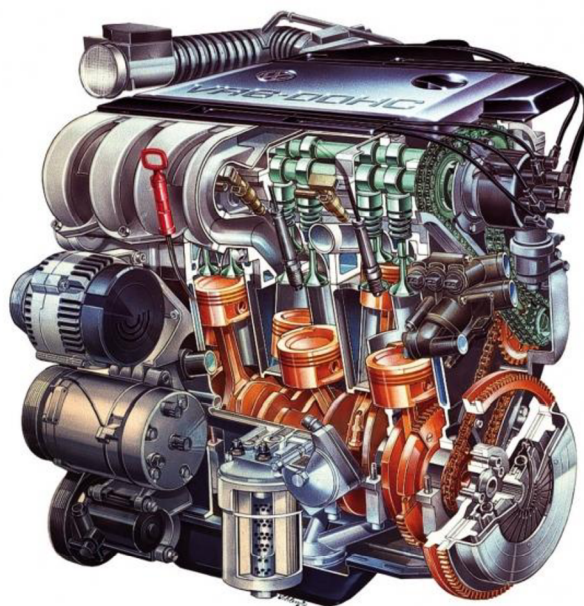


Obr. 14 Motor Ferrari 599 GTB Fiorano [12]

1.3.5 MOTOR VR6

Motor je kombinací vidlicového a řadového motoru se šesti válci. Tato konstrukce motoru je vynález firmy Volkswagen AG (obr. 15). Kliková hřídel je jako v případě řadového šestiválce rozdělená po 120° a má jednu hlavu válců. Motor má každé dva vedlejší válce uložené na jednom klikovém čepu, které jsou od sebe pootočený o $10,6^\circ$ nebo 15° . Motory mají výkon 130–300 kW s objemem 2,8–3,6 litrů [7]

Výhodou této konstrukce je velikost motoru a je potřeba jen jedno ventilové ústrojí. Motor má vyšší tuhost než řadový šestiválec. Nevýhodou je obtížnější vyvažování klikového ústrojí a složitá konstrukce motoru. [7]



Obr. 15 VR6 značky Volkswagen [10]

1.4 W MOTORY

Válce motoru jsou uspořádány ve tvaru „W“. W motory mají dvě konfigurace rozdělení řad válců. První je tři řady válců se společnou klikovou hřídelí. Další varianta je čtyři řady válců se společnou klikovou hřídelí, kterou používá firma Volkswagen AG.

1.4.1 W8

Poprvé byl motor použit u Volkswagen Passat W8 v roce 2001 pro prémiové vozy, výroba skončila v roce 2004. Výkon motoru byl 205 kW a objem 4 litry. Řady válců motoru jsou od sebe pootočené o 72° a na každé straně jsou čtyři válce uspořádány jako u VR motorů. Složení bloku motoru vypadá jako dva složené VR4. Kliková hřídel má čtyři přesazené ojnicí čepy, na nichž jsou po dvou uloženy ojnice. V porovnání s vidlicovým osmiválcem je kliková hřídel kratší a má rozdělení čepů po 180° (obr. 16). [7]



Obr. 16 Porovnání klikové hřídele W8 (vrchní) a V8 (spodní) [13]

1.4.2 W12, W16

Volkswagen W12 má šest válců na každé straně bloku motoru (obr. 17), které tvoří dvě řady pootočené o 15° . Strany bloku jsou od sebe natočeny o 72° a válce sdílejí jednu klikovou hřídel. Dva sousedící písty se dělí o jeden klikový čep, který je přesazený o 12° . Kliková hřídel je výrazně kratší než u vidlicových dvanáctiválců, šířka ojnice je v porovnání s V12 menší. Motor má objem 6 litrů s výkonem 300–450 kW.[7]



Obr. 17 Blok válců W12 [14]

W16 je konstrukčně stejná jako W12, ale u každého bloku jsou přidány 2 válce. Motor bývá někdy označen jako WR16 kvůli tomu, že vypadá jako dvě spojené VR8. Motor používá například Bugatti Veyron EB 16.4 s objemem 8 litrů a výkonem 740 kW. Na každém válci jsou 4 ventily, dohromady 64 ventilů, které jsou ovládány čtyřmi vačkovými hřídelemi.



1.5 MOTORY BOXER

Motory mají rozevření válců 180° a jsou uloženy horizontálně, proto jsou motory nízké a mají nízko těžiště. Tato výhoda je nezbytná pro závodní automobily, pro lepší ovladatelnost vozidla. Používají je firmy Subaru a Porsche AG. Dva protilehlé válce mají vzájemně pootočené kliky o 180° , a proto všechny motory s protilehlými válci poskytují dokonalé vyvážení. Jsou široké a cenově dražší, kvůli většímu počtu dílů.

1.5.1 ČTYŘVÁLCOVÝ BOXER

Čtyřválcové boxery jsou často používány u vozů Subaru (obr. 18). Kliková hřídel je rovinná a má čtyři klikové čepy. Setrvačné síly jsou vyvážené z konstrukce motoru, ale jako u řadového tříválce je tu podélné vibrování, které vzniká, že protilehlé písty nejsou v jedné ose. Proto je potřeba vyvažovacích hřídelí a je tu větší namáhání silentbloků. Boxer je dost náročný na prostou v příčném směru, proto bude servis některých částí motoru obtížnější. Objem motoru bývá od 1,1 do 3 litrů s výkonem od 50 do 150 kW. [6]



Obr. 18 Čtyřválcový motor typu boxer firmy Subaru [10]

1.5.2 ŠESTIVÁLCOVÝ BOXER

Hlavním výrobcem šestiválcových boxer motorů je firma Porsche AG. Kliková hřídel má šest klikových čepů pro každý samostatný píst a je rozdělená po 120° . Díky většímu počtu válců je chod motoru lepší jak u čtyřválcového boxeru a je srovnatelný s řadovým šestiválcem, proto není potřeba vyvažovacích hřídelí. Výkon motoru se pohybuje v rozmezí 60–440 kW s objemem 1,5–4 litrů. Nevýhodou šestiválcových boxerů je složitější a nákladnější konstrukce motoru a dále komplikovanější uložení v automobilovém prostoru, kvůli jeho velikosti.



2 VÝROBA A MATERIÁLY KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

Kliková hřídel je jednou z nejdůležitějších, provozně nejnamáhavějších a výrobně obtížnější součástí motoru. Volba materiálu klikových hřídelí závisí na podmínkách, jakým bude kliková hřídel vystavena. Podle použití a tvaru klikové hřídele se volí způsob výroby s přihlédnutím na cenu výrobku, i ten má svůj podíl na jejich vlastnostech a volbě materiálu. Dalším významným faktorem ovlivňujícím mechanické vlastnosti klikové hřídele je povrchová úprava.

2.1 VÝROBA KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

Klikové hřídele se vyrábějí odléváním, kováním, skládáním nebo jsou celoobráběné. Nejpoužívanější způsob výroby je kováním. Odléváním lze získat klikové hřídele velkých rozměrů a větší rozmanitost tvarů než kováním. Skládané hřídele se nejčastěji vyskytují u motocyklových motorů. Nejméně používaný způsob je obrábění celého polotovaru. [15]

2.1.1 ODLÉVANÉ KLIKOVÉ HŘÍDELE

Kliková hřídel se vyrábí odléváním tekutého materiálu do předem vyrobených forem. Po vychladnutí materiálu se forma rozebere a odlitek klikové hřídele se dále obrábí.

Výhodou odlévání je spotřeba materiálu na výrobu pomocí přesnějších forem na odlitek. Dále je možnost odlít vhodnějších tvarů pro lepší tuhost hřídele. Nevýhodou je pevnost, a proto se odlévají větší průměry čepů. Oproti kování bývají náklady poloviční a hmotnost o třetinu lehčí, a to i při stejné pevnosti a tuhosti. [16][17]

Na obr. 19 je obrobena, odlévaná kliková hřídel čtyřválcového řadového motoru.



Obr. 19 Odlévaná kliková hřídel [17]



2.1.2 KOVANÉ KLIKOVÉ HŘÍDELE

Kované klikové hřídele se vyrábí pomocí zápustkového kování. Před kovááním se materiál ohřeje, poté se vloží do zápustky, která má tvar budoucí hřídele, a pomocí bucharu nebo lisu se materiál vytvaruje do tvaru zápustky. Na vytvarování hřídele je třeba několik zápustek. Pomocí lisu se materiál vytvaruje v jednom cyklu oproti bucharu, který potřebuje několik úderů na vytvarování materiálu. Výkovek je dále obráběn do požadovaných rozměrů.

