

Vliv procesních a materiálových parametrů na kruhovitost pístu sacího ventilu pro dieselové vstřikovací čerpadlo

Pavel Bílek

Abstrakt

Práce na téma „Vliv procesních a materiálových parametrů na kruhovitost pístu sacího ventilu pro dieselové vstřikovací čerpadlo“ se zabývá dokončovacím procesem broušení pístu, kdy dochází k nedodržení předepsané kruhovitosti na součásti.

Je zaměřena především na popis problému s kruhovitostí u součásti a věnuje se metodám a experimentům, které byly použity k zjištění hodnot pro následnou optimalizaci dokončovacího procesu pro zajištění požadované kruhovitosti.

Klíčová slova

Kruhovitost, píst, Six Sigma, plánovaný experiment, Minitab

Úvod

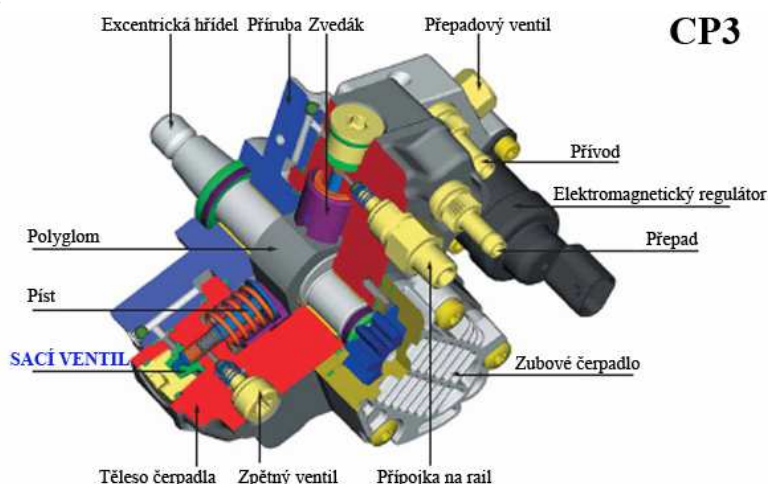
Práce je řešena pro podnik Jihlava Bosch Diesel s.r.o., kde se součást pístu sacího ventilu montuje do dieselového vstřikovacího čerpadla. Pro správnou funkci čerpadla je důležité dodržení veškeré výkresové dokumentace a to nejen na součásti pístu. Při nedodržení předpisů vznikají následně při zkouškách problémy, které je nutné řešit. U výše zmíněné součásti se začal objevovat problém s kruhovitostí. Proto se v jihlavském podniku začal řešit projekt na zlepšení procesu – Six Sigma. Dokončovací operace broušení na součásti, při které se docílí kruhovitosti, je vykonávána v podniku Hützel s.r.o v Klášterci nad Ohří, kde byla prováděna měření. Experimenty na tepelné zpracování a jejich vyhodnocení bylo provedeno v Jihlavě.

Cílem této práce je seznámení s danou problematikou, popsání metody Six sigma a všech experimentů, které byly použity pro získání hodnot. Pomocí všech výsledků se následně optimalizuje dokončovací proces obrábění pístu sacího ventilu.

1. Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo – CP3

Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo je nedílnou součástí diesellových motorů. Zajišťuje společně s railem vstřikování optimálního množství paliva - při dostatečně vysokém tlaku - do válců diesellových vznětových motorů. Rail je konstrukce přímo navazující na čerpadlo, v které se akumuluje, stále pod stejným tlakem, palivo. Stejně tak je i píst sacího ventilu nedílnou součástí diesellového čerpadla a jeho správná funkce má dopad nejen na činnost ventilu, ale i na účinnost celého vstřikovacího zařízení.

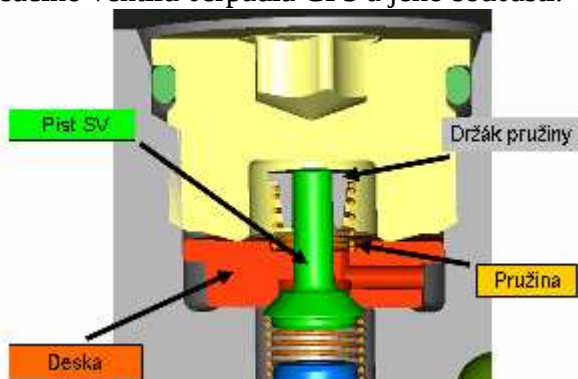
Na obrázku 1 je řez vysokotlakým vstřikovacím čerpadlem systému Common Rail, které má obchodní název CP3. Čerpadlo má tři sací ventily, jenž jsou vůči sobě natočeny, v rovině kolmé na excentrickou hřídel, o 120°. Na každý sací ventil je namontovaná přípojka na rail. Všechny tři přípojky jsou napojeny na jeden a ten samý rail, který dále akumuluje palivo před vstupem do válců motoru. Sací ventil je místo v konstrukci, kde dochází k vytvoření vysokého tlaku paliva. V railu je dále tlak jen udržován. Díky vysokému tlaku je zajištěno vstříknutí paliva do válců vysokou rychlostí. Dojde k jeho rozprášení na mikrokapky a tím se docílí účinného spálení. Čerpadlo CP3 vytváří ve své vysokotlaké části tlak až 1600 bar.



Obr. 1 Schéma vysokotlakého vstřikovacího čerpadla CP3. [1]

1.1. Sací ventil čerpadla CP3

Funkce sacího ventilu spočívá v propouštění paliva proudícího od zubové spojky do části nad píst, který je součástí zvedáku připevněného na polyglom excentrické hřídele. Zároveň brání návratu paliva zpět a tím umožňuje jeho průtok do vysokotlaké části čerpadla. Na obrázku 2 je schéma sacího ventilu čerpadla CP3 a jeho součástí.



Obr. 2 Schéma sacího ventilu vysokotlakého čerpadla CP3. [1]

Obr. 4 Schéma součásti s vyznačeným problémem.

3.1. Definice kruhovitosti

Všechny body povrchu kužele v rovině řezu kolmé k ose kužele musí ležet uvnitř tolerančního pole vymezeného dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými o velikost tolerančního pole. [4] V případě pístu SV má velikost tolerančního pole 0,003 mm.

