



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA DOKONČOVACÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

ANALYSIS OF MACHINING FINISHING METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Urban

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Martin Urban**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Karel Osička, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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 diplomové práce:

Analýza dokončovacích metod obrábění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kompletní analýza jednotlivých dokončovacích technologií obrábění. Komplexní vyhodnocení integrity povrchu včetně stavu napjatosti pro vybranou metodu dokončovacího obrábění.

Cíle diplomové práce:

Rozbor základních dokončovacích metod obrábění a jejich použití.

Rozbor stavu povrchu po dokončovacím obrábění.

Experiment pro vybranou metodu dokončovacího obrábění.

Vyhodnocení výsledků experimentu.

Seznam doporučené literatury:

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

KOCMAN, K. a J. PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

FOREJT, M. a M. PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

ŠTULPA, M. CNC obráběcí stroje. 2. dotisk, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.

SVOBODA, E. Technologie a programování CNC strojů. 1. vydání. Havlíčkův Brod: FRAGMENT, 1998. 278 s.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM Publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

HUMÁR, A. a M. PÍŠKA. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD, Praha: 2004. 110 s., ISSN 1212-2572.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou dokončovacích metod obrábění. V práci jsou popsány technologie broušení, honování, lapování, leštění, omílání a superfinišování. Dále je rozebrána zbytková napjatost povrchu po metodě superfinišování a jsou popsány dva možné způsoby jejího měření. V práci byl také proveden experiment, ve kterém byly popsány dokončovací procesy u ložiskového soudečku pro axiální soudečkové ložisko 29434EJ-3, ložiskového soudečku pro dvouřadé soudečkové ložisko 23164CJ-3 a u vnitřního ložiskového kroužku pro dvouřadé soudečkové ložisko 22224EKJ-N7-2. Poté bylo na površích těchto součástí provedeno šest měření drsnosti povrchu. U soudečku 23164CJ-3 se střední aritmetická odchylka profilu R_a pohybovala mezi hodnotami 0,59 až 0,70 μm , u soudečku 29434EJ-3 se hodnota R_a pohybovala mezi 0,26 až 0,31 μm a u vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2 mezi 0,22 až 0,28 μm .

Klíčová slova

broušení, honování, lapování, leštění, omílání, superfinišování

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the analysis of finishing machining methods. The work describes the technologies of grinding, honing, lapping, polishing, tumbling and superfinishing. Furthermore, the residual surface tension after the superfinishing method is analyzed and two possible methods of its measurement are described. An experiment was also performed in which the finishing processes for the bearing spherical roller for axial spherical roller bearing 29434EJ-3, the bearing spherical roller for double row spherical roller bearing 23164CJ-3 and the inner bearing ring for double row spherical roller bearing 22224EKJ N7-2 were described. Six surface roughness measurements were then performed on the surfaces of these components. For the 23164CJ-3 barrel, the mean arithmetic deviation R_a of the profile ranged between 0.59 and 0.70 μm , for the 29434EJ-3 barrel, the R_a value ranged between 0.26 and 0.31 μm , and for the 22224EKJ N7-2 inner bearing ring, between 0.22 to 0.28 μm .

Key words

grinding, honing, lapping, polishing, tumbling, superfinishing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

URBAN, Martin. *Analýza dokončovacích metod obrábění* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139919>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Analýza dokončovacích metod obrábění vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

.....
místo, datum

.....
Bc. Martin Urban

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. a panu Ing. Romanu Křivánkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	1
1 DOKONČOVACÍ OPERACE	2
2 BROUŠENÍ.....	4
2.1 Rovinné broušení	7
2.2 Broušení vnějších rotačních ploch	8
2.3 Broušení vnitřních rotačních ploch	10
3 HONOVÁNÍ.....	12
4 LAPOVÁNÍ.....	16
4.1 Ruční lapování	19
4.2 Strojní lapování.....	20
5 LEŠTĚNÍ.....	22
6 OMÍLÁNÍ.....	25
7 SUPERFINIŠOVÁNÍ	28
8 INTEGRITA POVRCHU	33
9 EXPERIMENT	36
9.1 Měření drsnosti povrchu.....	46
ZÁVĚR.....	63
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	64
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
SEZNAM PŘÍLOH	68

ÚVOD

Aby mohly součásti správně plnit svou předepsanou funkci, je potřeba aby jejich funkční plochy měly kvalitní povrch. Je proto důležité zvolit správně metodu výroby, ale hlavně správnou dokončovací operaci. Protože právě dokončovací operace, jakožto finální operace výroby, mají největší vliv na konečnou kvalitu povrchu.

Dokončovací operace se musí volit tak, aby povrch opracovaný touto metodou co nejlépe odpovídal předepsaným požadavkům. Metody dokončování pomáhají nejen ke zlepšení jakosti povrchu, mechanických a fyzikálních vlastností povrchu vyráběných součástí jako jsou pevnost, tvrdost, odolnost proti korozi, odolnost proti otěru nebo mez únavy, ale napomáhají také ke zlepšení vizuální stránky součástí. Dokončováním se totiž zlepšuje také lesk a hladkost dokončovaných ploch.

Různé dokončovací operace jsou vhodné pro dokončování různých typů ploch a materiálů. Některé dokončovací operace dokáží například dosahovat velice jemných drsností povrchu, ale ne vždy se musí vyplatit z ekonomického hlediska. Vhodně zvolená metoda tak může mít zásadní vliv na snížení celkových nákladů. Ne vždy lze ale dělat kompromis a vybrat tu nejlevnější metodu, protože se touto metodou nemusí dát dosáhnout požadovaných vlastností. Počítá-li se ve výrobě s použitím některé z dokončovacích metod, tak je třeba po předcházející operaci ponechat ještě přídavek pro dokončování. Pro každou metodu je velikost přídavku jiná, proto je při výběru vhodné dokončovací metody nezbytné ponechat správný přídavek.

Tato práce se zaměřuje na analýzu dokončovacích metod obrábění. Konkrétně je popsána metoda broušení, po které se často používají ještě další dokončovací operace. Broušení může ale sloužit i jako finální metoda. Dále jsou popsány metody honování, lapování, leštění, omílání a superfinišování. Je také proveden experiment vyhodnocující dané součásti po dokončování. Tyto součásti jsou dokončovány broušením a superfinišováním.

1 DOKONČOVACÍ OPERACE

Dokončovacími metodami se provádí konečné úpravy povrchů vyráběných součástí. Jedná se o poslední prováděné operace na součástech. Provádí se, pokud jsou vysoké požadavky na vlastnosti daných povrchů, a to buď mechanické, fyzikální nebo estetické. Tyto operace určují finální kvalitu povrchové vrstvy, tvrdost, odolnost proti korozi a otěru, zpevnění, únavové vlastnosti, třecí vlastnosti povrchu, lesk, konečné přesnosti rozměrů (kruhovitost, rovinnost, kolmost a další), strukturu povrchu, zbytková pnutí, vlnitost, drsnost povrchu a další povrchové vlastnosti. [1]

Existují dva základní principy dokončovacích metod, které se v praxi používají pro úpravu povrchů [1]:

- bez úběru materiálu – jedná se o tvářecí operace, probíhají pomocí přetváření materiálu povrchové vrstvy, tedy pomocí plastické deformace,
- s úběrem materiálu – jedná se o obráběcí operace, těmito operacemi se odebírá přídavek ponechaný pro dokončovací operaci.

Při použití metod bez úběru materiálu nedochází během procesu ke vzniku třísky. U těchto dokončovacích metod je preferováno, aby deformace proběhla za studena, protože dojde ke zpevnění materiálu, k vyvolání tlakových zbytkových pnutí a někdy i ke zlepšení drsnosti povrchu díky zatlačení vrcholků nerovností. Navíc selepší funkční vlastnosti součástí, a to především ty mechanické. Nepříznivý vliv předcházejících operací je eliminován vyvoláním zbytkových tlakových pnutí do větší hloubky pod povrchem. Zvýší se tvrdost součástí, únavová pevnost a odolnost proti otěru a korozi. Získané mechanické vlastnosti se tak podobají vlastnostem kvalitnějších a dražších materiálů s delší životností. Naopak při plastické deformaci za tepla, která se vyskytuje například u závěrečné fáze leštění bez brusiva, dosahujeme zcela opačných účinků. Díky ohřevu povrchové vrstvy se sice usnadní rozleštění vrcholků nerovností a získání tak lesklého povrchu, zároveň se ale sníží životnost součástí a vzroste pravděpodobnost tvorby trhlin, kvůli vyvolání tahového pnutí a strukturálních změn v povrchové vrstvě. Mezi dokončovací metody bez úběru materiálu patří válečkování, vyhlazování, vibrační zpevňování, kalibrování a tryskání. [1]

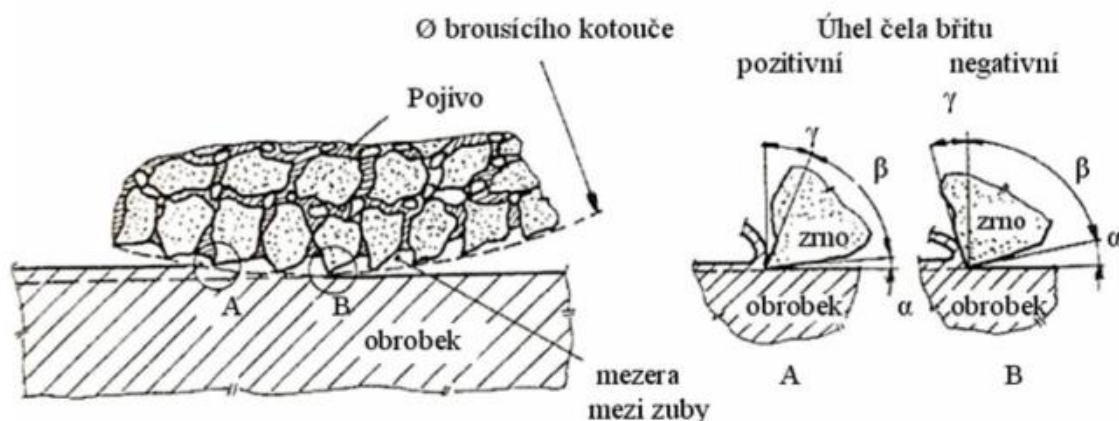
Při použití dokončovacích metod s úběrem materiálu je nutné po předchozí operaci ponechávat přídavek na dokončování, který je odebírán s minimálním tepelným ovlivněním povrchové vrstvy. Pro každou operaci je vhodný jiný přídavek. Přídavek musí být zvolen tak, aby při jeho odebírání došlo k nápravě poničeného povrchu po předchozích operacích, jako jsou trhlinky, vady, zbytková tahová pnutí nebo malé tvarové či rozměrové nepřesnosti. Dokončovací metody broušení, honování, lapování a superfinišování patří mezi abrazivní dokončovací metody. Jsou charakterizovány využitím nástroje s nedefinovanou geometrií břitů. Ve strojírenství patří tyto technologie mezi nejvyužívanější metody dokončování obráběných součástí. Klade se u nich velký důraz na přesnost obroběných ploch. Porovnání přesností těchto metod je zobrazeno v tab. 1. [1; 2]

Tab. 1 Dosahované parametry přesnosti obrobených ploch pro abrazivní metody obrábění [2].

Metoda obrábění		Přesnosti rozměrů IT		Drsnost plochy R_a [μm]	
		střední	rozsah	střední	rozsah
Vnější rotační plochy	Broušení				
	- hrubování	10	9 až 11	1,6	0,8 až 3,2
	- dokončování	5	5 až 6	0,4	0,2 až 0,6
	- jemné	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
	Lapování				
	- normální	4	3 až 4	0,1	0,05 až 0,2
Vnitřní rotační plochy	- jemné	2	1 až 2	0,05	0,012 až 0,05
	Hrubování				
	- dokončování	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
	- jemné	3	2 až 4	0,1	0,025 až 0,1
	Vnitřní broušení				
	- hrubování	9	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
Vnitřní rotační plochy	- dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	- jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Honování				
	- hrubování	7	6 až 8	0,4	0,2 až 0,8
	- dokončování	6	5 až 7	0,2	0,1 až 0,2
	- jemné	4	3 až 5	0,1	0,05 až 0,1
Rovinné plochy	Lapování				
	- dokončování	4	3 až 5	0,2	0,01 až 0,4
	- jemné	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05
	Broušení				
	- hrubování	10	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	- dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
Rovinné plochy	- jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Lapování				
	- dokončování	4	3 až 5	0,2	0,1 až 0,4
	- jemné	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05

2 BROUŠENÍ

Jedná se o nejstarší dokončovací metodu obrábění. Tato metoda je lidmi používána již od pravěku. Brousicí nástroj obsahuje na svém povrchu brousicí zrna, která jsou nepravidelně rozložena na jeho povrchu. Tato zrna jsou vlastně malé břity. Na povrchu brousicího nástroje se vyskytují s různým převýšením a nemají přesně definovanou řeznou geometrii, viz obr. 1. [1]



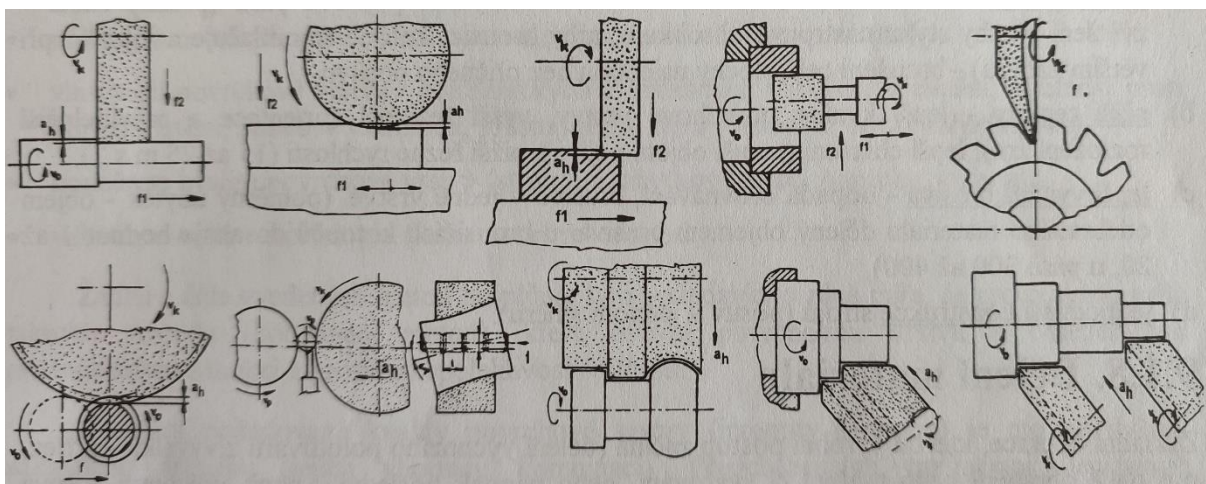
Obr. 1 Záběr brousicích zrn [3].

Broušením lze dokončovat i hrubovat, a to i různé druhy velmi tvrdých materiálů, které se ostatními metodami třískového obrábění dají jen těžko opracovávat. Třísky odebírané jednotlivými zrny dosahují velice malých průměrů. U obrábění dochází ke vzniku vysokých teplot dosahujících 300 až 1000 °C, a velkých hodnot měrného řezného odporu, dosahujících hodnot 30000 až 60000 MPa. [1]

Existuje hned několik metod úběru při broušení, jde o [1]:

- podélný (průběžný) způsob,
- zapichovací způsob,
- radiální způsob,
- oscilační způsob,
- planetový způsob,
- tangenciální způsob,
- integrovaný (složený) způsob.

