



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A
DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

POVRCHOVÉ CHARAKTERISTIKY A MATERIÁLY VÁLCŮ SPALOVACÍCH MOTORŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ZLOCH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ MARŠÁLEK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Zloch

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Povrchové charakteristiky a materiály válců spalovacích motorů

v anglickém jazyce:

Surface Characteristics and Materials of Internal Combustion Engines Piston Liners

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vypracovat přehled povrchových úprav a materiálů v současnosti používaných při výrobě válců spalovacích motorů. Dále provést přehled běžně dosahovaných parametrů povrchových drsností získaných těmito povrchovými úpravami.

Cíle bakalářské práce:

- Úvod
 - Rozbor konstrukce spalovacího motoru
 - Přínosy povrchových úprav a speciálních materiálů, důvody jejich použití
- Rozdělení válců z hlediska konstrukce
- U jednotlivých druhů povrchových úprav popsat
 - Technologii
 - Charakteristiku procesu
 - Dokončovací operace
 - Charakteristika povrchu
 - Aplikace
- U jednotlivých druhů používaných materiálů (monolitické bloky) popsat
 - Technologii
 - Charakteristiku procesu
 - Dokončovací operace
 - Charakteristika povrchu
 - Aplikace
- Závěr

Seznam odborné literatury:

- [1] RAUSCHER, J. Vozidlové motory, studijní opora ve formátu pdf. Brno.
- [2] DIENWIEBEL, Martin; PÖHLMANN, Klaus; SCHERGE, Matthias. Origins of the wear resistance of AlSi cylinder bore surfaces studies by surface analytical tools. ScienceDirect: Tribology International [online]. 13.5.2007, 40, [cit. 2010-11-02]. Dostupný z WWW: www.sciencedirect.com.
- [3] Třístupňové honování. Technický týdeník : 2. rozšířené vydání k MSV Brno. 7.9.2010, 58, 18, s. 16.
- [4] ADAMIŠ, Pavel ; MOHYLA, Miroslav. Vlastnosti kompozitních povlaků s katodicky vylučovanou maticí. In Metal 2011 [online]. Ostrava

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Maršálek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 5.11.2013

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je odbornou rešerší a zabývá se problematikou pracovních povrchů válců spalovacích motorů. Uvádí technologie a koncepty, jež jsou uplatňovány v produkci pístových spalovacích motorů v současné době. Charakteristika každé z těchto technologií obsahuje popis výrobních procesů, dokončovacích operací a nejčastějších aplikací. Dále jsou uvedeny vlastnosti, struktury a dosahované drsnosti povrchů vytvořených těmito dostupnými technologiemi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Alusil®, Silitec®, Goedel®, tepelné sprejování, Lokasil®, spalovací motor, vložky válců, nízkotlaké lití, Nikasil®, laserové legování

ABSTRACT

This work is professional research and addresses the issues of working surfaces of cylinders of internal combustion engines. It describes the technologies and concepts that are applied in the production of internal combustion engines currently. The characteristics of each of these technologies provides a description of the production process, finishing and the most common applications. Furthermore, the properties, structure, and achieved surface roughness created by these technologies are available.

KEYWORDS

Alusil®, Silitec®, Goedel®, thermal spraying, Lokasil®, combustion engine, cylinder liners, low pressure die casting, Nikasil®, laser alloying



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Zloch, J. *Povrchové charakteristiky a materiály válců spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 52 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Ondřej Maršálek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 30. května 2014

.....

Jan Zloch



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu práce Ing. Ondřeji Maršálkovi za cenné připomínky a rady, které mi tvorbu práce usnadnily. Dále mé poděkování patří mé rodině a přátelům za podporu během tvorby této práce.



OBSAH

Úvod	10
1 Rozbor konstrukce spalovacího motoru	11
1.1 Nepohyblivé části motoru	11
1.1.1 Válců	11
1.1.2 Kliková skříň	11
1.1.3 Hlavy válců	12
1.1.4 Sací a výfukové potrubí	12
1.2 Pohyblivé části motoru	12
1.2.1 Píst	12
1.2.2 Ojnice	12
1.2.3 Klikový hřídel	13
1.2.4 Setrvačnick	13
1.3 Další části motoru	13
2 Přínosy povrchových úprav a speciálních materiálů	14
2.1 Monolitický koncept	14
2.2 Quasi-monolitický koncept	14
2.3 Heterogenní koncept	15
2.4 Požadavky kladené na vnitřní povrch válců	15
2.5 Parametry povrchových drsností	16
3 Rozdělení válců z hlediska konstrukce	18
3.1 Válců dvoudobého rychloběžného motoru	18
3.2 Válec vzduchem chlazeného čtyřdobého motoru	20
3.3 Válec kapalinou chlazeného čtyřdobého motoru	20
3.3.1 Druhy uspořádání válců ve vozidlových motorech	20
3.3.2 Chladicí plášť	21
4 Monolitický koncept: Alusil®	22
4.1 Technologie	22
4.2 Charakteristika procesu	22
4.3 Dokončovací operace	23
4.4 Charakteristika povrchu	25
4.5 Hodnoty drsností povrchu	26
4.6 Aplikace	27
5 Quasi-monolitické koncepty	18
5.1 LOKASIL®	28
5.1.1 Technologie	28



5.1.2	Charakteristika procesu	28
5.1.3	Charakteristika povrchu.....	30
5.1.4	Aplikace.....	31
5.2	Povlaky nanášené pomocí tepelného sprejování.....	31
5.2.1	Technologie	31
5.2.2	Počáteční příprava ošetřovaného povrchu	33
5.2.3	Materiály pro tvorbu povlaků	34
5.2.4	Aplikace a přínosy tepelně nanášených povlaků	35
5.2.5	Dokončovací operace a dosažené drsnosti výsledného povrchu	36
5.3	Laserové legování křemíkem	37
5.4	Elektrolytické vytváření ochranných povlaků	39
5.4.1	NCC- kompozitní nikl-keramické povlaky	39
5.4.2	Plasmová elektrolytická oxidece- PEO	40
6	Heterogenní koncepty.....	42
6.1	Vložky z nadeutektické slitiny Al-Si	42
6.1.1	Silitec®	42
6.1.2	Albond®	43
6.2	Vložky z šedé litiny	44
6.2.1	Technologie klasických litinových vložek	44
6.2.2	Tepelně sprejované vložky Goedel®	44
6.2.3	Výsledný povrch, dokončovací operace a drsnosti povrchu litinových vložek	45
	Závěr.....	46
	Použité informační zdroje.....	47
	Seznam použitých zkratk a symbolů	52



ÚVOD

Spalovací motory jsou stroje, které přeměňují tepelnou energii vzniklou při spalování paliva na energii mechanickou, jež lze dále využít k pohonu daného zařízení či hnaného stroje. Historicky se spalovací motory objevily poprvé v 19. století a jejich vývoj až do dnešní doby přinesl širokou škálu možných konstrukčních řešení spalovacích motorů vhodných pro různé aplikace.[52]

Spalovací motory můžeme rozdělit na motory s vnitřním a vnějším spalováním. Rozdíl mezi těmito je v pracovní látce. Touto může být samotné palivo (vnitřní spalování) nebo látka zprostředkovávající přenos tepla (vnější spalování). Motory s vnitřním spalováním lze dále dělit na pístové a lopatkové. Problematika, kterou se zabývá tato práce, se bezprostředně váže na pístové spalovací motory s vnitřním spalováním. U těchto motorů probíhá spalování paliva v prostoru válce, kde je potenciální tlaková energie spalovaného paliva využívána k uvedení pístu do pohybu.[52][53]

V pístových spalovacích motorech koná píst vratný přímočarý pohyb a je při něm veden válcem motoru. Je zřejmé, že plochy těchto dvou součástí budou při tomto vzájemném pohybu velmi namáhány a požadavky na jejich povrchy budou velmi vysoké v mnoha ohledech. Požadavky na dostatečnou odolnost proti opotřebení, dobré kluzné vlastnosti a celkovou tribologii těchto povrchů se pak odráží jak ve výběru vhodných materiálů pro výrobu těchto součástí, tak v dokončovacích operacích aplikovaných po jejich výrobě. Tato problematika bude předmětem zájmu v dalších částech této práce.[46][52]



1 ROZBOR KONSTRUKCE SPALOVACÍHO MOTORU

Před vlastním pojednáním o pracovních površích válců spalovacích motorů bude vhodné na začátek alespoň ve stručnosti podat náhled na spalovací motory, co se konstrukce týče. Rozbor lze provést rozdělením motoru na součásti, které tvoří jeho nepohyblivou a pohyblivou část.[4]



Obr. 1 Průhledný model motoru Ford EcoBoost [56]

1.1 NEPOHYBLIVÉ ČÁSTI MOTORU

Mezi nepohyblivé neboli pevné části motoru řadíme klikovou skříň, blok válců, hlavu válců, sací a výfukové potrubí. Kliková skříň a blok válců tvoří blok motoru, který v současnosti bývá vyráběn jako jeden odlitek. Řešení motorového bloku jako samostatné klikové skříně, na niž se přišroubují válce v celém bloku nebo jednotlivě, se dosud používá u motorů chlazených vzduchem, případně u velkých lodních motorů.[53]

1.1.1 VÁLCE

Účelem válců motoru je zachycování tlaků, vznikajících během pracovního oběhu, spolu s hlavou válců a pístem spoluvytvářet spalovací prostor, rychle odvádět teplo do chlazení motoru a vést píst během pracovního oběhu.[4][53]

1.1.2 KLIKOVÁ SKŘÍŇ

Účelem klikové skříně je nést ložiska pro uložení klikového hřídele a u motoru s rozvodem OHV nést i ložiska pro uložení vačkového hřídele. Ve většině případů tvoří s válci monolitický blok, samostatně vyrobená kliková skříň je použita pouze u vzduchem chlazených motorů automobilů, u dvoudobých a rychloběžných motorů (motocyklové motory) bývá kliková skříň odlita vcelku s převodovou skříní.[4]



1.1.3 HLAVY VÁLCŮ

Hlava válců uzavírá pracovní prostor ve válci a stejně jako válec a píst spoluvytváří spalovací prostor, přičemž také odvádí podstatné množství tepla do chlazení motoru. Jsou zde umístěny svíčky, popř. vstřikovače paliva a u čtyřdobých motorů ventily, popř. vačkový hřídel.[4]

1.1.4 SACÍ A VÝFUKOVÉ POTRUBÍ

Sací potrubí je přišroubováno k hlavě válců a slouží k přivedení zápalné směsi do sacích kanálů a dále do válce motoru v případě zážehového motoru nebo vzduchu v případě motoru vznětového a zážehového s přímým vstřikem paliva. Výfukový systém pak zajišťuje odvod spalin z válců motoru.[4][53]

1.2 POHYBLIVÉ ČÁSTI MOTORU

Za pohyblivé části motoru považujeme píst, ojnici a klikový hřídel se setrvačníkem (klikové ústrojí).[4][43]



Obr. 2 Písty spojené pomocí ojnic s klikovým hřídelem[54]

1.2.1 PÍST

Píst spalovacího motoru zachycuje tlak plynů vznikající při hoření a přenáší jeho sílu na ojnici a dále na klikový hřídel. Další funkcí je utěsnění spalovacího prostoru od prostoru klikové skříně. Píst na sobě nese pístní kroužky, které slouží k dokonalému utěsnění spalovacího prostoru a určení optimální výšky mazací vrstvy oleje mezi pláštěm pístu a povrchem válce.[4][23][43]

1.2.2 OJNICE

Ojnice je k pístu připojena za pomoci pístního čepu, ojnicí se píst spojuje s klikovým hřídelem. Ojnice přenáší sílu z pístu na klikový hřídel. Důležitou funkcí je, že ojnice mění přímočarý vratný pohyb pístu na otáčivý pohyb klikového hřídele.[4]



1.2.3 KLIKOVÝ HŘÍDEL

Klikový hřídel přenáší větší část točivého momentu na setrvačnick a dále na spojku motorového vozidla a menší částí točivého momentu pohání ventilový rozvod, olejové čerpadlo alternátor atd. [4]

1.2.4 SETRVAČNÍK

Setrvačnick akumuluje pohybovou energii, která je potřebná k překonání pasivních odporů při nepracovních zdvizích, přispívá k rovnoměrnosti chodu motoru a při spouštění motoru umožňuje velký převod mezi elektrickým spouštěčem a motorem.[4]

1.3 DALŠÍ ČÁSTI MOTORU

Dalšími částmi spalovacího motoru jsou systémy chlazení, mazání, palivový systém (karburátor či vstřikovač paliva) a u čtyřdobých motorů rozvodové mechanismy. Rozvodové mechanismy řídí plnění válců motoru směsí nebo vzduchem a ovládají odvod zplodin vzniklých hořením z válců ven.[4]



2 PŘÍNOSY POVRCHOVÝCH ÚPRAV A SPECIÁLNÍCH MATERIÁLŮ

Základními materiály pro výrobu bloku válců jsou šedá litina a v poslední době převažující hliníkové slitiny.[53]

V důsledku snahy o snížení spotřeby paliva a emisí CO₂ z osobních vozidel, se podíl hliníkových bloků motorů (Al bloků) na trhu stále zvyšuje, tento trend je zapříčiněn existencí mnoha výhod, které Al bloky oproti šedé litině poskytují. Přední výhodou je nízká hmotnost, a to s ohledem na skutečnost, že blok motoru nabízí nejvyšší potenciál pro snížení hmotnosti celého vozidla. Dále lepší tepelná vodivost hliníkové slitiny, tedy lepší schopnost odvádět teplo do chladicí soustavy, poskytuje možnost vysoké zatížitelnosti motoru.[33][53]

Oproti značnému množství výhod mají Al bloky až 2,5 krát vyšší cenu než bloky litinové. U bloků motoru z šedé litiny je také možno pracovní plochu válce zhotovit přímo z odlévaného materiálu. Vzhledem k tomu, že většina technických slitin hliníku (s výjimkou nadeutektické slitiny Al-Si) poskytuje pouze špatnou odolnost proti opotřebení, existují různá technická řešení, která umožňují vytvoření pracovní plochy vrtání válce, která je odolná vůči účinkům tření při kontaktu s pístními kroužky.[46]

U bloků z Al slitin můžeme charakterizovat typy provedení bloku válců jako monolitické, quasi-monolitické a heterogenní bloky. Tyto tři skupiny budou následně blíže charakterizovány.[53]

2.1 MONOLITICKÝ KONCEPT

Monolitické provedení bloku válců může být provedeno z tradičně používané šedé litiny nebo z nadeutektické slitiny hliníku a křemíku (Al-Si). Z již zmíněných důvodů se použití šedé litiny nevyskytuje v tak hojné míře, nicméně určité procento motorů z tohoto materiálu zde stále je i dnes. Jako příklad lze uvést dieselové motory, vyžadující větší tuhost bloku válců, a speciálně použití pro dlouhé řadové lodní motory je přímo žádoucí, vzhledem k nutnosti zatížit spodní část lodi. Samotné nahrazování šedé litiny ve výrobě motorů slitinami hliníku se započalo přibližně v 70. letech minulého století, kdy byly použity pro výrobu velkoobjemových motorů a motorů s mnoha válci pro použití v luxusních automobilech. Oproti šedé litině je tu druhý materiál v dnešní době hojně používaný pro výrobu monolitických bloků motoru, zmíněná nadeutektická slitina Al-Si.[25][46]

Pro nadeutektické Al-Si slitiny jsou požadovány relativně přísné limity pro množství prvků nečistot. Výroba takového bloku motoru vyžaduje lití do kokil pod nízkým tlakem, což je ekonomicky i časově náročný proces. Proto se používají především pro vysoce výkonné benzínové motory vyráběné ve středních sériích, jako jsou motory V8 či V12 například od výrobců BMW, Mercedes-Benz nebo Porsche. Mnohem méně jsou vhodné pro dnes masovou výrobu řadových automobilových motorů.[34][46]

2.2 QUASI-MONOLITICKÝ KONCEPT

Za účelem eliminace nevýhod výše zmíněného monolitického konceptu byl vyvinut koncept quasi-monolitický, který spočívá ve vytvoření žádané mikrostruktury pouze tam, kde je jí skutečně třeba, tedy pouze na pracovním povrchu vrtání válce. Výroba těchto bloků spočívá ve vložení porézní kostry válce, tvořené částicemi či vlákny keramiky nebo křemíku, do



kokily a následné infiltraci hliníkové slitiny při licím procesu. Ve výsledku takto získáme nejen odolný povrch, ale také dojde ke zpevnění samotného bloku. Tato technologie nese označení Lokasil®.[46][52]

Další možností pro vytvoření bloku motoru typu quasi-monolitický je ošetření vrtání válce vrstvami odolných materiálů galvanickým pokovením tepelným nástřikem nebo laserovým legováním. Příklady galvanického pokovování jsou metody Nikasil® a Galnical®. Nástřik povrchů se provádí plasmovým dělem (Rotaplasma®), při laserovém legování (Tribosil®) je povrch vrtání lokálně legován prvky zapříčiňujícími jeho zvýšenou tvrdost. [46]