3.2. Definice parts per milion – ppm [5]

Výpočet ppm se často využívá ve výrobních i jiných společnostech ke sledování zmetkovitosti. Používá se jako ukazatel při meziročním srovnávání efektivity výroby nebo při srovnání jednotlivých podniků.

Parts per milion anglicky znamená „dílů či částic na jeden milion“ a je výrazem pro jednu miliontinu celku. Někdy je tento výraz odvozen i z latinského pars per milion. Používá se pro znázornění jedné části vůči celku.

Výpočet ppm: množství neshodných výrobků (zmetků) z jedné dávky (a nebo za sledované období) se vydělí celkovým počtem kusů ve stejné dávce nebo za sledované období a následně vynásobí 1 000 000.

Platí tedy vztah:
$$ppm = \frac{n_z}{n_c} \cdot 10^6$$
 n_z - počet neshod (zmetků)
 n_c - celkový počet kusů

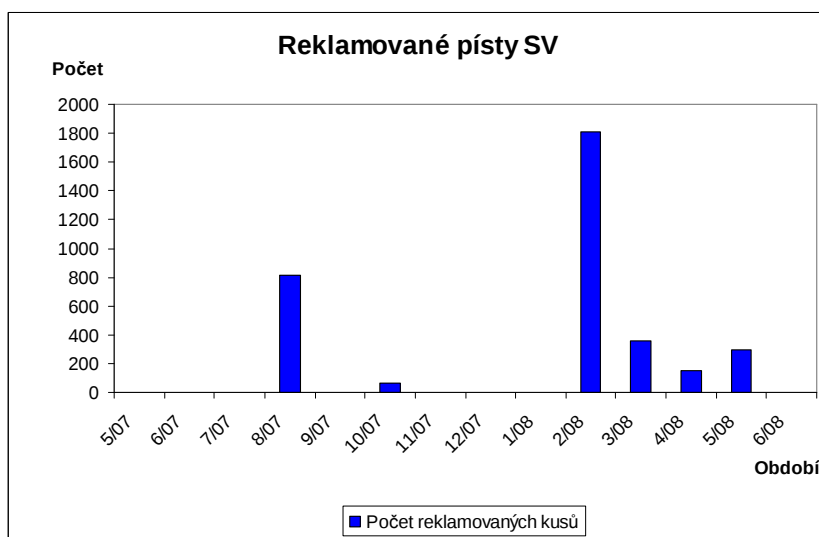
3.3. Vstupní data do problému kruhovitosti pístu SV

V roce 2007 bylo dodáno z Klášterce nad Ohří do Jihlavy 2 163 533 kusů pístů SV a z toho bylo 875 kusů reklamováno na nedodržení tolerančního pole kruhovitosti. V roce 2008 od ledna do června včetně bylo dodáno 1 271 776 kusů, z toho bylo 2 612 chybných. Jako ukazatel zmetkovitosti pístu SV bylo použito ppm.

Za rok 2007 bylo:
$$ppm = \frac{n_z}{n_c} \cdot 10^6 = \frac{875}{2163533} \cdot 10^6 = 404$$

Za období leden až červen 2008 bylo:
$$ppm = \frac{n_z}{n_c} \cdot 10^6 = \frac{2612}{1271776} \cdot 10^6 = 2054$$

Na obrázek 5 je grafické znázornění vývoj počtu kusů za období od května 2007 do června 2008.



Obr. 5 Vývoj reklamovaných kusů pístu SV.

Z hodnot a z grafu je vidět, že v období mezi srpnem 2007 a únorem 2008 relativně nedocházelo ke vzniku zmetků. Písty se obrábí na pěti konstrukčně a typově stejných strojích. Po výskytu problému v srpnu 2007 dodavatel udělal opatření a kontrolu procesu na vybraných strojích, protože ne na všech docházelo ke vzniku chyb. Provedla se výměna řemenů a ložisek a kontrolovala se stabilita strojů. Poté se přestaly objevovat zmetky až do začátku roku 2008. Dodavatel v té době neznal příčinu, proto byl společností Bosch připraven projekt zlepšování procesu – Six Sigma, k určení skutečné příčiny, který se vztahuje na všechny obráběcí stroje.

4. Six Sigma [6]

Six Sigma je úplný a flexibilní systém dosahování, udržování a maximalizace obchodního úspěchu, založený na porozumění potřeb a očekávání zákazníků, disciplinovaném používání faktů, dat a statistické analýzy na základě pečlivého přístupu k řízení, zlepšování a vytváření nových obchodních, výrobních a obslužných procesů.

Six Sigma je založena na třech základních prvcích:

Zkušenosti – výchozím bodem pro použití vědeckých metod jsou praktické zkušenosti lidí z procesu.

Statistické metody – jsou nezbytné pro dosažení excelentních výsledků.

Zdravý rozum – tvoří základnu pro definování cílů, fungování mezilidských vztahů a vyváženého využití zkušeností a vědeckých metod.

Cílem Six Sigma je zisk, spokojenost zákazníků, spokojenost zaměstnanců, spokojenost dodavatelů, ekologie, bezpečnost a firemní kultura.

Six Sigma nabízí několik metod a způsobů jak zvládnout daný problém. Jedná se o:

- 1) DFSS – metodologie jak navrhovat nové výrobky a procesy, které by lépe uspokojily zákaznické potřeby.
- 2) DMAIC – způsob jak zlepšit dosavadní procesy, a tak uspokojit požadavky zákazníka.
- 3) Řízení procesu – přístup k řízení a zvládání procesu tak, aby splňoval podnikatelské cíle.

4.1. DMAIC [6]

Pro problematiku kruhovitosti na pístu SV je použita metoda DMAIC. Jedná se o metodologii zlepšování procesů. DMAIC je zkratka složená z anglických slov:

D – Define – definování cíle projektu a jeho rozsahu, získání podkladů o procesu a zákazníkovi.

M – Measure – měření a sbírání informací o problému a o současně situaci.

A – Analyse – analýza naměřených dat, statistické vyhodnocení, vytvoření hypotéz možných příčin a provádění pokusů k jejich prokázání či vyvrácení.

I – Improve – zlepšení zavedením výsledků předchozích analýz do praxe.