Broušení jde použít na opracování prakticky všech druhů ploch od vnějších i vnitřních rotačních ploch po rovinné a tvarové. Nejčastěji používaným nástrojem je celistvý brousicí kotouč. Může být ale i složen z různých tvarových segmentů nebo se může jednat o brousicí pás. Hlavním pohybem brousicího kotouče je rotační pohyb. Brousicí kotouč může odebírat materiál obrobku svým obvodem, čelem nebo kombinací obou ploch najednou. Typické způsoby broušení kotoučem jsou zobrazeny na obr. 2. [1]

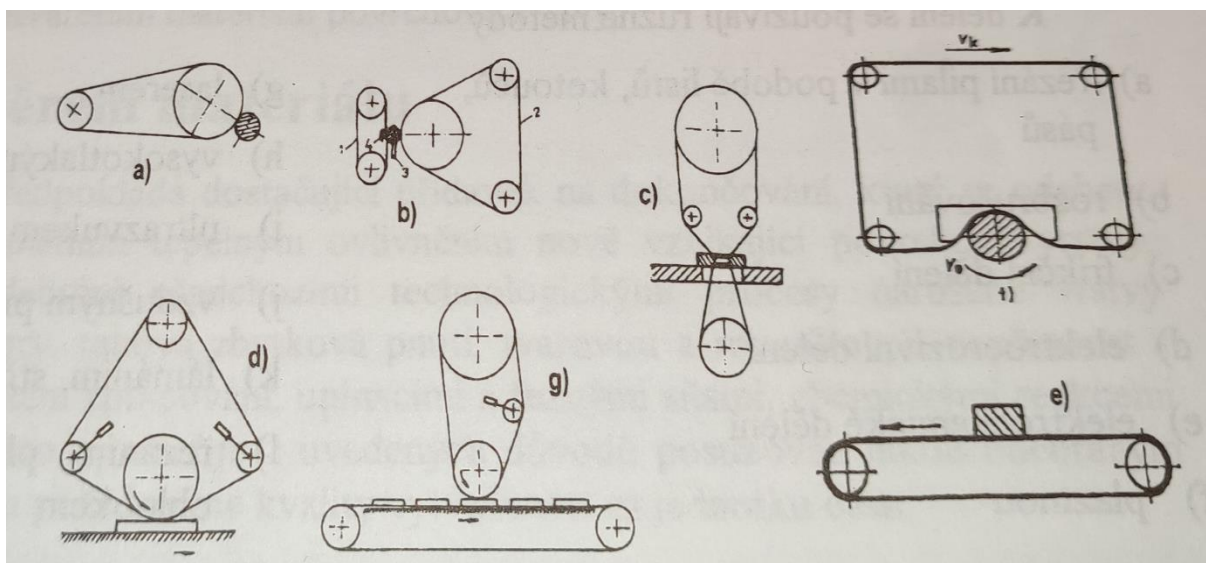


Obr. 2 Schéma způsobů broušení kotoučem [1].

Posuvy stolů a brousicích vřeteníků v pracovních cyklech jsou prováděny hydraulicky. To zaručuje plynulost pohybů a tlumení rázů v úvratích během změn smyslu pohybu. Při volbě řezných podmínek se musí brát ohled na obráběný materiál, výkon nástroje, požadovanou kvalitu povrchu a na konkrétní způsob broušení. Běžně používaná obvodová rychlost brousicího kotouče se pohybuje v rozmezí 20 až 35 m.s⁻¹. [1]

Kromě kotoučového broušení je velmi rozšířené i pásové broušení. Jedná se o úběr materiálu brousicími zrna nanesenými na pružný podklad. Typické způsoby broušení pásem jsou zobrazeny na obr. 3. Podkladovým materiálem bývá buď papír nebo různé tkaniny. Jedna či dvě vrstvy brousicích zrn je nanesena v elektrostatickém poli do vrstvy lepidla (používají se umělé pryskyřice nebo kliš). To zaručuje orientaci brousicích zrn krystalografickými osami kolmo k podkladu. Přilepená zrna jsou po předsušení spojena další vrstvou pryskyřic, která je posléze ještě vytvrzena. Tato metoda je hojně využívána pro broušení [1]:

- strojních součástí,
- dřeva,
- skla,
- kůže atd.



Obr. 3 Schéma broušení pásem [1].

Schémata brousicích způsobů na obr. 3 zobrazují broušení [1]:

- a) vnějších rotačních ploch v hrotech,
- b) vnějších rotačních ploch bez hrotů – nahrazení vnějšího podávacího kotouče opěrnou deskou a pásem,
- c) otvorů – volným úzkým pásem při otáčení obrobku,
- d) rovinných ploch na kontaktním kotouči,
- e) rovinných ploch na volném pásu,
- f) tvarové plochy – pás je k obrobku přitlačován tvarovou podpěrou,
- g) kontinuální – na pracovišti může být umístěno několik pásů různých zrnitostí za sebou.

Brousicí pásy se vyrábí s brusivem různých druhů a zrnitostí. Běžné šířky brousicích pásů se pohybují v rozmezí od 3 do 500 mm, výjimečně se mohou objevit i pásy s šířkou 2 m. Vyrobené pásy se nastříhají a následně slepí na vyžadovanou délku, vznikne tak nekonečný pás, který je vedený a vypínaný kladkami. Tyto kladky mají na svém povrchu vrstvu umělé hmoty se zářezy. Vždy jeden z kotoučů je hnací a podle způsobu broušení může být jeden kontaktní. Používanými variantami úběru jsou [1]:

- na kontaktním kotouči,
- na tvarové podpěře – tvar podpěry je negativ broušené plochy,
- na volném pásu.

Broušení pomocí brousicího pásu má oproti broušení kotoučem hned několik výhod. Mezi ty hlavní se řadí [1]:

- jednodušší konstrukce strojů – posuv pouze v jednom směru,
- lepší využití brusiva – odpadá orovnáání, brusivo je v jedné vrstvě,
- nižší teploty – vyšší řezivost, snadnější chlazení, nižší řezné rychlost a lepší kvalita povrchu,
- vyšší výkon – na jeden průchod pásu lze odebrat až 0,5 mm materiálu, broušení celé plochy najednou (není potřeba příčného posuvu).

Velký vliv na brousicí proces má použití řezných kapalin. Jejich použití ovlivňuje kvalitu broušeného povrchu, trvanlivost nástroje a úběr materiálu. Tyto kapaliny mají především chladicí a čistící účinek. Používají se, protože v místě styku dochází k vytvoření vysokých teplot, které způsobují teplotní roztažnost, strukturní změny a ovlivňují rozměrovou přesnost. Také korigují zbytkové pnutí, nebezpečí vznícení třísek u Mg a Ti slitin a zabráňují zalepování pórů nástroje ohřátými třískami. [1]

2.1 Rovinné broušení

U rovinného broušení se obrábí buď rovinné nebo tvarové plochy. Existuje více typů rovinného broušení, každý z těchto typů se provádí trochu jiným způsobem a u každého z nich se používá jiný typ brusného kotouče. Nejčastější typy rovinného broušení jsou čelní a obvodové. Vhodné řezné parametry pro tyto dva typy rovinného broušení jsou zobrazeny v tab. 2. [2; 4]

Jedním z typů rovinného broušení je čelní rovinné broušení. U tohoto typu broušení je materiál odebírán rovnou čelní plochou brousicího kotouče. U této metody se dosahuje poměrně velkých úběrů materiálu, velkého brusného výkonu a brusný kotouč na obrobek působí velkým tlakem. To vše je zapříčiněno tím, že je stále v záběru velká plocha brousicího kotouče. Obrobek může při broušení vykonávat kromě posuvného i kruhový pohyb, pokud je použit otočný stůl. Kvalita broušeného povrchu není po použití této metody ideální. [4]

Dalším typem rovinného broušení je obvodové rovinné broušení. U této metody se nebrousí čelem brusného kotouče ale jeho obvodem. Brousicí kotouč se tolik nezanášá díky malé ploše záběru. Tlak brousicí kapaliny a odstředivá síla navíc pomáhají k čištění kotouče od třísek. U obvodového rovinného broušení je vhodné volit co největší šířku a průměr brousicího kotouče. Čím jsou větší šířka a průměr kotouče, tím je brousicí proces efektivnější a ekonomicky výhodnější, a to kvůli tomu, že při větší ploše záběru se dosahuje velkého brousicího výkonu. Pro co nejmenší opotřebování hran brousicího kotouče a pro zmírnění lokálního přehřívání se nastavuje příčný posuv v hodnotě $4/5$ šířky kotouče. [4]

Tab. 2 Směsné hodnoty řezných parametrů pro rovinné broušení [2].

Druh práce	Radiální posuv f_r [mm]	Axiální posuv f_a [mm]	Tangenciální rychlost posuvu stolu v_{ft} [m.min ⁻¹]
Rovinné broušení obvodové			
a) přímočarý pohyb stolu			
- hrubování	0,01 až 0,04	$(0,4 \text{ až } 0,7) \cdot b_s$	8 až 30
- broušení na čisto	0,005 až 0,01	$(0,2 \text{ až } 0,3) \cdot b_s$	15 až 20
b) kruhový pohyb stolu			
- hrubování	0,005 až 0,015	$(0,3 \text{ až } 0,6) \cdot b_s$	20 až 60
- broušení na čisto	0,005 až 0,010	$(0,2 \text{ až } 0,25) \cdot b_s$	40 až 60
Rovinné broušení čelní			
c) přímočarý pohyb stolu			
- hrubování	0,015 až 0,04	-	4 až 12
- broušení na čisto	0,005 až 0,01	-	2 až 3
d) kruhový pohyb stolu			
- hrubování	0,015 až 0,03	-	10 až 40
- broušení na čisto	0,005	-	10 až 40

2.2 Broušení vnějších rotačních ploch

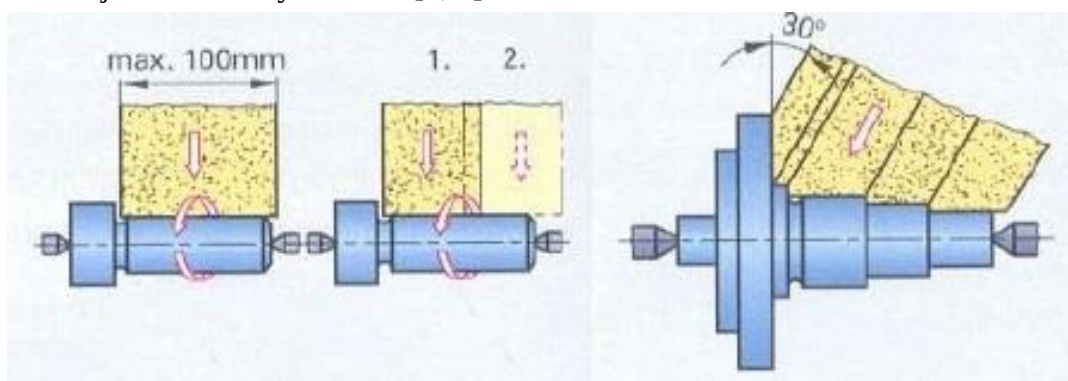
U broušení vnějších rotačních ploch do kulata se brousicí nástroj dotýká obrobku pouze velmi úzce. Díky tomu nedochází ke vzniku vysokých teplot a zároveň se z místa broušení lépe odplavují třísky, protože se brousicí kapalina dostane ke kotouči velmi snadno. Obrobek se upíná mezi hroty, na válcový nebo kuželový trh anebo do sklíčidla. Pokud jsou ale součástky příliš dlouhé a tenké, tak je třeba je během broušení podepírat lunetami, aby se neprohnuly pod tlakem kotouče. Máme tři základní druhy broušení vnějších rotačních ploch, a to podélné (axiální) broušení, zapichovací (radiální) broušení a bezhroté broušení. [2; 5]

Podélné broušení se používá především pro broušení dlouhých součástek. Posuvný pohyb může provádět buď obrobek, posuvem ve své ose, nebo brousicí kotouč, rovnoběžně s osou obrobku. Středem brousicího kotouče lze při této metodě přejít až přes okraj obrobku, a tím zajistit, že konce obrobku nebudou mít větší průměr. Řezné podmínky při podélném broušení vnějších rotačních ploch jsou zobrazeny v tab. 3. [2; 5]

Tab. 3 Řezné podmínky při podélném broušení vnějších rotačních ploch [2].

Materiál	Řezná rychlost v_c [m.s ⁻¹]	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min ⁻¹]	Axiální posuv na jednu otáčku obrobku f_a [mm]
Ocel	25 až 35		
- hrubování		15 až 20	(0,6 až 0,8). b_s
- dokončování		8 až 15	(0,2 až 0,4). b_s
- zvlášť jemné broušení			(0,1 až 0,2). b_s
Litina	25		
- hrubování		15 až 22	(0,75 až 0,85). b_s
- dokončování		12 až 16	(0,3 až 0,5). b_s
- zvlášť jemné broušení			(0,1 až 0,2). b_s

U zapichovacího (radiálního) broušení je na rozdíl od podélného broušení spojitý přísuv. U této metody se vybírá takový brusný kotouč, aby byl širší než broušená plocha. Broušení může probíhat s příčným nebo se šikmým posuvem, viz obr. 4. Šikmé zapichovací broušení se využívá především v sériové výrobě. Brousicí nástroj totiž brousí jak vnější rotační plochu, tak i navazující čelní plochu. Díky tomu dochází k úspoře času. U zapichovacího broušení se dosahuje o 40 až 80 % většího výkonu než u posuvného broušení. Vhodné řezné podmínky pro tuto metodu jsou zobrazeny v tab. 4. [2; 5]

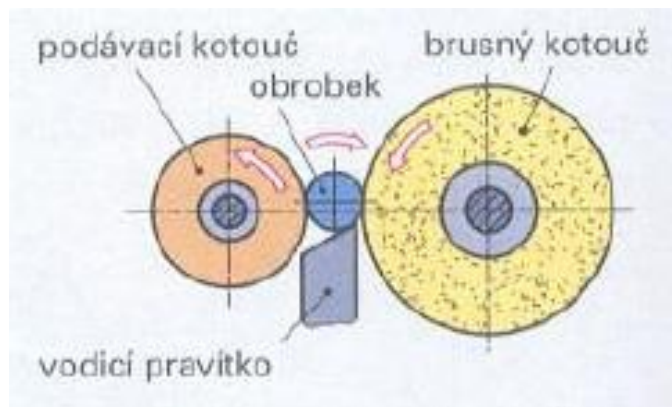


Obr. 4 Zapichovací broušení příčné (vlevo) a šikmé (vpravo) [5].

Tab. 4 Řezné podmínky při zapichovacím broušení vnějších rotačních ploch [2].

Materiál	Řezná rychlost v_c [m.s ⁻¹]	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min ⁻¹]	Radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku f_r [mm]
Ocel	25 až 35		
- hrubování		15 až 20	0,0025 až 0,0075
- dokončování		8 až 15	0,001 až 0,005
Litina	25		
- hrubování		15 až 22	0,0025 až 0,0075
- dokončování		12 až 16	0,001 až 0,005

U bezhrotého broušení se používají dva kotouče, viz obr. 5. Hlavním kotoučem je kotouč brusný, který je součástí bezhroté brusky. Druhým kotoučem je kotouč unášecí. Ten se většinou vyrábí z pružných materiálů, jako je například guma. Každý z kotoučů se otáčí jinou rychlostí, brousící rychleji než unášecí. Aby bylo zajištěno spolehlivé otáčení s rychlostí pohybu obrobku kolem 20 až 40 mm.min⁻¹, tak je horní plocha podpěrného pravítka lehce nakloněna k unášecímu kotouči. Bezhroté broušení může být průběžné nebo zapichovací. U průběžného broušení produkty souvisle postupují bruskou hned za sebou. Musí být ovšem zajištěno, aby byl vždy broušen pouze jeden vnější průměr. V tab. 5 jsou zobrazeny řezné podmínky pro bezhroté broušení průběžným způsobem a v tab. 6 jsou zobrazeny řezné podmínky pro bezhroté broušení zapichovacím způsobem. [6]



Obr. 5 Bezhroté broušení [5].

Tab. 5 Volba řezných podmínek při bezhrotém broušení – průběžný způsob [2].

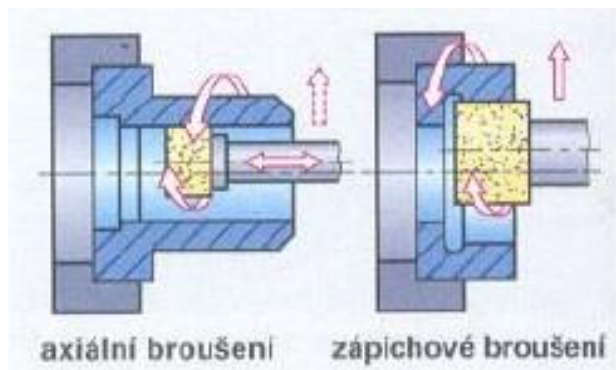
Druh práce	Průměr broušené součásti d_w [mm]	Přídavek na průměr $2a_e$ [mm]	Úhel nastavení α [°]	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m.min ⁻¹]
Hrubování	do 10	0,04 až 0,06	3 až 4	150 až 80
	10 až 25	0,06 až 0,1	2,5 až 3,5	120 až 50
	25 až 75	0,1 až 0,3	2 až 3,5	50 až 10
	75 až 150	0,2 až 0,4	1 až 2,5	25 až 8
Broušení na čisto	-	0,005 až 0,02	1,5 až 2	120 až 50

Tab. 6 Volba řezných podmínek při bezhrotém broušení – zapichovací způsob [2].

Druh práce	Radiální posuv na 1 otáčku obrobku f_r [mm]	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m.min ⁻¹]
Hrubování	0,005 až 0,02	10 až 35
Broušení na čisto	0,03 až 0,01	10 až 35

2.3 Broušení vnitřních rotačních ploch

U broušení vnitřních rotačních ploch je při volbě brousícího kotouče třeba dbát na průměr broušeného otvoru. Brousící kotouč se volí tak, aby jeho průměr dosahoval 0,6 až 0,9 průměru broušeného otvoru. Broušení vnitřních rotačních ploch má oproti broušení vnějších rotačních ploch větší plochu záběru nástroje a dlouhé tenké třísky. Aby nedošlo k vychýlení brousícího kotouče ze své osy působením velké příčné síly vzniklé mezi vřetenem a obrobkem, tak je třeba volit malou šířku brousícího kotouče a malý přísuv. Doporučené řezné hodnoty pro vnitřní broušení jsou zobrazeny v tab. 7. Nejčastější dvě metody vnitřního broušení jsou axiální broušení a zapichovací broušení, viz obr. 6. [2; 5]



Obr. 6 Schéma metod vnitřního broušení [5].