Ve vrchní části obr. 20 je vidět polotovár klikové hřídele a pod ním je již obrobená kliková hřídel vidlicového osmiválcového motoru.



Obr. 20 Kovaná kliková hřídel [17]

Oproti ostatním metodám je celý výrobní čas krátký. Náklady na zápustku jsou vysoké, proto se vyplácí jen u sériových zakázek. Někdy se používá jedna zápustka na výrobu několika typů hřídel. Výhodou kování jsou lepší mechanické vlastnosti (životnost, pevnost, houževnatost, mez únavy) a možnosti orientace vláken ve směru největšího zatížení. U kovaných hřídel je méně povrchových a vnitřních vad než u odlévaných. [16]

2.1.3 SKLÁDANÉ KLIKOVÉ HŘÍDELE

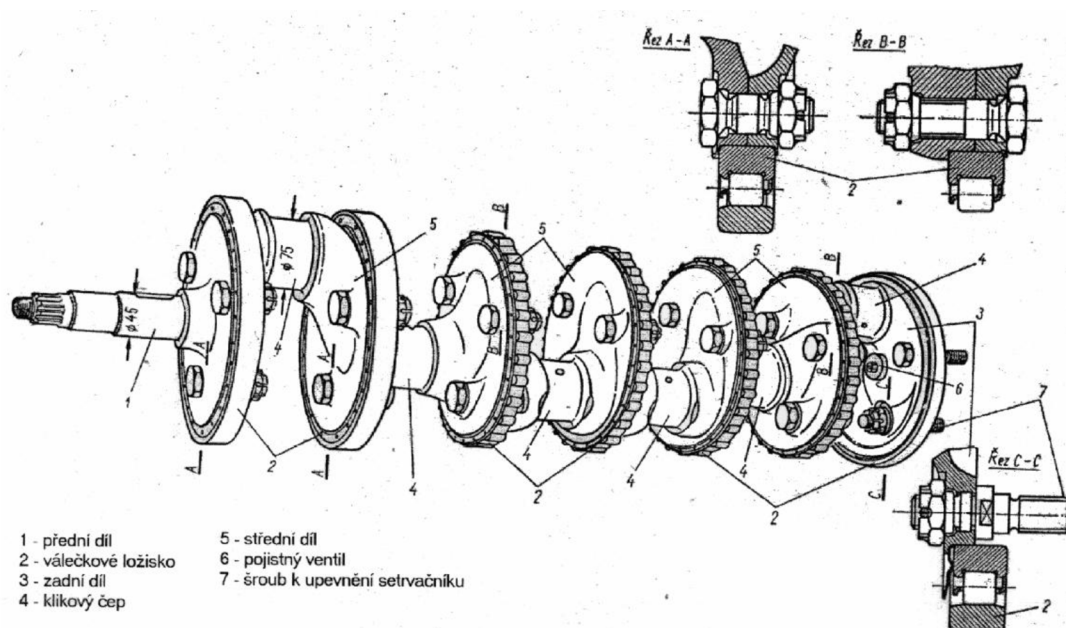
Klikové hřídele se dají vyrábět spojováním více součástí. Spojovat lze pomocí šroubů, kdy je možnost hřídel zase lehko rozebrat. Druhá možnost je jednotlivé díly do sebe zalisovat a vznikne už těžko rozebíratelná kliková hřídel. Poslední možnost je spojování pomocí svárů.

Slisováním čepů a ramen vznikají klikové hřídele, které se používají u dvoudobých a čtyřdobých motocyklových motorů. Tato metoda je sériově velice produktivní. [15]

Metoda spojování pomocí šroubu se používá pro velkoobjemové motory. Výrobce je například Česká automobilová firma TATRA TRUCKS a.s. Na obr. 21 je skládaná kliková hřídel TATRA. Vnitřní valivá ložiska jsou uložena na kruhových ramenou hřídele. Kliková



hřídel je pak uložena do tzv. tunelové klikové skříně. V důsledku absence hlavních čepů je kliková hřídel kratší v porovnání s předchozími. [15]



Obr. 21 Skládaná kliková hřídel TATRA [15]

Výhodami konstrukce je tuhost klikové skříně, možnost použití nedělených ojnic a uložení hřídele ve valivých ložiskách, která mají třecí ztráty nižší než kluzná ložiska. Další výhodou je tzv. stavebnicové řešení, kdy změnou klikové skříně lze poskládat motor o potřebném počtu válců. Takto řešené motory vynikají převážně u vidlicových motorů. Nevýhody jsou hlučnost a vibrace motoru. [15]

2.1.4 CELOBRÁBĚNÉ KLIKOVÉ HŘÍDELE

Kliková hřídel se vyrábí z polotovaru kruhového průřezu. Pomocí soustruhu a CNC stroje se polotovar obrobí na požadovaný tvar (obr. 22.).

Výhodou je možnost volby materiálu a libovolného tvaru hřídele. Tyto hřídele vznikají v malých sériích, a proto jsou z důvodu vysoké ceny nejčastěji používány v závodních motorech. Další uplatnění je u automobilových výrobců na výrobu nových prototypů. [18]



Obr. 22 Celoobrobená kliková hřídel a její polotovár [19]

2.2 MATERIÁLY KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

První klikové hřídele se vyráběly kováním. Začátkem 80. let se začaly zejména u menších motorů vyrábět klikové hřídele z lité oceli. Hlavním důvodem bylo ekonomické hledisko a menší hustota materiálu. V dnešní době je široká škála materiálů umožňující volbu mechanických vlastností podle zatížení klikové hřídele.

K mechanickým vlastnostem patří:

- pevnost
- tvrdost
- pružnost
- houževnatost
- vysoká mez únavy
- schopnost tlumení vibrací.

Kliková hřídel musí mít vysokou mez únavy, která se zvyšuje s pevností materiálu. Se vzrůstem pevnosti ale klesá schopnost tlumení rázu, proto se při výběru materiálu musí hledat kompromis mezi mechanickými vlastnostmi.

2.2.1 MATERIÁLY ODLÉVANÝCH KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

Častým materiálem u odlévaných klikových hřídelí bývá litina s kuličkovým grafitem. U odlévání z litiny jsou výhody tlumení vibrací, lepší kluzné vlastnosti a nižší citlivost k vrubům. Litiny mají také nižší modul pružnosti, který snižuje pnutí způsobené deformací hřídele. [16]



Další vhodné materiály pro odlévání jsou šedé litiny pro malá namáhání, legované litiny (Ni, Cr, Mo, Cu, V, Ti), temperované litiny (feritická, perlitická), očkované litiny a ocelolitiny (tab. 1). [20]

Tab. 1 Materiály odlévaných klikových hřídelí [20][21][22]

Materiál	Označení ČSN	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Tvrдость [HB]
Šedé litiny	42 2425	250	180–200
Očkované litiny	42 2435	350	225
Legovaná litina (Cr-Mo)	42 2432	320	280
Legovaná litina (Ni-Mo)	42 2443	430	290
Legovaná litina (Ni-Cr)	42 2429	295	265
Legovaná litina (Cu-Cr)	42 2450	500	260
Temperované litiny feritické	42 2532	300	180
Temperované litiny perlitické	42 2555	550	220
Tvárná nodulární litina	42 2370	500–900	290
Ocelolitiny uhlíkové	42 2665	650	-
Ocelolitiny slitinové	42 4380	800	-
Litá ocel nelegovaná	-	650	236
Litá ocel legovaná	-	820	260

Tatra používá pro lité součásti skládaných klikových hřídelí ocelolitiny 42 2661 s pevností 660–700 MPa. [20]

2.2.2 MATERIÁLY KOVANÝCH KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

Z různých druhů ocelí se vybírá materiál zušlechtitelný s obsahem legujících prvků. U méně namáhaných motorů se používají uhlíkové oceli třídy 12, pro středně namáhané hřídele bez povrchových úprav materiály 14 240 a 15 260. Materiály 15 230 a níže uvedené v tab. 2 jsou s povrchovými úpravami a používají se pro více namáhané motory. Pro závodní motory se užívá ocel 16 521, která není vhodná k povrchovému tvrzení. [20]