C – Control – Řízení procesu, dostání procesu pod kontrolu, standardizování výsledků a zajištění, aby zlepšení procesu mělo trvalý charakter.

Výše uvedená slova jsou názvy jednotlivých fází zlepšování procesu. Tyto stupně jsou jednotlivě propojeny a tvoří proces. Výstupy jedné fáze jsou zároveň vstupy fáze následující.

I když je DMAIC proces po sobě následujících kroků, může se stát, že bude nutné vrátit se zpět a například upřesnit definici a rozsah projektu, provést nová měření apod.

4.2. Statistický software Minitab [7]

Minitab představuje balík statistických metod určených pro analýzu dat. Byl vyvinut na Pensylvánské státní universitě týmem vědců v roce 1972. Nabízí přesné a přizpůsobivé nástroje pro kontrolu kvality, plánování experimentů a základních statistických metod. Je často používán v praxi a v různých společnostech po celém světě.

Minitab je považován za standardní nástroj pro vyhodnocování a analýzu dat u společností, které aplikovaly metodiku Six Sigma.

4.3. Design of Experiment (DoE) – plánovaný experiment [6]

Jednou z hlavních částí DMAIC je Design of Experiment, neboli plánovaný experiment, který je zahrnut do bodu Analyse. DoE je vytvářen ve statistickém softwaru Minitab.

Plánovaný experiment je zkouška (a nebo posloupnost zkoušek), ve kterých se cílevědomě provádí změny vstupních faktorů procesu, aby bylo možné pozorovat a identifikovat odpovídající změny výstupní proměnné - tzv. odezvy (response). Umožňuje testovat několik faktorů najednou.

DoE je silný nástroj pro zlepšení a optimalizaci výroby. Je to aktivní statistická metoda, což znamená, že se provádí v procesu promyšlené změny a pozorují se příslušné odezvy, aby se získaly informace vedoucí k jeho zlepšení.

Je-li proces pod statistickou kontrolou tzn. je-li stabilní, ale stále má ještě nízkou způsobilost, pak je nutné zmenšit jeho variabilitu. DoE nabízí efektivní metody pro zvýšení způsobilosti.

Jakmile regulační diagram ukáže na nestabilitu procesu, DoE pomůže identifikovat, z mnoha možných příčin, ty nejvlivnější říditelné faktory, jež tuto nestabilitu způsobují. Stanoví nejen jejich důležitost, ale případně i jejich interakce.

Pomocí DoE lze docílit zlepšení výtěžnosti procesu, zmenšení jeho variability, redukci doby vývoje nového produktu, snížení celkových nákladů a dále pomáhá vyčíslit dopad různých konfigurací ve výrobě a určit klíčové parametry ovlivňující výkonnost.

4.4. Korelační analýza, p-hodnota a dvouvýběrový F-test [6]

Pro hodnocení parametrů ovlivňujících proces byla ve statistickém softwaru Minitab použita metoda korelační funkce. Ta slouží ke kvantitativnímu hodnocení vztahů mezi dvěma a více proměnnými. Vychází z toho, že se na začátku stanoví nulová hypotéza, která říká, že neexistuje závislost mezi dvěma proměnnými. Poté se v Minitabu provede výpočet. Výsledkem korelační analýzy je takzvaná p-hodnota, jedná se o pravděpodobnost existence závislosti, která nabývá hodnot od 0,0 až po 1,0. Konvekcí je dáno, že pokud je p-hodnota větší než 0,05, je potvrzena nulová hypotéza a neexistuje závislost mezi dvěma proměnnými. Pokud je ale p-hodnota menší než 0,05, je závěr takový, že je jen malá šance, aby neexistovala závislost mezi proměnnými. Zamítne se tedy nulová hypotéza a učiní se závěr, že platí hypotéza A, tedy že existuje závislost mezi dvěma proměnnými.

P-hodnota je výstupem i jiných analýz prováděných v Minitabu. Jednou z nich je metoda dvouvýběrového F-testu, kde se za různých vstupních podmínek hodnotí pouze jedna proměnná. Pokud je p-hodnota větší než 0,05, platí pro danou proměnnou, že nezáleží na vstupních podmínkách. V opačném případě je p-hodnota menší než 0,05. Podmínkou pro korelační analýzu a F-test je nutnost mít spojitá data. To znamená, že se data vztahují k předem stanovené stupnici.[8]

5. Vstupy do plánovaného experimentu

Cílem projektu Six Sigma pro kruhovitost pístu SV je dosažení nulové zmetkovitosti. V celém procesu výroby má zásadní vliv na kruhovitost dokončovací operace broušení. Té je také při řešení problému věnována největší pozornost.

Nejdůležitější fází projektu je správné nadefinování vstupní hodnoty do plánovaného experimentu (DoE). Na základě analýzy vstupních faktorů z oblastí procesu, materiálu, stroje, lidského faktoru a vlivu okolí, byly vyhodnoceny jako nejvíce ovlivňující výslednou kruhovitost následující parametry:

- řemen brusného vřetene
- řemen pracovního vřetene
- vibrace z okolí
- geometrie polotovaru
- tepelné zpracování pístu SV
- otáčky pracovního vřetene
- doba vyjiskřování

Analýzu prováděl tým složený z pracovníků podniku Bosch Diesel, který byl seznámen s procesem broušení ve společnosti Hützel. Společně nadefinovaly hlavní faktory ovlivňující kruhovitost. V následujících bodech budou jednotlivé faktory popsány.

5.1. Řemen brusného vřetene a řemen pracovního vřetene

Pro řemeny brusného a pracovního vřetene se předpokládá, že zhoršující se stav řemenů má vliv na kruhovitost. Oba řemeny se kontrolují v namontovaném stavu každý týden. Řemen brusného vřetene se vyměňuje každých šest měsíců a řemen pracovního vřetene každé tři měsíce. Do plánovaného experimentu bylo navrženo použití tří různě opotřeбенých řemenů. Pro brusné vřeteno stáří řemenů: 0; 3 a 6 měsíců. Pro pracovní vřeteno stáří řemenů: 0; 1,5 a 3 měsíce.