Tab. 7 Volba řezných poměrů při vnitřním broušení [2].

Druh práce	Podélný (axiální) posuv f_a [mm]	Pracovní (radiální) záběr a_e [mm]	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min ⁻¹]
Jednoduché brusky			
- hrubování	$(0,4 \text{ až } 0,7) \cdot b_s$	0,005 až 0,02	20 až 40
- broušení na čisto	$(0,25 \text{ až } 0,4) \cdot b_s$	0,0025 až 0,01	20 až 40
Poloautomatické brusky			
- hrubování	$(0,4 \text{ až } 0,75) \cdot b_s$	0,0025 až 0,005	50 až 150
- broušení na čisto	$(0,25 \text{ až } 0,4) \cdot b_s$	0,0015 až 0,0025	50 až 150

3 HONOVÁNÍ

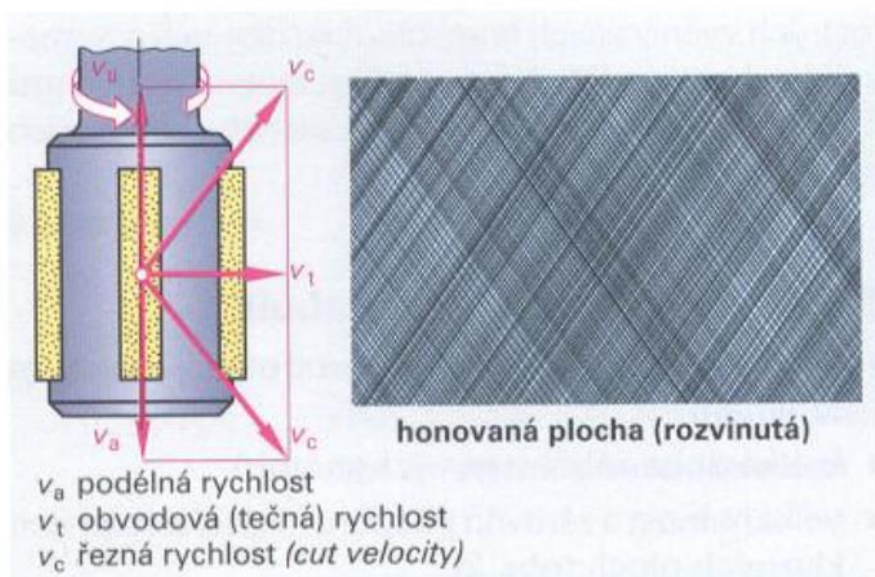
Honování je technologie obrábění kovů. Jedná se o dokončovací operaci, která se vyznačuje úběrem nadbytku materiálu pomocí abrazivních kamenů. Lze honovat vnější i vnitřní válcové plochy, nejčastěji se však honují vnitřní válcové plochy. Na povrchu obrobku se po honování vytvoří jemné zkřížené rýhování. Díky tomu drží na ploše olejový mazací film lépe. Používá se k odstraňování vad ve tvaru otvoru, jako jsou například oválnost, kuželovitost, kruhovitost, vlnitost, rýhy, zakřivení osy, nelze však opravit polohu nebo směr osy díry. Honování se běžně používá pro dokončování hydraulických a pneumatických válců, brzdových válců, válců spalovacích motorů, bubnů, pouzder a ložisek vřeten. Rozsah honovaných průměrů se běžně pohybuje od 1 mm do 1000 mm, lze však honovat i jiné průměry pomocí speciálních nástrojů. [1; 2; 7; 8]

Mezi běžně honované materiály patří:

- hliníkové slitiny [2],
- slinuté karbidy [2],
- bronz [7],
- měď [7],
- keramické, kovové a karbidové povrchové úpravy [7],
- ocel [7],
- litina [2],
- nerezová ocel [7].

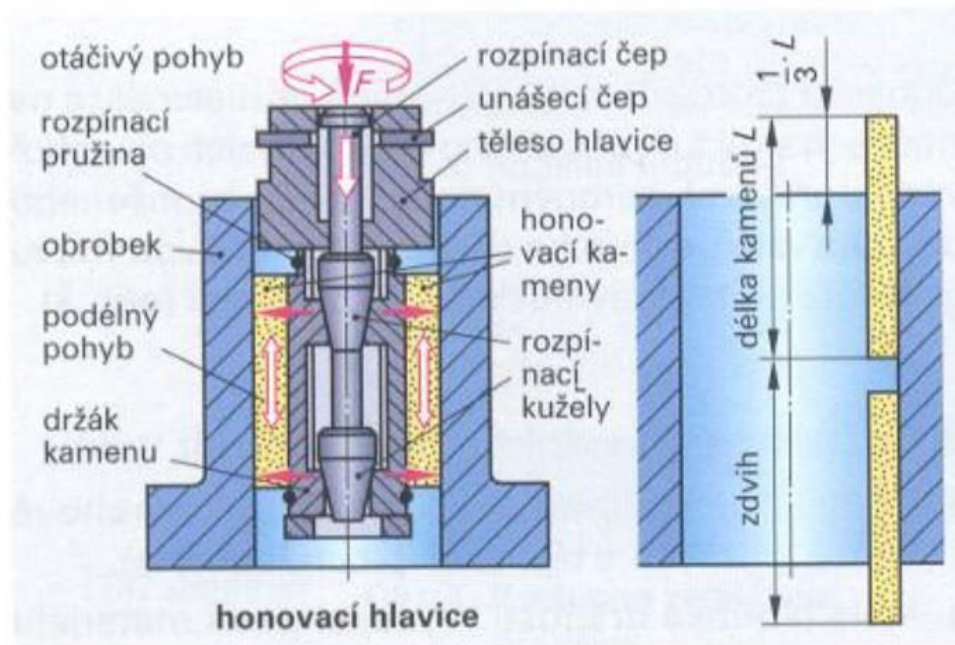
Honování je v podstatě broušení jemným brusivem při malých rychlostech a provádí se honovacími kameny, které jsou upevněny na honovací hlavě. Tyto brusné kameny mají podobnou strukturu jako brusné nástroje. Na rozdíl od nich jsou ale k povrchu neustále přitlačovány malou silou. Honovací brusné kameny se vyrábí na přesný rozměr a je nutné, aby měli dokonalou rovnou plochu. Je nutné u nich zajistit samoošetření, a to i při malém přitlaku. I při menším zatížení se musí lámat a vylamovat zrna. [2; 8]

Honovací hlava je podle velikosti díry osazena třemi nebo více honovacími kameny. Honovací hlava provádí zároveň dva druhy pohybů. Těmito pohyby jsou rotační pohyb honovací hlavy a vratný posuvný pohyb ve směru osy. Propojením těchto dvou pohybů se brousicí zrna překrývají a vytváří tak soustavy šroubovitých stop, jenž se kříží pod honovacím úhlem, viz obr. 7. [2; 8]



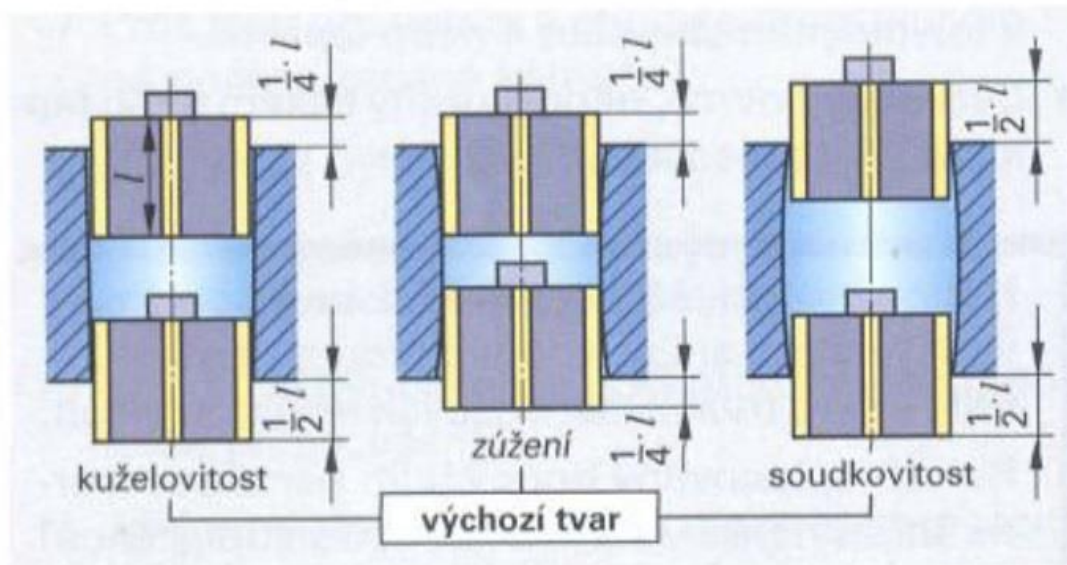
Obr. 7 Pohyby a povrch při honování s dlouhým zdvihem [8].

Honovací hlava pojme až dvanáct honovacích kamenů, které se zajišťují do radiálně nastavených držáků rozestavených po obvodě honovací hlavy v rovnoměrných roztečích. Podobně jako u nastavitelných výstružníků je nastavení zajištěno rozpěrnými kužely, viz obr. 8. Přítlak honovacích kamenů na obrobek je vyvozován mechanicky nebo hydraulicky. Pro honování litiny se používají honovací kameny z SiC a pro honování oceli z Al_2O_3 . Nejvíce používanými brusivy jsou nitrid boru a diamant, ty jsou používány jsou-li vysoké požadavky na jakost povrchu honovaných děr. Používají se ve velikosti zrna 20 μm . [1; 2; 8]



Obr. 8 Honovací hlavy s rozpínacím (přítlačným) systémem [8].

U honovacích kamenů se délka zdvihu nastavuje tak, aby honovací kameny při vyjetí nahoru i dolů přesahovaly honovací plochu o jednu třetinu jejich délky, viz obr. 2. Pokud se ovšem u výjezdu z užšího konce nastaví větší přesah a u výjezdu z širšího konce se nastaví menší přesah, dosáhneme tak odstranění případné mírné kuželovitosti plochy, středového zúžení nebo soudkovitosti díry (viz obr. 9). Při honování neprůchozí díry nelze u dna použít přesah, proto se musí nejprve honovat honovací hlavou s krátkým zdvihem. [8]



Obr. 9 Vliv přesahu zdvihu na tvar díry [8].

Zvětšování průměru obrobku je automaticky zastaveno pneumatickými měřicími tryskami, které se nachází na honovací hlavě. K zastavení dojde ihned po dosažení požadovaného průměru díry. [8]

Řezné podmínky u honování (tab. 8) jsou ovlivněny především materiálem obrobku, přídatkem na honování, viz tab. 9, použitým materiálem brusiva, průměrem honované díry a požadovanou a výchozí drsností povrchu a přesností tvaru. [2]

Tab. 8 Doporučené řezné podmínky pro honování [2].

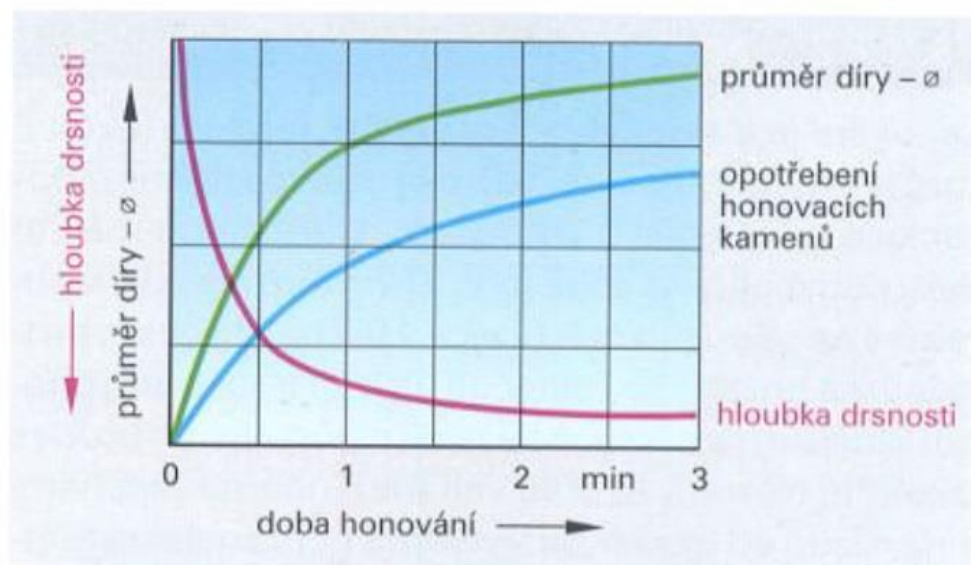
Materiál	Operace	Brusivo					
		Diamant, KNB			Umělý korund, karbid křemíku		
		v_c [m.min ⁻¹]	v_f [m.min ⁻¹]	p_k [MPa]	v_c [m.min ⁻¹]	v_f [m.min ⁻¹]	p_s [MPa]
Nekalená ocel	hrub.	25 až 35	6 až 12	0,4 až 0,6	15 až 30	8 až 12	0,4 až 0,8
	dok.	25 až 35	3 až 8	0,2 až 0,4	10 až 30	5 až 7	0,2 až 0,4
Kalená ocel	hrub.	40 až 50	5 až 8	0,8 až 1,4	20 až 40	5 až 8	1,0 až 1,5
	dok.	40 až 55	4 až 6	0,4 až 0,8	20 až 30	4 až 7	0,6 až 1,0
Litina	hrub.	50 až 80	15 až 18	0,8 až 1,5	40 až 80	12 až 22	0,8 až 1,4
	dok.	40 až 70	8 až 16	0,4 až 0,9	30 až 50	8 až 15	0,3 až 0,8
Bronz	dok.				40 až 70	4 až 8	0,3 až 0,5
Tvrdé povlaky	dok.	20 až 25	10 až 12	0,3 až 0,4			

Tab. 9 Přídatky na honování [2].

Průměr díry [mm]	Velikost přídatku na průměr [mm]	
	ocel	litina
až 50	0,01 až 0,02	0,02 až 0,04
50 až 100	0,015 až 0,03	0,02 až 0,06
100 až 200	0,02 až 0,05	0,04 až 0,08
200 až 300	0,025 až 0,08	0,06 až 0,16
300 až 500	0,04 až 0,12	0,12 až 0,25

U honování je potřeba zaručit, aby teplota obrobku nepřekročila 100 °C. Dosahujeme toho použitím pouze malých tlaků a malé řezné rychlosti. Používaný tlak k přitlačování honovacích kamenů na obráběnou plochu se pohybuje mezi 10 N/cm² až 100 N/cm² a musí být konstantní. A řezná rychlost nesmí překročit hodnotu 30 m/min. [8]

Na počátku honovacího procesu se nejprve zbrousí vrcholky drsnosti povrchu a jeho zvlnění. S narůstajícím prostorovým podílem hutnosti materiálu se zmenší odebíraná výška materiálu. Dojde k tomu z toho důvodu, že se nemění tlak na honovací kameny, a navíc je tak malý, že se nerozlamují brusná zrna. S časem tak při honování postupně klesá rychlost úběru materiálu a zároveň i rychlost opotřebení honovacích kamenů, viz obr. 10. [8]

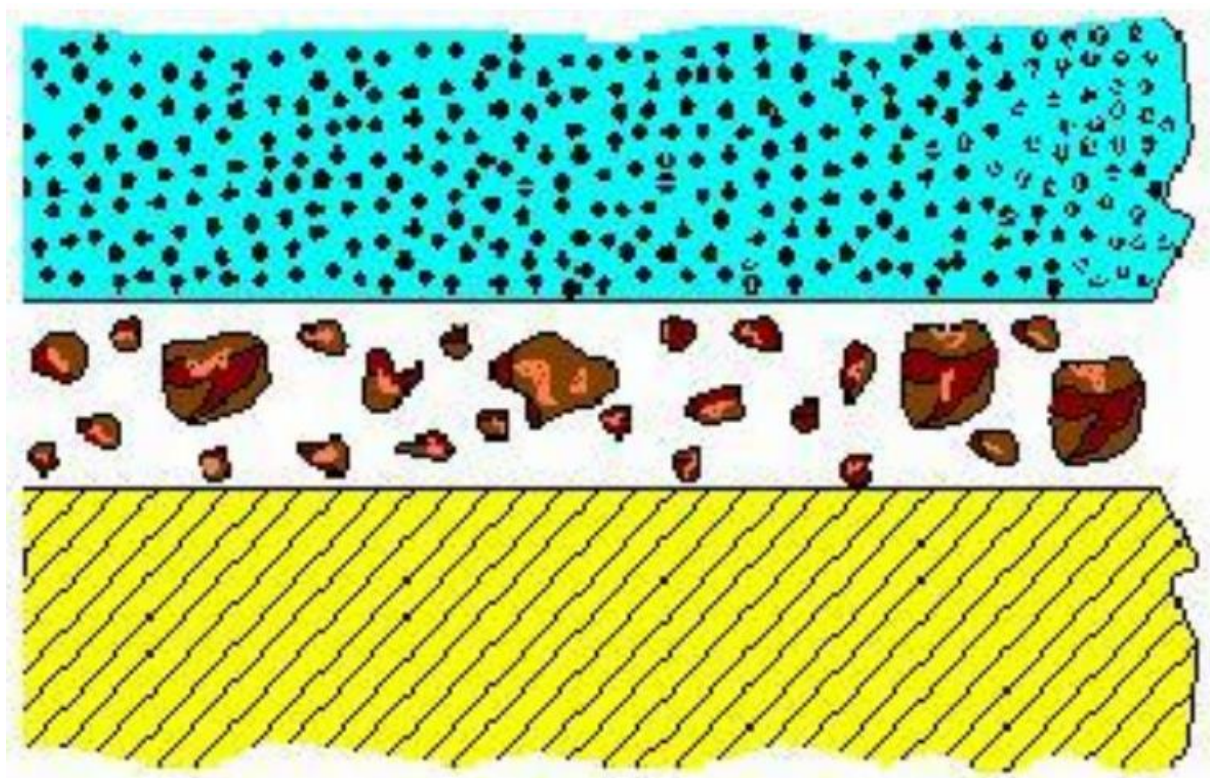


Obr. 10 Závislost opotřebení honovacích kamenů a hloubky drsnosti na době honování [8].