Tab. 2 Materiály kovaných klikových hřídelí [20][21]

Materiál	Legující prvky	Mez pevnost v tahu – žíhaný stav [MPa]	Mez pevnost v tahu – zušlechtný stav [MPa]	Tažnost na L=5d [%]	Tvrdość povrchu [HB]
12 040	-	550–650	-	22	163
12 050	-	650–750	-	18	185
12 060	-	700–800	-	15	219
14 240	Mn-Cr	750	800–950	14	253–285
15 260	Mn-Cr-V	800	900–1050	10	239–285
15 230	Cr-V	700	900–1150	11	(677–730) ³
15 330	Cr-V-Mo	800	900–1150	12	(677–730)
16 250	Cr-Ni	780	800–900	12	587–(680)
16 440	Cr-Ni	850	900–1050	12	551–587
16 521	Cr-Ni-Mo	850	900–1200	13	-
Poldi EVF 310	Cr-V	750	1300	6	(680)
Poldi EVF 420	V	750	1200	8	-

V tab. 3 je porovnání výrobních kritérií klikových hřídelí u výkovků z oceli a odlitku z litiny s kuličkovým grafitem. [16]

Tab. 3 Porovnání klikových hřídelí kovaných a odlévaných

Kritérium	Výkovek z oceli	Odlitek z litiny s kuličkovým grafitem
Přidavky na obrábění	Na hrubování, jemné soustružení a broušení	Na broušení
Úchytky rozměrů	Do 2 mm	Do 1 mm
Hmotnost polotovaru	100%	60–90%
Objem obrábění	100%	50–60%
Výrobní čas	100%	Do 70%
Náklady na polotovar	100%	85–95%
Výrobní náklady	100%	20–80%

³ Tvrdość povrchu uvedené v závorkách v tab. 2 přesahují hodnotu, která způsobuje chybu v měření podle Brinella. Hodnoty jsou ale převedeny z jiného způsobu měření, aby se materiály daly lépe porovnat.



2.2.3 MATERIÁLY SKLÁDANÝCH HŘÍDELÍ

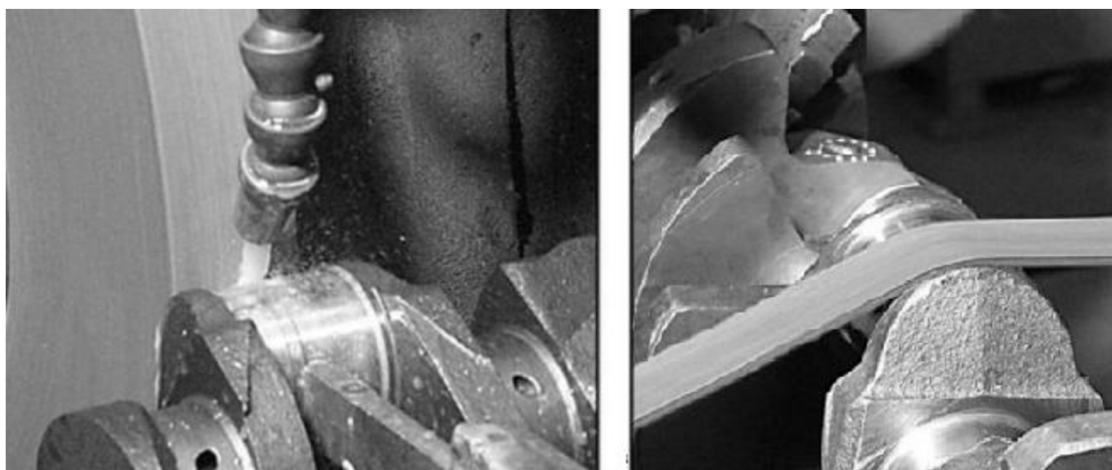
U skládaných klikových hřídelí se používá kombinace více materiálů. Výhodou takto kombinovaných materiálů je nižší hmotnost. V místech většího zatížení se používá kvalitnější materiál.

2.2.4 MATERIÁLY CELOOBRÁBĚNÝCH HŘÍDELÍ

Na výrobu se převážně používají oceli vysoké kvality. Běžně se používá materiál 4340, který má chemické složení chrom, nikl a molybden (36CrNiMo6) nebo materiály které jsou vlastnostmi podobné. Materiál 4340 má pevnost v tahu 745 MPa, tvrdost v žíhaném stavu 217 HB a tažnost 22%. Při povrchové úpravě dosahuje tvrdost 485 HB.[23]

2.3 POVRCHOVÁ ÚPRAVA

Vyrobenou klikovou hřídel ať už odlévanou nebo kovanou je třeba obrábět pomocí soustruhu k odstranění přebytečného materiálu. U všech vyrobených hřídelí je potřeba zlepšovat povrch čepů. Povrch se brousí a poté se ještě leští (obr. 23). Z důvodu opotřebení musí být čepy co nejtvrdší. Ke zpevnění povrchu se kliková hřídel tepelně zpracovává (indukčním kalením, kalením plamenem, nitridováním) nebo se povrch upravuje elektro-chemicky (elektrolytické chromování). [24]



Obr. 23 Broušení a leštění ojnicního čepu [24]

U odlévaných litin s kuličkovým grafitem se k zpevnění povrchu používá válečkování. U temperované litiny feritické na rozdíl od perlitické je třeba povrchové kalení čepu. Při povrchovém kalení plamenem nodulární oceli se pevnost zvýší z 290 HB na 550–600 HB. Lité oceli se můžou povrchově kalit na tvrdost 560 HB.[16][21]

Tvrdosti kovaných ocelí po povrchové úpravě jsou v tab. 2. Pro indukční kalení se používají materiály Poldi. Mezi materiály vhodné pro nitridaci řadíme oceli 15 230 a 15 330. Pro kalení plamenem jsou vhodné oceli 16 250 a 16 440.



2.3.1 INDUKČNÍ KALENÍ ČEPŮ

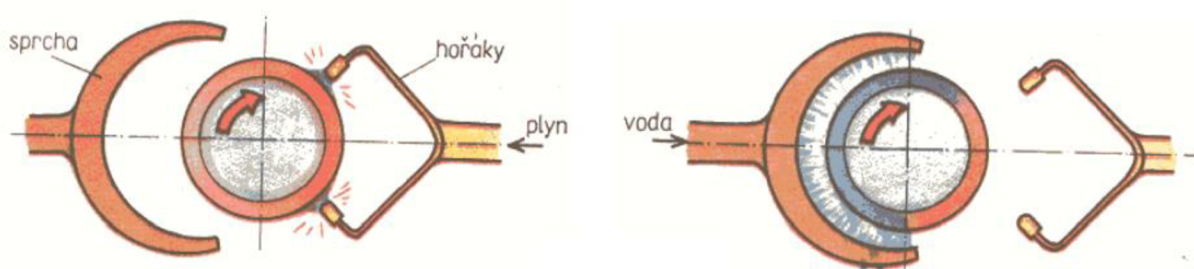
Kolem povrchu čepu je obmotána cívka a pomocí střídavého proudu procházející cívkou se povrch čepu zahřeje na kalící teplotu. Poté se povrch ochladí vodou a vznikne velmi tvrdý povrch. Indukční kalení způsobuje zabarvení kolem povrchu (obr. 24). Typická hloubka zakalení se pohybuje od 2 do 4 mm.[25]



Obr. 24 Zabarvení klikové hřídele po indukčním kalení [25]

2.3.2 KALENÍ PLAMENEM

Při povrchovém kalení plamenem se většinou používají kyslíkoacetylenové hořáky. Povrch se zahřeje nad austenitizační teplotu. Po ohřevu ihned následuje prudké zchlazení. Nejčastěji se používá zchlazení vodní sprchou (obr. 25). Rozdílná struktura mezi jádrem a povrchem způsobuje vnitřní pnutí, které se snižuje popouštěním na teplotu 150–250 °C. Tloušťka zakalené vrstvy se pohybuje také od 2 do 4 mm jako u indukčního kalení. [26]



Obr. 25 Kalení plamenem (vlevo) a zchlazení vodní sprchou (vpravo) [26]