5.2. Vibrace z okolí

Ve firmě Hützel se provádí broušení na pěti počítačem řízených strojích CNC UB 16. V hale, kromě daných zařízení, pracují ještě další stroje a zařízení. Předpokládá se tu vliv okolních strojů na kvalitu procesu broušení. Byl navržen jednoduchý experiment, který má prokázat, a nebo vyvrátit dané tvrzení. V každé směně se obrobí šedesát kusů pístů SV, určí se jejich kruhovitost a vyhodnotí se vliv okolních zařízení v různých směnách.

Na ranní směně je stanoven provoz celé výrobní haly a všech zařízení. Na odpolední směně nepracuje malosériová výroba a část zařízení. Noční provoz v podniku Hütze není nastaven, obrábění tedy bude bez vlivu okolních strojů.

Z výsledků se dopočítali střední hodnoty a směrodatné odchylky a provedlo se vyhodnocení.

Ranní směna: $\bar{x} = (1,39 \pm 0,26) \mu m$

Odpolední směna: $\bar{x} = (1,31 \pm 0,26) \mu m$

Noční směna: $\bar{x} = (1,35 \pm 0,37) \mu m$

Ze získaných hodnot se ukázalo, že vliv okolních strojů na proces broušení je zanedbatelný. Při odpolední směně sice došlo ke zlepšení kruhovitosti, ale jen o 0,08 μm . V noční směně, kdy se předpokládaly nejlepší výsledky, protože všechny stroje ve výrobní hale byly vypnuty, se hodnota od ranní směny nepatrně zlepšila, ale od odpolední směny naopak nepatrně zhoršila. Z tohoto důvodu se vliv z okolí dále nezvažoval a do plánovaného experimentu se nezahrnul.

5.3. Geometrie polotovaru

Polotovarem je zde myšlena obrobená součást ve stavu před broušením. Cílem je zjistit, zda předchozí operace prováděné na součásti, nemají vliv na kruhovitost pístu SV. K jeho vyhodnocení pomocí korelační analýzy bylo použito padesát kusů pístů SV. Před broušením se u každého z nich provedlo měření drsnosti kuželové části, kruhovitosti, vrcholového úhlu kužele a délky dráhy pístu SV (rozměr 8,44 dle obrázku 3). Po broušení se u každého kusu určila kruhovitost. Vyhodnocení bylo provedeno v Minitabu.

V tabulce 2 je výstup z korelační analýzy. Jedná se o statistické vyhodnocení vlivu geometrie polotovaru na výslednou kruhovitost. Vždy se porovnává hodnota kruhovitosti po broušení s ostatními parametry před broušením. Výstupem je p-hodnota.

Tab. 2 Výstup korelační analýzy.

První parametry	Druhý parametr	p-hodnota
Kruhovitost po broušení	Drsnost	0,191
Kruhovitost po broušení	Kruhovitost před broušením	0,902
Kruhovitost po broušení	Úhel	0,056
Kruhovitost po broušení	Dřík	0,655

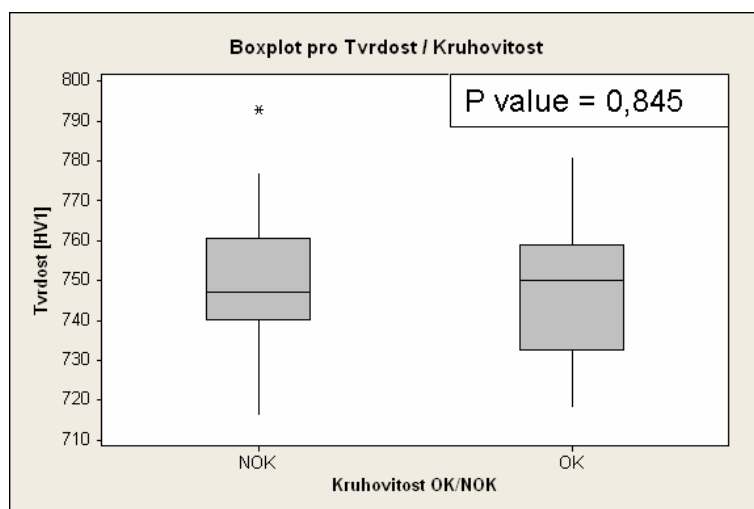
Ve všech případech je p-hodnota větší než 0,05. Sice je u porovnání kruhovitosti po broušení a úhlu před broušením p-hodnota pouhých 0,056, ale hranicí pro posouzení, zda existuje závislost mezi proměnnými je právě 0,05. Z tohoto důvodu se geometrie polotovaru do plánovaného experimentu nezahrnula.

5.4. Tepelné zpracování

Pro tepelné zpracování pístu SV a jeho vlivu na kruhovitost platí stejné předpoklady jako pro bod 5.2. a 5.3. Pro posouzení jeho vlivu byly navrženy dva experimenty. Jednak vyhodnocení tvrdosti pístu sacího ventilu a dále hloubky cementované vrstvy.

5.4.1. Tvrdost pístů SV

Bylo odebráno dvacet pět kusů s odpovídající kruhovitostí a dvacet pět kusů zmetků. U každého se na kuželové části v místě, kde se měří kruhovitost změřila tvrdost HV1 ve 100 μ m pod povrchem. Dle výkresové dokumentace je předepsána tvrdost 760 ± 60 HV3. Jelikož ale neexistuje odpovídající zařízení použito se měření HV1 na mikrotvrdoměru. Stejně zatížení je použito i pro určení cementované hloubky. V Minitabu se použila metoda dvouvýběrového F-testu. Vložily se pouze hodnoty tvrdosti, které se rozdělily do dvou skupin - podle toho zda se jednalo o shody a nebo neshody. Na obrázku 6 je ukázán výstup z F-testu. Na ose y jsou hodnoty tvrdosti HV a na ose x jsou dva ukazatele. První je NOK, tedy zmetky a druhý je OK, což jsou kusy s předepsanou kruhovitostí do 3 μ m. Výsledkem jsou takzvané boxy, což je ohraničení, kde se nachází všechny hodnoty. Vodorovná čára v boxech udává střední hodnotu. Hvězdička ukazuje, že se jedna nebo několik hodnot nachází mimo box. Nejdůležitější je p-hodnota, která udává, jestli je tvrdost závislá na tom, zda se jedná o shodu, nebo neshodu. Pokud je p-hodnota větší než 0,05 závislost neexistuje. Pokud je p-hodnota menší než 0,05 závislost existuje a znamená to, že tvrdost a tedy tepelné zpracování má vliv na kruhovitost pístu SV.