4 LAPOVÁNÍ

Lapování je metodou dokončovacího obrábění, kterou lze dosáhnout velice přesných rozměrů a velmi malé drsnosti povrchu. Přesnost rozměrů se pohybuje od 0,1 do 0,5 μm a střední aritmetická odchylka profilu R_a dosahuje hodnot 0,01 až 0,15 μm . Tato metoda je vhodná pro úpravu ploch různých tvarů. Lze jí opracovávat vnější i vnitřní plochy, tvarové i rovinné plochy, válcové i kuželové plochy, ozubení, a dokonce i závit. [1; 2]

Lapování může být strojní i ruční. Lapování probíhá buď za pomoci pasty, brusiva rozptýleného v kapalině nebo za pomoci suchého brousícího prášku. Brousící zrna postupně odřezávají mikronerovnosti na povrchu obráběných ploch, a tím dochází ke zlepšování drsnosti povrchu a částečně i k úpravě geometrického tvaru součástí. Kvalita povrchu se zlepšuje i díky plastické deformaci malých nerovností, ke které dochází díky tlaku pohybujících se brousících zrn. Princip lapování je vidět na obr. 11. [1; 9]



Obr. 11 Princip lapování [9].

Nevýhodou lapování je, že jde o zdlouhavý proces. Dalšími nevýhodami oproti jiným dokončovacím metodám obrábění je velká pracnost, poměrně malá produktivita a vysoké náklady na jednotku plochy. Z toho důvodu je lapování, pokud to dovolí dané požadavky na přesnost a drsnost povrchu, často nahrazováno honováním nebo superfinišováním. [2; 9]

Liší se od sebe hrubovací lapování a velmi jemné lapování, a to podle charakteru úběru materiálu. U hrubovacího lapování se mikronerovnosti odřezávají velkým počtem zrn a u velmi jemného lapování dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy upravované plochy. Tvar lapované plochy určuje tvar lapovacího nástroje, protože lapovací nástroje mají vždy negativní tvar lapovaných ploch. Lapovacím nástrojem je buď lapovací kotouč nebo trn vyrobený z měkkého materiálu. [1; 2; 9]

Materiály používané na lapovací nástroje jsou:

- jemnozrná perlitická nebo feritická litina [2],
- kalená ocel [1],
- plastické hmoty [1],
- měkká ocel [9],
- měď [9],
- mosaz [9],
- olovo [9],
- tvrdé dřevo [9].

Brusivo se u lapování volí podle lapovaného materiálu. Lapuje-li se měkká nebo kalená ocel, tak je jako brusivo nejčastěji používán umělý korund. Pro lapování slinutých karbidů a další velmi tvrdých materiálů je vhodné použít karbid bóru, diamantové mikroprášky nebo mikroprášky z kubického nitridu bóru. Hodnota zrnitosti brusiva se nejčastěji používá v rozmezí od 40 do 1 μm a volí se podle požadované drsnosti, výchozího stavu upravované plochy a podle ponechaného přídávku na lapování. Důležitým faktorem je i tvar zrn brusiva, protože zrna brusiva musí mít velkou rovnoměrnost granulometrického složení a měla by být izometrická. U velmi jemného lapování se často používá oxid železa (Fe_2O_3), oxid chromu (Cr_2O_3) a také vídeňské vápno (CaMgCO_3). Nejčastěji používaným nositelem brusiva je pak petrolej s přídatkem tři až pěti procentní kyseliny olejové neboli oleinu a oleje s přídatkem živočišného nebo rostlinného oleje. Někdy se také u jemného lapování používá nafta, benzín nebo líh s vídeňským vápnem. Líh s vídeňským vápnem se použije, pokud je potřeba dosáhnout vysokého lesku kalené oceli. Doporučená brusiva jsou v tab. 10. [1; 2]

Tab. 10 Brusiva pro lapování [2].

Lapovaný materiál	Brusivo
ocel	umělý korund
litina keramika sklo	karbid křemíku
zvláště tvrdé materiály (SK, RO)	karbid bóru kubický nitrid bóru diamant
měkké materiály	oxid železitý (Fe_2O_3) oxid chromitý (Cr_2O_3) vídeňské vápno (CaMgCO_3) hydroxid železitý ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)

Lapovací pasty neobsahují pouze brousící zrna, krom nich mohou totiž obsahovat i různé oleje, petrolej, živočišné tuky nebo některé kyseliny, jako jsou například kyselina olejová a kyselina stearinová. Tyto kyseliny se používají, protože narušují mikroskopické vrstvy lapované plochy, a ty jdou pak lépe obrousit. Složení lapovacích past je zobrazeno v tab. 11. [1]

Tab. 11 Složení lapovacích past [2].

Druh brusiva		Al ₂ O ₃		SiC	Cr ₂ O ₃		
Zrnitost		1200 - 70	150 - 36	180 - 150	36	100	220
Obsah složek [%]	Brusivo	70	50 až 70	60	81	76	74
	Kyselina olejová	20	20 až 27				2
	Kyselina stearová	8	8 až 17		10	10	10
	Tuhá kyselina křemičitá				2	2	1,8
	Zmýdelněný tuk			38	5	10	10
	Bikarbonát sodný						0,2
	Petrolej	2	2 až 6	2	2	2	2

Přidávky pro lapování se po předcházející operaci, kterou je většinou broušení volí tak, aby byly větší než odchylky od geometrického tvaru a zároveň musí být ještě zvětšeny o 20 až 50 % maximální hodnoty nerovností R_z . Většinou se pak tyto přidávky pohybují v rozmezí od 0,005 do 0,03 mm. Doporučené přidávky a další řezné podmínky pro lapování jsou zobrazeny v tab. 12. [1]

Tab. 12 Řezné podmínky pro lapování [2].

Typ plochy a lapovaný materiál	Operace	Brusivo, zrnitost	Řezné podmínky		
			přídavek [μm]	tlak p_k [MPa]	rychlost v_c [m.min ⁻¹]
Rovinné plochy, kalená ocel	1	Al ₂ O ₃ , 60	30 až 60	0,13 až 0,15	30 až 60
	2	Al ₂ O ₃ , 220	10 až 15	0,12 až 0,15	15 až 30
	3	Al ₂ O ₃ , 500	5 až 7	0,10 až 0,12	10 až 15
	4	Al ₂ O ₃ , 1200	1 až 3	0,08 až 0,10	7 až 10
Vnější válcové plochy, bronz	1	Cr ₂ O ₃ , 36	20 až 30	0,02 až 0,03	20 až 30
	2	Cr ₂ O ₃ , 220	10 až 15	0,01 až 0,015	10 až 15
	3	Cr ₂ O ₃ , 1200	3 až 5	0,01 až 0,015	10 až 15

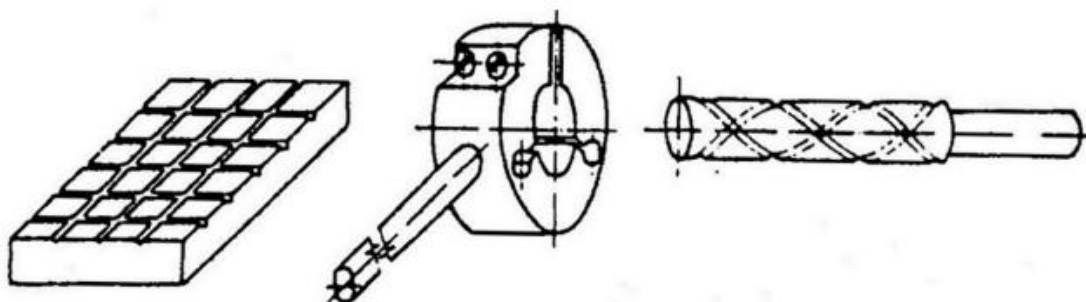
U vysokých nároků na požadovanou kvalitu při velkých přídvcích se využívá víceetapňové lapování. Tato metoda probíhá tak, že se postupně snižuje zrnitost brusiva, pracovní rychlost a přítlačný tlak. Lapovací proces řídí tři základní faktory [1]:

- doba lapování,
- přítlak (tlak v místě styku obrobku s lapovacím nástrojem),
- rychlost pracovního pohybu.

4.1 Ruční lapování

Při užití ručního lapování se na obrobek nejprve nanese lapovací pasta nebo lapovací kapalina. Poté se se stálou změnou pohybu a za mírného tlaku pootáčí nástrojem nebo obrobkem. Po několika pohybech se opotřebovaná pasta z obrobku musí setřít a je nutno ji nahradit novou vrstvou pasty. [9]

Lapovacími trny se lapují vnitřní plochy, vnější rotační plochy se lapují pomocí prstenců s kameny a rovinné plochy pomocí pohybu obrobku po lapovací desce nebo pohybujícími se lapovacími destičkami. Na obr. 12 jsou zleva zobrazeny lapovací deska, lapovací prstenec a lapovací trn. Opotřebením lapovacích trnů u lapování otvorů lze částečně eliminovat jejich přestavováním po celé délce. Pro vylapování otvoru je potřeba použít sadu několika pevných trnů s odstupňovanými průměry. [1; 9]



Obr. 12 Ruční lapovací nástroje [2].

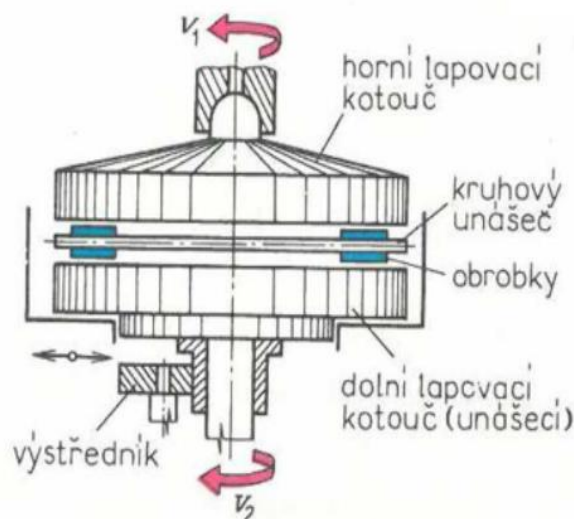
U ručního lapování se často používají diamantové ruční lapovací nástroje, viz obr. 13. Tyto nástroje běžně mívají hliníkovou ručku. Používají se na lapování brusných hran střižných nástrojů, odstranění zbytků po broušení a na odstranění mikro-ostřin na hranách. Především se používají k lapování nástrojů ze slinutých karbidů, dále i na kalené a broušené nástroje. [10]



Obr. 13 Diamantový ruční lapovací nástroj [10].

4.2 Strojní lapování

Při strojním lapování se kromě lapovacího kotouče používá i unášecí kotouč (viz obr. 14), který je uložený na čepu nad lapovacím kotoučem. Unášecí kotouč je po obvodu opatřen ozubením. Při jeho otáčení se dosáhne požadovaného složeného pohybu. Při strojním lapování se dá dosahovat velice malých drsností povrchu, a to až do hodnoty $R_a = 0,005 \mu\text{m}$. Obrobek získá po lapování vysoký lesk a přesný tvar. [9]



Obr. 14 Lapovací stroj se svislou osou [11].

Při strojním lapování se u rotačních ploch používá průběžný nebo bezhrotý zapichovací způsob a nástrojem je kotouč s brusivem v keramické vazbě. Pro rovinné lapování se používá buď opět brousící kotouč s vázaným brusivem a keramickou vazbou nebo litinový kotouč. K lapování vnějších válcových ploch a otvorů o větších průměrech se používají honovací hlavy, u kterých se místo brousících kamenů použijí litinové nebo ocelové lišty. Součásti pro strojní lapování se před lapovacím procesem musí rozřadit do skupin podle tolerance, protože jejich tolerance se nesmí lišit o více než $5 \mu\text{m}$. [1]

Pro lapování rovinných a válcových součástí se používají univerzální lapovací stroje. Pro lapování určitého druhu součástí jako například kuličky, čepy klikových hřídelí, valivá tělíska valivých ložisek nebo boky zubů kol se pak používají speciální lapovací stroje. [1; 2]

Existuje více druhů lapovacích strojů. Pro lapování otvorů slouží stroje se svislým vřetenem a pro dlouhé otvory pak stroje s vodorovným vřetenem. Pro opracování rovinných a vnějších rovinných ploch se pak nejčastěji používají dvoukotoučové lapovací stroje se svislými osami kotoučů, viz obr. 15. U tohoto typu stroje koná pracovní otáčky buď pouze spodní kotouč nebo oba kotouče. Aby se plocha hnacího kotouče mohla přizpůsobit ploše dolního kotouče a být s ní tak rovnoběžná, tak je hnací kotouč výkyvný. Tlak je tvořen buď hydraulicky nebo pouhou vahou horního kotouče. Mezi oběma kotouči je ještě vložena unášecí deska obsahující otvory ve tvarech lapovaných součástí. Aby nedocházelo k nerovnoměrnému opotřebování lapovacího kotouče, tak je nutno aby se obráběné součásti pohybovali po jednotlivých drahách tak, aby pokryly jeho celý povrch. Toho je dosaženo vychýlením unášecí desky excentrem. [1]



Obr. 15 Moderní lapovací stroj [12].

5 LEŠTĚNÍ

Leštění se využívá k dosažení lesklého povrchu s malými nároky na přesnost rozměru. Leštěním se souhrnně nazývají nejrůznější dokončovací operace, u kterých dochází k úpravě povrchu převážně z důvodu zlepšení vzhledu povrchu. U těchto dokončovacích metod dochází pouze k minimálnímu úběru materiálu a používají se především k odstranění stop po předchozí obráběcí operaci. Neslouží však ke změně rozměrů a tvaru obrobku. Kromě odstraňování menších povrchových nerovností se z povrchu odstraňují také nečistoty, vrstvy oxidů a jiných chemických sloučenin. Odstranění povrchových nerovností se většinou provádí ve třech navazujících krocích [1]:

- 1) hrubování brousícími zrny pevně připevněnými k textilnímu podkladu (jedná se o brousící pásy, plátna a kotouče),
- 2) jemné leštění volně rozptýlenými zrny v kapalině (většinou v oleji), nebo v leštící pastě (vozky, tuky), nanášené na textilní pásy nebo kotouče,
- 3) dolešťování textilním kotoučem nebo pásem bez brusiva za pomoci přtlaku; při dosažení vyšších rychlostí dochází k zahřátí a plastické deformaci vrcholků nerovností třením, což vede k ke změknutí a přeštění.

Nástroje na leštění vypadají různě, podle tvaru leštěné plochy. Rozlišují se na dva základní druhy [1]:

a) Kotouče

Jedná se o lamelové pásy vytvořené z tkanin (brousících plátén). Dělají se v různých stupních tuhosti, aby došlo k co nejlepšímu kontaktu s leštěnou plochou. Volné lamely mohou být orientovány buď radiálně nebo šikmo. U radiální orientace lamel se jedná o leštění obvodem. U šikmé orientace lamel se jedná o takzvané spleené leštění, protože dochází k leštění i bokem kotouče. Na obr. 16 je zobrazen radiální štětínový kotouč. [1]



Obr. 16 Radiální štětínový kotouč [13].

Kotoučů pro leštění máme několik druhů. Mohou být [1]:

- vrstvené z textilních tkanin,
- plstěné,
- tvořené umělohmotnými nebo žíhovými vlákny,
- kombinace vláken a lamel,
- speciální – tuhé (guma, dřevo, kov), potažené plstí, apod.