2.3 HETEROGENNÍ KONCEPT

Základním rysem bloků motoru heterogenního konceptu je, že jsou vyrobeny jako odlitky z levné hliníkové slitiny, do kterých jsou zalisovány nebo případně zality či jiným způsobem zasazeny vložky z odolného materiálu. Materiálem vložek je nejčastěji šedá litina pro svoje výborné tribologické a mechanické vlastnosti. Se snahou o snižování hmotnosti se vložky vyrábí také z již zmíněné odolnější nadeutektické A-Si slitiny (Albond®, Silitec®). [46][53]

Samotná výroba heterogenních bloků může být realizována buď zalisováním vložky, nebo vložením vložky do formy odlitku a jejím následným zalitím. U zalévaných vložek se z důvodu vytvoření lepší vazby mezi základním materiálem bloku a vložkou používá metoda tepelného stříkání, kdy je vnější povrch vložky před zalitím opatřen speciálním povrchem. Všechny tyto metody budou dále v práci blíže specifikovány.[46]

2.4 POŽADAVKY KLADENÉ NA VNITŘNÍ POVRCH VÁLCŮ

Při výrobě jak samotných bloků válců i při řešení povrchu vrtání (vložky, povlaky) je obecně potřeba dosáhnout nízké hmotnosti výrobků. Materiály musí mít dobré předpoklady k recyklaci, výroba musí být šetrná k životnímu prostředí a náklady co nejnižší.[46]

Základní aspekty zohledňující hlavní požadavky na vnitřní stěny válců motoru lze shrnout do několika hlavních bodů.[46]

Předně je nejdůležitější funkcí povrchu vrtání válce působit jako vynikající kluzný povrch pro píst a pístní kroužek. Toto musí vnitřní stěna zajišťovat při současném minimálním opotřebení obou kluzných partnerů. Dalším aspektem je snaha o co nejmenší spotřebu maziva a také schopnost zajistit krátkodobou funkčnost bez mazání. Jinak řečeno při chodu motoru je motorový olej stále dodáván v dostatečném množství pro bezpečný kontakt, nicméně v případě nedostatku oleje, např. studené starty aj., je třeba, aby byl povrchem válce alespoň po určitou dobu udržován minimální olejový film, který zajistí bezpečný chod motoru. V neposlední řadě se požaduje, aby byl povrch válce odolný proti korozi, která je způsobena působením látek potřebných ke spalování i látek výfukových zplodin vzniklých při hoření nebo vznícení.[46]

Dále zmíněné požadavky jsou relevantní v případě heterogenního provedení válců motoru, tedy při použití litinových vložek.[46]

Je požadována dobrá tepelná vodivost mezi vložkou a samotným blokem motoru za účelem odvádění tepla a udržení dostatečně nízké teploty vnitřní stěny válce. V případě heterogenního provedení však může odvod tepla fungovat správně pouze tehdy, je-li dosaženo dobrého spojení vložky s okolním materiálem bloku motoru. Jako ideální lze považovat kovovou



vazbu mezi těmito materiály. Častokrát se ale vyskytuje pouze mechanické spojení (po nalisování).[46]

Vzhledem ke zvýšení kompaktnosti a snižování hmotnosti motoru je snaha dosáhnout minimální tloušťky stěn mezi vývrty jednotlivých válců (cílem je méně než 5 mm). To se pochopitelně projevuje na ztenčování samotných vložek a z tohoto důvodu se také stávají stále perspektivnějšími řešení, která odolný povrch vrtání vytvoří pomocí měnění struktury a složení povrchové vrstvy nebo potahováním speciálními materiály.[21][46]

Mechanické a termodynamické ztráty, opotřebení a emise způsobené spalováním motorového oleje mohou být ovlivněny především tribologickými vlastnostmi povrchu válců a jeho chováním při kontaktu s pístem či pístním kroužkem. Současný trend kompaktních motorů s vysokým výkonem s sebou nese zvýšené termomechanické zatížení (stěny válce musí vydržet vyšší tlaky při zapálení a vyšší rychlosti pístu) a zvyšuje tímto důležitost dobrých tribologických vlastností těchto povrchů. Za zmínění dále stojí také fakt, že přesné přizpůsobení povrchů a rozměrů válce vůči pístu či pístním kroužkům vede krom zmíněných ekonomických a ekologických hledisek také ke zvýšení výkonu motoru.[33][46][53]

2.5 PARAMETRY POVRCHOVÝCH DRSNOSTÍ

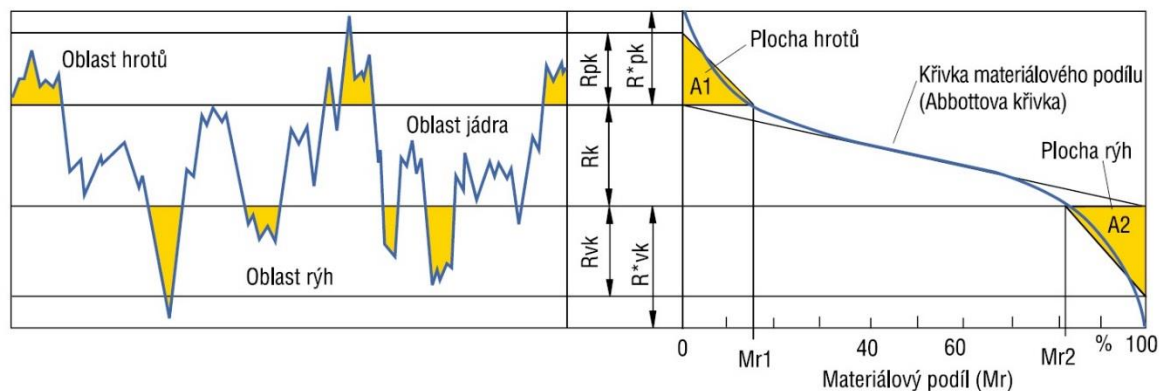
Aby bylo možné kvantitativně vyjádřit vlastnosti povrchů, které jsou dosaženy pomocí dokončovacích operací, je zavedeno několik parametrů popisujících drsnost povrchu. Mezi parametry nejčastěji používané pro charakterizování drsnosti pracovního povrchu válců v motoru řadíme R_a , R_z , R_k , R_{pk} a R_{vk} uváděné v hodnotách [μm] a dále Mr_2 , jež se uvádí v [%]. Těmito jsou ve většině publikací a v informativních brožurách firem popsány drsnosti dosažené při jednotlivých technologiích ošetřování pracovních povrchů válců. Všechny zmíněné parametry se řadí mezi parametry drsnosti povrchu dle DIN EN ISO. Následně budou uvedeny stručné charakteristiky a popsány významy jednotlivých zmíněných parametrů.[69]

R_a neboli průměrná aritmetická úchylka profilu je nejpoužívanější parametr ve všech odvětvích strojírenské praxe. Parametr R_z udává maximální výšku profilu. Zbylé jmenované parametry se řadí do skupiny veličin nosného podílu.[69]

První z veličin nosného podílu je parametr základní hloubka označující se jako R_k , tento parametr popisuje hloubku profilu jádra drsnosti. Jádro drsnosti je zóna povrchu s největším nárůstem podílu materiálu nad určitou hloubkou.[69] Hodnota tohoto parametru vychází z R_{pk} a R_{vk} . Tento parametr má do značné míry vliv na spotřebu motorového oleje, čím menší je hodnota R_k , tím menší je spotřeba oleje. Rovněž hodnota R_k ovlivňuje životnost povrchu a jeho odolnost proti opotřebení, opět pokud je hodnota R_k nižší, má povrch předpoklad k delší životnosti. Hodnota tohoto parametru je ovlivněna především honovacím procesem.[8][10][55]

Symbolem R_{pk} se značí redukováná výška špiček. Tato veličina udává střední výšku špiček profilu, vyčnívajících z profilu jádra drsnosti. Charakterizuje tedy nejvyšší zónu profilu, která je při zabíhání motoru kontaktem s pístním kroužkem velmi brzy odstraněna, nicméně i po tuto dobu její zvýšená hodnota může mít negativní vliv na strukturu povrchu a zvyšovat jeho opotřebení.[8][10][55]

Symbol R_{vk} značí naopak redukovanou hloubku rýh, popisuje tedy hodnotu střední hloubky rýh profilu zasahujících z profilu jádra drsnosti do materiálu. Tato zóna profilu je rovněž tvořena při honování a funguje jako zásobárna pro motorový olej.[8][55]



Obr. 3 Grafické znázornění veličin nosného podílu[10]

Veličina Mr udává podíl materiálu v jednotlivých vrstvách profilu. Hodnota, která je nejčastěji uváděna $Mr2$ určuje podíl materiálu pod profilem drsnosti. Tato spolu s R_{vk} určuje schopnost povrchu zadržovat olej.[5][10]

Následující tabulka uvádí hodnoty těchto parametrů, které jsou doporučeny pro průmyslovou výrobu motorů. První sloupec uvádí hodnoty, jakých by mělo být dosaženo v případě automobilových motorů pro běžné použití, tedy hodnoty, které zaručí dobrý výkon motoru a zároveň i vysokou životnost motoru. Naopak druhý sloupec uvádí hodnoty pro motory k závodnímu použití, kde se nižší třecí síly a hladší povrch upřednostňuje před životností motoru.[5]

Tab. 1 Doporučené hodnoty drsností pracovního povrchu válce pro dané použití[5]

Parametr	Běžné užití	Závodní použití
R_{pk}	0,2-0,3 μm	0,07-0,13 μm
R_k	0,6-0,9 μm	0,3-0,46 μm
R_{vk}	1-1,3 μm	0,5-0,635 μm
R_a	0,38-0,5 μm	- μm



3 ROZDĚLENÍ VÁLCŮ Z HLEDISKA KONSTRUKCE

V úvodní části práce bylo uvedeno, že válce patří k nepohyblivým částem motoru. Dále je zopakovat a doplnit, že válce v motoru musí splňovat tyto základní požadavky:

- stěny válce spolu s hlavou válců tvoří a ohraničují spalovací prostor
- zabezpečují vedení pístu a pohlcují silové účinky zapříčiněné tlaky vznikajícími při pracovním oběhu
- zajišťují odvedení tepla a tím chlazení spalovacího prostoru
- tvoří kluznou a těsnicí plochu pro pohyb pístu a zajišťují udržení souvislé vrstvy mazacího olejového filmu ve všech fázích a režimech práce motoru [4][52]

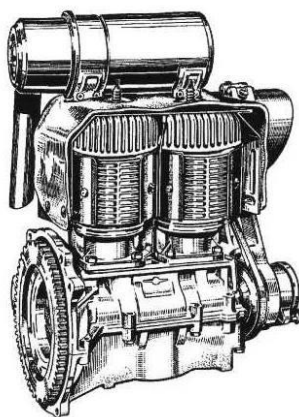
Zároveň se požaduje, aby válec byl dostatečně pevný a odolný proti tepelnému namáhání, které vzniká rozdílem teplot na vnitřních a vnějších stěnách válce. Tyto účinky spolu se silovými účinky od tlaku plynů při hoření jsou časově proměnné a způsobují únavové namáhání válce, proti němuž musí válce mít rovněž dostatečnou odolnost. Neméně důležitý požadavek se vztahuje k již dříve zmíněnému povrchu vrtání, který je namáhán třením spolu s abrazivními a korozivními účinky provozních látek a spalin.[52]

Mezi konstrukční hlediska, podle kterých můžeme motorové válce (bloky válců) rozdělit patří:

- typ chlazení
- uspořádání válců
- typ motoru- dvoutaktní/čtyřtaktní
- provedení bloku- monolitický/quasi-monolitický/heterogenní
- počet válců.[53]

3.1 VÁLCE DVOUDOBÉHO RYCHLOBĚŽNÉHO MOTORU

Dvoudobé rychloběžné motory mají nejširší použití v provedení s nižším objemem pro použití v motocyklech, zahradní technice aj., v ostatních odvětvích jsou pro svoji nízkou termickou účinnost a vysokou ekologickou zátěž spíše na ústupu. Pro svou přední výhodu, kterou je nízká hmotnost a jednoduchost konstrukce, jsou dodnes jednoválcové dvoutaktní motory používány především v terénních a motokrosových motocyklech. Válec rychloběžného dvoudobého motoru je povětšinou vyroben jako jeden díl, který je ke klikové

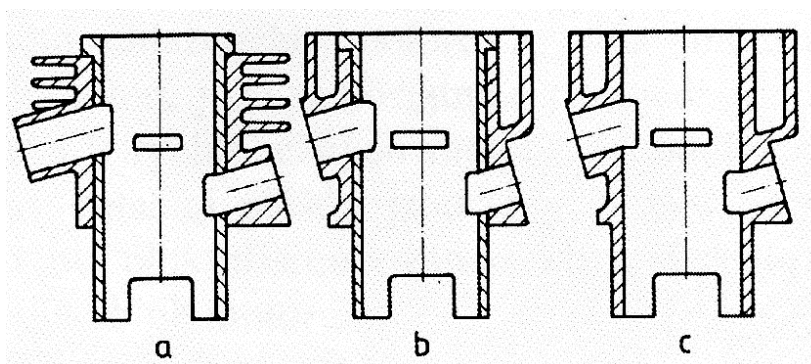


Obr. 4 Vzduchem chlazený dvouválcový dvoutaktní motor Trabant[57]



skříni připevněn pomocí dlouhých svorníků spolu s hlavou válce nebo pomocí příruby. U víceválcových motorů je rozdíl v uchycení na klikovou skříň mezi válci chlazenými kapalinou a válci chlazenými vzduchem. Zatímco vzduchem chlazené válce jsou přišroubovány jednotlivě, kapalinou chlazené válce bývají slity do bloku válců a ke klikové skříni jsou připevněny jako jeden celek. Typický zástupce motorů se vzduchem chlazenými válci je Trabant 601 na obr. 4.[53]

Válec dvoudobého motoru může být konstrukčně řešen třemi nejběžnějšími přístupy. Mezi tyto jmenujme heterogenní řešení válce chlazeného vzduchem, jehož chladicí plášť je vyroben z hliníkové slitiny. Do tohoto pláště je za tepla zalisována vložka válce z odolného materiálu (šedá litina), zalisování za tepla znamená ohřát hliníkový plášť na cca 200°C. Tímto vzniká mezi vložkou válce a pláštěm přesah v rozmezí 0.05 až 0.09 mm. Vzduchem chlazený válec je na obr.5a. Konstrukční řešení heterogenního válce se rovněž uplatňuje u válců chlazených vodou, takový válec ukazuje obr.5b. Tyto dvě provedení se liší způsobem utěsnění hlavy válce, kdy u válců chlazených vzduchem je do drážky ve válci vložen měděný kroužek zajišťující těsnost spalovacího prostoru. Na rozdíl od válců chlazených kapalinou kde se takto děje za pomoci „O“ kroužků vložených do drážek ve válci a pouzdru válce.[20][52]



Obr. 5 Konstrukční řešení válce dvoudobého motoru[53]



Obr. 6 Jednoválcový dvoutaktní motor KTM[58]

Třetím způsobem jak konstrukčně vyřešit válec dvoutaktního motoru spočívá v monolitickém provedení, kdy jsou v současné době válce takto vyráběny z hliníkové slitiny a povrch vrtání válce je následně vhodným způsobem upravován, aby vykazoval požadované vlastnosti. Schematický náčrt tohoto konstrukčního řešení je opět na obr. 5c. Typická aplikace spočívá v použití hliníkového kapalinou chlazeného válce s povrchem vrtání upraveným pomocí galvanického pokovení metodou NIKASIL® u moderních dvoutaktních motorů



motokrosových a závodních enduro motocyklů. Typický zástupce motor dvoutaktního motocyklu KTM je vyobrazen na obr. 6.[52]

3.2 VÁLEC VZDUCHEM CHLAZENÉHO ČTYŘDOBÉHO MOTORU

Stejně jako u dvoutaktních motorů se zásadní rozdíly jeví mezi válci motorů chlazených kapalinou nebo vzduchem. Způsob uchycení vzduchem chlazených válců na klikovou skříň je totožný jako u dvoutaktních motorů, tedy samostatně. Stejně tak je velká podobnost v konstrukci malých jednoválcových motorů, kdy je rozdíl mezi dvoutaktním a čtyřtaktním v absenci kanálu pro výměnu náplně ve válci čtyřtaktního motoru, u nějž dodání spalovací náplně obstarávají ventily v hlavě válce. Z toho důvodu je hlava válce čtyřtaktního motoru oproti dvoutaktnímu složitější.[53]

Jedná-li se o vzduchem chlazené čtyřtaktní motory větších objemů, tak válce těchto motorů jsou nejčastěji vyráběny za pomoci odstředivého lití. Tyto motory lze dnes nalézt v použití pro pohon nákladních automobilů např. vzduchem chlazený osmiválcový vznětový motor TATRA.[52]

3.3 VÁLEC KAPALINOU CHLAZENÉHO ČTYŘDOBÉHO MOTORU

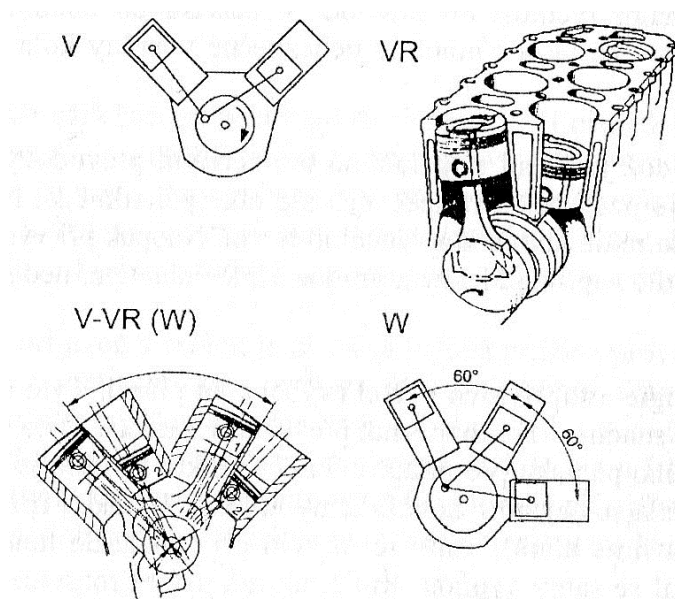
Je-li čtyřtaktní motor chlazen za pomoci kapaliny a má více než jeden válec, je současným standardem, že je takovýto motor vyroben jako jeden odlitek válců i klikové skříňe, tedy blok motoru. Bloky motoru lze podle vlastního uspořádání válců rozdělit na několik typů, které budou nyní stručně charakterizovány.[52]

3.3.1 DRUHY USPOŘÁDÁNÍ VÁLCŮ VE VOZIDLOVÝCH MOTORECH

Nejrozšířenějším typem uspořádání válců je v motoru řadovém (označuje se Ř), v tomto provedení jsou válce buď svislé, nebo od svislé osy odkloněné a jsou za sebou v jedné řadě. Maximální počet válců v tomto provedení se uvádí až šest.[23]

Dalším často používaným typem uspořádání je vidlicové, tedy dvouřadý motor s válci uspořádanými do tvaru písmena V (odtud označení V). Úhel mezi válci se pohybuje v rozmezí od 60-90°, s výjimkou vidlicového uspořádání válců v provedení s jednotnou hlavou válců, kdy je úhel mezi válci zkorigován na hodnotu 15° a motorový blok je velice kompaktní (označení VR). Kombinace V a VR uspořádání se často označuje jako W-motor, jehož užití nalezneme u automobilových motorů Audi nebo VW. Označením W je někdy rovněž označován typ motoru se třemi řadami válců vzájemně svírajících úhel 60°.[23][46]

Motor s ležatým uspořádáním válců proti sobě, tedy s úhlem válců 180° nese označení „boxer“, příklady použití tohoto uspořádání jsou u motocyklů BMW F1200GS nebo v automobilových motorech Subaru.