2.3.3 NITRIDOVÁNÍ

Další možné povrchové vytvrzování klikové hřídele je nitridování. Nitridování probíhá v solné lázni nebo v plynném prostředí. V prvním případě se kliková hřídel vkládá do roztavené směsi solí o teplotě kolem 550 °C. Hlavní složkou solí jsou kyanidy. Povrch se nasycuje dusíkem a vzniká tvrdá vrstva. Poté se součást chladí vzduchem. Nitridová vrstva sahá jen do 0,3 mm, ale jedná se o jednu z nejlepších technologií. [25]



U nitridování v plynném prostředí se dusík získává z rozloženého čpavku. Čpavek se přivádí do zvonových pecí o teplotě 510–580 °C. Po uplynutí doby nitridace se pec pomalu ochlazuje 5 až 6 hodin na teplotu 200 °C, poté se zastaví přívod čpavku. Doba nitridace je 48 až 72 hodin a vrstva je od 0,45 do 0,61 mm. [27]

2.3.4 ELEKTROLYTICKÉ CHROMOVÁNÍ

Při elektrolytickém chromování vzniká na povrchu hřídele chromová vrstva, která zvyšuje odolnost vůči opotřebení. Chromová vrstva se vyznačuje pórovitostí, která vznikla zpětným pochodem přepólované lázně. Díky prohlubním na povrchu se dobře váže mazací olej, proto chromování snižuje tření a zvyšuje životnost klikových hřídelí. Tvrdost povrchu se pohybuje kolem 60 HRC (647 HB). Hloubka vrstvy se pohybuje od 0,01 až do 0,6 mm, zaleží na době trvání procesu. [20]



3 PŘÍČINY NEVYVÁŽENOSTI A JEJICH VYVAŽOVÁNÍ

Konstrukce a výroba každého pístového spalovacího motoru potřebuje, aby jeho klikový mechanismus byl vyvážen nebo alespoň částečně vyvážen. To zlepšuje chod motoru a prodlužuje jeho životnost. Konstrukčním vyvažováním klikového ústrojí se rozumí odstraňování setrvačných sil a momentů, které vznikají [6]:

- pohybem součástí klikového mechanismu
- výrobními nepřesnostmi, nehomogenitou materiálu
- deformací součástí za provozu.

Vyvažování se v první řadě dosahuje vhodným uspořádáním klikové hřídele, aby se hlavní setrvačné síly a momenty v každém okamžiku kompenzovaly. To se v mnoha případech neděje, a proto se na klikové hřídele umísťují protizávaží nebo se ke klikovému mechanismu připojují vyvažovací hřídele. Takové vyvažování zvětšuje celkovou hmotnost a cenu motoru. Klikové hřídele se vyvažují na vyvažovačkách. [6]

3.1 SETRVAČNÉ SÍLY A MOMENTY

Na klikové ústrojí působí dva druhy setrvačných sil. Volná setrvačná síla rotujících součástí, která je určena vztahem (vztahy kapitoly 3 dle [6]):

$$F_r = m_r \cdot r \cdot \omega^2 [N], \quad (3)$$

kde m_r je celková redukována hmotnost rotujících součástí klikového mechanismu, která se skládá zalomením klikové hřídele, hlavy ojnice a podílu dřívku ojnice, r je poloměr kliky a ω je úhlová rychlost otáčení klikové hřídele. Dále setrvačná síla posuvných součástí:

$$F_s = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \left(\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2\alpha) - \frac{\lambda}{4} \cdot \cos(4\alpha) + \dots \right) [N], \quad (4)$$

kde m_p je celková redukována hmotnost posuvných součástí klikového mechanismu, která obsahuje píst, pístní čep, oko ojnice a podíl dřívku ojnice, λ je ojnicní poměr a α úhel pootočení kliky. Rovnice má nekonečný počet složek. Nejvýznamnější jsou síly I. řádu:

$$F_{sI} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) [N], \quad (5)$$

a II. řádu:

$$F_{sII} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos(2\alpha) [N]. \quad (6)$$

U víceválcových motorů setrvačné síly jednotlivých válců nepůsobí v těžišti motoru, a proto vznikají setrvačné momenty. Tyto momenty se snaží naklopit motor kolem jeho těžiště. U motoru se stejnou vzdáleností os válců se bere těžištní rovina uprostřed délky krajních uložení klikové hřídele. U nestejně vzdálenosti os válců se těžištní rovina určuje z momentové rovnice. Rovnice pro točivý moment rotujících součástí [6]:



$$M_r = F_r \cdot l \text{ [N} \cdot \text{m]}, \quad (7)$$

kde l je vzdálenost síly od těžištní roviny. Klopný moment setrvačných sil posuvných součástí I. řadu má tvar:

$$M_I = F_{SI} \cdot l \text{ [N} \cdot \text{m]}, \quad (8)$$

moment II. řadu má rovnice tvar:

$$M_{II} = F_{SII} \cdot l \text{ [N} \cdot \text{m]}. \quad (9)$$

3.2 VYVAŽOVÁNÍ SETRVAČNÝCH SIL A MOMENTŮ

Vyvažování setrvačných sil a momentů je u všech koncepcí motoru podobné. Zde jsou dále v kapitole příklady vyvažování setrvačných sil rotujících a posuvných součástí na jednoválcovém motoru. Vyvažování momentů setrvačných sil rotujících součástí a momentů setrvačných sil posuvných součástí je ukázáno na víceválcových motorech.

3.2.1 VYVAŽOVÁNÍ SETRVAČNÝCH SIL ROTUJÍCÍCH SOUČÁSTÍ

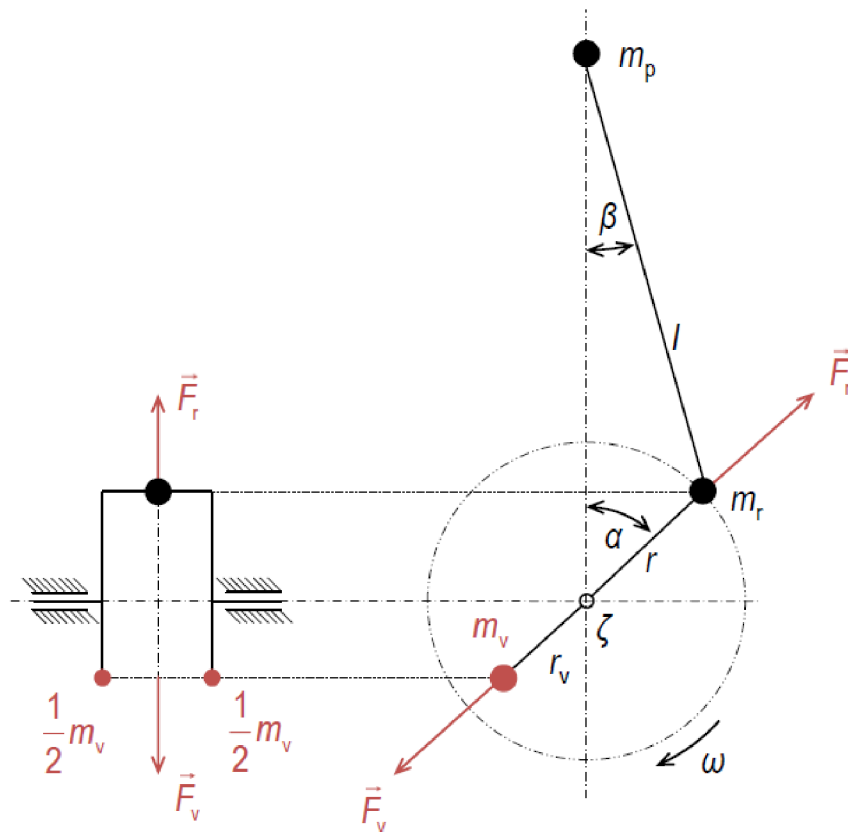
Setrvačná síla má stále stejnou velikost při stejné úhlové rychlosti a je ve směru kliky hřídele. Sílu lze vyvážit vývažkem na opačné straně ramene kliky dle obr. 26. Pro úplné vyvažování má rovnice tvar:

$$m_v \cdot r_v \cdot \omega^2 = m_r \cdot r \cdot \omega^2, \quad (10)$$

kde m_v je hmotnost vývažku a r_v je vzdálenost těžiště vývažku od osy klikové hřídele. Hmotnost vývažku při vzdálenosti r_v je:

$$m_v = m_r \cdot \frac{r}{r_v} \text{ [kg]}. \quad (11)$$

Aby vývažek netvořil se setrvačnou silou moment, rozdělí se vývažek na obě ramena kliky dle obr. 26 vlevo.