Doporučené obvodové rychlosti kotoučů v závislosti na leštěném materiálu jsou zobrazeny v tab. 13 [14].

Tab. 13 Obvodové rychlosti kotoučů při leštění [14].

Leštěný materiál	Stupně leštění	
	I.	II. a III.
Měkká ocel	38 až 46 m/s	26 až 30 m/s
Tvrdá ocel	40 až 48 m/s	26 až 30 m/s
Slitinové oceli	40 až 48 m/s	26 až 28 m/s
Nikl	38 až 48 m/s	26 až 28 m/s
Bronz	38 až 48 m/s	26 až 28 m/s
Měď	32 až 36 m/s	26 m/s
Mosaz	32 až 36 m/s	26 až 28 m/s
Hliník	36 m/s	16 až 24 m/s
Lehké slitiny	32 až 40 m/s	16 až 22 m/s
Zinek	30 až 38 m/s	18 až 22 m/s
Drahé kovy	20 až 24 m/s	16 až 18 m/s
Chrom	38 až 48 m/s	26 až 28 m/s

b) Textilní pásy (obr. 17)



Obr. 17 Leštící pás [15].

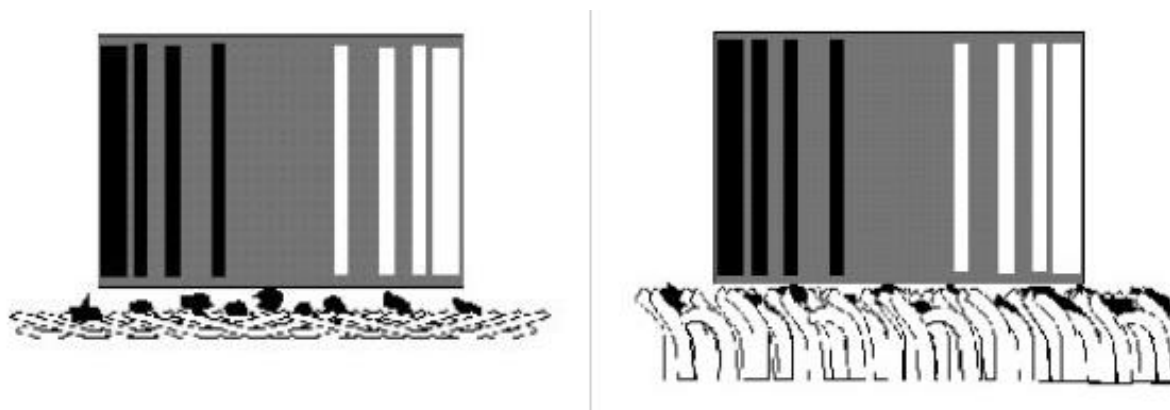
Máme dva druhy textilních pásek [1]:

- nekonečný pás přitlačovaný tvarovou opěrkou nebo volným povrchem – podobá se pásovému broušení,
- brousící pásy nalepené na kmitající tvarové kameny – podobá se superfinišování. Metoda, která používá tento druh textilní pásky se nazývá leštění kmitající textilní páskou. Proti klasickému superfinišování je doba zkrácená až o polovinu, a to díky větší řezivosti lépe orientovaných zrn a pružnosti podkladového materiálu. Tyto vlastnosti umožňují vyšší rychlosti a větší přitlačné síly.

Materiál a zrnitost brousících zrn se vybírají podle broušeného materiálu a požadované účinnosti procesu. Zrnitost se většinou pohybuje v rozmezí od 80 do 600. [1]

Leštění může probíhat strojně i ručně. Leštění může být mechanické, chemické, kdy se k mechanickému leštění přidává chemická látka, nebo elektrochemické. U elektrochemického leštění dochází k úběru materiálu elektrochemickým rozpouštěním. [16]

Během leštění nedochází k velkému úběru materiálu. Především jsou pouze odstraňovány zbylé rysy po předchozích operacích. Může dojít i k takzvanému přešetění, kdy je do povrchové vrstvy vnesena dodatečná nežádaná deformace. Při leštění lze použít i lešticí prostředky s jemnými zrníčky. Tato zrníčka jsou na vláknech ukotvena pružně. Schémata na obr. 18 ukazují, že působení hran zajišťující úběr materiálu je pro leštění a broušení odlišné. [17]



Obr. 18 Schémata zrn u broušení (vlevo) a u leštění (vpravo) [17].

Ukotvení jednotlivých zrn je u měkkých a tvrdých podložek odlišné. U tvrdých podložek se zrna uchycují na povrchu podložky ve vhodných místech podle dané struktury tkaniny. Tvrdé podložky se používají pro dosažení maximální rovinnosti a dochází u nich k agresivnímu leštění. U měkkých podložek se zrna uchytávají mezi jednotlivými vlasy měkkých tkanin, takže úběr materiálu je méně agresivní. Měkké tkaniny jsou ideální k vysoce kvalitní povrchové úpravě. [17]

V mnoha případech nelze přesně určit hranici mezi leštěním, lapováním a broušením jemnozrnnými kotouči s organickým pojivem, a to především v případech kdy se používají podobné nástroje. Tyto metody se totiž často prolínají. Příkladem může být zabrušování pastami různé zrnitosti, ve skutečnosti se totiž jedná o lapování. [1]

6 OMÍLÁNÍ

Jedná se o dokončovací metodu, která spočívá v úběru materiálu z povrchu velkého množství malých součástí umístěných v omílacím bubnu za pomoci abrazivních částic, viz obr. 19. K úběru materiálu dochází díky pohybu všech součástí i abrazivních částic a jejich vzájemnému omílání se o sebe. Jedná se o nejproduktivnější metodu úpravy vzhledu povrchu, máme-li velké množství malých součástek bez nároků na přesnost. Rychlost pohybu součástek v omílacím bubnu, jejich dráhy a abrazivní účinek závisí na tvaru, velikosti a pohybu bubnu, na tvaru, materiálu a pohybu částic a na rozměrech, hmotnosti, tvaru ploch a vlastnostech materiálu obrobku. [1]



Obr. 19 Příklad omílacího bubnu [18].

Existují tři způsoby omílání. Jsou to [19]:

- rotační omílání – používá se pro opracování malých součástí ve velkých sériích, tyto součásti i omílací prvky jsou zpravidla ve tvaru válce,
- vibrační omílání – k omílání součástí se využívá vibrační pohyb, při tomto typu omílání se dosahuje vyššího výkonu než u rotačního omílání,
- odstředivé omílání – omílané součásti jsou u této metody uspořádány planetově a omílací proces je hrubší.

Omílací bubny se vyrábí v nejrůznějších velikostech a tvarech. Běžné délky omílacích bubnů se pohybují od 1 do 10 m, mohou být však i větší. Tvary bubnů se liší, mohou být [1]:

- kruhového průřezu – nejčastější průměry jsou 0,5 až 3 m,
- šesti nebo osmi hraného průřezu,
- tvaru válce komolého kužele,
- tvaru hranolu,
- tvaru zvonu,
- složeného tvaru – například válec s kuželovými čely.

Na vnitřní povrch bubnu bývají často umístěny různé přepážky, upínací přípravky a závěsy. Základním pohybem omílacího bubnu je rotační pohyb. Rychlost rotačního pohybu se pohybuje mezi $0,5$ a 2 m.s^{-1} . Dalšími pohyby jsou [1]:

- osový,
- excentrický,
- vodorovný,
- šikmý,
- sférický.

Tyto pohyby mohou probíhat plynule nebo přerušovaně, může se jednat o vratný pohyb, případně může být doplněn rázy nebo kmity. Pohyby náplně bubnu musí být zajištěny tak, aby došlo k co nejlepší úpravě tvarových ploch obrobků a k co nejkratší době trvání procesu. K zajištění těch správných pohybů se používají nejrůznější varianty konstrukcí a pracovních podmínek. [1]

Vzájemný pohyb obráběných součástek lze modifikovat přívodem kapaliny, nebo při omílání za sucha přívodem tlakového vzduchu. Kapalina je do bubnu přiváděna buď tryskami umístěnými ve vnitřním prostoru bubnu nebo otvory ve vnějším povrchu bubnu. Do kapalin se přidávají aditiva kvůli urychlení úběru materiálu a k ochraně proti korozi. [1]

Po proběhnutí omílacího procesu se procesní kapalina musí vyčistit ve speciálních zařízeních. Před vypuštěním do kanálu nebo před tím, než se znovu použije na další omílací proces se musí procesní kapalina vyčistit, protože obsahuje otěr z kovových součástí a omílacích tělísek a může obsahovat i olej nebo rozpuštěné kovy. Recyklace probíhá pomocí odstředování, kdy jsou pevné částice oddělovány od vody. Dosáhne se toho tak, že se na přiváděnou znečištěnou kapalinu začne působit odstředivými silami. Díky tomu se pevné částice usadí uvnitř odkalovacího bubnu a vytvoří tam hutnou vrstvu kalu. Lze odstranit i olej nebo pevné částice menší jak $1 \mu\text{m}$, a to přidáním kapalného nebo práškového flokulantu ještě před odstředovacím procesem. Recyklovaná procesní kapalina se může znovu použít v dalším omílacím procesu. Vyrábí se dva druhy odstředivek [20]:

- automatické – k odstranění kalu dochází automaticky
- poloautomatické (obr. 20) – je nutno manuálně vyprazdňovat odkalovací vložky



Obr. 20 poloautomatická bubnová odstředivka Z800 [21].

Celý proces může trvat i několik hodin. Objem bubnu je během omílacího procesu naplněn okolo 50 – 80 %. Tato náplň je tvořena obrobky, kapalinou, pracovními částicemi a pomocnými prostředky. Obrobky jsou ponechány volně, v tomto případě se pohybují společně s náplní, nebo mohou být pevně upnuté či zavěšené. Zavěšené výrobky se snadněji vyměňují a po skončení procesu také lépe třídí a čistí. [1]

Celý proces probíhá v několika fázích. Během těchto fází se mění používané částice za částice jiných velikostí a rozdílných zrnitostí. Ne vždy musí být použity všechny fáze. Jednotlivé fáze se mohou vynechat v reakci na požadavky na obráběnou plochu a na její výchozí stav. Těmito fázemi jsou [1]:

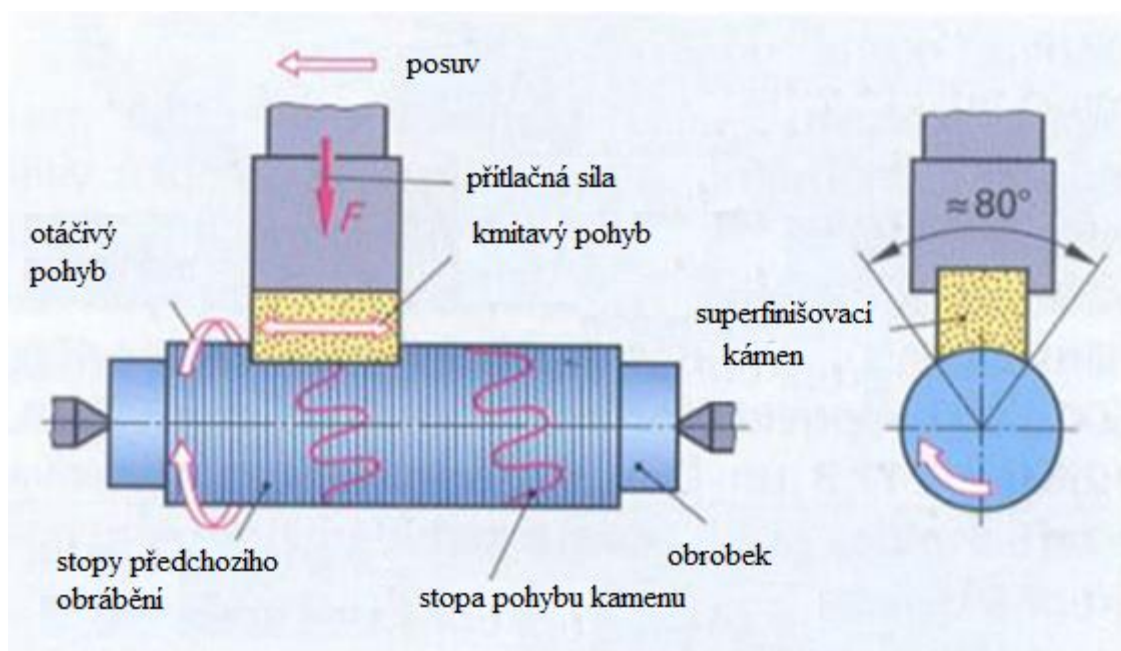
- čištění – použití nejhrubších částic (hrudky),
- broušení – střední zrnitost brusiva (60 – 120),
- leštění – jemné brusivo (240 – 500),
- doleštění – nejjemnější brusivo (vápno, oxidy kovů, plavená křída) ulpí na povrchu pomocných částic (kuličky z umělé hmoty, dřevěné piliny, korková drť). Jedná se o tzv. měkký proces,
- zpevnění – kovová tělíska s hranami zaoblenými omíláním nebo kuličky. Jedná se o tzv. tvrdý proces.

7 SUPERFINIŠOVÁNÍ

Superfinišování je velice produktivní dokončovací metoda obrábění. Lze ji použít na vnější i na vnitřní rotační, rovinné i tvarové plochy, viz obr. 21. Nejčastěji se superfinišování používá k dokončování valivých ložisek, místa uložení klikových hřídelů a nejrůznějších součástek v automobilovém průmyslu. [2; 8]

Vhodnými materiály pro superfinišování jsou [2]:

- kalené oceli,
- nekalené oceli,
- litiny,
- slitiny těžkých kovů,
- plasty.



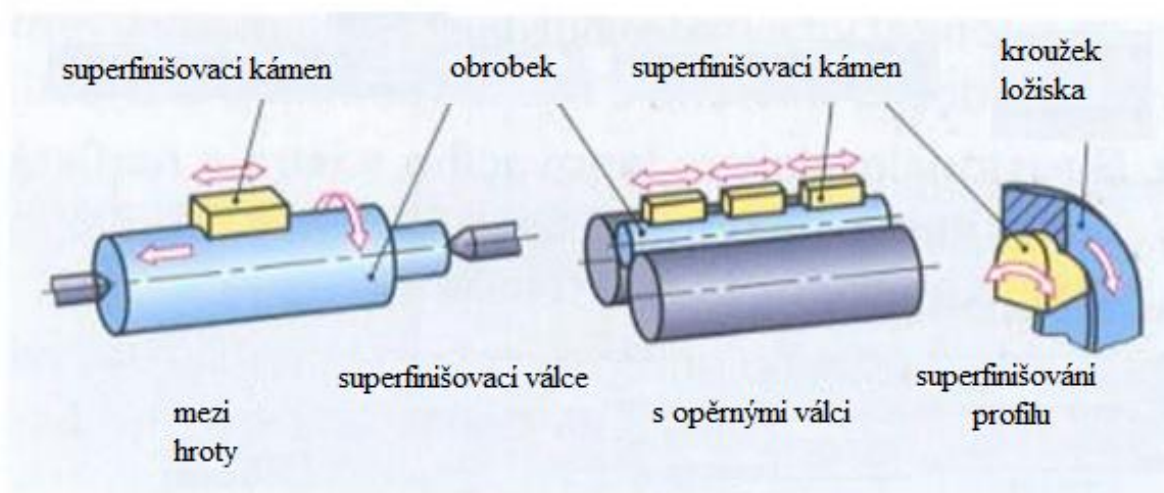
Obr. 21 Princip superfinišování, podle [8].

Superfinišování je speciální druh broušení, při kterém jsou z dokončovaného povrchu odřezávány vrcholky nerovností velice jemnými zrna brousicího nástroje, kterým je superfinišovací kámen. Superfinišováním se odstraňuje tenká měkká přepálená vrstva, která je popouštěná broušením zkaleného dílu a rýhy po broušení. Tím se dá značně vylepšit trvanlivost namáhaných dílů. [2; 8]

Superfinišování je charakterizováno [2]:

- definovanou silou vyvolávající nízký tlak na obráběnou plochu,
- kmitavým pohybem superfinišovacího kamene,
- malými řeznými rychlostmi.

Superfinišovací kameny jsou upevněny v pneumaticky, hydraulicky či elektromechanicky na poháněných kmitavých hlavách. Honovací kameny jsou pak těmito kmitavými hlavami pohybovány v podélném směru, to je ve směru osy válcové plochy, viz obr. 22. Amplituda vytvořeného kmitavého pohybu se pohybuje mezi 1 až 6 mm v kolmém směru k rýhám po soustružení nebo broušení. [1; 8]



Obr. 22 Pohyby při superfinišování, podle [8].