Obr. 7 Druhy uspořádání válců v blocích[23]

3.3.2 CHLADICÍ PLÁŠŤ

Je-li motor chlazen kapalinou, naskýtá se zde další hledisko, dle kterého bloky motorů jsou rozděleny. Tímto je provedení dosedací plochy pro hlavu válců. Bloky válců tedy definujeme jako ty, jejichž chladicí prostor je otevřený (open deck) nebo uzavřený (closed deck). Bloky s uzavřeným chladicím prostorem poskytují vyšší tuhost a jejich použití nalezneme u vznětových motorů, kde je třeba zachycovat vyšší tlaky při chodu motoru. Naopak varianta s otevřeným chladicím prostorem poskytuje velkou výhodu spočívající v nahrazení části pískového jádra pláště při odlévání samotnou částí ocelové kokily, což zvyšuje produktivitu a snižuje náklady na výrobu.[52]



Obr. 8 Vizuální porovnání provedení chladicích prostorů[59]



4. MONOLITICKÝ KONCEPT: ALUSIL®

Jak bylo zmíněno, výroba bloku válců jako jednoho monolitického celku je možná za použití materiálů, jejichž povrch je dostatečně tvrdý, odolný, a má dobré kluzné vlastnosti. Pomineme-li možnost využití šedé litiny, nabízí se užití velice kvalitní nadeutektické slitiny hliníku a křemíku, přesněji AlSi17Cu4Mg . [3][22]

4.1 TECHNOLOGIE

Hlavní myšlenkou konceptu Alusil® ve zkratce je vyrobení monolitického bloku motoru ze slitiny hliníku a křemíku, jehož pracovní povrch má po příslušném ošetření podobu vystouplých tvrdých krystalů křemíku, které usazené v hliníkové matici tvoří kluznou dráhu pro píst a pístní kroužek. [22][26]

Slitiny hliníku a křemíku dělíme podle procenta hmotnosti křemíku na podeutektické, s obsahem křemíku do 12.5% (angl. hypoeutectic) a nadeutektické (angl. hypereutectic) s více jak 12.5% obsahu křemíku. [24][31] Nadeutektické Al-Si slitiny obsahují krom majoritního podílu hliníku 12 až 50% křemíku, 1 až 5% mědi a 0.01 až 0.05% fosforu a vápníku jako nečistoty. Obsah těchto nečistot se většinou pohybuje do 0.03% a méně. [31] Daná slitina používaná pro výrobu bloků válců metodou Alusil® nese označení AlSi17Cu4Mg . Tato obsahuje přibližně 77% hliníku a 17% křemíku. Al slitiny lze také rozdělit dle způsobu stárnutí na přirozeně a uměle stárnoucí. [24][25]

Co se týče historie, slitina AlSi17Cu4Mg byla poprvé vytvořena v roce 1927 společností Schweizer a Fehrenbach v Německu a dále vylepšována především společností Kobelschmidt (KS) jejíž výroba se zaměřuje na komponenty pro automobilové motory. [24][35] Samotný produkt Alusil® nespočívá pouze v odlití bloku motoru, ale především se jedná úpravu tohoto materiálu na pracovním povrchu do požadované struktury.

4.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU

Technologie Alusil® je velice úzce spjata s termínem nízkotlaké lití (angl. Low pressure die casting-LPDC). A skutečně, nízkotlaké lití je výrobní proces, jímž jsou odlévány právě bloky válců ze slitiny AlSi17Cu4Mg . Dříve zmíněná společnost Kolbenschmidt je jedním z největších producentů takto vyráběných bloků. A právě také proto můžeme vděčit za současnou podobu technologie Alusil® mnohaletému vývoji a vylepšování. Pochopitelně tedy i značné množství informací shromážděné touto prací vychází z poznatků této firmy. [3][26]

Co se týče vlastního nízkotlakého odlévání, samotné označení nízkotlaké má souvislost s podmínkami, při kterých se plní forma a tuhne slitina, ze které je blok vyráběn. Stroj používaný k nízkotlakému lití je vyobrazen na obr. 9. Forma je plněna pozvolna ve vertikálním směru a plnění je doprovázeno pouze minimálními turbulencemi. To vše při nízkém tlaku, který musí být udržován nadále i ve fázi tuhnutí odlitku. Pod odlévací formou je umístěna pec, která je s formou propojena plnicí trubicí. Když je pec tlakována, postupuje tavenina plnicí trubicí vzhůru. Přední výhodou této technologie je, že proces tuhnutí postupuje od nejvyššího a nejvzdálenějšího místa k ohřívanému plnicímu otvoru. Při dodržování správných podmínek po dobu celého procesu, tedy zajištěním vhodného chlazení formy a odpovídající kontroly časové. Tento proces odlévání také umožňuje se přiblížit ideálnímu řízenému směrovému tuhnutí (directional solidification). Pro samotný odlitek to znamená velkou výhodu, pokud se jedná o kvalitu v porovnání s gravitačním litím. [25][35]



Nízkotlaké lití je metoda odlévání vhodná pro použití netrvalých pískových forem, trvalých forem (ocelových kokil) a stejně tak pro jejich kombinace, čímž se rozumí například ocelová forma s pískovými jádry atd. V případě trvalých ocelových forem můžeme hovořit o desetitisících odlévacích cyklů, než je naplněna jejich životnost.[25]

Je však pravda, že čistě ocelové formy jsou přísně omezeny, pokud se jedná o tvarovou složitost odlitků. Naproti tomu pískové formy poskytují větší tvarovou rozmanitost odlitku. Nelze však opomenout skutečnost, že použití pískových forem brání aplikaci účinného chlazení odlitku, které je důležité pro efektivnější kontrolu teploty. [25]



Obr. 9 Zařízení pro nízkotlaké lití[60]

Běžně používané typy provedení většinou vynikají svou tvůrčí jasností a v jistém smyslu ještě větší jednoduchostí. Výsledná podoba nejběžněji se vyskytujících forem, v případě bloků válců vyrobených metodou nízkotlakého lití, spočívá v ocelové formě kombinované s minimálním počtem pískových jader. Ta poskytuje velice uspokojivé podmínky pro redukci počtu pískových jader vodního pláště chladicího systému a dovoluje zavedení tzv. closed-deck provedení válce, tedy vytvoření dosedací ploch pro hlavu válců s uzavřeným chladicím prostorem (viz. Kap 3).[25]

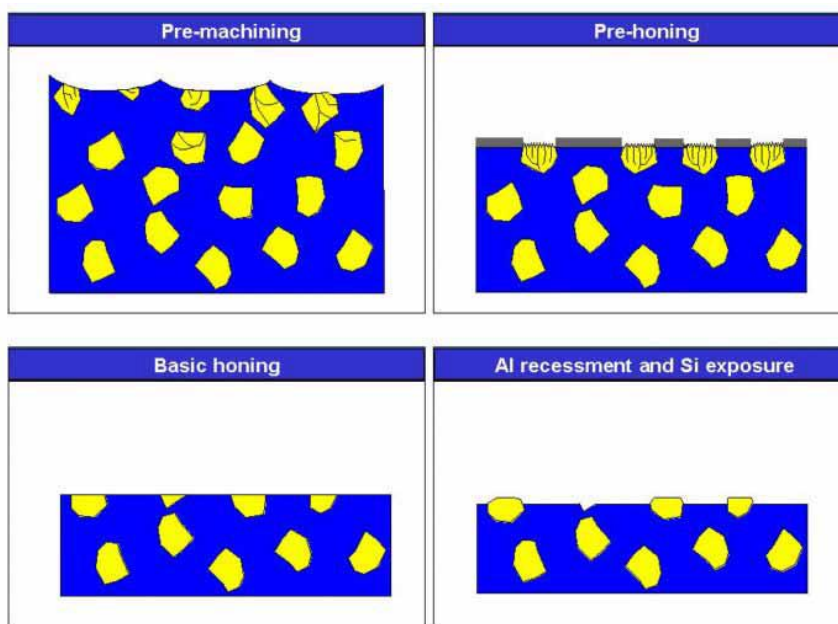
Lze tvrdit, že všechny bloky válců, vyrobené zmíněnou metodou nízkotlakého odlévání, se vyznačují vysokým standardem kvality. Tudiž, jak bude následně podrobněji zmíněno, tato technologie nalézá uplatnění především v oblasti výkonných motorů s většími objemy spalovacího prostoru. Zmíněné výhody a přednosti jsou tedy vyvažovány většími náklady jak z hlediska materiálu, tak samotný nízkotlaký odlévací proces patří k těm ekonomicky náročnějším.[3][25]

4.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Získáme-li výše popsaným odlévacím procesem hotový odlitek bloku válců, je dalším krokem k získání výsledné podoby vrtání válce úprava pomocí přesného vrtání a následného



třístupňového honování. Třemi stupni se rozumí předhonování, honování a expozice křemíkových zrn.[22][42][48]



Obr. 10 Postup dokončovacích operací povrchu nadeutektické slitiny[46]

Cílem přesného vrtání je připravit povrch válců pro následující třífázové honování, zajistit požadované rozměry vrtání a eliminovat případné geometrické vady, které se mohly ve válci objevit při procesu odlévání. Aby se minimalizovala zóna poškození krystalů křemíku, musí být použit diamantový hrot vrtacího nástroje (PCD). Pochopitelně je nezbytné, aby byly dodrženy dané parametry obrábění, jako otáčky nástroje, šířka záběru ostří a posuv, a to nejen u přesného vrtání válců, tak obdobně i při následujících honovacích procesech.[37]

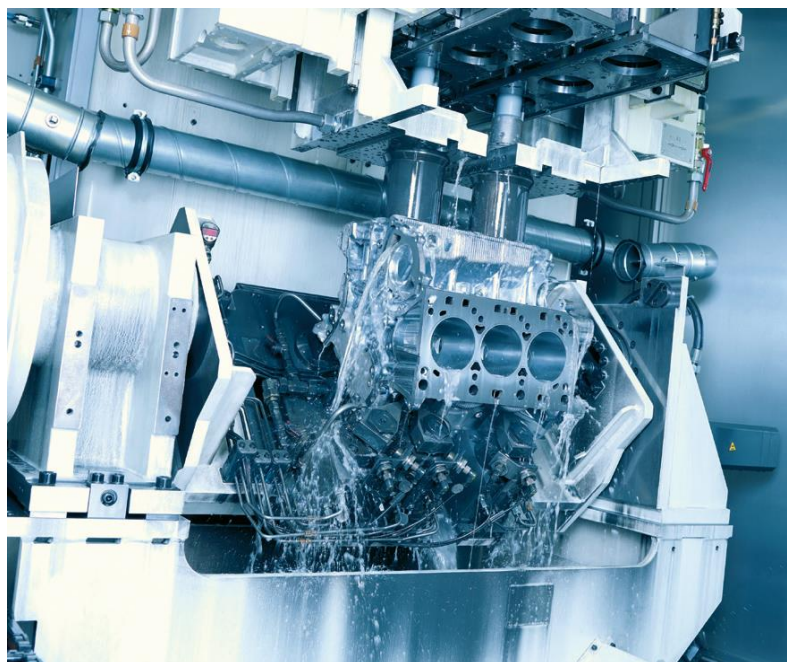
Následující honování má za cíl zajistit jemné výsledné obrobení, dosáhnout nominálních rozměrů průměru a válcovitosti válců, odstranit zmíněnou deformační zónu křemíkových krystalů vzniklou při přesném vrtání a nyní již nadobro eliminovat jakékoliv geometrické nepřesnosti uvnitř vrtání válce. Zmíněná společnost Kobelnschmidt užívá pro honování jimi dodávaných bloků motorů výhradně diamantové honovací nástroje, které jsou pro dosažení nižších drsností vhodnější a také mají delší životnost (viz. dále).[37]

První krok honovacího procesu, tedy předhonování, se aplikuje v případě, pokud drsnost povrchu vrtání je větší než $Ra=0,5 \mu\text{m}$. Uběr materiálu při tomto kroku se pohybuje okolo 25 až 30 μm , a je ho dosaženo v čase přibližně 60 sekund. Používané honovací nástroje jsou z konvenčních abraziv jako keramika nebo může být použito diamantové abrazivo s částicemi o velikosti 29 μm . Povrch po aplikaci předhonovacího procesu vykazuje drsnost $Ra=0,5 \mu\text{m}$. Srovnáme-li honování s jakoukoliv jinou technologií s definovanou geometrií bříty, ukáže se jako velká výhoda permanentní samotvarování honovací lišty, kdy při správném uspořádání a uchycení zrn v nástroji dochází pouze k minimálnímu opotřebení nástroje.[12][26][44]

Následující druhý krok honování je opět realizován za použití tradičních abraziv nebo abraziva diamantového, tentokrát se zrnitostí 9 μm . Použitím diamantových částic se životnost honovacího nástroje zvyšuje z 10 000 honování při použití keramických částic, až na 20 000 procesů honování. Navíc, pokud se použijí keramické honovací kameny z karbidu



křemíku, nitridu bóru nebo korundu, může dojít k deformaci křemíkových krystalů, proto je výhodné použití výhradně diamantových honovacích nástrojů. Výsledná drsnost dosažená po druhém honovacím kroku se pohybuje okolo $Ra=0,1 \mu m$. [12][26][37][44]



Obr. 11 Honovací zařízení[3]

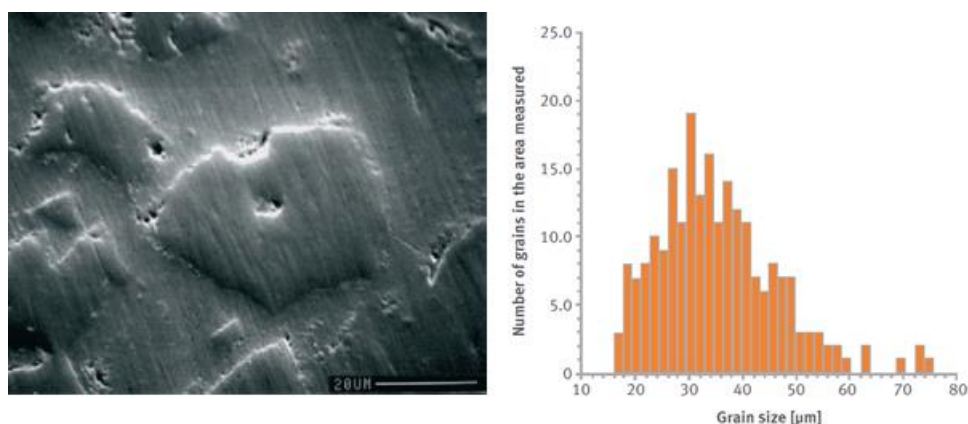
Zaměříme-li se nyní na skutečně poslední fázi ošetřování povrchu válce, tak se jedná o expozici nebo jinak řečeno odhalení či obnažení krystalů křemíku z hliníkové matrice. Zprvu bylo pro tento úkol aplikováno speciální leptání povrchu, nicméně z důvodu velice obtížné reprodukovatelnosti procesu, čímž se myslí produkce značného množství nečistot, bylo od tohoto postupu upuštěno a dnes je tento úkol vykonáván zcela výhradně za pomoci speciálně vyvinutého mechanického procesu. Jedná se v podstatě o honování, nicméně je zde užíváno malých sil a vysoce porézních kamenů. Honovací kameny pro expozici křemíkových částic obsahují elastomer, jako látku ve které jsou abrazivní částice uloženy. Abrazivní částice užívané pro výrobu těchto kamenů jsou převážně korundové. Samotný princip tohoto honovacího kroku spočívá v tom, že tvrdé částice nástroje jsou uloženy dostatečně pružně na to, aby při kontaktu s křemíkovým krystalem tento okopírovaly, ale okolní materiál matrice ubraly o požadovanou hodnotu. Zároveň se při tomto procesu uskutečňuje zaoblení takto vyčnívajících vrcholů křemíkových částic, což je rovněž rozdíl a značná výhoda oproti obnažování Si krystalů leptáním. Krok odhalení křemíkových částic v praxi zaujímá pro jeden cyklus čas asi 60 až 90 sekund a při tomto se odebere přibližně $0,5 \mu m$ vysoká vrstva hliníkové matrice, z níž vyčnívají zaoblené křemíkové krystaly. Chladicí médium používané ve všech třech honovacích krocích je konvenčně používaný honovací olej. Zmíněný strojní čas je opět v porovnání s leptáním mnohonásobně příznivější a jak je zřejmé, celý proces honování ve třech krocích je z časového hlediska velmi ekonomický a můžeme hovořit o relativně vysoké produktivitě. [12][26][37][44][48]

4.4 CHARAKTERISTIKA POVRCHU

Výsledný povrch má podobu zřejmou z výše popsaného procesu honování. Primární křemíkové částice vyčnívající z hliníkové matrice mají díky poslednímu honovacímu kroku zaoblené vrcholy. Rozměry těchto křemíkových zrn jsou v rozmezí 20 až $60 \mu m$. Graf na obr.