Obr. 6 Výstup z F-testu pro tvrdost.

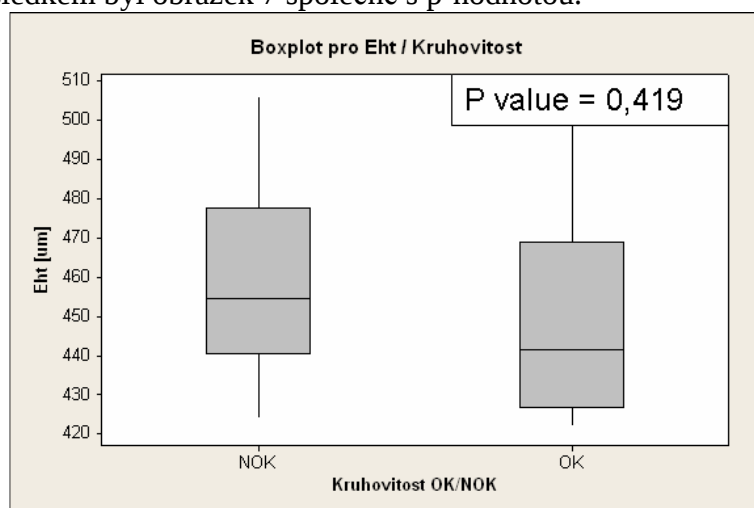
Pomocí F-testu na tvrdost a získané p-hodnoty ($p = 0,845$) se určilo, že tepelné zpracování nemá statistický význam na velikost kruhovitosti.

5.4.2. Hloubka cementované vrstvy

Pro dané měření bylo použito deset vzorků se správnou kruhovitostí a deset zmetku. Měření bylo prováděno dle normy ČSN EN ISO 2639 – Ocel – stanovení a ověření hloubky cementace.

Dle [9] je hloubka cementace definovaná jako kolmá vzdálenost mezi povrchem a vrstvou, ve které je tvrdost 550 HV1 podle ISO 6507-1. Hloubka cementace se označuje písmeny CHD (Case-hardened depth) a vyjadřuje se v milimetrech. Ve firmě Bosch se používá německý ekvivalent - zkratka Eht.

Následně se hodnoty použily stejným způsobem jako v bodě 5.4.1. do F-testu v Minitabu a výsledkem byl obrázek 7 společně s p-hodnotou.



Obr. 7 Výstup z F-testu pro Eht.

Pomocí F-testu na hloubku cementované vrstvy a získané p-hodnoty ($p = 0,419$) se potvrdilo, že tepelné zpracování, nemá statistický význam na velikost kruhovitost pístu SV.

5.5. Otáčky pracovního vřetene

Otáčky na brusném a pracovním vřetenu vytváří řeznou rychlost. Kruhovitost pístu SV lze, podle předchozích pozorování, ovlivnit pouze otáčkami na pracovním vřetenu. Do plánovaného experimentu bylo navrženo nastavení otáček ve třech rozmezích. A to 1 500, 1 600 a 1 700 otáček za minutu.

5.6. Doba vyjiskřování

Dle [10] je vyjiskřování operace, která bezprostředně následuje za broušením, kdy se bez přísuvu ještě několikrát obrobek brousícím kotoučem přebrousí. Tím se vyrovnávají pružné deformace soustavy stroj – nástroj – obrobek – upínač, způsobené řeznými silami a tepelnou roztažností. Dosahuje se zpřesnění broušené plochy.

Byl navržen experiment, při kterém se zkoumal vliv doby vyjiskřování na kruhovitost. Doba trvání vyjiskřování byla stanovena od 0 sekund do 3,0 sekund s krokem 0,5 sekund. Pro každý časový interval se obrobilo pět kusů. Následně se změřila kruhovitost a dopočítala se střední hodnota.

Z dřívějších experimentů zabývajících se dobou vyjiskřování se zjistilo, že při příliš velkých časových prodlevách (3 a více sekund) se na povrchu součásti začínají objevovat tzv. Neuhärtezone, označeno zkratkou Nhz. To je nežádoucí stav, který následně může vést ke vzniku trhlin.

Nhz je označení pro tzv. Neuhärtezone. Dle [11] se jedná o tepelné ovlivnění povrchu, přehřátí, které vzniká při jeho opracování (např. broušení). Dochází ke změně struktury, zakalení a vznik jemného martenzitu, který vyvolává tlakově napěťové stavy. Nhz se vykazuje křehkostí, lámavostí, náchylností ke vzniku trhlin a také vysokou tvrdostí. Z tohoto důvodu se hůře leptá než základní struktura. Při pozorování ve světlém poli se jeví bíle a ze struktury svítí.

Proto se u daného experimentu přistoupilo i ke zkoumání struktury broušeného povrchu. Při době vyjiskřování do jedné vteřiny se na rozbor Nhz odebíral pouze jeden vzorek. Od doby 1,5 vteřin a výše se odebíraly tři vzorky. Na obrázku 8 je zobrazena závislost kruhovitosti na době vyjiskřování. Na obrázku 9 je zobrazena struktura povrchu bez existence Nhz. Při čase vyjiskřování 3 sekundy byla analyzována struktura povrchu s tenkým pruhem jasně svítící struktury (obrázek 10). Při daném zvětšení nelze přesně určit zda se jedná o Nhz a nebo zda při vyjiskřování nedošlo k natavení materiálu. Daný rozpor by bylo možné určit na rastrovacím elektronovém mikroskopu při minimálně 5000-krátem zvětšení, kde by bylo možno potvrdit a nebo vyvrátit jemnou martenzitickou strukturu.