Superpozicí rotačního pohybu součásti o rychlosti v_w 10 až 80 m.min⁻¹ a kmitavého pohybu superfinišovacího nástroje o frekvenci kmitů ω_k 500 až 3000 min⁻¹ vzniká při superfinišování řezný pohyb, který je vždy kolmý na směr rotačního pohybu součásti. Rychlost kmitavého pohybu se volí v rozmezí od 2 do 15 m.min⁻¹ a lze určit ze vztahu [2]:

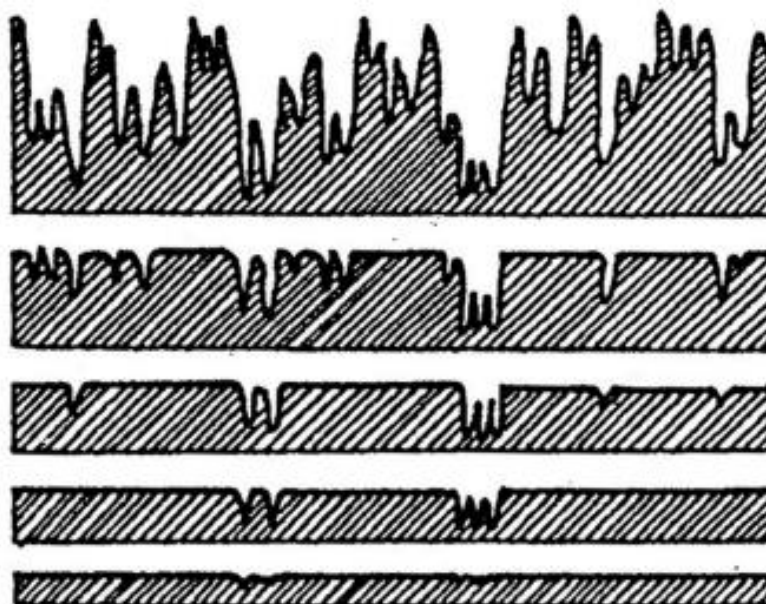
$$v_k = \frac{a \cdot \omega_k}{1000} \quad (6.1)$$

kde: v_k – rychlost kmitavého pohybu [m.min⁻¹]

a – amplituda [mm]

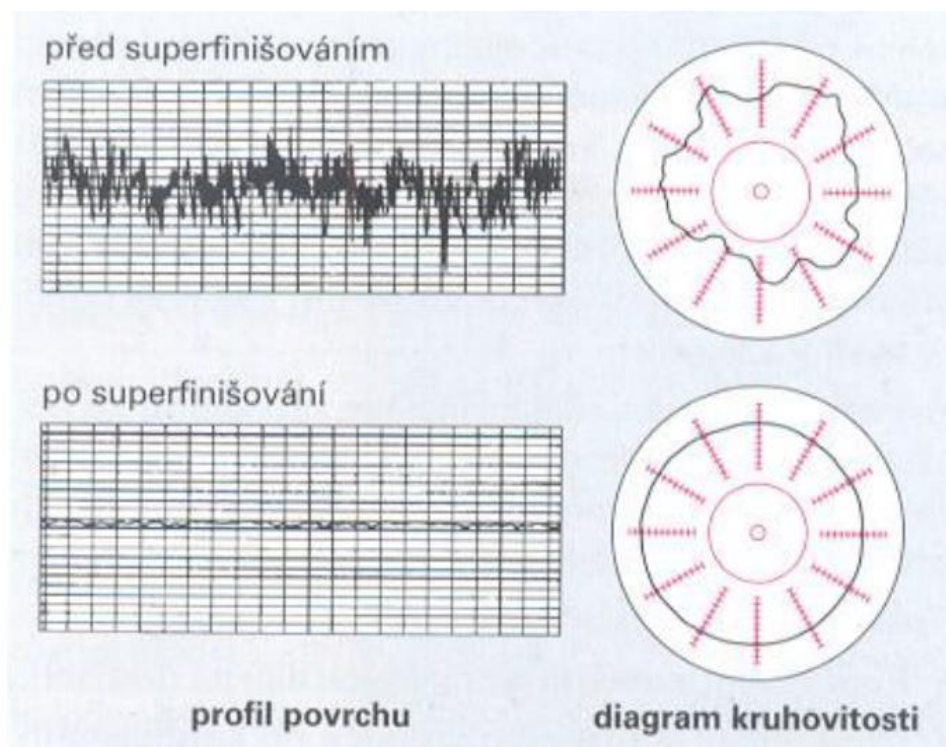
ω_k – frekvence [min⁻¹]

Superfinišovací kameny mohou být najednou až čtyři a jsou přitlačovány na obráběnou plochu tlakem p_k 0,1 až 0,4 MPa. Se snižováním drsnosti povrchu dochází ke zvětšování nosného podílu, měrný tlak mezi nástrojem a součástí postupně klesá, až dojde k vytvoření souvislého kapalinového filmu, viz obr. 23. Superfinišovací kámen se pak už nestýká s obrobkem a superfinišovací proces už dále nepokračuje. [1; 2]



Obr. 23 Průběh superfinišovacího procesu – zvětšování nosného podílu [2].

Hmotnost a velikost superfinašovacíh kamenů je značně omezena, a to kvůli kmitavému pohybu, který má kmitočet 2300 až 3000 min⁻¹. Větší tvarové odchylky, jako je například prohnutí hřídele, se tak touto metodou nedají vyrovnávat, protože menší honovací kameny to nezvládnou. Dají se tak zarovnávat pouze ty tvarové odchylky, které tyto honovací kameny svou velikostí překryjí. Superfinašováním se nemůžou korigovat odchylky od válcovitosti. Může se jím však odstranit zvlnění kruhovitěho průřezu válcové plochy. Tím se dá podstatně zlepšit kruhovitost, viz obr. 24. [8]



Obr. 24 Změna drsnosti a kruhovitosti superfinašováním [8].

Pokud se úhel sklonu stopy po jednom zrně brusiva (α) pohybuje v rozmezí od 40 do 60°, tak se dosahuje největšího úběru. Při těchto hodnotách úhlu α je ale nevýhodou tvorba matného povrchu. Vysoký lesk povrchu lze dosáhnout při úhlech $\alpha < 40^\circ$, při takto nízkých úhlech se snižuje řezivost kamene. Zrna brusiva tak místo řezání provádí zahlazování malých nerovností plastickou mikrodeformací. [1; 2]

Řezná kapalina se přivádí mezi stykové plochy. Nejčastěji používanými řeznými (vyplachovacími) kapalinami jsou [2]:

- petrolej,
- směs petroleje s 10 až 15 % minerálního oleje,
- oleje s aditivy.

Olej, jakožto kapalina s vyšší viskozitou, je vhodný pro jemné superfinašování (dosažení vysokého lesku) a měkčí materiály. Petrolej, jakožto kapalina s nižší viskozitou je pak vhodný pro velké úběry. [2]

Superfinašování má dvě fáze. Těmito fázemi jsou hrubovací fáze a leštící fáze. Pro tyto fáze je důležitý poměr obvodové rychlosti obrobku a rychlosti kmitavého pohybu nástroje. Tento poměr je určen úhlem křížení drah zrn brusiva 2α , přičemž platí rovnice [2]:

$$\tan \alpha = \frac{v_k}{v_w} \quad (6.2)$$

kde: α – úhel sklonu stopy po jednom zrně brusiva [°]

v_k – rychlost kmitavého pohybu [m.min⁻¹]

v_w – rychlost otáčení obrobku [m.min⁻¹]

Před superfinašováním se ve většině případů provádí broušení. Může to být ale i jemné soustružení nebo vyvrtávání. Řezné podmínky se pro superfinašování volí podle výchozích parametrů opracovávané plochy, především to závisí na drsnosti povrchu, viz tab. 14. Superfinašováním lze vylepšit drsnost povrchu až do hodnot $R_a = 0,05$ až $0,1 \mu\text{m}$ a lze jím snížit vlnitost povrchu pod $0,1 \mu\text{m}$. Geometrický tvar se touto metodou moc upravovat nedá. [1; 2]

Tab. 14 Řezné podmínky a přídavky pro superfinašování [2].

Drsnost povrchu R_a [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel křížení stop 2α [°]	Poměr v_w / v_k
požadovaná	výchozí				
0,16	1,6	10 až 12	1	80 až 110	0,8 až 1,2
0,08	0,8	5 až 8	2	40 až 70	1,5 až 2,5
0,04	0,4	4 až 5	3	20 až 40	3 až 12
0,02	0,2	2 až 3	4	méně než 20	12 až 28

Nástroji pro superfinašování jsou superfinašovací kameny, viz obr. 25. Tvar kamenů je přizpůsoben podle tvaru obráběné plochy. Pro superfinašování oceli se superfinašovací kameny používají s brusivem z umělého korundu a bakelitovou nebo keramickou vazbou. Pro superfinašování litin a ocelí s nižší pevností, korozivzdorných ocelí, neželezných kovů a slitin se pak superfinašovací kameny používají s brusivem z karbidu křemíku nebo karborunda. Kubický nitrid bóru v keramické vazbě se používá pro superfinašování vysoce legovaných ocelí a pro superfinašování slinutých karbidů se používá syntetický diamant v organické vazbě. Nejčastěji používané zrnitosti se pohybují v rozmezí od 180 do 600, volí se podle požadavku na drsnost povrchu. [1; 2]



Obr. 25 Superfinašovací kameny [22].

Existují dva základní druhy superfinašovacích strojů, jsou jimi jednovřetenové a vícevřetenové. Superfinašovací stroje se vyskytují v celé řadě různých konstrukcí v závislosti na velkém sortimentu velikostí a tvarů obráběných součástí. Na obr. 26 je uveden příklad moderního superfinašovacího stroje. Nejčastěji se využívají pro opracování vnějších a vnitřních rotačních ploch, pro zapichovací nebo průběžné finišování. Jsou určeny především pro dokončování součástí hromadné výroby jako jsou valivá ložiska, dráčky ventilů, hřídele, klikové hřídele nebo pístní čepy. Na suporty hrotových soustruhů nebo na hrotové brusky se v kusové a malosériové výrobě upínají přídatná zařízení. [1; 2]



Obr. 26 Modulární superfinašovací stroj LeanCostMachine [23].

8 INTEGRITA POVRCHU

Integrita obrobeného povrchu představuje souhrn fyzikálních a chemických vlastností povrchu vzhledem k předpokládanému využití součásti. Integrita povrchu zahrnuje především kvalitu povrchu. Kvalitu povrchu určují následující faktory [24]:

- drsnost povrchu,
- výskyt mikroskopických trhlin,
- výskyt tepelných degradací,
- výskyt fázových transformací,
- zbytková napjatost.

Nejvýznamnějším faktorem je drsnost povrchu. Na její vyhodnocení se používají dvě metody měření. Jedná se o dotykové měření a optické měření. [24]

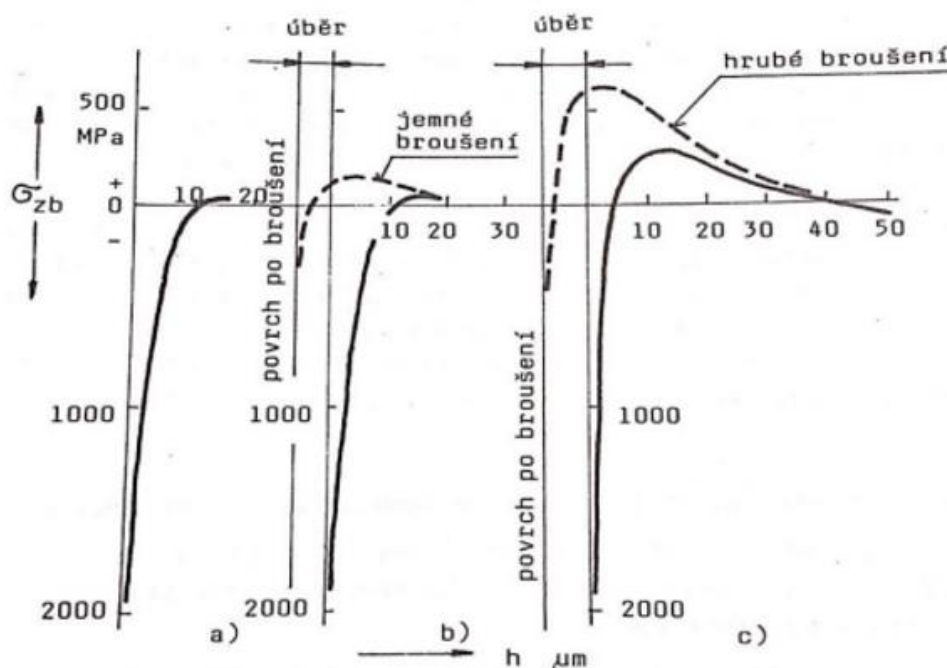
1) Dotykové měření

Nejrozšířenějšími metodami měření povrchu jsou dotykové metody. Hodnoty naměřené dotykovou metodou slouží jako srovnávací a vztažné hodnoty pro další měřicí operace. Výhodami této metody jsou možnost vyobrazit naměřený geometrický profil, schopnost převést analogový záznam na digitální a snadná reprodukovatelnost. Hlavní nevýhoda spočívá v tom, že při měření hrot snímače vytváří mírný tlak na měřené místo, a tak může ve snímané vrstvě dojít k částečné deformaci. [24]

2) Optické metody

Kromě dotykových metod měření existují i bezdotykové metody měření. U této metody se namísto dotykového hrotu ke snímání povrchu využívá světelný paprsek. Ten se od naměřeného povrchu buď odrazí nebo rozptyluje. U měření světelným paprskem velmi záleží na schopnosti materiálu absorbovat světlo. To ovlivňuje hloubku vnikání světelného paprsku. Hlavní výhodou je, že paprsek nepoškozuje měřený povrch. [24]

Největší vliv na kvalitu povrchové vrstvy má poslední technologická operace. Nezvolí-li se však správný sled operací může z předchozí operace zůstat částečné ovlivnění povrchu. Na obr. 27 je znázornění průběhu zbytkových napětí u kroužků valivých ložisek po dokončovacích operacích broušení a superfinišování. Na obr. 27 a) je zobrazen průběh zbytkového napětí při použití pouze superfinišování. Z obrázku lze vyčíst, že až do hloubky 10 μm je zbytkové napětí tlakové, poté pozvolna dochází k přechodu na tah. Na obr. 27 b) je zobrazen průběh zbytkového napětí, pokud superfinišování předchází jemné broušení. Je patrné, že zbytkové napětí je stejně jako u předchozí metody až do hloubky 10 μm tlakové. Poté ale oproti předchozí metodě přechází na tlak o nepatrně vyšších hodnotách. Nejedná se ale o nějak podstatný nárůst, a tak lze tvrdit, že zbytkové napětí po jemném broušení je superfinišováním téměř zcela odstraněno. Na obr. 27 c) je zobrazen průběh zbytkového napětí, když operaci superfinišování předchází hrubé broušení. Z obrázku jde vidět, že hrubé broušení vyvolává výrazná tahová napětí, které následující operace superfinišování nedokáže zcela odstranit. Výsledkem je, že tahová zbytková napětí jsou v tomto případě blíže k povrchu a dosahují výrazně vyšších hodnot než v předchozích případech. Přitom při měření drsnosti či tvrdosti povrchu se tyto různé hodnoty zbytkových napětí téměř neprojevují, a tak se měřené povrchy mohou zdát jako shodné. [25; 26]



Obr. 27 Stav napjatosti v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek [26].

Dvě nejznámější analýzy integrity povrchu jsou [25*]:

- analýza Barkhausenova šumu,
- analýza rentgenové difrakce.