12 ukazuje počty vyskytujících se křemíkových zrn různých velikostí a skutečnou podobu pracovního povrchu válce vyrobeného metodou Alusil® můžeme pozorovat na obr. 12 vlevo.[2][12]



Obr. 12 Mikrofotografie povrchu, počty zrn různých velikostí

4.5 HODNOTY DRSNOSTÍ POVRCHU

Technologii Alusil® produkuje firma Kolbenschmidt a používá k závěrečné povrchové úpravě výše zmíněnou mechanickou expozici primárních zrn křemíku. Hodnota Ra výsledného povrchu, tedy po aplikaci mechanické expozice, se pohybuje okolo hodnoty 0,21 µm. Je tedy v porovnání se stavem po druhém honovacím kroku vyšší, což je zřejmé vzhledem k tomu jaké změny nastanou na povrchu při závěrečném kroku expozice křemíkových zrn. Ve druhé kapitole této práce jsou zmíněny a charakterizovány parametry drsností a veličiny nosného podílu profilu povrchu, které i firma Kolbenschmidt uvádí pro povrchy válců vyrobených z nadeutektické slitiny hliníku a křemíku s následným třístupňovým honováním. Hodnoty těchto parametrů uvádí tab. 2.[38]

Tab. 2 Hodnoty drsností nadeutektických Al-Si povrchů po třístupňovém honování-Kolbenschmidt[38]

Parametr	Hodnota
Ra	0,21 µm
Rz	1,35 µm
Rk	0,55 µm
Rvk	0,16 µm
Rpk	0,39 µm
Mr2	92 %

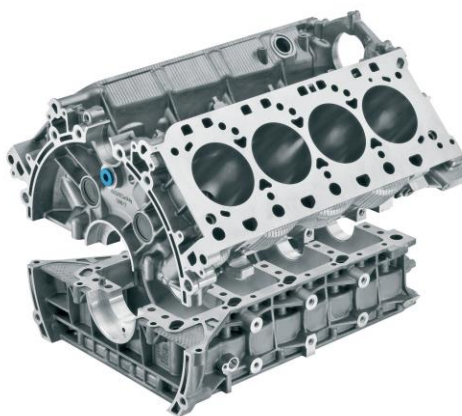
Proces třístupňového honování se krom konceptu Alusil® uplatňuje při ošetřování povrchů válců všech konceptů, které jako materiál pro pracovní povrch válce užívají nadeutektickou slitinu Al-Si. Mezi tyto řadíme například quasi-monolitické koncepty Lokasil® a koncept



laserového legování křemíkem Tribosil®. Z heterogenních konceptů využívají tohoto procesu vložky Silitec® a Albond®. Všechny tyto koncepty využívají třístupňového honování, proto jejich výsledné povrchy jsou téměř shodné. V pojednání o těchto jednotlivých konceptech v této práci bude pokaždé ve věci dokončovacích operací, charakteristiky finálního povrchu a jeho drsností odkázáno na výše uvedené třístupňové honování a tab. 2 s dosaženými drsnostmi. [28]

4.6 APLIKACE

Vzhledem ke skutečnosti, že zmíněná technologie patří mezi nákladnější řešení výroby válců, nalezneme uplatnění této technologie pouze v těch oblastech, kde původně vznikla, a sice v produkci prémiových automobilů s motory o vyšších objemech spalovacího prostoru. Sama nadeutektická slitina AlSi17Cu4Mg použitá na celý objem bloku válců je z hlediska výroby drahý materiál. Zmíněný největší producent technologie Alusil®, totiž firma Kolbenschmidt, své produkty dodává výrobcům automobilů jako je Porsche a Audi. Modely vozů Porsche využívající osmi a šesti válcové motory s uspořádáním do V, vyrobené metodou Alusil®, jsou SUV Cayenne a coupé Panamera. Pro společnost Audi se jedná šesti, osmi a deseti válcové motory rovněž uspořádání V.[2][3]



Obr. 13 Blok motoru V8 Porsche Alusil®[3]

Obdobná technologie Silumal®, jež je téměř shodná s Alusil® technologií firmy Kolbenschmidt, je rovněž monolitickým konceptem, který je užit pro výrobu bloků motorů vozidel prémiových značek jako BMW a Mercedes-Benz. Vždy se jedná o motory vyšších objemů, převážně uspořádání V8.[38]



5. QUASI-MONOLITICKÉ KONCEPTY

Hlavním smyslem a přínosem řešení bloku válců quasi-monolitickým konceptem je poskytnout výhody, které jsou vlastní monolitickému provedení, a zároveň poskytnout výhodu nižších výrobních nákladů a tedy být vhodnější pro použití v produkci velkých počtů cenově dostupnějších motorů. Mezi dostupné možnosti jak realizovat quasi-monolitický koncept v současné době patří systém infiltrovaných forem, obchodní název Lokasil®, dále systém laserového legování povrchů běžných podeutektických slitin hliníku Tribosil®, tepelně sprejované povlaky a významný podíl zaujímají také technologie galvanického pokovování, jmenovitě technologie Nikasil® a Galnical®.[26][46]

5.1 LOKASIL®

5.1.1 TECHNOLOGIE

Monolitické koncepty si s sebou nesou podstatnou nevýhodu spočívající v užití drahé nadeutektické slitiny hliníku a křemíku na celý objem vyráběného bloku válců. Je však pochopitelné, že tvrdý, odolný povrch a kvalitní mikrostrukturu, kvůli níž je této slitiny užito, je požadován pouze na povrchu vrtání válců, a nikoliv po celé ploše motoru. Zvyšuje se tímto spotřeba materiálu a dochází k rapidnímu růstu nákladů. Naskytne se tedy myšlenka, jak docílit užití na křemík bohaté a tvrdé slitiny pouze tam, kde je jí třeba? Koncept Lokasil® na tuto otázku podává jasnou odpověď, a sice užití porézní duté válcové formy, vyrobené z keramických vláken a částic křemíku, která se vkládá do kokily při procesu odlévání bloku motoru a je infiltrována, neboli prostoupena slévarenskou slitinou hliníku. Tato vytvoří blok motoru a v oblasti vrtání samotných válců díky této infiltraci vznikne materiál o vysoké tvrdosti a s kvalitním odolným povrchem, připraveným k obrobení, honování a finálním úpravám.[46]

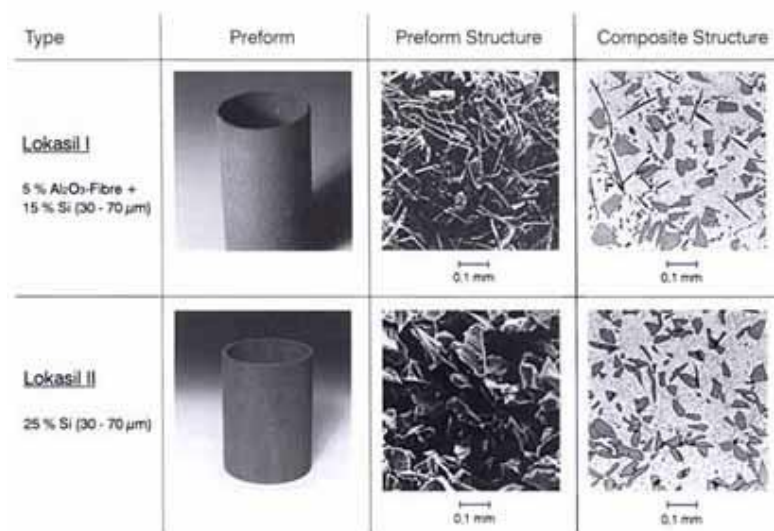
Technologie Lokasil takto nahrazuje bloky motorů odlévané ze nadeutektické slitiny 390 (Al-17Si-4Cu-Mg Alusil®), a zamezuje potřebě užití vkládaných vložek ze šedé litiny. Tímto se předchází možným problémům plynoucím z rozdílného modulu pružnosti litinové vložky a okolního materiálu, kdy se při tepelné zátěži při chodu motoru tyto dvě vrstvy chovají rozdílně. Slitina použitá k infiltraci porézních forem je podeutektická slitina hliníku 226 (Al-9Si-3Cu).[26]

5.1.2 CHARAKTERISTIKA PROCESU

Porézní duté formy s tvarem budoucího válce jsou vyráběny jako dva typy, a sice jako Lokasil® I a Lokasil® II. Rozdíl mezi těmito dvěma typy spočívá především v typu částic, jež tvoří samotnou formu. V případě provedení Lokasil® I se jedná o keramická vlákna a částice křemíku, zatímco v případě Lokasil® II je forma tvořena pouze křemíkovými částicemi. Dále se tyto dva základní typy forem pro technologii Lokasil® mohou lišit ve způsobu jejich výroby, tento bude popsán dále. Co je společným krokem ve výrobě porézních forem obou typů, je krok slinování, kdy jsou zpevňovány ve slinovacích pecích.[26][46]

Výsledná struktura materiálu v okolí pracovního povrchu válců je při aplikaci metody Lokasil® složena z 5% hmotnostního podílu hliníku a 15% křemíku v případě Lokasil® I a v případě Lokasil® II se jedná o 25% hmotnostní podíl křemíku. V obou případech zbývající hmotnostní podíl připadá na hliníkovou slitinu tvořící celý blok válců.[26]

V současné době používanější metodou je Lokasil® II. Porézní formy v tomto případě obsahují pouze částice křemíku, a to o velikostech 30 až 70 μm . Formy se vyznačují vysokou pórovitostí, tedy 70 až 75%, a proto se pro jejich výrobu používá gelového odlévání s vysoušením pomocí mrazu (angl. gel-casting, freeze-drying process). Při tomto procesu jsou póry v odlitku tvořeny pomocí výplňové látky, v tomto případě vody, která se po odlití a ztuhnutí při vysoušecím procesu mrazem odstraní a v materiálu se tak vytvoří póry.[25][26]



Obr. 14 Porovnání struktur forem Lokasil I a II [26]

VÝROBA FOREM PRO LOKASIL® II

Homogenní odlévací směs pro výrobu forem obsahuje křemíkový prášek, vodu a pojiva. Tato směs je nejdříve odlita do formy s negativní geometrií požadované lokasilové formy, a následně se ochlazuje na teplotu okolo 60°C pod bod mrazu. Vysoušení za pomoci mrazu spočívá v tom, že voda při takto nízkých teplotách při dodání energie a při sníženém tlaku vysublimuje a v místech kde se vyskytovaly krystalky ledu, vzniknou dutinky nebo jinak řečeno kavity, jež tvoří samotnou pórovitost vyráběné formy válce. Do těchto se při odlévání bloku válců infiltruje hliníková slitina.[13][26]

Formy jsou tedy odlité a díky vysoušení mají i požadovanou pórovitost. Za účelem dosažení požadované pevnosti jsou v další fázi tyto formy vypalovány při slinovacím procesu. Slinování probíhá při teplotách přibližně 1000°C a vypálené vyrobené formy jsou v závěru nařezány do požadovaných délek a připraveny k použití.[26][46]

ODLÉVÁNÍ BLOKŮ VÁLCŮ

Při aplikaci konceptu Lokasil® je ve většině případů užíváno vytlačovacího tlakového lití, anglický název procesu zní „squeeze casting“. Tato odlévací procedura kombinuje průběhy podobné nízkotlakému odlévání, kdy odlévání probíhá velice pomalu a s nízkými turbulencemi, s průběhem tuhnutí podobným vysokotlakému odlévání. Odlitek tuhne při vyšším tlaku a koeficienty přestupu tepla jsou po dobu tuhnutí relativně vysoké, což zajišťuje rychlé tuhnutí odlitku. Díky této skutečnosti se z časového hlediska stává tento proces ekonomicky příznivým. Stroj používaný při „squeeze-casting“ procesu se dělí na pevnou a pohyblivou část. Stejně tak odlévací forma se skládá z pevné a pohyblivé části. Odlévání probíhá vytlačováním slitiny z plnicí komory odlévacím pístem. Píst zajišťuje v odlitku



zvýšený tlak, aby mohla správně proběhnout právě zmíněná infiltrace slitiny do porézních forem, které jsou v odlévací formě umístěny. Tato fáze je pochopitelně z celého procesu výroby válců metodou Lokasil® nejdůležitější, jelikož v ní probíhá proces infiltrace, který je podstatou tohoto konceptu. Odlévací píst po naplnění formy slitinou působí na odlitek zbytkovým tlakem a tuhnutí odlitku tedy probíhá při podmínkách se zvýšeným tlakem, jak bylo zmíněno výše.[26]

Praktické provedení výroby bloků válců konceptu Lokasil® velice výstižně popisuje v knize „Metal matrix composites“ K. Kainer. Zařízení pro squeeze-casting lití je plně automatizovaná odlévací buňka, ve které se dva roboty starají o všechny potřebný pohyb komponent. Zatímco robot 2 čistí formu, robot 1 vezme tři předehřáté formy z předehřívací pece a umístí je na temperované objímky. Následně tyto jsou umístěny do odlévacího nástroje. Po uzavření odlévací formy nastává proces lití, licí píst stoupá vzhůru a pomalu plní odlitek slitinou. Lokasilové formy jsou infiltrovány hliníkem a odlitek tuhne při vysokém tlaku. Následně po zatuhnutí se odlévací forma otevře a robot 1 uchopí odlitek. Tyto jsou kontrolovány pro kompletnost, označeny a odloženy po odstranění odnímatelných objímek z dopravníku. V tuto chvíli robot 2 už započal další cyklus čištěním odlévací nádoby. [26]

Popsaný způsob odlévání je v případě tohoto konceptu nejpoužívanější, nicméně v současné době se provádí pokusy o dosažení dobré infiltrace porézních forem i při aplikaci vysoce produktivního vysokotlakého lití (HPDC-high pressure die casting). Pokud by se toto podařilo, jednalo by se o velmi produktivní výrobu bloků válců s malou hmotností a prvotřídními vlastnostmi pracovního povrchu vrtání.[46]

5.1.3 CHARAKTERISTIKA POVRCHU

Charakter vyrobeného bloku válců lze popsat jako hliníkový blok válců téměř monolitického charakteru s tím rozdílem, že struktura v okolí pracovního prostoru válců má podobu nadeutektické slitiny Al-Si. A stejně tedy jako v případě čistě monolitického bloku Alusil® musí být povrch vrtání ošetřen závěrečnými dokončovacími operacemi. Povrch se ošetřuje stejným třístupňovým honovacím procesem jako je tomu u konceptu Alusil®, proto lze ve věci popisu dokončovacích operací odkázat na čtvrtou kapitolu této práce, kde jsou tyto uvedeny. Tab. 3 udává hodnoty veličin drsností, kterými firma Kolbenschmidt specifikuje finální pracovní povrchy bloků válců vyrobených konceptem Lokasil®.[26]

Tab. 3 Hodnoty veličin drsností pro Lokasil® (Kolbenschmidt) [38]

Parametr	Hodnota
Ra	0,15- 0,35 μm
Rz	1,0- 3,0 μm
Rk	0,2- 0,6 μm
Rvk	0,1- 0,7 μm
Rpk	0,4- 0,7 μm