Obr. 26. Vyvažování setrvačných sil rotujících částí [8]

3.2.2 VYVAŽOVÁNÍ SETRVAČNÝCH SIL POSUVNÝCH SOUČÁSTÍ

U setrvačných sil posuvných součástí je vyvažování komplikovanější, a tím i více náročné na prostor, který zabírá vyvažovací ústrojí. To dále zvyšuje cenu a hmotnost motoru. Proto se vyvažuje jen částečně, zpravidla se vyvažuje polovina jejich účinků.

ČÁSTEČNÉ VYVAŽOVÁNÍ SETRVAČNÝCH SIL POSUVNÝCH SOUČÁSTÍ I. ŘÁDU VÝVAŽKEM

U částečného vyvažování se umístí vývažek, stejně jako u setrvačných sil rotujících součástí, na opačnou stranu ramene kliky dle obr. 27. Vznikne síla v ose válce o velikosti:

$$F_{vl}^{\eta} = m_v \cdot r_v \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) \text{ [N]}, \quad (12)$$

pro vyrovnání setrvačné síly posuvné I. řádu se síly musí rovnat:

$$F_{sl} = F_{vl}^{\eta}, \quad (13)$$

po dosazení:

$$m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) = m_v \cdot r_v \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha). \quad (14)$$



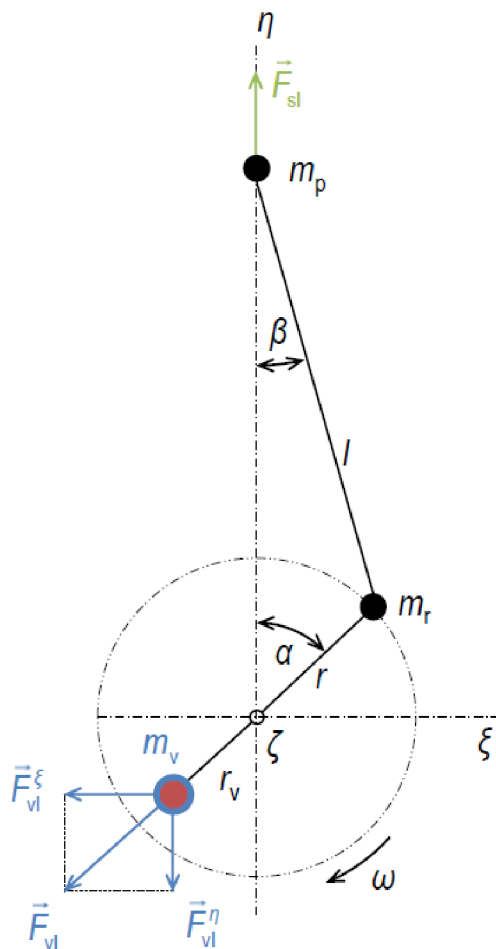
Hmotnost vývažku se určí dle vztahu:

$$m_v = \frac{m_p \cdot r}{r_v} [kg]. \quad (15)$$

Při vyvažování síly v ose válce vznikne síla od vývažku kolmo na osu válce o velikosti:

$$F_{vl}^\xi = m_v \cdot r_v \cdot \omega^2 \cdot \sin(\alpha) [N]. \quad (16)$$

Tato metoda vyvažování je vhodná pro motory, které jsou citlivější na síly působící ve směru osy válce než ve směru kolmém na ni, například ležaté motory. Síla působí ve směru váhy motoru nebo proti, a proto lépe zatěžuje základové šrouby. Obvykle se převádí jen část síly. [21]



Obr. 27 Částečné vyvažování posuvných součástí I. řádu vývažkem [8]

ÚPLNÉ VYVAŽOVÁNÍ SETRVAČNÝCH SIL POSUVNÝCH SOUČÁSTÍ I. A II. ŘÁDU

Pro úplné vyvažování setrvačných sil I. řádu se používají dva vývažky ve formě vyvažovacích hřídelí, které se otáčejí proti sobě stejnou úhlovou rychlostí jako kliková hřídel dle obr. 28. Síly kolmé na osu válce se vyruší. Výsledná síla vývažků je ve směru osy válce:



$$F_{vI} = 2 \cdot m_{vI} \cdot r_{vI} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) [N], \quad (17)$$

kde m_{vI} je hmotnost vývažku, který se otáčí stejně velkou úhlovou rychlostí, r_{vI} je vzdálenost těžiště vývažku od osy otáčení. Pro vyvážení se výsledná síla vývažků rovná setrvačné síle prvního řádu:

$$2 \cdot m_{vI} \cdot r_{vI} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha), \quad (18)$$

odkud je rovnice pro hmotnosti vývažku:

$$m_{vI} = \frac{m_p \cdot r}{2 \cdot r_v} [kg]. \quad (19)$$

Pro vyvažování setrvačných sil II. řádu je potřeba použít dalších dvou vývažků, které se budou otáčet proti sobě s dvojnásobnou úhlovou rychlostí jako má kliková hřídel (obr. 28). Stejně jako u vyvažování I. řádu zůstane jen síla ve směru osy válce o velikosti:

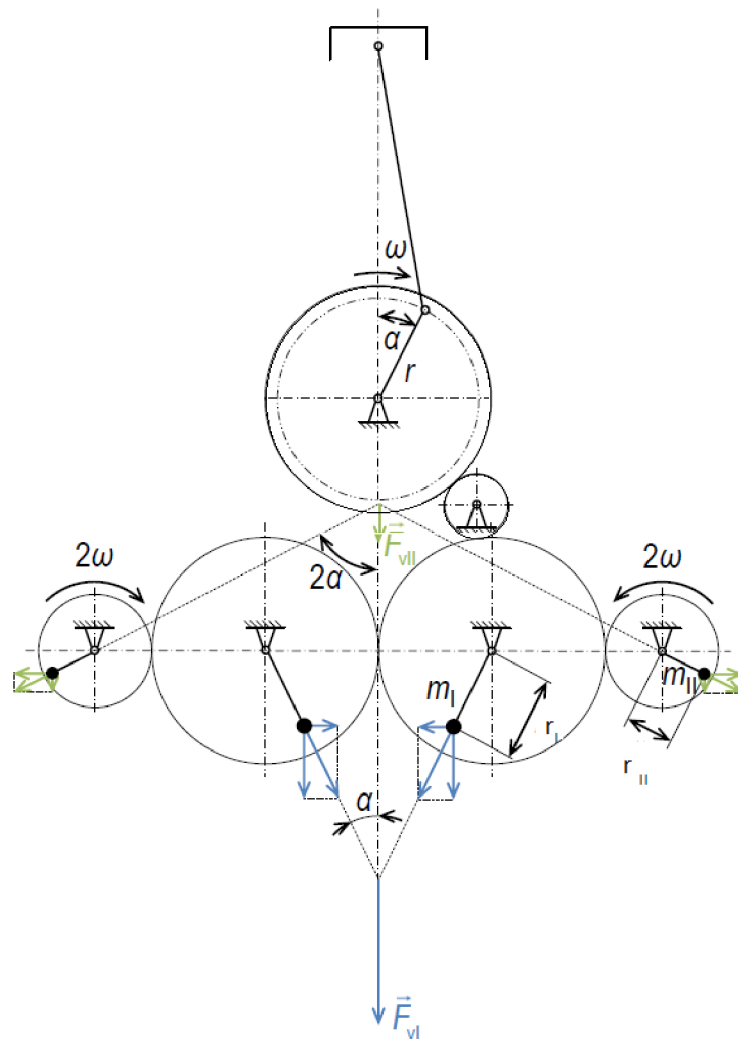
$$F_{vII} = 2 \cdot m_{vII} \cdot r_{vII} \cdot (2 \cdot \omega)^2 \cdot \cos(2 \cdot \alpha) [N], \quad (20)$$

kde m_{vII} je hmotnost vývažku, který se otáčí dvojnásobnou úhlovou rychlostí, r_{vII} je vzdálenost od osy otáčení. Pro vyvážení se síla vývažků bude rovnat setrvačné síle II. řádu:

$$2 \cdot m_{vII} \cdot r_{vII} \cdot (2\omega)^2 \cdot \cos(2\alpha) = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos(2\alpha), \quad (21)$$

hmotnost vývažku pro vyvažování setrvačné síly posuvných součástí II. řádu je:

$$m_{vII} = \frac{m_p \cdot r \cdot \lambda}{8 \cdot r_{vII}} [kg]. \quad (22)$$



Obr. 28 Vyvažování setrvačných sil posuvných součástí I. a II. řádu [8]