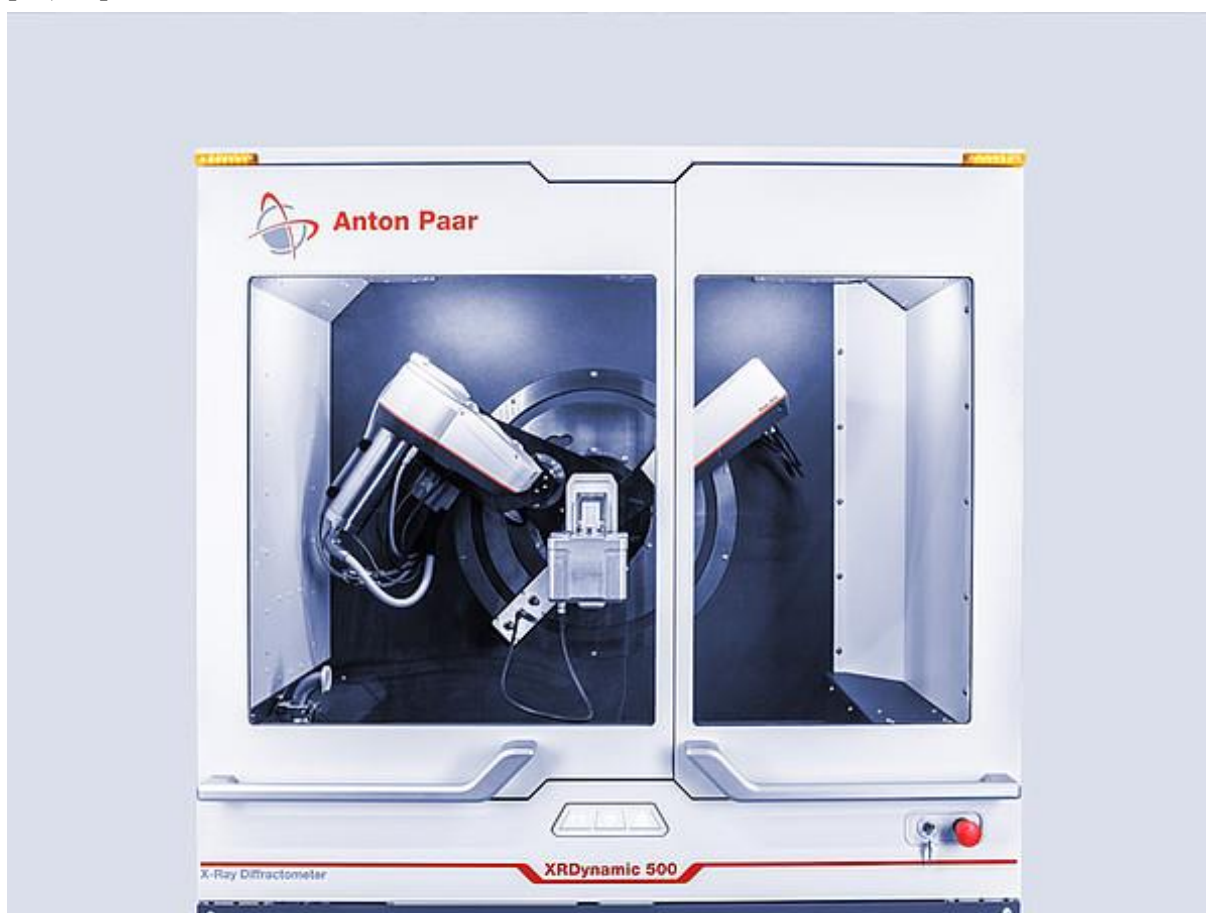
Analýza Barkhausenova šumu je nedestruktivní metoda vyhodnocení integrity povrchu. Touto metodou se vyhodnocují zbytková napětí, tvrdosti vzorků, strukturní a fázové změny. Pro feromagnetické materiály lze použít magnetickou metodu. Magnetizační proces není spojitý, ale je složen z malých skoků a je charakterizován hysterní křivkou. Barkhausenův šum je signál, který vznikne shrnutím všech elektrických pulsů. Zbytková napětí se dají zjistit z měření intenzity Barkhausenova šumu díky jevu, při kterém jsou doménová struktura a magnetické vlastnosti ovlivňovány elastickými vlastnostmi. Tento jev se nazývá magnetoelastická interakce. Tato interakce u materiálů s pozitivní magnetostrikcí, jako je například železo nebo většina ocelí, způsobuje snižování intenzity Barkhausenova šumu tlakovým napětím a zvyšování intenzity Barkhausenova šumu tahovým napětím. [27]

Příkladem přístroje k analýze Barkhausenova šumu je ruční analyzátor Rollscan, viz obr. 28. Tento přístroj dokáže detekovat brusné spáleniny, nalézt defekty tepelného zpracování a vyhodnocovat výskyt zbytkových napětí u feromagnetických materiálů. [28]



Obr. 28 Rollscan 350 [28].

Analýza rentgenové difrakce je nedestruktivní metoda k měření zbytkových napětí. Hloubkové profily zbytkových napětí lze hodnotit kombinací rentgenového měření a postupného elektrochemického odteplávání. Měří se vzdálenost daného systému mřížkových rovin v krystalcích s různou orientací. Příkladem přístroje na analýzu rentgenové difrakce je automatizovaný víceúčelový práškový rentgenový difraktometr XRDynamic 500, viz obr. 29. [27; 29]



Obr. 29 rentgenový difraktometr XRDynamic 500 [29].

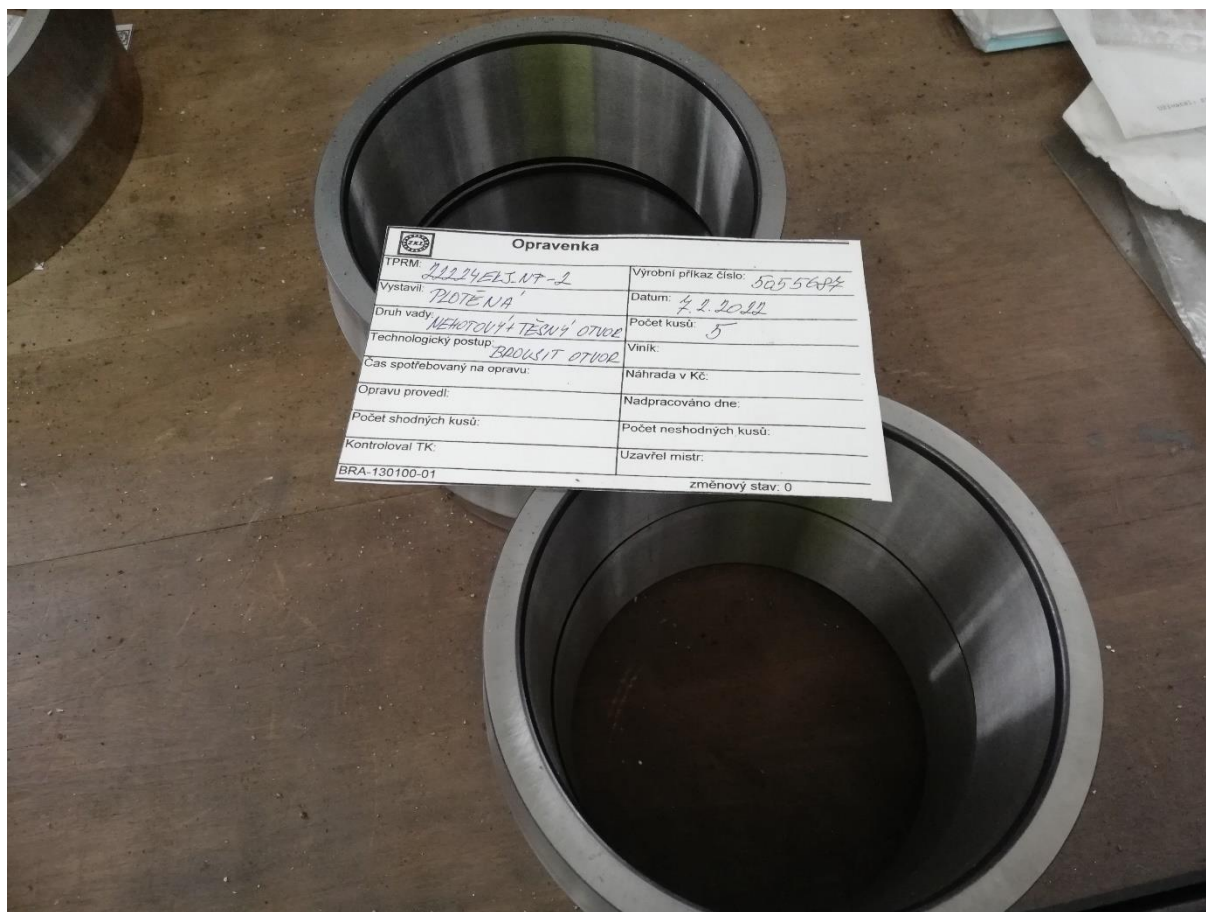
9 EXPERIMENT

Součástí experimentu jsou dokončovací operace na vybraných součástkách ložisek. Konkrétně se jedná o tři součásti:

- vnitřní ložiskový kroužek s označovacím číslem 22224EKJ-N7-2,
- soudeček s označovacím číslem 29434EJ-3,
- soudeček s označovacím číslem 23164CJ-3.

Použitá označovací čísla jsou používána ve firmě ZKL Brno, kde byly tyto součásti zhotoveny. Celá část číslic a písmen před poslední pomlčkou je stejná s ostatními součástmi téhož ložiska a poslední číslice značí přesně o kterou součástku jde. V tomto případě číslo 2 pro vnitřní kroužek a číslo 3 pro soudeček.

1) Vnitřní ložiskový kroužek 22224EKJ-N7-2 (obr. 30)



Obr. 30 Vnitřní ložiskový kroužek 22224EKJ-N7-2.

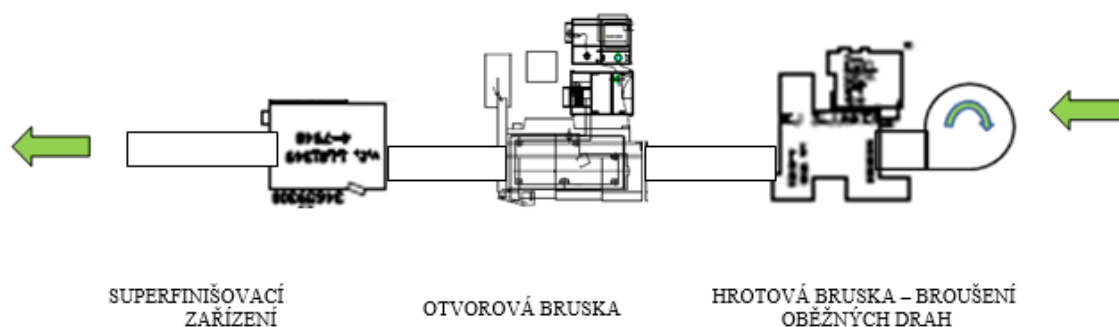
Jedná se o vnitřní kroužek pro dvouřadé soudečkové ložisko, viz obr. 31. V rámci dokončovacích operací jde tato součástka nejprve do broušícího stroje na oboustranné broušení ploch (čel) ložiskových kroužků. Na tomto stroji je prováděno velmi přesné oboustranné broušení čelních ploch ložiskových kroužků v horizontální poloze. Po obroušení čelních ploch se součást přesune na broušící linku pro dokončování vnitřních kroužků ložisek. [30]



Obr. 31 Dvouřadé soudečkové ložisko [31].

Součástí této linky jsou tři stanoviště (obr. 32) [30]:

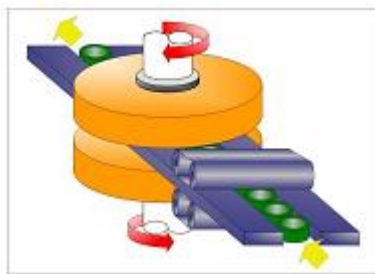
- hrotová bruska na broušení vnějších oběžných drah vnitřních kroužků,
- bruska na broušení otvorů vnitřních kroužků,
- superfinišovací zařízení na vnější oběžné dráhy vnitřních kroužků,
- automatické manipulační zařízení na kroužky, včetně dopravníků.



Obr. 32 Broušící linka na dokončování vnitřních kroužků ložisek [30].

První operace je broušení vnějších oběžných drah na hrotové brusce. Následující operace je prováděna na brusce na broušení otvorů a po této operaci je provedeno superfinišování vnější oběžné dráhy. Při broušících operacích je kroužek upnut ve svislé poloze na magnetické desce s opěrkovým středícím systémem a při superfinišování ve vodorovné nebo svislé poloze. Dokončovací operace prováděné na této součásti byly provedeny postupně na třech stanovištích. [30]

a) Stroj pro oboustranné broušení ploch (čel) ložiskových kroužků (obr. 33)



Obr. 33 Stroj pro oboustranné broušení ploch (čel) ložiskových kroužků [30].

Po automatickém vložení ložiskových kroužků z dopravníku do lineárního podávacího zařízení je ve vodorovné poloze provedena operace oboustranného broušení jejich čelních ploch. Jedná se o první operaci po kalení. Broušené plochy jsou zobrazeny červeně na obr. 34. [30]



Obr. 34 Broušené čelní plochy [30].

Broušení je prováděno v automatickém cyklu lineárním průchodem, přičemž kroužky jsou podávány lineárním podavačem a vedeny v nastavitelných lištách. Stroj je vybaven post-procesním měřidlem, přičemž na základě provedených měření jsou automaticky nastavovány parametry broušení. [30]

Stroj použitý k broušení čel vnitřního kroužku je bruska na oboustranné broušení čelních ploch se dvěma vertikálními kotouči. Broušení proběhlo čely brousících kotoučů za lineárního průchodu. Stroj je vybaven dvěma vřeteny s výkonem 65 kW a dvěma nástroji. Obrobek je upnut v lištách v lineárním podavači. Způsob podávání obrobků do stroje je plně automatický. K podávání dochází automaticky díky lineárnímu podavači. Rychlost podavače se pohybuje okolo 100 mm/s. [30]

Rozměrové rozpětí součástí, které je tento stroj schopen brousit se pohybuje v rozmezí od $\varnothing$ 40 mm do $\varnothing$ 225 mm, maximální šířka broušených součástí může být 80 mm a maximální hmotnost pak 20 kg. Vnitřní ložiskový kroužek 22224EKJ-N7-2 má vnější průměr $\varnothing$ 150 mm, šířku 57 mm a hmotnost pouze 2292 g, takže vybraný stroj je pro tuto součást vhodný. Časová studie a kvalitativní požadavky pro broušení čel dokončované součásti jsou zobrazeny v tab. 15. [30]

OTVOROVÁ BRUSKA

HROTOVÁ BRUSKA - BROUŠENÍ OBĚŽNÝCH DRAH

Brousící linka na dokončování vnitřních kroužků energeticky účinných ložisek, včetně zařízení na automatickou manipulaci kroužků mezi jednotlivými stroji. Manipulační zařízení a dopravníky musí být schopny komunikovat jak s brousícími stroji, které jsou součástí linky, tak se strojem provádějícím následující operaci (superfinišovací zařízení). [30]

- Automatické manipulační zařízení na kroužky, včetně dopravníku,
- Hrotová bruska na broušení vnějších oběžných drah vnitřních kroužků,
- Bruska na broušení otvorů vnitřních kroužků.

Po provedení operace broušení je po odepnutí kroužek přemístěn manipulačním zařízením ze stroje a je přesunut na další operaci broušení otvorů. po převzetí kroužku z operace broušení oběžných drah ve svislé poloze je kroužek manipulačním zařízením přemístěn do místa broušení otvorů. Při broušení je kroužek upnut ve svislé poloze na magnetické desce. Po provedení operace broušení je po odepnutí kroužek přemístěn manipulačním zařízením ze stroje a je uložen ve vodorovné poloze na dopravník, na kterém je přepravován na další operaci superfinišování oběžných drah. [30]

Technické parametry kruhového podávacího stolu jsou zobrazeny v tab. 16. Rozměry kroužků, které lze umístit na podávací stůl jsou zobrazeny v tab. 17.

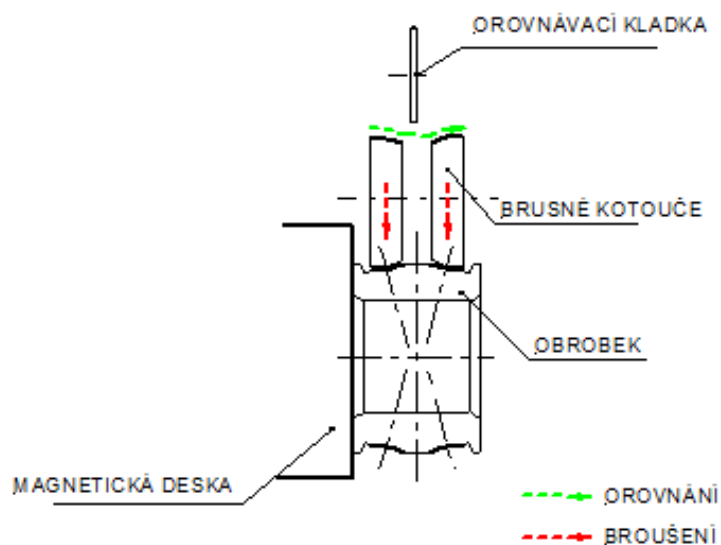
Tab. 16 Technické parametry kruhového podávacího stolu [30].

Průměr stolu	1500 mm
Nosnost stolu	300 kg
Příkon	7 kVA

Tab. 17 Rozměry kroužků, které lze umístit na podávací stůl [30].