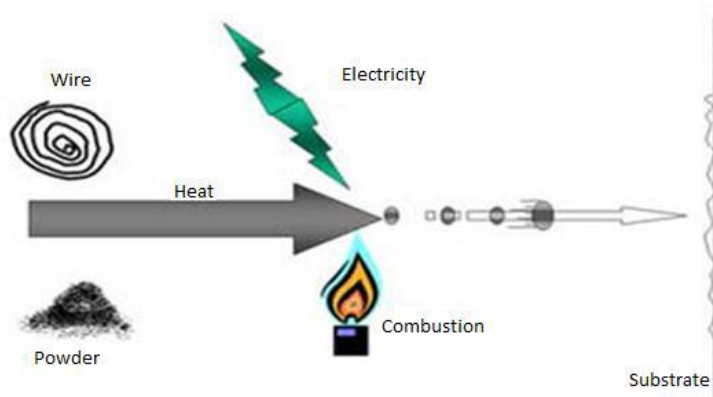
5.1.4 APLIKACE

Motory vyrobené využitím konceptu Lokasil® produkuje předně zmíněná firma Kolbenschmidt a tyto motory jsou použity především pro vozy značky Porsche. Jmenovitě se jedná o šestiválcové ploché motory s uspořádáním „boxer“, které jsou užity například v modelu Boxter. [26]

5.2 POVLAKY NANÁŠENÉ POMOCÍ TEPELNÉHO SPREJOVÁNÍ

5.2.1 TECHNOLOGIE

Vytváření povlaků tepelným sprejováním vyžaduje speciální zařízení. Vzhledem k tomu, že většina vyráběných motorů má průměr válce menší než 100 mm, musí být zařízení pro nanášení povlaků dostatečně malé, aby bylo možné povlaky při rotačním pohybu zařízení



Obr. 15 Schematický náčrt technologie tepelného sprejování[40]

uvnitř vrtání válce nanášet. Proto jsou tato zařízení povětšinou realizována jako otáčivé vřeteno, na němž je namontována pistolová hlava s plazmovým generátorem nebo spalovací komorou a sprejová tryska. Posuv vřetena tvoří spirálovitou trajektorii celého systému. V současné době jsou k dispozici minimálně čtyři systémy tepelného vytváření povlaků buď v komerčně dostupné verzi, nebo ve fázi výzkumu. Jeden z těchto systémů používá přídavný materiál ve formě prášku a zbylé tři systémy používají přídavný kovový drát nebo je možné užití obou variant.[49]

Tyto systémy jmenovitě jsou:

- rotační práškový plazmový proces (APS nebo Rotaplasma®, v sériové produkci)
- rotační dvoudrátový elektrický obloukový systém (TWA, v sériové produkci)
- vysokorychlostní kyslíkový systém (HVOF, ve fázi výzkumu)
- plasmou přenášející systém s přídavným drátem (PTWA, v sériové produkci).

Každý ze jmenovaných systémů má své přednosti i nevýhody. Následující tabulka znázorňuje přednosti jednotlivých metod tepelného nanášení povlaků.[40][49]



Tab. 4 Hodnocení systémů žárového vytváření povlaků dle různých kritérií[40]

Kritérium	PWTA (přídavný drát)	HVOF(přídavný drát nebo prášek)	Rotaplasma® (prášek)
Použitelnost více druhů materiálů	nízká	střední	vysoká
Přenos tepla do bloku motoru	střední	vysoká	nízká
Spolehlivost tavicího procesu	střední	vysoká (prášek), střední (přídavný drát)	vysoká
Kvalita povlaku	střední	vysoká	vysoká
Cena procesu	nízká	vysoká	nízká

Systém založený na elektrickém oblouku využívá dvou drátů jako elektrod, z nichž jeden nabit kladně a druhý záporně, při kontaktu zažehnou elektrický oblouk a taví se. Tyto jsou umístěny v těsné blízkosti před tryskou, ze které se pod vysokou rychlostí přivádí vzduch nebo dusík natavený materiál se díky vysoké rychlosti plynu rozprašuje směrem k nanášenému povrchu a vytvoří žádaný povlak.[40]

V případě systému s přenosem materiálu plasmou se využívá elektrického oblouku v plazmovém hořáku k ionizaci a urychlení plynu, jímž může být argon, dusík nebo vodík. Takto ionizovaný plyn tvoří plasmu, která produkuje značné množství tepla. Toto teplo se využije k natavení přídavného materiálu, buď v podobě prášku, nebo drátu, a rychlost plasmy je využita opět k dopravení tohoto materiálu na ošetřovaný povrch spolu se sekundárními ochrannými plyny.[40]

HVOF tedy systém s vysokorychlostním kyslíkovým hořákem (anglicky High Velocity Oxygen Fuel system) využívá plynů jako paliva spolu s kyslíkem, které se spalují v hořáku, a plamen je přes trysku vypouštěn ven z hořáku. Materiál pro vytvoření povlaku se zde ve formě prášku rozprašuje druhým otvorem trysky do plamene, kde se opět taví a je díky vysoké rychlosti plamene urychlován směrem k nanášenému povrchu.[40]

Vzhledem k tomu, že ve velkoobjemových výrobních zařízeních se manipulace s drátem jeví jako mnohem mobilnější a rychlejší než manipulace s materiálem v práškové formě, je hojně využíváno právě nanášení plasmou s přídavným drátem. Plazmový generátor, nebo jinak pistolová hlava se skládá z wolframové katody, vzduchem chlazené trysky, vyrobené z mědi a elektricky vodivého drátu využívaného jako anoda. Vodivý drát, tedy anoda je přiváděn kolmo k ose trysky. Tato pistolová hlava je umístěna na otočném vřetenu, které provádí až 600 otáček za minutu.[49]

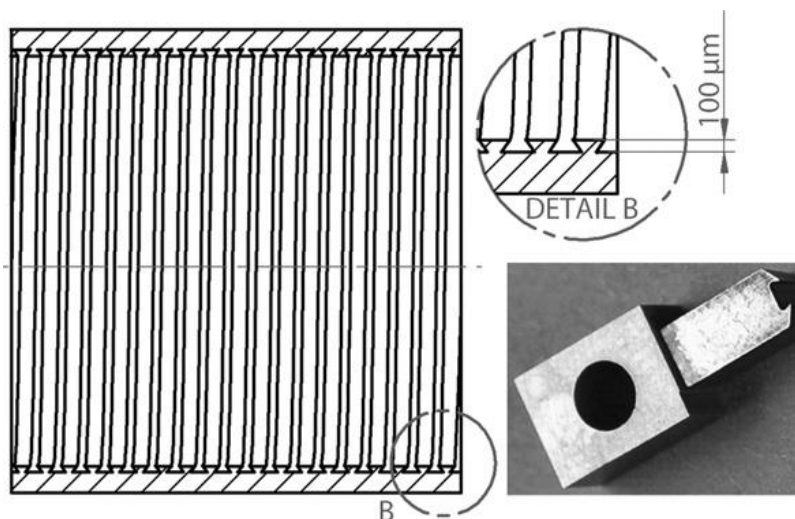
Při spouštění samotného procesu se zažehne výboj, způsobený vysokým napětím mezi anodou a katodou, a tento začne disociovat a ionizovat směs plynů mezi katodou a tryskou. Vzhledem ke tvaru škrťacího otvoru trysky je plasma vypouštěna nadzvukovou rychlostí a dostává se k přídavnému drátu, tedy anodě, a oblouk se uzavírá. Konstantní napájecí proud je

udržován na hodnotách 60 až 100, napětí okolo 100 až 120 V. Jak bylo popsáno, ionizovaný plyn se urychluje, a po natavení a odebrání přídavného materiálu, který má tímto teplotu přibližně 2100°C, vytváří sprejový nástřik o rychlosti 100 až 130 m/s. Plyn používaný k ionizaci může být teoreticky každý nehořlavý plyn, nejčastěji je však využíváno například směsi argonu a vodíku. Systém plasmového nástřiku je velmi dobře použitelný pro ošetřování válců s průměrem vrtání 35 až 360 mm. Díky použití přídavného materiálu ve tvaru drátu a díky designu plasmové pistolové hlavy nevyžadující chlazení vodou, se celý nástroj stává velice kompaktním a především konstrukčně jednoduchým a tudíž i spolehlivým.[14][49]

Pohlédneme-li na ošetření válce tepelně nanášeným povlakem od začátku do konce, můžeme celý proces rozdělit do čtyř po sobě následujících kroků. Prvním krokem je obrábění vrtání válce do požadovaného tvaru následovaný speciálním předpřípravením povrchu tak, aby se povlak mohl dostatečně uchytit. Následuje samotný tepelný nástřik a na závěr honování povrchu do závěrečné požadované podoby. Tloušťka povlaku po aplikaci nástřiku je 200 až 300 μm , po závěrečném honovacím procesu má povlak 100 až 150 μm tloušťky.[49]

5.2.2 POČÁTEČNÍ PŘÍPRAVA OŠETŘOVANÉHO POVRCHU

Speciální příprava povrchu vrtání válce před tepelným nanášením povlaků může proběhnout několika způsoby. Základní operací, kterou můžeme použít, je tryskání povrchu. Při aplikaci tryskání se následně aplikovaný povrch přilne a pevnost spojení je do 30 MPa, což je považováno za minimální hodnotu pro dobře provedený povlak. Tryskání tedy nelze považovat za optimální operaci pro přípravu válce před tepelně nanášeným povlakem. Proto se při přípravě vrtání válce aplikují i jiné, vhodnější procesy. Mezi další typy přípravy povrchu válce lze jmenovat vysokotlaké tryskání vodním paprskem nebo NiAl/Flux proces. Při NiAl/Flux procesu je na hladký povrch nanášen povlak hliníku a niklu, který zajistí zdrsňování povrchu a samotný tepelně nanášený povlak se aplikuje až na takto ošetřený povrch. Nikl-hliníkový zdrsňující povlak má tloušťku okolo 50 μm a je použit z toho důvodu, že je schopen vytvořit se základním hliníkovým materiálem válce velice silnou vazbu.[49]



Obr. 16 Nástroj a schéma dosahované struktury mechanického zdrsňujícího procesu[49]

Speciálním případem procesů přípravy válce před vytvářením povlaku jsou mechanicky zdrsňující procesy (MRP- angl.. Mechanical roughening process). Tyto procesy byly vyvinuty, aby se vyhovělo požadavku dobré implementace přípravného procesu válce do sériové produkce. Jeden z prvních takovýchto procesů byl vyvinut na Ústavu obráběcích a



tvářecích strojů a technologie výroby na Braunschweig University v Německu. Proces využívá nástroje s dvěma geometricky definovanými břity, který na povrchu vrtání válce vytváří topografii povrchu charakteristickou profilem s podřezáním, umožňujícím mechanickou vazbu mezi materiálem válce a následně nanášeným povlakem jak je zřejmé z obr. 16, na kterém je tvar nástroje a schematicky naznačený profil povrchu válce po mechanické úpravě.[49]

Nástroj kombinuje rotační pohyb s axiálním přísuvem a pohybuje se tedy po šroubovici stejně jako nástroj při řezání závitů. Proces byl vyvinut bez potřeby jakéhokoliv mazání nebo chlazení olejem, nevyžaduje se následné čištění válce před další operací a jedná se tedy o velice čistý a rychlý proces. V neposlední řadě lze k výhodám této přípravy válce jmenovat vlastnost, že k jeho realizaci lze použít stejná obráběcí centra, jaká jsou použita pro předchozí obrábění válce. Proti zmiňovaným možnostem jako je tryskání se mechanicky zdršňující procesy ukazují jako mnohem vhodnější a produktivnější volba pro před přípravu vrtání válců. První realizované mechanické zdrsnění válce vedlo po aplikaci tepelného povlaku k pevnosti spojení povlaku a materiálu válce až 40 MPa, což je o mnoho více, než je doporučená zmíněná hodnota 30 MPa. Nejdokonalejší zdršňující profil takzvaný „dove tail“ (volným překladem: ocas holubice) dosahuje pevnosti spojení až 58 MPa. Zmíněná pevnost spojení základního materiálu a povlaku je měřena pomocí tahového adhezního testeru s obchodním označením PAThandy® (anglicky: pull off adhesion tester). [40][49]

5.2.3 MATERIÁLY PRO TVORBU POVLAků

Materiály, použitelné pro tvorbu žárově nanášených povlaků jsou v současné době tvořeny dvěma skupinami. První skupinou, jež se hojně využívá, jsou uhlíkové oceli. Uhlíkové oceli pro použití k nanášení tepelných povlaků obsahují od 0,1 do 0,82% podílu uhlíku. Druhá skupina jsou materiály na bázi oceli speciálně upravované pro optimální vlastnosti výsledného povrchu, tyto jsou převážně ve fázi studií, výzkumu a hledání optimálního materiálu. [40][49]

Žárově stříkané povlaky mají obecně určitou minimální porozitu. Pro aplikaci na povrchy válců spalovacích motorů může mít tato vlastnost pozitivní dopad v případě, že je povlak vhodně honován a póry jsou odkryty. Tehdy odkryté dutinky slouží na povrchu vrtání válce k zadržení maziva a pomáhají udržení optimálního mazacího filmu. Tyto dutinky se velikostí pohybují v mikrometrech a jejich schopnost zadržovat část maziva je dodatečná k množstvím maziva zadrženého profilem či topografií povrchu, které jsou zajištěny závěrečným honováním. Doporučená hodnota kapacity zadržení maziva pro tepelné povlaky z nízkouhlíkových ocelí se uvádí od 0,050 do 0,070 mm³/mm² pro dutinky vzniklé z pór a 0,014–0,018 mm³/mm² pro drážky vzniklé honováním. Optimální hodnoty zadržení maziva pro nanokrystalické povlaky jsou předmětem výzkumu. [40][49]

POVLAKY Z UHLÍKOVÝCH OCELÍ

V případě užití nízkouhlíkových ocelí pro nanášení povlaků plasmou se jako rozprašovací plyn používá vzduch. Vzduch s ocelovou slitinou reaguje a vytváří se určité množství FeO (oxidu dusičnatého), což je velice tvrdá kyslíková fáze železa, která na vytvořeném povlaku funguje jako pevné mazivo a zajišťuje zlepšené tribologické vlastnosti především v oblastech obou úvratí. Porozita vytvořeného povlaku se pohybuje okolo 2%. Je-li cílem nanést povlak o tloušťce 300 μm, pak musí proběhnout přibližně 16 opakování nástřiku při spotřebě materiálu 4 kg/h. Na obrázku 18 je mikrofotografie naneseného povlaku metodou plasmového nástřiku s přídavným drátem (PTWA) z uhlíkové oceli o hmotnostním podílu uhlíku 0,82%. Na



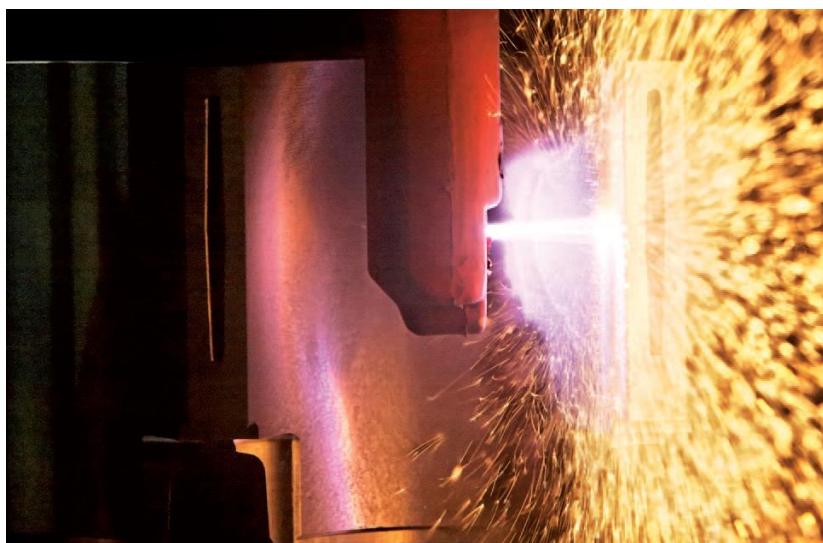
fotografii je patrná porozita povlaku a tmavěji zašedlé oblasti ukazují výskyt zmíněného tvrdého oxidu železnatého. Tvrdost tohoto povlaku je v rozmezí 550 až 620 HV. [40][49]

NANO-STRUKTURNÍ POVLAKY

Za nano-strukturní povlaky považujeme vysoce legované povlaky s obsahem legujících prvků jako Cr, Si, W a především 1,9 až 5 % hmotnostního podílu bóru, díky němuž se v povlaku vytvoří pevné a tvrdé fáze bóru. Vzhledem k vysokému celkovému obsahu legujících prvků v základním materiálu jsou v případě užití přídavných drátů používány dráty plněné. Tyto plněné přídavné dráty jsou označovány jako SUNA. Legující přísady plní dutý drát a jsou ve formě prášku. První užití plněné dráty SUNA 2 a 3 vedly k vytvoření povlaku s tvrdostí až 1200 HV. [40][49]