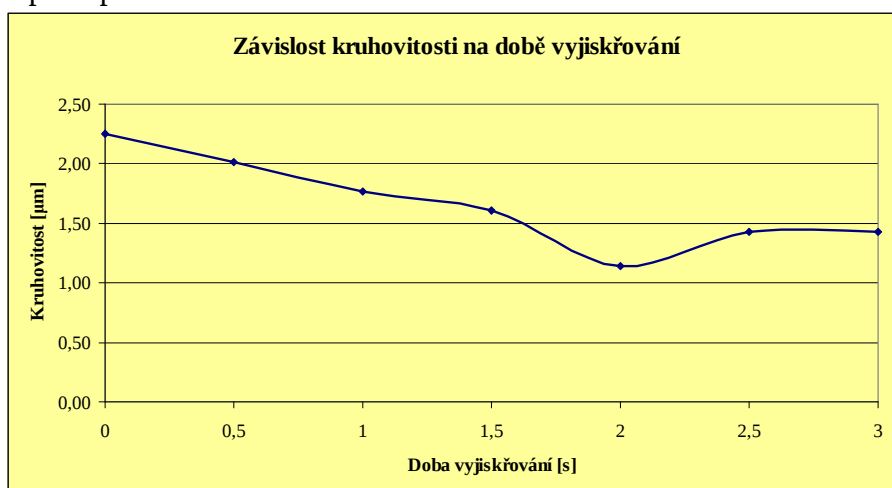
Všechny vzorky byly pozorovány při zvětšení 1000-krát a byly leptány tříprocentním roztokem nitalu. Z obrázků je vidět, že se jedná o martenzitickou strukturu odpovídající tepelnému zpracování, bez viditelného zbytkového austenitu v cementační vrstvě.

Tepelné zpracování spočívá dle [12] v:

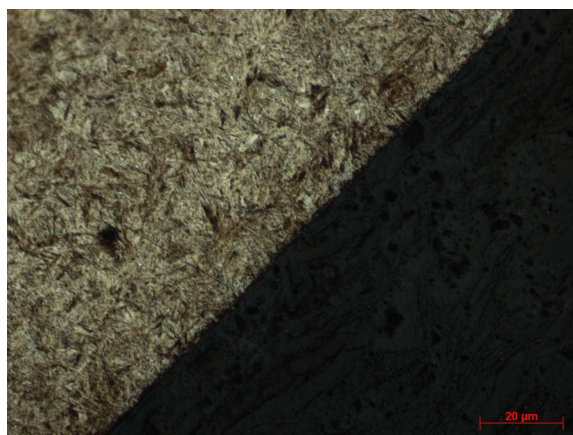
1. cementace v plynu při teplotě $(890 \pm 10)^\circ\text{C}$
2. kalení z teploty $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$ do oleje o teplotě 80°C
3. čištění
4. zmrazování při teplotě minimálně -80°C
5. popuštění při teplotě $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$ po dobu (60 ± 3) minut o ochlazování na vzduchu

Čtvrtý krok – zmrazování – je zařazen do tepelného zpracování z důvodu přeměny zbytkového austenitu na martenzit. Tento zbytkový austenit snižuje tvrdost a při pozdější přeměně způsobuje značné vnitřní pnutí, tím i deformace hotových výrobků a vznik trhlin, a to často až po velmi dlouhé době po zakalení. Díky zmrazování se sníží obsah zbytkového austenitu ve struktuře a tím i další možnost jeho pozdější přeměny na martenzit, která je

doprovázena změnou objemu a rozměrů.[13] Tyto strukturní změny by posléze mohli vést k nedodržení předepsané kruhovitosti.



Obr. 8 Závislost kruhovitosti na době vyjiskřování.



Obr. 9 Negativní Nhz.



Obr. 10 Pozitivní Nhz.

6. Nastavení plánovaného experimentu

Pomocí provedených měření, experimentů a analýz došlo k redukci parametrů pro plánovaný experiment na čtyři. Do DoE v Minitabu se u každého parametru vždy nastavila dolní, střední a horní hodnota. V tabulce 3 jsou parametry a jejich nastavené limity. Následně bylo v Minitabu spuštěno DoE a byl vygenerován plánovaný experiment, podle kterého se musí v přesně daném pořadí provést měření se zadanými hodnotami. Jedno měření odpovídá jednomu obrobenému pístu SV. U všech dílů se poté změří kruhovitost. V tabulce 4 je vygenerovaný plánovaný experiment, respektive prvních devět měření i s hodnotami kruhovitostí. Celkem se muselo provést 62 měření.

Tab. 3 Parametry a nastavení hodnot do plánovaného experimentu.

Parametr	Dolní limit	Střední limit	Horní limit
Řemen BV [měsíc]	0	3	6
Řemen PV [měsíc]	0	1,5	3
Otáčky [1/min]	1500	1600	1700
Doba vyjiskřování [s]	0,5	1,5	2,5

Tab. 4 Část plánovaného experimentu.

Řemen BV [měsíc]	Řemen PV [měsíc]	Otáčky [1/min]	Doba vyjiskřování [s]	Kuhovitost [μm]
3	1,5	1700	1,5	1,38
3	1,5	1600	1,5	2,26
0	0	1500	0,5	2,11
3	1,5	1600	1,5	2,26
3	1,5	1600	1,5	2,35
3	0	1600	1,5	1,77
3	1,5	1600	2,5	2,11
3	1,5	1500	1,5	2,17
6	3	1700	2,5	2,14

7. Vyhodnocení v Minitabu

Všechny hodnoty kruhovitostí z plánovaného experimentu se použili pro vyhodnocení. V tabulce 5 jsou z Minitabu pomocí p-hodnoty znázorněny parametry nejvíce ovlivňující proces broušení. Z výsledků bylo zjištěno, že řemen pracovního vřetene i v kombinaci s jinými parametry na proces broušení nemá statistický význam. Dále řemen brusného vřetene a otáčky pracovního vřetene mají přímou závislost. A doba vyjiskřování má statistický význam pouze v kombinaci s řemenem brusného vřetene. Všechny ostatní spojení byly vyhodnoceny p-hodnotou větší než 0,05 a tedy jejich statistický význam na proces broušení nebyl prokázán.

Tab. 5 Parametry a jejich kombinace, které jsou statisticky významné na proces broušení.