3.2.3 VYVAŽOVÁNÍ MOMENTŮ SETRVAČNÝCH SIL ROTUJÍCÍCH SOUČÁSTÍ

Setrvačné momenty rotujících součástí lze vyvážit dvěma způsoby. První způsob je vyvažování setrvačných sil rotujících součástí u každého zalomení klikové hřídele jako u jednoválcového motoru, a tím zamezit vzniku momentů. Takové řešení potřebuje mnoho protizávaží, a to zvyšuje moment setrvačnosti a hmotnost klikové hřídele. Druhá možnost je umístění dvou protizávaží, které vytvoří opačný moment a vruší moment setrvačných sil rotujících součástí. [21]

Momenty setrvačných sil rotujících součástí působící ve dvouválcovém motoru boxer dle obr. 29 jsou popsány vzorcem:

$$M_r = m_r \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{a}{2} + m_r \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{a}{2} \quad [N \cdot m], \quad (23)$$

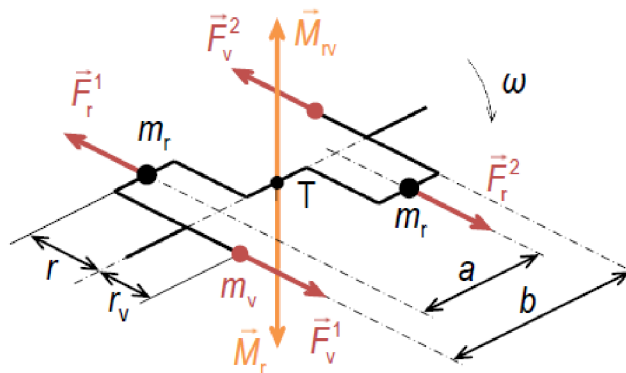
kde $a/2$ je vzdálenost setrvačné síly od těžištní roviny. Při vyvažování protizávažím na koncích klikové hřídele dostáváme rovnici:



$$m_v \cdot r_v \cdot \omega^2 \cdot b = m_r \cdot r \cdot \omega^2 \cdot a, \quad (24)$$

kde $b/2$ je vzdálenost protizávaží od těžištní roviny. Pro výpočet protizávaží platí rovnice:

$$m_v = m_r \cdot \frac{r}{r_v} \cdot \frac{a}{b} \text{ [kg]}. \quad (25)$$



Obr. 29 Vyvažování momentů setrvačných sil rotujících částí [8]

3.2.4 VYVAŽOVÁNÍ MOMENTŮ SETRVAČNÝCH SIL POSUVNÝCH SOUČÁSTÍ I. A II. ŘÁDU

Vyvažování momentů setrvačných sil posuvných součástí lze například popsat na tříválcovém řadovém motoru s pravidelným rozestupem klikových čepů po 120° . Výsledný moment I. řádu působící na tříválcový řadový motor má dle obr. 30 tvar:

$$M_I = -m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) \cdot a + 0 + m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cos(\alpha + 240) \cdot a \text{ [N} \cdot \text{m]}, \quad (26)$$

po úpravě dostaneme:

$$M_I = \sqrt{3} \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot a \cdot \sin(\alpha + 300) \text{ [N} \cdot \text{m]}. \quad (27)$$

Výsledný moment působí v rovině kolmo k ose válců, proto ho není možné vyvážit jen protizávažím na klikové hřídeli. U vyvažování momentů setrvačných sil posuvných součástí se používají vyvažovací hřídele. Vyvažovací hřídele mají stejnou úhlovou rychlost jako kliková hřídel a pohybují se proti sobě (obr. 30). Výsledný moment vyvažovacích hřídelí vyvažuje moment I. řádu. Rovnice vyvážení momentu I. řádu má tvar [21]:

$$2 \cdot m_v \cdot r_v \cdot \omega^2 \cdot b = \sqrt{3} \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot a, \quad (28)$$

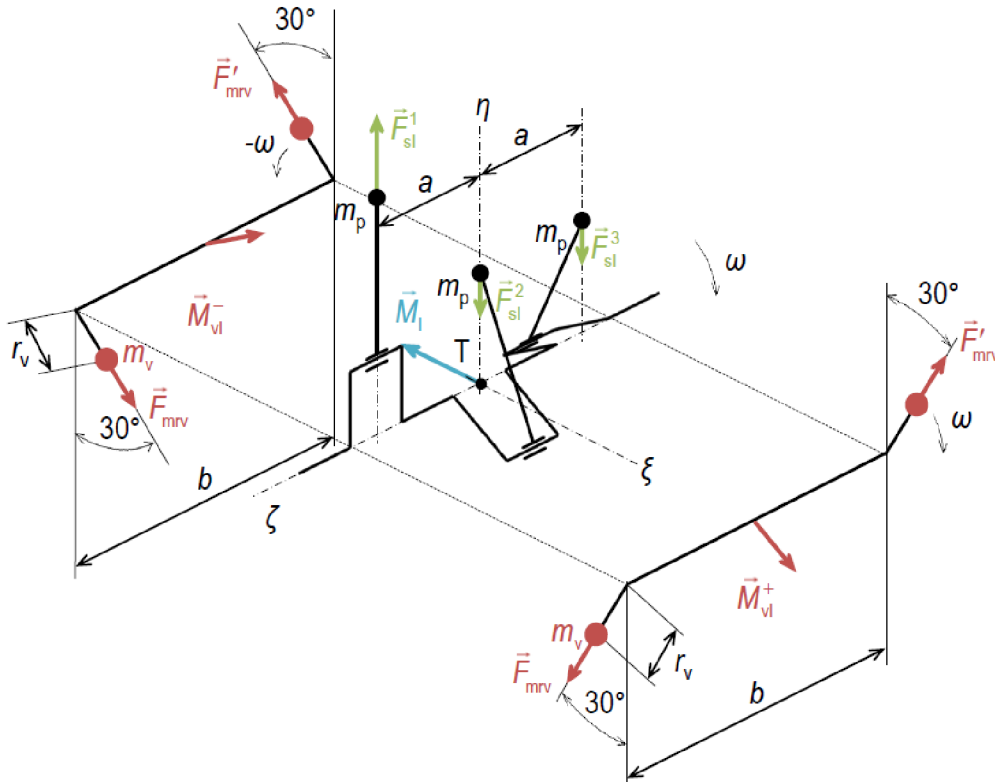
upravená rovnice pro výpočet hmotnosti vývažků na vyvažovací hřídeli:

$$m_v = \frac{\sqrt{3} \cdot m_p \cdot r}{r_v \cdot b} \text{ [kg]}. \quad (29)$$

U vyvažování momentů setrvačných sil II. řádu se postupuje obdobně. Na vyvážení je potřeba také dvou vyvažovacích hřídelí, které se otáčejí dvojnásobnou rychlostí jako kliková hřídel.



Vyvažování momentů II. řádu se vyvažuje jen výjimečně. V praxi se velmi často používá zjednodušení konstrukce, kdy se používá jedna vyvažovací hřídel a závaží na klikové hřídeli. Pokud není použita vyvažovací hřídel, dá se umístit závaží na řemenici a setrvačník.