5.2.4 APLIKACE A PŘÍNOSY TEPELNĚ NANÁŠENÝCH POVLAKŮ

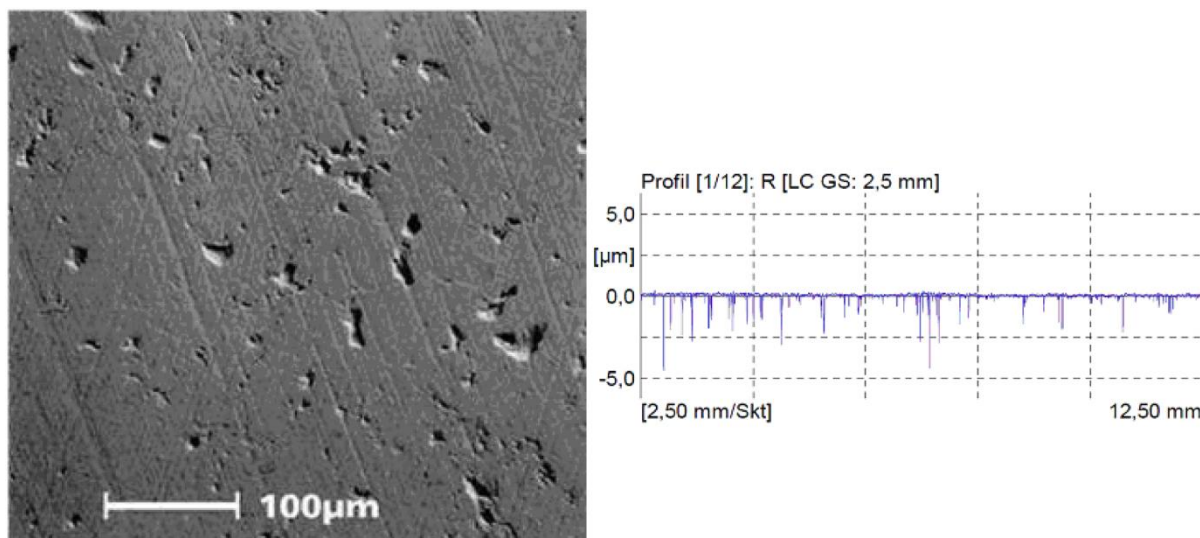
Tepelné nanášení povlaků ať už plasmou, elektrickým obloukem nebo kyslíkovým hořákem je jednou z nejmodernějších metod nahrazení tradičních vložek válců z šedé litiny. Přináší všechny zmíněné výhody quasi-monolitických provedení bloku válců. První použití této technologie v automobilovém průmyslu bylo společností Ford Motor Company, jejíž patentovanou technologií je právě PTWA (plasmové nanášení s užitím přídavného drátu). Společnost ji užila při výrobě vidlicového osmiválcového motoru pro Ford Shelby Mustang. Mezi další uživatele této technologie patří Nissan (automobil Nissan GTR), Caterpillar,



Obr. 17 Ukázka procesu PTWA (Ford) [14]

Volkswagen nebo jej užívá KS Kolbenschmidt při výrobě bloků motorů pro Porsche.[14][40][49]

Hlavními přínosy tepelně nanášených povlaků pro automobilní průmysl jsou snížení hmotnosti motoru, zvýšená účinnost motorů plynoucí ze zmíněné vylepšené podpory tvorby mazacího filmu především v úvratích. Dále zlepšený přenos tepla do chladicího okruhu a tím i snížení teplot bloků až o 30°C.[14]



Obr. 18 Mikrofotografie povrchu a profil drsnosti tepelně sprejovaného povlaku[32]

5.2.5 DOKONČOVACÍ OPERACE A DOSAŽENÉ DRSNOSTI VÝSLEDNÉHO POVRCHU

Tepelně sprejované povlaky mají jednu specifickou vlastnost, co se týče dokončovacíh operací. Jak bylo uvedeno, obsahují tyto povlaky určité procento pór, které jsou pro ně charakteristické. Honováním se část těchto pór odkryje a slouží jako zásobní prostor pro zadržování motorového oleje. Díky této skutečnosti se tepelně nanášené povlaky mohou na rozdíl od jiných povrchů válců honovat téměř do zrcadlového lesku a zadržení oleje zajistí tyto odkryté dutinky. Mikrofotografie a graf profilu drsnosti tepelně sprejovaného povlaku ukazuje obrázek 18. Hodnoty veličin nosného profilu a ostatních běžně uváděných parametrů drsností, které byly popsány v druhé kapitole, uvádí pro případ tepelně nanášených a následně honovaných povlaků tabulka[32][50]

Tab. 5 Hodnoty parametrů drsností tepelně sprejovaných povlaků po honování[32]

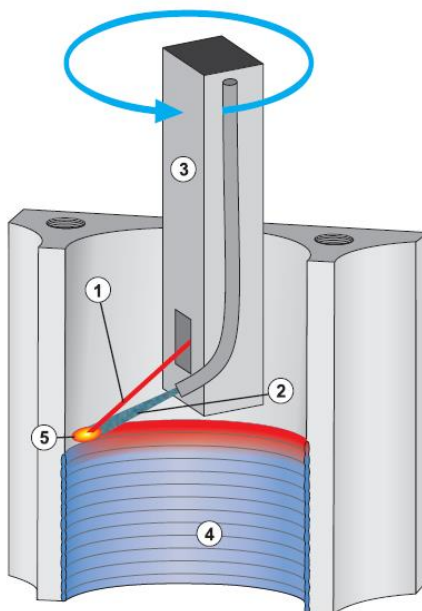
Parametr	Hodnota
Ra	0,15-0,35 μm
Rz	<5 μm
Rk	<0,3 μm
Rvk	0,5- 2,0 μm
Rpk	0,07- 0,16 μm
Mr2	84 %

5.3 LASEROVÉ LEGOVÁNÍ KŘEMÍKEM

TECHNOLOGIE

Další možností jak docílit užití odolného a tvrdého materiálu pouze na pracovním povrchu vrtání válce je krom výše uvedeného konceptu Lokasil® také způsob legování povrchu válců za pomoci laseru. Podstatou této technologie je ošetření pracovního povrchu vrtání natavením povrchové vrstvy, což umožní legování této vrstvy a především změni její mikrostrukturu a mikrotvrdost. Jedná se zde téměř o shodnou myšlenku jako u konceptu Lokasil®, jelikož legování se v případě ošetřování zmíněných Al-Si slitin provádí křemíkem, a ošetřená povrchová vrstva tímto získá opět podobu nadeutektické Al-Si slitiny.[17]

Vytvrzování povrchové vrstvy válců laserovým legováním se stalo lukrativním hlavně díky příznivé ekonomice procesu a také jeho použitelnosti jak pro malou, tak pro velkosériovou výrobu. Ke konkurenceschopnosti této technologie přispívá rovněž rychlost, vysoká čistota a možnost vysoké automatizace procesu. Tato technologie má široké spektrum využití, a to nejen v automobilovém průmyslu, ale obecně ve strojírenství je hojně používána pro vytvrzování povrchových vrstev různých materiálů legováním. Legování Al-Si slitiny křemíkem je tedy pouze jednou z mnohých možností využití laserového legování, nicméně co se týče bloků válců, má smysl hovořit právě o tomto případě. A právě tato technologie nese obchodní název Tribosil®, jež je ochrannou známkou, kterou vlastní německá firma VAW aluminium AG zabývající se převážně technologiemi a výrobou z hliníku pro strojírenský a zejména automobilní průmysl.[7][17]



Obr. 19 Nástroj pro laserové legování schematicky[38]

CHARAKTERISTIKA PROCESU

Proces laserového legování je aplikován na blok válců vyrobený z podeutektické AlSi9Cu3 slitiny. Podoba nástroje pro laserové legování je schematicky vyobrazena na obr. 19. Nástroj



se skládá z laserové optiky a dávkovače křemíkového prášku. Nástroj při legování koná ve válci šroubovitý pohyb. Podstatou procesu je velice rychlé ohřátí a natavení povrchové vrstvy slitiny (pozice 5 na obr. 19) a následné rychlé ochlazení (pozice 4 na obr. 19) nebo jinak rychlé tuhnutí, při kterém se utvoří metastabilní mikrostruktury zajišťující důležité technologické vlastnosti jako značně zvýšená tvrdost materiálu, zlepšená odolnost vůči opotřebení a často také může dojít ke zlepšení korozivzdornosti materiálu. Velice rychlé ochlazení a související stejně rychlé tuhnutí natavené a práškem legované vrstvičky je zajištěno díky odevzdání tepla z této vrstvy do zbytku okolního chladného materiálu válce, jehož je v porovnání s ochlazovanou vrstvou nesrovnatelně větší objem[17].

CHARAKTERISTIKA POVRCHU

Výslednou podobu a především kvalitu zmíněných zlepšených vlastností povrchové vrstvy materiálu určuje při laserovém legování několik faktorů. Předně bylo dokázáno, že efektivita zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy je závislá na rychlosti ochlazování nataveného materiálu, a dále je závislá na koncentraci legujících prvků v tuhnoucí slitině, jinak řečeno na množství práškem dodaného křemíku a případných ostatních legujících prvků. Dále zlepšení odolnosti povrchu proti opotřebení je ovlivněno tím, jak dobře jsou křemíkové krystaly při tuhnutí distribuovány, neboli rozprostřeny po šířce laserem natavené oblasti a tedy homogenita výsledné vrstvy. S touto skutečností úzce souvisí i další faktor ovlivňující míru zlepšení odolnosti proti opotřebení, a to velikost překryvu sousedních natavených oblastí. Je zřejmé, že tento překryv je regulován posuvem nástroje v axiálním směru válce a je třeba, aby byla trajektorie, v tomto případě šroubovice, nástroje byla optimalizována tak, aby výsledný povlak byl co nejvíce stejnorodý a jeho struktura homogenní[17].

Nejoptimálnější tloušťka vytvářeného povlaku se ukázala v okolo 600 μm , která je následně honována. Mikrostrukturní analýzy modifikované povrchové vrstvy materiálu ukázaly, že vrstva se skládá ze dvou oblastí s odlišnou mikrostrukturou. Těmito oblastmi jsou přetavená horní vrstva a dále tranzitní neboli přechodová vrstva, tato odděluje přetavený a legovaný povrch od základního materiálu válce.[35] Povrchová přetavená oblast získá svou jemnozrnnou dendritickou mikrostrukturou díky zmíněným vysokým rychlostem natavení a následného ochlazení. Vznik tvrdých zrn legujícího křemíku může být vysvětlen termodynamickými procesy probíhajícími v natavené vrstvě během jejího rychlého ochlazení. V přechodové tranzitní oblasti mohou být pozorovány α -dendrity hliníku a křemíku, jedná se o modifikovanou vrstvu, která se prolíná se základním materiálem válce a tedy homogenní je tato oblast pouze po částech[17].

Co se týče zlepšení tvrdosti této povrchové vrstvy, závisí především na hloubce přetavené oblasti materiálu. Mikro-tvrdost této vrstvy se pohybuje okolo 160 až 180 $\text{HV}_{0,2}$. Pokud mikro-tvrdost povrchové vrstvy závisí na hloubce natavení, tak hloubka natavení může být ovlivněna především délkou trvání pulsu laseru. Tyto se pohybují od 4 do 8 ms, a delší doba trvání pulsu zapříčinuje větší hloubku natavení povrchové vrstvy[17].

Nelze opomenout skutečnost, že povrchová vrstva vytvořená velmi rychlými procesy natavení a následného ztuhnutí, obsahuje díky tomuto zbytková napětí. Tato zbytková napětí se mohou pohybovat v rozmezí 45 až 70 MPa a jeho maximální hodnoty se vyskytují ve spodní části přetavené oblasti nebo v oblasti tranzitní. Článek o analýze vlastností laserem legovaného povrchu hliníku Sušnika a kol. [35] uvádí, že maximálních zbytková napětí se ukázala při použití doby trvání pulzu laseru 6 ms a naopak nejnižších hodnot nabývala v případě použití 4 ms dlouhých pulzů. Vhodná technologie k odstranění zbytkových napětí



v povrchové vrstvě vyrobené technologií laserového legování je precipitační žíhání. Precipitační žíhání hliníkové laserem ošetřené součásti může při teplotě 150°C trvat přibližně 12 hodin. Po prvních 6 hodinách napětí v povrchové vrstvě nabyde z hodnot zbytkového napětí cca 50 MPa až na hodnoty okolo 100 MPa, nicméně na konci žíhání po 12 hodinách jsou napětí zredukována na hodnoty maximálně 30 MPa [35]. Aplikace precipitačního žíhání si však vybere menší daň v podobě snížení mikro-tvrdosti povrchu o hodnotu asi 20 HV_{0,2} [17].

Co se týče dokončovacích operací a hodnot finálních povrchových drsností, opět lze odkázat na kapitulu o konceptu Alusil®, protože povrch je v tomto případě rovněž tvořen nadeutektickou slitinou Al-Si a tedy dokončovacími operacemi jsou zmíněné tři stupně honování se závěrečnou expozicí křemíkových zrn.[38][42]

5.4 ELEKTROLYTICKÉ VYTVÁŘENÍ OCHRANNÝCH POVLAKŮ

Bloky válců vyrobené ze slévárenské slitiny hliníku, tedy z vodivého materiálu, lze galvanicky pokovovat. Je tedy další možností jak docílit vyšší odolnosti povrchu vrtání, nanášení odolných povlaků galvanicky. Procesy galvanického pokovování v současnosti komerčně užívané nebo ve fázi výzkumu jsou dvou typů. První skupina použitých řešení je postavena na bázi kompozitních materiálů z niklu a keramiky (angl.. nickel ceramic composite- NCC), tedy galvanické pokovování těmito materiály. Druhou skupinu tvoří povlaky vytvářené díky plazmové elektrolytické oxidaci povrchu vrtání (angl. plasma electrolytic oxidation-PEO).[19][40]

5.4.1 NCC- KOMPOZITNÍ NIKL-KERAMICKÉ POVLAKY

Co se týče principu vytváření povlaků prvního zmíněného typu, jedná se o tvorbu kompozitního povlaku, přičemž základem je elektrolytický proces galvanického pokovování. Galvanické pokovování je proces, kdy při průchodu proudu se elektricky nabitě ionty kovů z elektrolytu jsou působením elektrického pole přemísťovány k elektrodám, z nichž jedna je ošetřovaný povrch, a tvoří na nich povlak. V tomto případě ionty niklové se takto uchycují na povrchu ošetřovaného válce a zároveň do vytvářené vrstvy zapouzdřují tvrdé částice keramického charakteru. Takto je na kovový materiál nanášena vrstva odolnějšího kompozitního materiálu s rovněž kovovým základem, tedy maticí niklu a částicemi vhodné tvrdé keramiky. Ve většině případů soudobého užívání této technologie se keramickými částicemi rozumí karbidy křemíku.[30][40]

Galvanické pokovování kompozitního materiálu z niklu a karbidu křemíku se dnes používá v širokém spektru aplikací především výkonných motorů. Tato technologie má svůj původ v 60. letech 20. století, kdy galvanické pokovování niklem s částicemi karbidu křemíku poprvé použila společnost Mahle a nazvala jej Nikasil®. Nikasil® se v současné době hojně používá jako laický výraz pro všechny obdoby tohoto galvanického kompozitního pokovování, nicméně jedná se o ochrannou známku původní technologie, kterou si firma Mahle nechala patentovat v roce 1967. Díky této patentové ochraně vzniklo postupně značné množství obdobných technologií, které mají odlišné názvy, nicméně principiálně se jedná o téměř totožné technologie pouze s jistými modifikacemi a vylepšeními. Jmenovitě lze uvést český Nikazet® vyvinutý v ČZM Strakonice, dále Gilnisil® italské firmy Gillardoni, nebo GALNIKAL® a v Austrálii úspěšně produkovaná technologie Electrosil®. Velmi časté modifikace původního kompozitu Nikasil® spočívají v přidání částic fungujících jako pevná maziva, přispívající ke snížení tření a zvýšení výkonu motoru. Jako příklad lze uvést částice materiálu Electrolube® aplikované technologií Elecrosil®.[6][9][11][30][40]



Galvanické pokovování probíhá v lázni (elektrolytu) ve které jsou obsaženy soli kovu určených vytvoření povlaků. Tyto soli se v elektrolytu rozdělují na kovové ionty, které jsou následně vylučovány při průchodu elektrického proudu a působení elektrického pole na elektrodách a především katodě, která je v tomto případě samotný pokovovaný povrch válce. Celé zařízení pro produkci galvanických povlaků se musí sestávat z několika částí. [30]

V první řadě je zapotřebí zdroje a rozvodu elektrického proudu a s touto částí související nutné regulační a měřicí přístroje. Zdroje proudu byla používána stejnosměrná nízkonapěťová dynamo, v současnosti je však převážně užito usměrňovačů s vyhlazováním proudu. Potřebné napětí při elektrolýze se pohybuje od 4 do 15 V a podle různých rozměrů výroby produkují zdroje od 1000 do 12000 A proudu. [36][51]