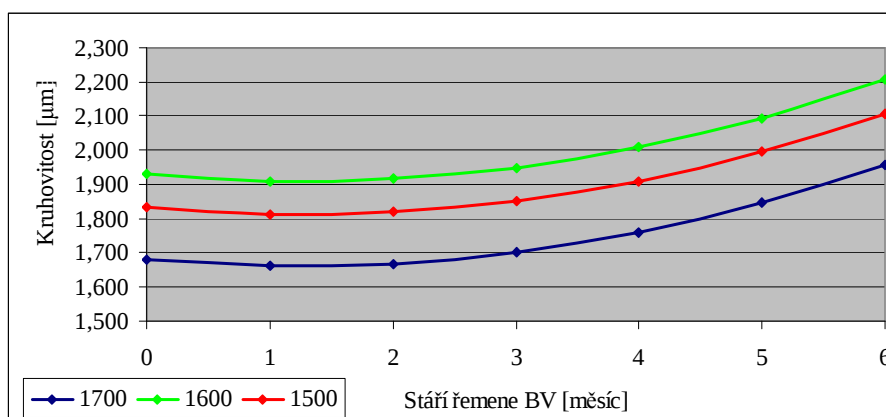
Parametry a jejich kombinace	p-hodnota
Řemen BV	0,000
Otáčky	0,045
Doba vyjiskřování	0,994
Řemen BV + Doba vyjiskřování	0,028

8. Optimalizace parametrů

Optimalizace procesu je provedena opět v Minitabu v rámci DoE a jsou do ní zařazeny tyto parametry: řemen brusného vřetene, otáčky pracovního vřetene a doba vyjiskřování. Optimalizace spočívá v nasimulování podmínek a Minitab pomocí již známých hodnot z plánovaného experimentu určí velikost kruhovitosti. Pro řemen brusného vřetene se použil interval stárí řemene nula až šest měsíců s krokem jeden měsíc. Pro otáčky se použili tři hodnoty 1 700, 1 600 a 1 500 za minutu a pro dobu vyjiskřování se použil interval 0,5 až 2,5 sekundy s krokem 0,5 sekundy. Nasimulovala se každá existující možnost nastavení parametrů.

Dále se parametry optimalizovali a hledalo se takové nastavení procesu, které vede k výrobě pístů SV s dodrženou kruhovitostí a nedochází k výrobě zmetků.

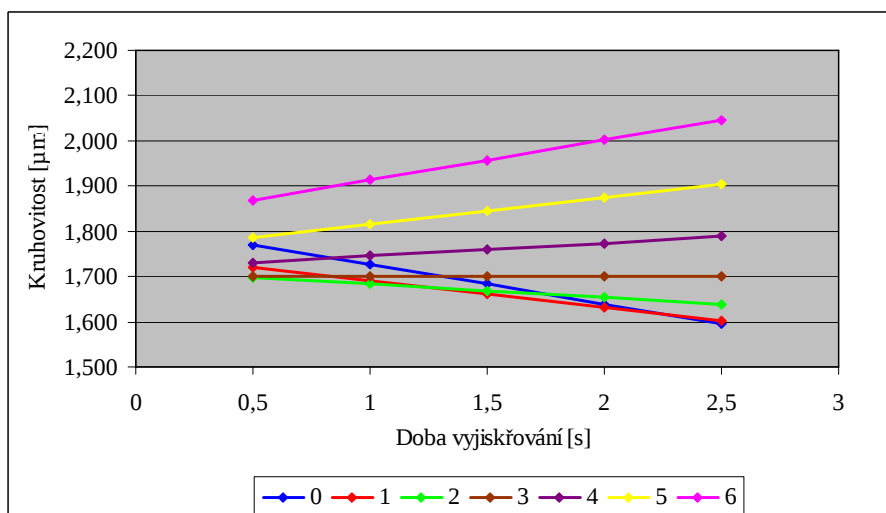
Nejprve se zkoumal vliv řemene brusného vřetene a otáček pracovního vřetene. Na obrázku 11 je znázorněn výsledek. Velikosti kruhovitosti byly použity z výpočtů provedené Minitabem v rámci DoE.



Obr. 11 Závislost kruhovitosti na stáří řemene BV pro různé otáčky PV.

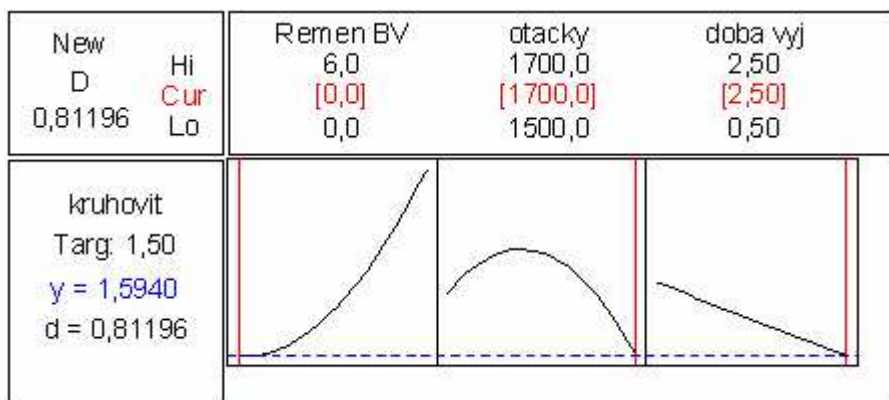
Z obrázku 11 lze především odečíst, že jako neoptimálnější nastavení otáček pracovního vřetene, v celé době životnosti řemene BV, je 1 700 za minutu, protože se dosahují nejnižší hodnoty kruhovitosti.

Na obrázku 12 je znázorněna závislost kruhovitosti na době vyjiskřování pro různě starý řemen brusného vřetene a to celé při konstantních otáčkách pracovního vřetene 1 700 za minutu. Hodnoty kruhovitosti jsou opět použity z výsledku simulace provedené v Minitabu v rámci DoE.