Obr. 30 Vyvažování momentů setrvačných sil posuvných částí I. řádu [8]

3.3 VYVAŽOVACÍ SOUČÁSTI A STROJE

Klikové hřídele se vyvažují konstrukčně, přidáním protizávaží na klikovou hřídel nebo připojením vyvažovacích hřídelí ke klikové hřídeli. Často se tyto varianty kombinují pro zjednodušení konstrukce a cenu motoru. V praxi se setkáváme se statickou a dynamickou nevyvážeností rotorů:

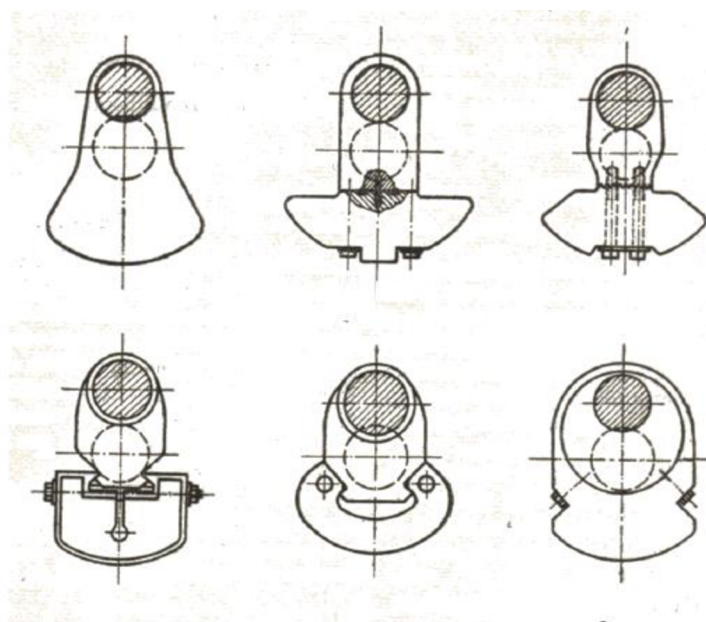
- statická – těžiště neleží na ose rotace,
- dynamická – hlavní osy setrvačnosti nejsou totožné s osou rotace.

3.3.1 PROTIZÁVAŽÍ KLIKOVÝCH HŘÍDELÍ

Protizávaží se umísťuje na protilehlou stranu ramene kliky. Spojení protizávaží s ramenem kliky musí zachytit jak setrvačnou sílu, tak tečnou sílu od nerovnoměrnosti chodu motoru. Protizávaží bývá připevněno ke klikové hřídeli (nalisováním, šroubovým spojem) nebo je jeho součástí při výrobě. Tvary protizávaží a upevnění jsou na obr. 31. Při dynamickém vyvažování se odebrává materiál z jednotlivých protizávaží. Pro zvýšení hmotnosti protizávaží se vkládají do vyvrtaných otvorů závaží s materiálem o vyšší hustotě (obr. 32). U závodních



automobilů, kde je potřeba maximální výkon, záleží i na tvaru a povrchu protizávaží, které mají aerodynamický tvar pro zmenšení odporu vzduchu. [28]



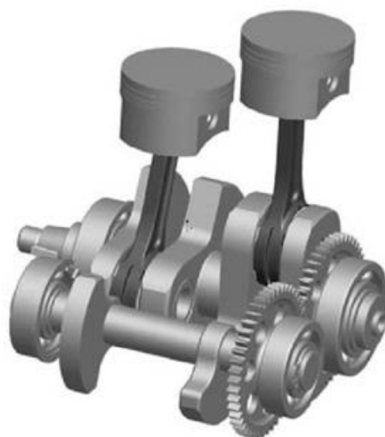
Obr. 31 Tvary a upevnění protizávaží [21]



Obr. 32 Kliková hřídel se závažím o vyšší hustotě [29]

3.3.2 VYVAŽOVACÍ HŘÍDELE

Vyvažovací hřídele, jako už bylo zmíněno, slouží k vyvažování setrvačných sil a momentů posuvných součástí I. a II. řádu. Při jejich použití klesají vibrace a zlepšuje se chod motoru. Hřídele jsou poháněny klikovou hřídelí převážně přes ozubené soukolí (obr. 33). Silový, popřípadě momentový účinek je dán vhodně tvarovanými vývažky.



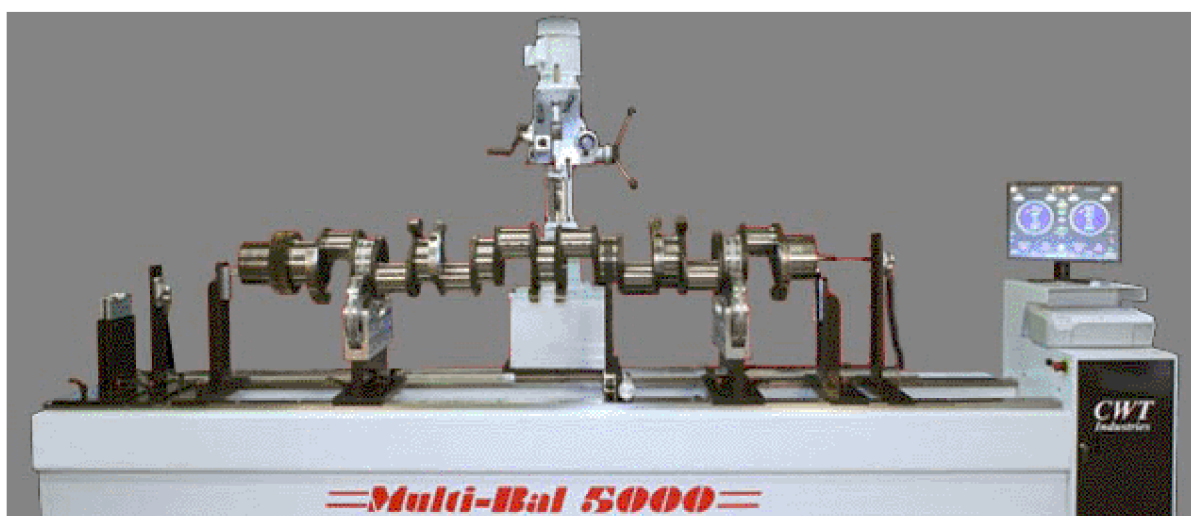
Obr. 33 Klikový mechanismus dvouválcového motoru s vyvažovací hřídeli [30]

3.3.3 STATICKÉ VYVAŽOVÁNÍ

Statically balanced engines have a small number of cylinders and operate at low speeds. The crankshaft is placed together with the flywheel in a balancing machine on prismatic or block supports, where the crankshaft is brought into static equilibrium. Balancing is done by removing material from the places where the crankshaft is overbalanced. [20]

3.3.4 DYNAMICKÉ VYVAŽOVÁNÍ

Engines with a high number of revolutions are dynamically balanced. In dynamic balancing, the crankshaft is rotated with the flywheel at high speed to determine the magnitude and location of the unbalanced moments. Just as in static balancing, material is removed and the inertia moments are reduced. [20]



Obr. 34 Vyvažovací stroj Multi-Bal 5000 [31]



ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo rešeršní shrnutí konstrukce klikových hřídelí. V první části se práce zabývá porovnáním víceválcových automobilových motorů, především konstrukcí a vibracemi motoru. Je velký počet možností uspořádání válců motoru, a proto byl vytvořen souhrn nejpoužívanějších variant uspořádání válců motoru a navíc několik konstrukčně zajímavých motorů. Z hlediska vyváženosti chodu motoru bez potřebného vyvažování jsou na tom nejlépe motory se šesti válci v jedné řadě nebo alternativa dvou řad po šesti válcích do tvaru V. Tyto motory jsou dokonale vyváženy, ale u běžných automobilů se s takovým počtem válců neseznamujeme. Nejpoužívanější pohonnou jednotkou je tedy řadový čtyřválec, který sice není dokonale vyvážen, ale díky menšímu počtu válců, a tím i nižším objemům a třecím ztrátám, mají motory lepší spotřebu. Pozoruhodnou konstrukci motorů má na svědomí Firma Volkswagen AG, kde motor zabírá s velkým počtem válců malou zástavbovou plochu, díky vhodnému uspořádání válců a dobře konstrukčně zvládnuté klikové hřídeli.

V druhé části je přehled výroby klikových hřídelí. Hlavním parametrem při výrobě klikových hřídelí je tvar a jejich mechanické vlastnosti, od toho se odvíjí výběr materiálu, který lze dobře povrchově upravovat. Výhodou dnešní doby při výrobě prototypů klikových hřídelí je pokrok CNC obráběcích strojů a tím vytvoření klikové hřídele podle přesných požadavků. To umožní rychlejší a snadnější testování klikových hřídelí u nových motorů.