Elektrolyt je udržován ve vanách, jež jsou další nezbytnou částí celého zařízení spolu se vzduchotechnickým zařízením k odvodu výparů vznikajících při elektrolýze. Vany na elektrolyt bývají většinou vytápěné k zajištění optimálních tepelných podmínek procesu. Nedílnou součástí celého zařízení jsou také filtrační zařízení, mechanizační a automatizační části a další zařízení sloužící pro předúpravu a dokončování povrchových úprav.[36]

K dokončovacími operacemi v případě galvanicky pokovených povrchů se v současné době používá honovacího nástroje Flexhone®, což je nástroj s pružně uloženými honovacími diamantovými kameny. Drsnosti povrchů upravených tímto nástrojem záleží na daném typu nástroje a jsou vždy uvedeny v katalogu výrobce tohoto nástroje. Pro honování válců lze tedy vybrat nástroj dle požadovaných hodnot drsností.[6]

Elektrochemicky ošetřené válce typu Nikasil®, Electrosil® aj. nalézají uplatnění u výkonnějších motorů automobilových i menších motocyklových. Jmenovitě automobily Porsche nebo většina motokrosových strojů využívá ve svých motorech těchto technologií.[11][29]

5.4.2 PLASMOVÁ ELEKTROLYTICKÁ OXIDACE- PEO

Plasmová elektrolytická oxidace (angl. Plasma electrolytic oxidation- PEO) je proces velmi podobný konvenčnímu eloxování. Eloxování je metoda, kdy při vhodném elektrickém napětí je na povrchu hliníkové součásti vytvářena vrstva oxidů. Čistý hliník pokud je vystaven ovzduší, vytváří si přirozeně pevnou a odolnou oxidovanou vrstvu na svém povrchu. V tomto běžném případě tato vrstva slouží jako protikorozní ochrana. Tato vrstva je tvořena oxidem hlinitým (Al_2O_3) a při konvenčním eloxování je vytvářena na povrchu hliníkových součástí ponořených v kyselém elektrolytu. Plasmová elektrolytická oxidace se od konvenčního eloxování liší především velikostí používaného napětí. Tato technologie se někdy rovněž označuje jako mikro-oblouková oxidace (angl. micro-arc oxidation: MAO). Počátek výzkumu zabývajícího se vylučováním vrstvy oxidů na povrchu hliníku pod obloukovým výbojem spadá do 70. let 20. století, nicméně až v 90. letech se po přispění výzkumu pana Yerokhina se technologie plasmové elektrolytické oxidace dostala do celosvětového povědomí jako ekologicky šetrný způsob tvorby tribologicky lepšího keramického povlaku na ošetření hliníku a jeho slitin. Tento proces vyvinutý anglickou společností dostal název Keronit a tato společnost se stejným názvem má sídlo v Cambridge a na dalším výzkumu této technologie se rovněž podílí univerzita v Cambridge.[19][40]

Proces Keronite vytvoří kondenzovanou keramickou vrstvu na povrchu hliníku, která má jednotnou tloušťku a zahrnuje i okraje součástí. Krom hliníkových součástí lze technologií Keronite vytvářet rovněž hořčíkové součásti. Jedná se o elektrolytický proces podobný



eloxování, nicméně na rozdíl používá zředěné alkalické elektrolyty, které jsou netoxické. Při procesu se používá vysoké napětí až 200 V mezi dvěma elektrodami, z nichž jedna je ošetřovaný povrch. Napětím vytvářený proud se používá stálý nebo pulsující pokud se jedná o stejnosměrný a pulsní pokud se jedná o střídavý proud. Díky vysokému napětí se na ošetřovaném povrchu postupně vytváří miliony mikroskopických plasmových výbojů s velmi krátkou dobou trvání. Těmito se povrchová vrstva materiálu natavuje a modifikuje, stává se vrstvou oxidů hliníku, která mění strukturu na tvrdší a s větší hustotou.[19][46]

Stejně jako u technologie eloxování získáme na ošetřovaném povrchu hliníkového válce hustou, velmi dobře přilnutou vrstvu oxidu hlinitého. Nicméně při použití technologie plasmové elektrolytické oxidace se díky natavení a rekrytalizaci této vrstvy z oxidu hlinitého stává jeho krystalická fáze strukturou podobná safíru. Jedná se o mnohem složitější strukturu v porovnání se sloupcovitě porézní strukturou po konvenčním eloxování. Krystalická fáze vzniklá touto technologií je převážně $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, jinak nazývaný jako korund. Tato tvrdá krystalická fáze zapříčiňuje, že hodnoty tvrdosti povlaků vytvořených technologií Keronite se pohybují od 1500 do 2000 HV, což je mnohem tvrdší než ocel, písek i sklo. Pro použití jako ochrana vrtání válce je tato technologie více než dostačující.[19][40]

Protože se jedná o velmi kvalitní povrchovou úpravu, nalézá technologie Keronite uplatnění především v motoristickém sportu. Technologie je použitelná jak pro hliníkové bloky válců, tak pro bloky závodních motorů vyrobených z hořčíku. V konstrukci vozů Formule 1 je hojně využito tohoto procesu ochrany nejen vrtání válců, ale i jiných hořčíkových součástí. Krom ošetřování pracovních povrchů válců, kterými se zabývá tato práce, je technologie Keronite hojně užíváno v letecké technice, kosmonautice a jiných špičkových aplikacích.[19]



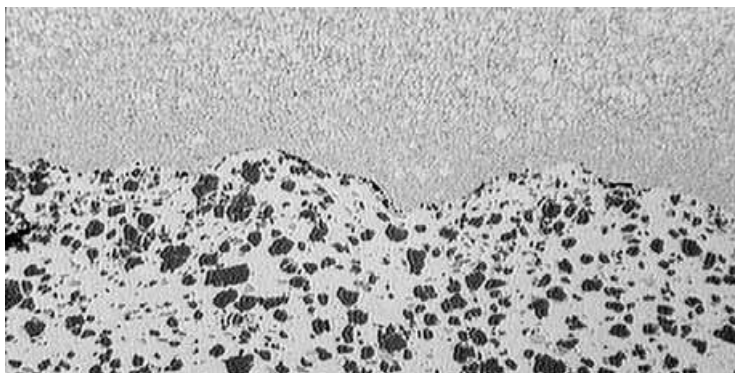
6 HETEROGENNÍ KONCEPTY

6.1 VLOŽKY Z NADEUTEKTICKÉ SLITINY AL-Si

Heterogenní koncept vložek typu SILITEC® nebo ALBOND® je založen opět na použití nadeutektické primární slitiny křemíku a hliníku (AlSi17Cu4Mg- Alusil®). Z této slitiny se vyrábí vložky, které jsou již hotové zalévány do bloku válců při jeho výrobě. Díky stejnému základnímu hliníkovému materiálu dochází ke spojení vložky a okolního materiálu bloku válců nejen mechanickým způsobem, ale dochází k částečnému natavení a následnému spojení hliníkovou maticí. Výhod, které tato technologie s sebou přináší je celá řada. Především se projevují ekonomické úspory v porovnání s monolitickými drahými bloky ALUSIL®, u kterých jak bylo zmíněno je drahá nadeutektická slitina užitá pro celý blok motoru. Tento heterogenní koncept stejně jako mnohé zmíněné quasi-monolitické koncepty (viz. LOKASIL®, laserové legování aj.) přináší výhodné vlastnosti drahé nadeutektické slitiny pouze na pracovním povrchu vrtání válce. Na rozdíl však od quasi-monolitických konceptů se jedná o technologii ekonomicky ještě více přívětivou. Totiž k výrobě bloků touto technologií je používána metoda vysokotlakého odlévání, což jak je známo, je velice produktivní proces. Základ této technologii položila německá firma PEAK Werkshoff, která jako první tuto technologii vyvinula a začala s její produkcí [46].

6.1.1 SILITEC®

První zmíněná technologie, nadeutektické materiály Silitec®, jsou vyráběny sprejovým zhutňováním. Ingoty sprejem zhutněné jsou následně vytlačovány. Vysoká rychlost procesu zhutňování rozprašováním zapříčiňuje, že primární částice křemíku v nadeutektické struktuře jsou podstatně menší než při standardním odlévání. Toto zajišťuje vynikající tribologické vlastnosti pracovního povrchu vložky, které jsou dosaženy po honování. Honování a dokončovací operace jsou v tomto případě shodné s jako u monolitických bloků Alusil®. Tedy je aplikováno třístupňové honování sestávající se z předhonování, honování a expozice křemíkových krystalů (viz. Alusil®). Jak bylo uvedeno, základní materiál, tedy hliník, je společný jak pro materiál vložky, tak pro okolní materiál válce. Z tohoto důvodu je možné dosáhnout až v 50 % kontaktu mezi vložkou a blokem pouze kovového spojení. Tento podíl kovové vazby vůči pouze mechanickému kontaktu zajišťuje, že bloky válců vyrobené touto technologií se vyznačují malými deformacemi a vysokou rozměrovou stabilitou při zátěži [46].



Obr. 20 Spojení vložky a materiálu válce [46]

Pro odlévání bloků válců se zaléváním hliníkovými nadeutektickými vložkami se používá především vysokotlaké lití (HPDC). Výhodou a důvodem proč se v tomto případě vysokotlaké odlévání používá, je fakt, že je zde úspěšně zabráněno přetavení a změně



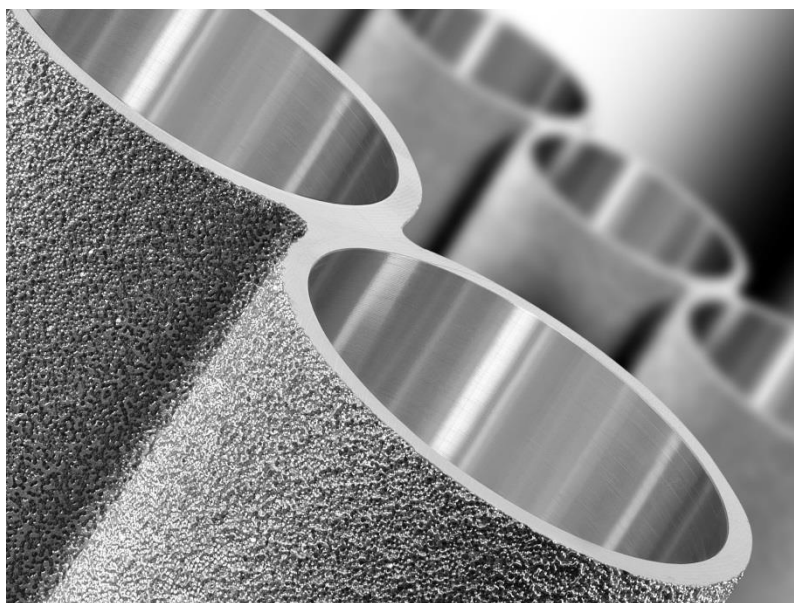
struktury zalévané vložky. To díky rychlému odvádění tepelné energie hliníkové slitiny kovovou formou. Teplo se při vysokotlakém odlévání rychle odvádí stěnami formy a je tedy



Obr. 21 Blok motoru s vložkami Silitec®[46]

malá pravděpodobnost, že by se vložka lokálně či jinak natavila a následně došlo k její deformaci. Pro použití jiných způsobů odlévání je nezbytné vytvořit nové slitiny na výrobu vložek, které by vůči účinkům zbytkového tepla byly více odolné. Použití technologie Silitec® nalezneme u výkonnějších motorů, jako příklad lze jmenovat motory s osmi nebo šesti válci s uspořádáním „V“ vyráběné společností Daimler pro použití v automobilech Mercedes, například AMG 5.5 V8 biturbo.[46]

6.1.2 ALBOND®



Obr. 22 Nadeutektické vložky Albond®[46]

Další technologií spadající mezi heterogenní koncepty zalévaných hliníkových vložek je Albond®. Jedná se o technologii, kterou vyvinula německá společnost Mahle v roce 2007. Opět je řeč o vložkách vyrobených z nadeutektické slitiny Al-Si, které se vložené do formy bloku motoru zalévají sekundární hliníkovou slitinou. Charakteristickým znakem vložek Albond® je výrazně zdrsňený povrch kontaktních ploch, jež vytváří vazbu s okolním materiálem bloku válců a zaručuje lepší tvarové prolnutí základního materiálu a materiálu vložky když je při odlévání jím obtékána. Tato zlepšená vazba zdrsňeného povrchu přispívá



k efektivnějšímu a jednotnému chlazení válců během provozu motoru, tím snižuje deformaci válců, minimalizuje třecí ztráty a přispívá k nižší spotřebě paliva. Zdrsněný povrch se vytváří za pomoci speciální technologie při odlévání vložek, rovněž vyvinuté společností Mahle[1].

Zásadní výhodou technologie Albond® je, že tyto vložky jsou určeny k odlévání bloků válců pomocí tlakového lití do kokil, což stejně jako v případě technologie Silitec® je přínos hlavně z ekonomického hlediska, protože získáváme blok válců s nadeutektickou prvotřídní strukturou vrtání za použití konvenčního a vysoce produktivního lití do ocelových forem. Díky lepší vazbě vložky s ostatním materiálem lze zmenšovat vzdálenosti mezi válci a dosahovat tak větší kompaktnosti motorů. Samotné tlakové odlévání do ocelových forem umožňuje výrobu tenkých stěn a rovněž i tímto se přispívá k odlehčení a kompaktnosti motorů. Společnost Mahle rovněž uvádí, že hmotnost připadající na jeden válec v motoru je redukována až o 400 g v porovnání s litinovými vložkami, které tato technologie nahrazuje. Dokončovací operace jsou stejně jako u technologie Silitec® i u Albond® shodné s třístupňovým honováním nadeutektické slitiny Al-Si. [1][46].

Mezi výhody, které tyto heterogenní koncepty Silitec® i Albond® přináší, nelze opomenout a nezařadit zvýšenou možnost recyklace celého bloku motoru, poněvadž materiál vložky a základní materiál bloku nejsou vyráběny z diametrálně rozdílných materiálů jako je tomu v případě použití ocelových či jiných povlaků nebo šedé litiny jako vložek pro vytvoření odolného povrchu vrtání.[1]

6.2 VLOŽKY Z ŠEDÉ LITINY

6.2.1 TECHNOLOGIE KLASICKÝCH LITINOVÝCH VLOŽEK

Je známo, že šedá litina je materiál, který má vynikající tribologické vlastnosti. Jeho mikrostruktura se sestává z feritu a lamelárního grafitu, a právě grafit v šedé litině funguje jako tuhé mazivo a zajišťuje její vynikající kluzné vlastnosti. Spolu s příznivou cenou jsou tyto hlavními důvody, proč se vložky válců hojně vyráběly pro použití ve spalovacích motorech právě ze šedé litiny. A dodnes je k tomuto účelu šedá litina hojně využívána. Vložky z šedé litiny mohou být do bloku motoru zalisovány nebo zality.[46]

Nejlevnější variantou, jak vyrobit blok motoru s vložkami z šedé litiny je vyrobit vložky, které se následně při odlévání bloku motoru do tohoto zalijí. Tento způsob je velmi levný, avšak přináší s sebou typické problémy. Jedním problémem je kvalita kontaktu mezi vložkou a okolním materiálem válce. Tento kontakt je v případě zalévaných litinových vložek pouze mechanický a nevyskytuje se zde žádné kovové spojení. Kvalita mechanického kontaktu mezi vložkou a materiálem bloku motoru závisí na podmínkách lití a na topografii kontaktního povrchu vložky. Proto je často vhodné aplikovat na povrch vhodný zdrsnňující proces. Dalším problémem této technologie je tvorba dutinek a spár mezi vložkou a materiálem bloku válců. Původ tohoto problému je v rozdílném chování materiálu vložky a materiálu bloku válců při tepelném zatížení. Tento problém se dá řešit dodatečným tepelným zpracováním bloku válců, nicméně nelze jej vyřešit úplně. V případě zalisovaných vložek se jedná o lepší, nicméně stále pouze mechanický kontakt mezi vložkou a materiálem válců.[15][46]

6.2.2 TEPELNĚ SPREJOVANÉ VLOŽKY GOEDEL®

Koncept Goedel® se snaží o využití výhodných vlastností vložek vyrobených z šedé litiny a zároveň v co největší míře také o eliminaci výše uvedených problémů vyplývajících z různých materiálových charakteristik vložky a materiálu bloku válců. Zejména při kombinaci litinové



vložky a hliníkové slitiny jako materiálu bloku se tyto problémy projevují nejvíce. Právě pro tuto kombinaci materiálů je koncept Goedel® vyvinut.[18][41][46]

Celý koncept Goedel® spočívá ve výrobě speciálních vložek, kdy na základní válcovou geometrii je tepelně sprejována ocelová vrstva, na niž je obdobně sprejována vrstva vhodné Al-Si slitiny. Pracovní povrch válce je tedy tvořen ocelovým odolným povrchem a nasprejovaná vrstva Al-Si slitiny a její mikrodrsnost zajistí vytvoření dobré vazby s materiálem bloku válců při zalévání vložky. Jedná se tedy o vícevrstvou vložku zalévanou materiálem při výrobě bloku válců. Lící proces používaný při výrobě bloku válců tímto konceptem je především vysokotlaké lití.[41][46][47]

Koncept Goedel® je patentem firmy Federal Mogul a je užit především k výrobě motorů osobních automobilů.[41]

6.2.3 VÝSLEDNÝ POVRCH, DOKONČOVACÍ OPERACE A DRSNOSTI POVRCHU LITINOVÝCH VLOŽEK

Finální podoba pracovního povrchu válce tvořeného litinovou vložkou ať už klasické koncepce, nebo například konceptu Goedel®, je utvářena pomocí honování vrtání válce honovacími kameny. Hodnoty drsností tohoto povrchu uváděné firmou Kolbenschmidt jsou uvedeny v tab. 6.[16][46]

Tab. 6 Drsnosti honovaného povrchu litinové vložky[38]

Parametr	Hodnota
Ra	0,71 μm
Rz	7,02 μm
Rk	1,82 μm
Rvk	2,25 μm
Rpk	0,31 μm
Mr2	75 %



ZÁVĚR

Tato bakalářská práce měla za cíl vypracovat přehled povrchových úprav a materiálu v současnosti používaných při výrobě válců spalovacích motorů, dále provést přehled běžně dosahovaných parametrů povrchových drsností získaných těmito povrchovými úpravami.