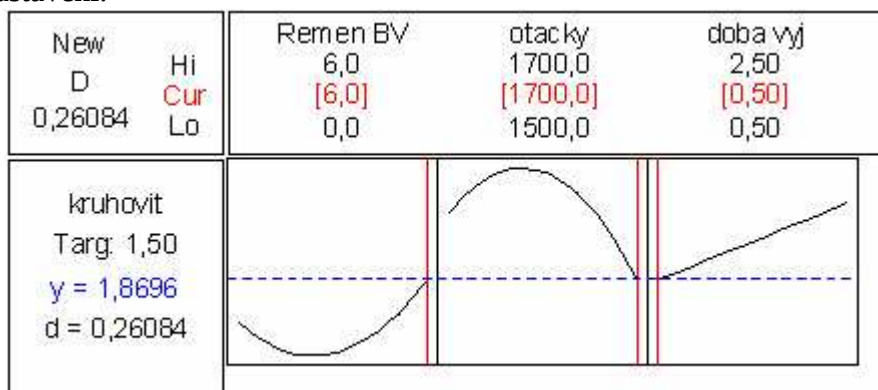
Obr. 12 Závislost kruhovitosti na době vyjiskřování pro různě starý řemen BV pro otáčky pracovního vřetene 1 700 za minutu.

Výsledkem plánovaného experimentu (DoE) jsou trendy závislostí statisticky významných parametrů. Na obrázku 13 jsou znázorněny závislosti pro optimální nastavení parametrů vycházejících z DoE. To nastane pokud bude použit nový řemen brusného vřetene, otáčky pracovního vřetene se nastaví na 1 700 za minutu a doba vyjiskřování bude 2,5 sekundy, poté bude dosažena minimální hodnota kruhovitosti a to dle výpočtu provedeným Minitabem je 1,594 μm (veličina ypsilon).



Obr. 13 Optimální nastavení parametrů, kruhovitost $y = 1,5940$ pro zadaná data; řemen BV starý 0 měsíců, otáčky 1 700 / min a doba vyjiskřování 2,5 sekundy.

Trendy závislostí jsou mezi sebou vzájemně provázány. Mění se při každé změně libovolného parametru a to tak, že změna jednoho parametru ovlivní trendy všech ostatních veličin vyjma svého. V daném případě, při změně otáček BV se změní trendy u otáček a doby vyjiskřování. Trend u řemene BV ale zůstane zachován. Na obrázku 14 jsou znázorněny trendy pro jiné nastavení parametrů. Studium trendů závislostí lze určit pro každou situaci optimální nastavení.



Obr. 14 Kruhovitost $y = 1,8696$ pro zadaná data; řemen BV starý 6 měsíců, otáčky 1 700 / min a doba vyjiskřování 0,5 sekundy.

9. Závěr a zhodnocení výsledků

Na základě provedených měření, experimentů a výpočtů bylo zjištěno, že ze všech předpokládaných faktorů největší mírou ovlivňují proces broušení, a tedy i výslednou kruhovitost součásti pístu sacího ventilu, následující tři faktory: stáří řemene brusného vřetene, otáčky pracovního vřetene a doba vyjiskřování. U následujících faktorů: vibrace z okolí, geometrie polotovaru, tepelné zpracování pístu sacího ventilu a stáří řemene pracovního vřetene se na základě provedených experimentů určilo, že jsou statisticky nevýznamné.

Z výsledků, které jsou dokumentovány v tabulce 5 a na obrázcích 11 a 12 se určila následující doporučení:

- 1) Otáčky pracovního vřetene by se měli udržovat stále na nejvyšší hodnotě, tj. 1 700 ot/min. (obrázek 11).
- 2) Při novém řemenu brusného vřetene se doporučuje nastavit maximální dobu vyjiskřování 2,5 sekundy. Experimentálně bylo potvrzeno, že doba 2,5 sekundy

ještě nezpůsobí vznik Nh_z, které se vyskytuje až při době třech sekundách a více. (kapitola 5.6 Doby vyjiskřování).

- 3) Po uplynutí tří měsíců stáří řemene brusného vřetene se doporučuje přednastavit dobu vyjiskřování z 2,5 sekund na 0,5 sekund. (obrázek 12).
- 4) Při nastavení doby vyjiskřování na 2,5 sekundy dojde k prodloužení pracovního cyklu. Pokud by z důvodu nutnosti výroby většího počtu kusů nebylo možné dodržet danou dobu, lze dobu vyjiskřování snížit, ale je nutné sledovat závislosti trendů ostatních parametrů a podle toho určit jejich optimální nastavení.

Seznam symbolů

n	otáčky	[1/min]
t	čas	[s]
T	teplota	[°C]
ppm	parts per milion	[]
HV	tvrdost – vickers	[]
$\bar{x}$	aritmetický průměr	[μm]
y	kruhovitost	[μm]
CHD	hloubka cementované vrstvy (Eht)	[mm]
Nh _z	Neuhärtezone	
DoE	Design of Experiment – plánovaný experiment	
SV	sací ventil	
BV	brusné vřeteno	
PV	pracovní vřeteno	

Seznam použité literatury

- [1] Prezentační materiály podniku Bosch Diesel s.r.o.
- [2] Materiálový list, Bosch Norma, Cr-Mn-Case Hardening Steel, poslední úprava 16.5. 1974.
- [3] Výkresová dokumentace podniku Bosch Diesel s.r.o, název výkresu Ventilkolben, číslo výkresu F 00N 200 532.
- [4] Pospíchal, J.: Technické kreslení, vydavatelství ČVUT, Praha, 2004. (str. 35)
- [5] Www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ppm>, [citováno 20-12-08].
- [6] Studijní materiály firmy SC&C Parnter, Lean Six Sigma.
- [7] Www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Minitab>, [citováno 23-12-08].
- [8] Www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Data>, [citováno 23-12-08].
- [9] Česká technická norma: ČSN EN ISO 2639, Ocel – Stanovení a ověření hloubky cementace.
- [10] Řasa, J., Gabriel, V.: Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění 1.díl, Scientia, Praha, 2005. (str. 153 – 154)
- [11] Studijní materiály podniku Bosch, Script zum Schadensanalyse – Seminar – Kapitel 5, Schadensanalyse metallischer Bauteile [10/2006] (Analýza poruch na kovových součástích).
- [12] Dokument podniku Bosch Diesel Jihlava, Wärmebehandlungsanweisung WBA (instrukce pro tepelné zpracování), součást Ventilkolben, číslo výkresu F 00N 200 532.
- [13] Jech, J.: Tepelné zpracování ocelí, Metalografická příručka, SNTL, Praha, 1983. (str. 98 – 100)