Poslední částí práce bylo vyvažování klikového mechanismu u spalovacích motorů. V důsledku obsáhlosti vyvažování jednotlivých motorů byla zvolena varianta ukázky postupů vyvažování setrvačných sil a momentů setrvačných sil u pár vybraných motorů. Ne vždy se u motorů vyplácí úplné vyvažování z ekonomického a konstrukčního hlediska, a proto se hledá nejlepší možná alternativa částečného vyvážení. Z tohoto důvodu by se mohla další práce zabývat možnostmi vyvažování jednotlivých koncepcí motorů.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory*. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [2] Crankshaft. In: *Motorservice* [online]. Ms Motorservice International GmbH. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.ms-motorservice.com/nl/products-catalogues/bf-products/crankshaft/>
- [3] SÝKORA, Jan a Zdeněk SLÁDEK. *Části strojů IV: klikový mechanismus*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1972, 189 s.
- [4] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů. 2. svazek. 5. přeprac. vyd.* Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1990, 707 s. ISBN 80-03-00426-8.
- [5] PEKÁREK, Stanislav. *Technologie oprav 1* [online]. Střední škola technická a zemědělská, Nový Jičín, 2015 [cit. 2016-05-23]. ISBN 978-80-88058-23-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/Cover.html>
- [6] KOVAŘÍK, L., FERENCEY, V., SKALSKÝ, R., ČÁSTEK, L. *Konstrukce vozidlových spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 1992. ISBN 80-206-0131-7.
- [7] WAN, Mark. Engine Smoothness. In: *AutoZine Technical School* [online]. ©1998-2000 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: http://www.autozine.org/technical_school/tech_index.html
- [8] PÍŠTĚK, Václav a Lubomír DRÁPAL. *Hnací ústrojí (přednáška)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. Studijní opory.
- [9] HEISLER, H. *Advanced Engine Technology*. SAE International, First edition 1995. ISBN 1-56091-734-2.
- [10] BEDNAŘ, Marek. 10 klíčových koncepcí motorů: jaké mají výhody a nevýhody?. In: *Autoforum* [online]. 25.8.2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/10-klicovych-koncepci-motoru-jake-maji-vyhody-a-nevychody/>
- [11] ERJAVEC, Jack. *Automotive technology: a systems approach*. 5th edition. United States: Delmar Cengage Learning, 2009. ISBN 14-283-1149-1.
- [12] Ferrari 599 GTB Fiorano. In: *Ferrari Auto* [online]. Ferrari S.p.A. ©2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://auto.ferrari.com/en_EN/sports-cars-models/past-models/599-gtb-fiorano/
- [13] Főtengely. In: *Geree.hu - A motorok világa* [online]. ©2009-2015 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.geree.hu/motor-mechanika/a-hengerfejtomites-alatt/fotengely/>
- [14] *Axali da meoradi manqanebi - Drive.ge* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://news.drive.ge/index.php?m=44&newsid=3634&kw=%E1%83%9E%E1%83%A0%E1%83%90%E1%83%95%E1%83%90%20%E1%83%92%E1%83%94>



- [15] RAUSCHER, J.: *Spalovací motory* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. Studijní opory.
- [16] BEDNÁŘ, Bohumír. *Technologičnost konstrukce I*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03268-X.
- [17] Cast vs forged crankshaft. In: *Drop Forging, Closed die forging* [online]. Ningbo Fly Drop Forge Co. ©2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.dropforging.net/cast-vs-forged-crankshaft.html>
- [18] SHEPARD, Larry. *How to hot rod small-block Mopar engines*. New York: HPBooks, c2003. ISBN 15-578-8405-6.
- [19] Billet crank shaft. In: *Jun Auto Japan* [online]. Tanaka Industrial Co. ©1997-2014 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.junauto.co.jp/products/crankshaft/index.en.html>
- [20] RICHTER, Antonín. *Konstrukce spalovacích motorů I. díl. Klikový mechanismus*. Brno: VUT Brno, 1961, 401 s.
- [21] Kolektiv VÚNM a ČKD. *Naftové motory čtyřdobé, 1 díl*. Druhé vydání. Praha: STNL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962. L123-B3-IV-41/2490.
- [22] LEINVEBER, Jan, Pavel VÁVRA a Jaroslav ŘASA. *Strojnické tabulky*. 3. uprav. a dopl. vyd. Praha: Scientia, 1999, 911 s. ISBN 80-7183-164-6.
- [23] 4340 Alloy Steel. In: *NeoNickel - Suppliers of Speciality Metal Alloys and Nickel Alloys* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.neonickel.com/cS/alloys/alloy-steels/4340-alloy-steel/>
- [24] MAVRIGIAN, Mike. *Rebuild LT1/LT4 Small-Block Chevy Engines HP1393*. New York: HPBooks, 2002. ISBN 9781101522998.
- [25] WRIGHT, Gus. *Fundamentals of medium-heavy duty diesel engines*. Burlington: Jones & Bartlett Publishers, 2015. ISBN 978-128-4067-057.
- [26] ROUŠ, Jiří. NITRIDOVÁNÍ. In: *Katedra energetických strojů a zařízení* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/about/projekty/enazp/projekty/14_Strojirenska-technologie_35-37/36_MMP/186_Nitridovn---Rous---P1.pdf
- [27] DRIML, Bohuslav. KALENÍ A POPOUŠTĚNÍ. In: *Webzdarma.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [28] MAVRIGIAN, Mike. *Modern engine blueprinting techniques*. North Branch: CarTech Inc, 2013. ISBN 978-161-3250-471.
- [29] F1 engine inside - F1 engine secrets. In: *Quartermile Development Tuning* [online]. 13.2.2010 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.quartermile.ws/forum/index.php?topic=5870.0>



- [30] HOPE - Four stroke engine. In: *Hybrid Opposite Piston Engine - HOPE & Portable Range Extender* [online]. ©2012 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.hybrid-engine-hope.com/hope-four_stroke_engine
- [31] Crankshaft Balancers. In: *Balancing Machines Home by CWT Industries - Crank & Crankshaft Balancers & More* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.cwtindustries.com/crankshaft%20balancer.htm>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

b	[m]	vzdálenost protizávaží
BMW		Bayerische Motoren Werke AG
CNC		computer numeric control
F_r	[N]	setrvačná síla rotujících součástí
F_s	[N]	setrvačná síla posuvných součástí
F_{sI}	[N]	setrvačná síla posuvných součástí I. řádu
F_{sII}	[N]	setrvačná síla posuvných součástí II. řádu
F_{vI}	[N]	setrvačná síla vývažku I. řádu
F_{vI}^{η}	[N]	setrvačná síla vývažku v ose válce
F_{vI}^{ξ}	[N]	setrvačná síla vývažku kolmá na osu válce
F_{vII}	[N]	setrvačná síla vývažku II. řádu
HB		tvrdost podle Brinella
HRC		tvrdost podle Rockwella
l	[m]	vzdálenost síly od těžištní roviny
M_I	[N·m]	moment setrvačné síly rotujících součástí I. řádu
M_{II}	[N·m]	moment setrvačné síly rotujících součástí II. řádu
m_p	[kg]	celková redukovaná hmotnost posuvných součástí klikového mechanismu
m_r	[kg]	celková redukovaná hmotnost rotujících součástí klikového mechanismu
M_r	[N·m]	moment setrvačné síly rotujících součástí
m_v	[kg]	hmotnost vývažku
m_{vI}	[kg]	hmotnost vývažku I. řádu
m_{vII}	[kg]	hmotnost vývažku II. řádu otáčející
r	[m]	poloměr kliky
r_v	[m]	vzdálenost těžiště vývažku od osy klikové hřídele
r_{vI}	[m]	vzdálenost těžiště vývažku I. řádu od osy otáčení
r_{vII}	[m]	vzdálenost těžiště vývažku II. řádu od osy otáčení
α	[°]	úhel pootočení kliky
$\varphi_{(2)}$	[°]	úhel mezi klikami hřídele dvoudobého motoru
$\varphi_{(4)}$	[°]	úhel mezi klikami hřídele čtyřdobého motoru
ω	[s ⁻¹]	úhlová rychlost otáčení klikové hřídele
λ	[-]	ojniční poměr