V úvodní části byl pro nastínění problematiky proveden rozbor motoru z hlediska konstrukce a nejčastější soudobé provedení válců spalovacích motorů jsou zde blíže rozděleny a charakterizovány. Dále jsou uvedeny důvody použití speciálních povrchových úprav a speciálních materiálů pro výrobu válců spalovacích motorů a požadavky na tyto součásti včetně uvedení doporučených hodnot povrchových drsností pro dané aplikace.

Vlastní část práce popisující jednotlivé technologie je rozčleněna do tří skupin podle hlediska zda daná technologie patří mezi koncepty monolitické, quasi-monolitické nebo heterogenní. Každá technologie je charakterizována jako výrobní proces, dále je uvedena oblast použití každé z uvedených technologií, dokončovací operace a s těmito související podoba výsledného povrchu spolu s hodnotami veličin drsností uváděných výrobcí daných konceptů. Je zřejmé, že bakalářská práce rozsahově nemůže uvést naprosto všechny dostupné technologie tohoto odvětví, nicméně i přesto se tato práce snaží postihnout co nejširší spektrum dnes používaných technologií. Tedy jsou uvedeny jak koncepty pro použití ve špičkových závodních motorech, luxusních automobilech (Alusil®, Lokasil® aj.), tak i koncepty používané v masovější výrobě především osobních automobilů (Silitec®, Goedel®).

Ze získaných poznatků v této práci se dá pro budoucí vývoj technologií pro výrobu válců spalovacích motorů předpokládat především snaha o zpřístupnění špičkových technologií z hlediska ekonomického, tedy jejich přizpůsobení levnějším výrobním procesům. Jmenovitě lze například uvést snahu o použití vysokotlakého lití pro koncept Lokasil® aj. Co se týče levnějších technologií, zde je jasná snaha o řešení problémů, jež tyto levnější koncepty s sebou nesou, tedy například zlepšení vazeb mezi litinovými vložkami a základovým materiálem hliníkového bloku motoru. Škála dostupných technologií je v současné době skutečně široká a pro téměř všechny aplikace lze na trhu nalézt vhodný koncept.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MAHLE. *ALBOND®*. 2006. Dostupné z: <http://www.mahle.com/mahle/en/news-and-press/press-releases/albond-rough-surface-improved-fuel-consumption.jsp>
- [2] KS ALUMINIUM TECHNOLOGIE. *Alusil® cylinder blocks: for the AUDI V6, V8 and V10 Gasoline Engines*. Neckarsulm Germany, 2008. Dostupné z: http://www.kspg.com/fileadmin/media/Broschueren/Produktbroschueren/KS_ATAG/ZKG_Niederdruckguss/at_alusil_audi_e.pdf
- [3] KS ALUMINIUM TECHNOLOGIE. *Alusil®- cylinder blocks: Porsche V6/V8*. Hafenstraße 25 74172 Neckarsulm Germany, 2008. Dostupné z: http://www.kspg.com/fileadmin/media/Broschueren/Produktbroschueren/KS_ATAG/ZKG_Niederdruckguss/at_porsche_v8_e.pdf
- [4] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 6. vyd. Brno: AVID, 2010, 179 s. ISBN 978-80-87143-15-5.
- [5] HASTINGS PISTON RINGS. *Bore finish*. 2012. Dostupné z: http://www.hastingsmfg.com/Master_Catalog_Pdfs/P7-9.pdf
- [6] BRM's Flexible Honing, Surface Finishing, and Deburring Blog. *IHS GlobalSpec CR4* [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://cr4.globalspec.com/blogentry/24524/Flexible-Hones-for-Nikasil-Liners-and-Engine-Rebuilds>
- [7] OSÓRIO, Wislei R., Noé CHEUNG, Leandro C. PEIXOTO a Amauri GARCIA. Corrosion Resistance and Mechanical Properties of an Al 9wt%Si Alloy Treated by Laser Surface Remelting. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*. 2009, roč. 2009, č. 4.
- [8] Cylinder Bore Surface Finishes. CARLEY, L. *Engine Builder* [online]. September 2000 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.enginebuildermag.com/2000/09/cylinder-bore-surface-finishes/>
- [9] CYLINDER ELECTROPLATING. *Electrosil Motorsport technology* [online]. 2011 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.electrosil.com.au/news3.htm>
- [10] HOMMEL CS S.R.O. *Drsnost povrchu: Parametry drsnosti povrchu dle DIN EN ISO*. Pražská 3259, 415 01 Teplice Czech Republic, 2010. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf>
- [11] HOUGHTON, R. ELECTROSIL COATINGS PTY. LTD. *ELECTROSIL COATED CYLINDERS*. 2006. Dostupné z: www.electrosil.com.au
- [12] KESHAVAN, S. a SAUER. Exposure honing of hypereutectic Al-Si alloys. *Engine professional*. 2011, Jan-Mar. Dostupné z: <http://www.nagelusa.com/pdfs/exposurehoning.pdf>
- [13] ALHASHMY, Hasan Ali. *Fabrication of Aluminium Matrix Composites (AMCs) by Squeeze Casting Technique Using Carbon Fiber as Reinforcement*. University of Ottawa, 2010. Dostupné z: <http://www.weck.ca/MSS/ppts/2March2012.pdf>
- [14] KS KOLBENSCHMIDT AG. *GTV PTWA Coat ing: The technical standard in automotive industry has been new defined*. Gewerbegebiet „Vor der Neuwiese“,



- Germany, 2011. Dostupné z: http://www.gtv-mbh.com/cms/upload/downloads/en/GTV_PTWA_en.pdf
- [15] *High-pressure Die Cast Cylinder Blocks Made of Aluminium: Highly Efficient Solution Specifically for Passenger Car In-line Engines*. Neckarsulm Germany, 2008. Dostupné z: http://www.kspg.com/fileadmin/media/Broschueren/Produktbroschueren/KS_ATAG/Z_KG_Druckguss/at_alusil_durckguss_e.pdf
- [16] MSI MOTOR SERVICE INTERNATIONAL. *Honing of grey cast iron cylinder blocks*. 1999. Dostupné z: <http://file.seekpart.com/keywordpdf/2011/3/30/2011330113527501.pdf>
- [17] SUŠNIK, Janez, Roman ŠTURM a Janez GRUM. Influence of Laser Surface Remelting on Al-Si Alloy Properties. *Strojníski vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2012, vol. 58, issue 10, s. 614-620. DOI: <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2012.696>.
- [18] Innovative cylinder liner technology from federal-mogul reduces engine oil consumption by up to 40 percent. *Reuters.com* [online]. 2012, Thu May 17, 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.reuters.com/article/2012/05/17/idUS155334+17-May-2012+HUG20120517>
- [19] CURRAN, James A. KERONITE. *Keronite surface treatment for aluminium, magnesium and titanium: aerospace & defence applications*. 2011. Dostupné z: <http://www.materialsfinishing.org/attach/9.%20Keronite%20James%20Curran.pdf>
- [20] VLK, František. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Konstrukce motocyklových motorů*. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2006-04-224-243.pdf>
- [21] SCHMIDT, Josef. Kvalitu spalovacích motorů určují dokončovací operace. *MM Das Industriemagazin* [online]. 2011, roč. 2011, č. 42 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kvalitu-spalovacich-motoru-urcuji-dokoncovaci-operace.html>
- [22] KRUG, Peter a Andreas STORZ. *Latest Generation of Aluminium Cylinder Liners for Downsizing Engines*. 2009. Dostupné z: http://www.engine-expo.com/forum_2009/pdfs/day1/15_andreas_storz.pdf
- [23] VLK, František. *Lexikon moderní automobilové techniky*. 1. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2005, 344 s. ISBN 80-239-5416-4.
- [24] Looking 4 spares: Alusil Cylinders. [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.looking4spares.co.za/web-articles/210-alusil-cylinders>
- [25] KS ALUMINIUM TECHNOLOGIE. *Low-pressure Die Cast Cylinder Blocks: The Optimum for High-performance Gasoline and Diesel Engines (for Passenger Cars)*. KSPG AG Neckarsulm GERMANY, 2007. Dostupné z: http://www.kspg.com/fileadmin/media/Broschueren/Produktbroschueren/KS_ATAG/Z_KG_Niederdruckguss/at_niederdruckguss_zkg_e.pdf



- [26] *Metal matrix composites: custom-made materials for automotive and aerospace engineering*. Editor Karl U Kainer. Weinheim: Wiley-VCH, c2006, 314 s. ISBN 35-273-1360-5.
- [27] ANANDKUMAR, R., A. ALMEIDA, R. COLAÇO, R. VILAR, V. OCELIK a J. Th. M. De HOSSON. Microstructure and wear studies of laser clad Al-Si/SiC(p) composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2007, vol. 201, issue 24, s. 9497-9505. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.04.003>.
- [28] MEARA, Tim. New Honing Options for Hypereutectic Aluminum Cylinder Bores. *Engine professional*. 2008, Apr-Jun. Dostupné z: http://www.aera.org/ep/downloads/ep2/EP04-2008_20-26.pdf
- [29] Nikasil. *US autoparts* [online]. 2007 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.usautoparts.net/bmw/engines/nikasil.htm>
- [30] Nikasil - dispersní pokovení. *Heidenau* [online]. 2003 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://kart-pneu.cz/nikasil/>
- [31] GOODMAN, John. Nikasil® and Alusil. *AREA engine builders association* [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.aera.org/engine-professional/nikasil%C2%AE-and-alusil/>
- [32] ERNST, P. a B. DISTLER. Optimizing the Cylinder Running Surface / Piston System of Internal Combustion Engines Towards Lower Emissions. *SAE International*. 2012, Sept. Dostupné z: http://www.sulzer.com/en/-/media/Documents/ProductsAndServices/Coating_Services/General/TechnicalArticles/Paper_SAE_Madison_2012.pdf
- [33] DIENWIEBEL, Martin, Klaus PÖHLMANN, Matthias SCHERGE a Max M. ROENSCH. Origins of the wear resistance of AlSi cylinder bore surfaces studies by surface analytical tools. *Tribology International*. 2007, vol. 40, 10-12, s. 1597-1602. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/370134>.
- [34] SCHOLZ, Celestýn. *Pístové spalovací motory: přednášky*. Liberec, 2011. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/PSM/PSM_15.pdf
- [35] MALEC, Petr. *Povrchové úpravy válců spalovacích motorů*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Ondřej Maršálek.
- [36] KRAUS, V. *POVRCHY A JEJICH ÚPRAVY*. 2001. Dostupné z: <http://tzs.kmm.zcu.cz/POUcelk.pdf>
- [37] MSI MOTOR SERVICE INTERNATIONAL. *Reconditioning of aluminium engine blocks*. 2007. ISBN 978-3-86522-197-1.
- [38] KOLBENSCHMIDT PIERBURG GROUP. *Reconditioning of aluminium engine blocks: Service tips and informations*. 2008. Dostupné z: http://download-mst.ms-motor-service.de/ximages/ks_50003799-02_web.pdf
- [39] KS ALUMINIUM TECHNOLOGIE. *Reconditioning of Aluminium Engines*. Karl-Schmidt-Straße 74172 Neckarsulm Germany, 2005. Dostupné z: http://www.w124performance.com/docs/general/aluminum_engine_reconditioning.pdf



- [40] *Replacing the Cast Iron Liners for Aluminum Engine Cylinder Blocks: A Comparative Assessment of Potential Candidates*. Connecticut, April 2011. Dostupné z: http://www.ewp.rpi.edu/hartford/users/papers/engr/ernesto/lennyj/EP/John_Lenny_Masters_Project_Final_Draft_4_14_11.pdf. Masters degree project. Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut.
- [41] FEDERAL MOGUL. *Rings and Liners*. 2012. Dostupné z: http://www.federalmogul.com/en-US/Media/Documents/Product_Sheets_Rings_Liners.pdf
- [42] WANG, Yucong a Simon C TUNG. Scuffing and wear behavior of aluminum piston skirt coatings against aluminum cylinder bore. *Wear*. 1999, 225-229, s. 1100-1108. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(99\)00044-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(99)00044-7).
- [43] MACEK, Jan a Bohuslav SUK. *Spalovací motory I*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003, 244 s. ISBN 80-010-2085-1.
- [44] Sunnen: above and beyond honing. *Honing Options for Hypereutectic Aluminum Cylinder Bores* [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.sunnen.com/NewsDetails.aspx?NewsID=11>
- [45] Škoda Techweb: Teorie motoru 4. ČECH, Jiří. [online]. 2003 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=413>
- [46] EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. *The Aluminium Automotive manual: Applications- Power train – Cylinder linings*. 2011. Dostupné z: <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/12>
- [47] PAWLUS, P., R. REIZER a M. WIECZOROWSKI. The analysis of directionality of honed cylinder liners surfaces. *Scanning*. 2014, vol. 36, issue 1, s. 95-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/sca.21101>.
- [48] YAMAGATAA, H., M. ANIOLEKB, H. KURITAAI, J.H. SOKOLOWSKI a W. KASPRZAK. The effect of average cooling rates on the microstructure of the Al–20% Si high pressure die casting alloy used for monolithic cylinder blocks. *Journal of materials processing technology* 203. 2008, roč. 2008, č. 203. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/jmatprotec
- [49] BOBZIN, K., F. ERNST, K. RICHARDT, T. SCHLAEFER, C. VERPOORT a G. FLORES. Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process. *Surface and Coatings Technology*. 2008, vol. 202, issue 18, s. 4438-4443. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.023>.
- [50] GRABON, Wieslaw, Pawel PAWLUS, Jaroslaw SEP, Wieslaw KURDOWSKI a Wieslaw M. KAZMIERSKI. Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder liner honed surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*. 2010, vol. 43, issue 10, s. 1882-1892. DOI: <http://dx.doi.org/10.1385/0896035174>.
- [51] ADAMIŠ, Pavel a Miroslav MOHYLA. *VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH POVLAKŮ S KATODICKÝ VYLUČOVANOU MATRICÍ*. Vysoká škola báňská -Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33,Ostrava - Poruba, ČR, 2008. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_00/papers/653.pdf
- [52] RAUSCHER, J. *Spalovací motory*. 2005.



- [53] RAUSCHER, Jaroslav. Vozidlové motory: Studijní opory. 2005, 156 s. Dostupné z: <http://www.iae2.fme.vutbr.cz/opory/Vozidlove.motory.pdf>
- [54] KS ALUMINIUM-TECHNOLOGIE. VW W8 AND VW/AUDI W12 ENGINES WITH ALUSIL ® BLOCKS. KS Aluminium-Technologie AG Hafenstraße 25 D-74172 Neckarsulm, 2005. Dostupné z: http://www.pierburg.de/pdfdoc/lpdc_engine_blocks_e.pdf
- [55] (ED)., MAHLE GmbH). Cylinder components Properties, applications, materials. Online-Ausg. Wiesbaden: Vieweg Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010. ISBN 978-383-4896-971.
- [56] Spalovací motor do muzea nepatří, úspěšně čelí nástupu elektromobilů. Idnes.cz [online]. 2011 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/spalovaci-motor-do-muzea-nepatri-uspesne-celi-nastupu-elektromobilu-12k-/automoto.aspx?c=A111120_233041_automoto_vok
- [57] Trabant 601. SHOC Auto [online]. 2003 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://trabant.shocauto.com/images/Image9.gif>
- [58] First Look: 2014 KTM Motocross and Enduro Range. MOTO [online]. 2011 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://moto.mpora.com/news/first-look-2014-ktm-motocross-and-enduro-range.html>
- [59] Block design. Bimmer Boost [online]. 2014 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.bimmerboost.com/images/imported/2013/09/blockdesign-1.jpg>
- [60] Low pressure die casting machines. Direct industry [online]. 2014 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/low-pressure-die-casting-machines-57620-2545275.jpg



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

HPDC	[-]	vysokotlaké lití (high pressure die casting)
HVOF	[-]	vysokorychlostní kyslíkový hořák (high velocity oxygen fuel system)
LPDC	[-]	nízkotlaké lití (low pressure die casting)
Mr2	[%]	podíl materiálu pod profilem drsnosti
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
Rk	[μm]	základní hloubka
Rpk	[μm]	redukovaná výška špiček
Rvk	[μm]	redukovaná hloubka rýh
Rz	[μm]	maximální výška profilu