Min. vnitřní průměr kroužku	30 mm
Max. vnitřní průměr kroužku	150 mm
Min. vnější průměr kroužku	40 mm
Max. vnější průměr kroužku	175 mm
Min. výška kroužku	20 mm
Max. výška kroužku	80 mm
Max. hmotnost kroužku	15 kg

Schéma hrotové brusky na broušení oběžných drah vnitřních kroužků je zobrazeno na obr. 36. Pro opracování obrobku na této brusce se obrobek upne do opěrek na magnetickou desku. Diamantový orovnávač orovná tvar oběžných drah do brusného kotouče a při následném brousicím cyklu zapichovacím způsobem obrousí obrobek, který je vedený v kluzných opěrkách. Řezná rychlost má hodnotu 80 m/s a otáčky pracovního vřetene jsou až 700 min⁻¹. Brousicí vřeteník lze natáčet o – 5° až + 30°. Časová studie a kvalitativní požadavky pro broušení oběžných drah dokončované součásti jsou zobrazeny v tab. 18. [30]

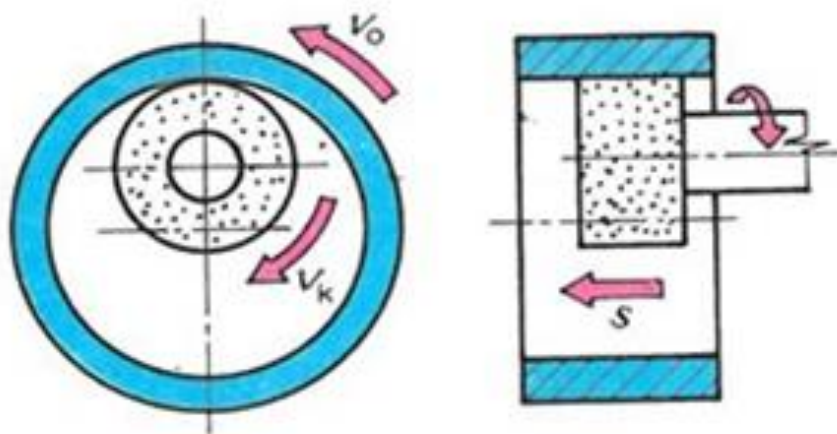


Obr. 36 Schéma hrotové brusky na broušení oběžných drah vnitřních kroužků [30].

Tab. 18 Časová studie a kvalitativní požadavky pro broušení oběžných drah [30].

Typ ložiskového kroužku	vnitřní kroužek	Operace	broušení oběžných drah
Označení	22224EKJ-N7-2	Typ stroje	hrotová bruska
Informace pro broušení:		Kvalitativní požadavky:	
Materiál	100 Cr6	Drsnost (R_a)	0,32
Přídavek pro operaci	0,6 mm	Kruhovitost (filtr 1-15)	3,5 μm
Chladicí médium	Emulze	Vlnitost (filtr 15-500)	1 μm
Orovnávací element	diamantová kladka	Tolerance rozměru	0,02 mm
Tvrдост (HRC)	58-63	Rozdíl $\varnothing$ oběžných drah	0,009 mm
		Tvar oběžné dráhy	0,003 mm
		Rozměry kroužku:	
Způsob upnutí	magnetická deska, kluzné opěrky	Vnější průměr	150 mm
		Šířka kroužku	57 mm
Současný čas operace	3,25 min	Průměr oběžných drah	143 mm
		Rádus oběžných drah	94 mm

Na brusce pro broušení otvorů vnitřních kroužků se obrobek upne do opěrek na magnetickou desku, diamantový orovnávač orovná vnější průměr brusného kotouče, který při následujícím cyklu provede broušení přímého, nebo kuželového vnitřního otvoru kroužku zápichem, nebo oscilací. Obrobek je vedený v kluzných opěrkách. Schéma broušení na této brusce je zobrazeno na obr. 37. Časová studie a kvalitativní požadavky pro broušení otvorů dokončované součásti jsou zobrazeny v tab. 19. [30]



Obr. 37 Schéma broušení otvorů vnitřních kroužků [30].

Tab. 19 Časová studie a kvalitativní požadavky pro broušení otvorů [30].

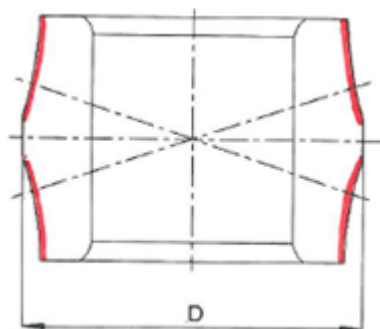
Typ ložiskového kroužku	vnitřní kroužek	Operace	broušení otvoru
Označení	22224EKJ-N7-2	Typ stroje	otvorová bruska
Informace pro broušení:		Kvalitativní požadavky:	
Materiál	100 Cr6	Drsnost (R_a)	0,6 μm
Přídavek pro operaci	0,6 mm	Kruhovitost (filtr 1-15)	3 μm
Chladicí médium	emulze	Házení oběžných drah k vnitřnímu průměru	0,012 mm
Orovnávací element	diamantová kladka	Tolerance rozměru	0,01 mm
Tvrdost (HRC)	58-63	Rozměry kroužku:	
Způsob upnutí	magnetická deska, kluzné opěrky	Vnitřní průměr	120 mm
Současný čas operace	3,29 min	Šířka kroužku	57 mm

c) Superfinašovací zařízení na oběžné dráhy vnitřních kroužků (obr. 38)



Obr. 38 Superfinašovací zařízení na oběžné dráhy vnitřních kroužků [30].

Po automatickém upnutí obrobku je v automatickém cyklu provedeno superfinašování obou vnějších oběžných drah vnitřního kroužku. Na obr. 39 jsou superfinašované plochy vyznačeny červenou barvou. [30]



Obr. 39 Plochy k superfinašování [30].

Superfinašovací stroj je umístěn v brousící lince na dokončování vnitřních kroužků ložisek, předcházející operací je broušení otvorů vnitřních kroužků a následující operací je praní. Nakládání a vykládání obrobku probíhá automaticky uvnitř stroje. Stroj má kompletní krytování s odsáváním olejové mlhy, s odlučovačem. Frekvence kmitu superfinašovacích kamenů je nastavena na 20 Hz. [30]

Stroj obsahuje dva superfinišovací nástroje, oba tyto nástroje vydrží superfinišovat více než 300 kusů. Těmito nástroje lze superfinišovat vnitřní kroužky o průměrech od Ø 30 do Ø 200 mm, šířce 25 až 100 mm a maximální hmotnosti 15 kg. Vnitřní ložiskový kroužek 2224EKJ-N7-2 má vnější průměr Ø 150 mm, šířku 57 mm a hmotnost pouze 2292 g, takže vybraný stroj je pro tuto součást vhodný. Časová studie a kvalitativní požadavky pro superfinišování dokončované součásti jsou zobrazeny v tab. 20. [30]

Tab. 20 Časová studie a kvalitativní požadavky pro superfinišování [30].

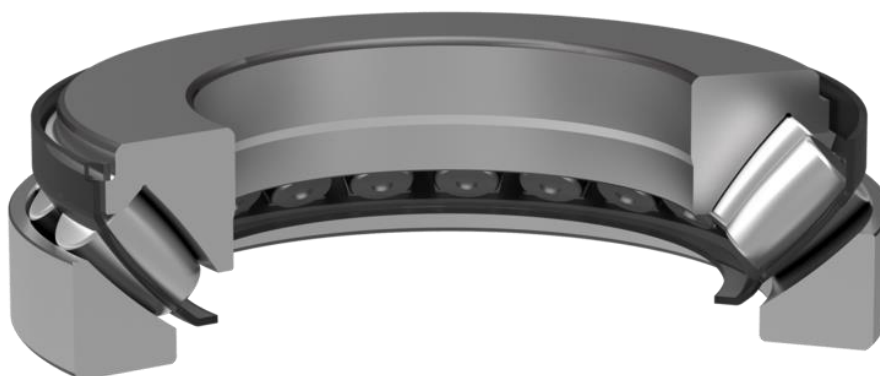
Časová studie a kvalitativní požadavky pro stroj			
Typ ložiskového kroužku	vnitřní kroužek	Operace	superfinišování
Označení	2224EKJ-N7-2	Typ stroje	superfinišovací stroj
Informace pro broušení:		Kvalitativní požadavky:	
Materiál	100 Cr6	Drsnost (R_a)	0,2 μm
Přídavek pro operaci	0,005 mm	Kruhovitost (filtr 1-15)	2,5 μm
Drsnost R_a	0,32 μm	Vlnitost (filtr 15-500)	0,25 μm
Chaldicí medium	honovací olej	Rozměry kroužku:	
Tvrdost (HRC)	58-63	Vnější průměr	150 mm
		Šířka kroužku	57 mm
		Průměr oběžných drah	143 mm
Současný čas operace	1,6 min	Rádus oběžných drah	94 + 0,3 mm

2) Soudeček 29434EJ-3 (obr. 40)



Obr. 40 Soudeček 29434EJ-3.

Jedná se o soudeček pro axiální soudečkové ložisko, viz obr. 41. Povrch této součástky je opracován na CNC brousícím stroji na broušení plášťů valivých těles. Tento stroj slouží k bezhrotému broušení plášťů valivých tělísek. Časová studie a kvalitativní požadavky pro bezhroté broušení zápichem dokončované součásti jsou zobrazeny v tab. 21. [30]



Obr. 42 Axiální soudečkové ložisko 29434EJ [31].

Tab. 21 Časová studie a kvalitativní požadavky pro bezhroté broušení zápichem [30].

Typ ložiskového kroužku	soudeček	Operace	bezhroté broušení zápichem
Označení	29434EJ-3	Typ stroje	bezhrotá bruska
Informace pro broušení:		Kvalitativní požadavky:	
Materiál	100 Cr6	Drsnost (R_a)	0,3 μm
Přídavek pro operaci	0,15 mm / 0,12 mm	Kruhovitost (filtr 1-15)	2 μm
Chladicí médium	chladicí emulze	Tolerance rozměru	0,01 mm
Tvrdost (HRC)	58-63	Rozměry kroužku:	
Současný čas – hrubování (min):	0,092 min	Největší průměr	48 mm
		Nejmenší průměr	36 mm
Současný čas – dokončování (min):	0,095 min	Šířka soudečku	62,5 mm

3) Soudeček 23164CJ-3 (obr. 42)



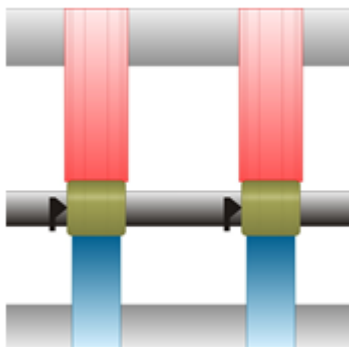
Obr. 42 Soudeček 23164CJ-3.

Jedná se o soudeček pro oboustranné soudečkové ložisko, viz obr. 31. Povrch této součástky je opracován na CNC brousícím stroji na broušení plášťů valivých těles. Tento stroj slouží k bezhrotému broušení plášťů valivých tělísek. Časová studie a kvalitativní požadavky pro bezhroté broušení zápichem dokončované součásti jsou zobrazeny v tab. 22. [30]

Tab. 22 Časová studie a kvalitativní požadavky pro bezhroté broušení zápichem [30].

Typ ložiskového kroužku	soudeček	Operace	bezhroté broušení zápichem
Označení	23164CJ-3	Typ stroje	bezhrotá bruska
Informace pro broušení:		Kvalitativní požadavky:	
Materiál	100 Cr6	Drsnost (R_a)	0,3 μm
Přídavek pro operaci	0,15 mm / 0,12 mm	Kruhovitost (filtr 1-15)	2 μm
Chladicí médium	chladicí emulze	Tolerance rozměru	0,01 mm
Tvrdost (HRC)	58-63	Rozměry kroužku:	
		Vnější průměr	53,5 mm
		Největší průměr	58,3 mm
Současný čas operace	3,25 min	Šířka soudečku	71 mm

Valivá tělesa jsou podávacím zařízením ze zásobníku automaticky přemístěna do místa broušení mezi podávací a brousící kotouč, kde je provedena operace bezhrotého broušení vnějšího povrchu (pláště) zápichem, viz obr. 43. [30]



Obr. 43 Schéma broušení na CNC brousícím stroji na broušení plášťů valivých těles [30].

Tento stroj má 2 vřetena, jedno brousící (pracovní) a jedno podávací. Otáčky pracovního vřetene stroje jsou nastaveny na 2500 min^{-1} , výkon pracovního vřetene je 15 kW a výkon náhonu podávacího vřetene je 4,7 kW. Řezná rychlost při broušení je 63 m/s. Orovnávačem u tohoto stroje je diamantová kladka. [30]

9.1 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu všech tří součástí bylo provedeno v dílně na VUT. Všechny součástky byly postupně podrobeny šesti měřením, vždy na jiném místě po jejich pootočení. K měření byl použit měřič drsnosti povrchu Taylor Hobson Surtronic S-128, viz obr. 44.



Obr. 44 Taylor Hobson Surtronic S-128 [32].

Nejprve byl naměřen vnější povrch soudečku 29434EJ-3, tedy ten menší z obou soudečků. Soudeček byl umístěn do drážky držáku tak, aby se během součásti nemohl pohybovat. Aby se měřicí tyčinka mohla umístit na jeho povrch, tak musel být soudeček ještě z jedné strany podložen, viz obr. 45. Součástka byla po každém měření pootočená tak, aby mohlo další měření proběhnout na jiném místě na povrchu. V tab. 23 jsou zobrazeny všechny hodnoty z šesti provedených měření na této součásti a také jejich průměry.



Obr. 45 Umístění soudečku 29434EJ-3 pro měření drsnosti povrchu.

Tab. 23 Hodnoty naměřené na vnějším povrchu soudečku 29434EJ-3.

	Měření číslo						Ø
	1	2	3	4	5	6	
$R_a [\mu\text{m}]$	0,27	0,26	0,28	0,30	0,31	0,28	0,283
$R_t [\mu\text{m}]$	2,4	2,1	2,7	2,5	2,7	2,6	2,5
$R_v [\mu\text{m}]$	1,0	0,9	1,0	1,2	1,2	1,1	1,067
$R_p [\mu\text{m}]$	0,9	0,8	0,9	1,1	1,1	0,9	0,95
$R_z [\mu\text{m}]$	1,9	1,7	1,9	2,2	2,3	2,0	2
$R_c [\mu\text{m}]$	0,7	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,717
$R_{z1\text{max}} [\mu\text{m}]$	2,1	1,8	2,1	2,4	2,4	2,3	2,183
$R_{Sm} [\mu\text{m}]$	25	26	24	28	24	27	25,667
$R_q [\mu\text{m}]$	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,367
$R_{dq} [^\circ]$	8,8	8,8	8,9	9,0	9,2	8,7	8,9
$R_{ku} [-]$	2,956	2,876	3,750	2,844	3,308	3,652	3,231
$R_{mr} [\%]$	47,0	47,2	48,0	44,8	45,7	47,3	46,667
$R_{dc} [\mu\text{m}]$	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7	0,75

Naměřené hodnoty střední aritmetické odchylky R_a se pohybují v rozmezí od 0,26 do 0,31 μm . Tyto hodnoty odpovídají hodnotě 0,3 μm , kterou by měly dosahovat, viz tab. 22 [30]. Lze tak říci, že tento povrch byl dokončen správně a měřený povrch je tak funkční. Na obr. 46, obr. 47, obr. 48, obr. 49, obr. 50 a obr. 51 jsou na měřicím přístroji zobrazeny výstupy jednotlivých měření. Na těchto obrázcích jde vidět, že měřicí přístroj nezobrazí hned všechny naměřené hodnoty zobrazené v tab. 21, ale uloží je na flashdisk, ze kterého je lze později získat po jeho připojení do počítače, viz příloha 1.



Obr. 46 Měření soudečku 29434EJ-3 číslo 1.



Obr. 47 Měření soudečku 29434EJ-3 číslo 2.



Obr. 48 Měření soudečku 29434EJ-3 číslo 3.



Obr. 49 Měření soudečku 29434EJ-3 číslo 4.



Obr. 50 Měření soudečku 29434EJ-3 číslo 5.



Obr. 51 Měření soudečku 29434EJ-3 číslo 6.

Další měřenou součástí byl druhý ze soudečků, konkrétně soudeček 23164CJ-3. Opět bylo provedeno šest měření na šesti různých místech. Na obr. 52 jde vidět, že tento soudeček má symetrický tvar. Díky tomu držel ve stojanu lépe než předchozí součást. Oproti předchozímu případu nemusel být z jedné strany podložen, což usnadnilo měření. V tab. 22 jsou zobrazeny všechny hodnoty z šesti provedených měření na této součásti a také jejich průměry. Hodnoty v tab. 24 jsou opět převzaty z datového souboru, viz příloha 2.



Obr. 52 Usazení soudečku 23164CJ-3 pro měření drsnosti povrchu.

Tab. 24 Hodnoty naměřené na vnějším povrchu soudečku 23164CJ-3.

	Měření číslo						Ø
	1	2	3	4	5	6	
$R_a [\mu\text{m}]$	0,66	0,61	0,66	0,59	0,66	0,70	0,647
$R_t [\mu\text{m}]$	5,9	6,0	5,6	5,2	5,4	6,3	5,733
$R_v [\mu\text{m}]$	2,5	2,6	2,5	2,1	2,3	2,5	2,417
$R_p [\mu\text{m}]$	2,2	1,8	2,1	1,9	2,3	2,2	2,083
$R_z [\mu\text{m}]$	4,7	4,4	4,6	4,0	4,6	4,7	4,5
$R_c [\mu\text{m}]$	1,4	1,2	1,4	1,3	1,5	1,5	1,383
$R_{z1\text{max}} [\mu\text{m}]$	5,9	6,0	4,9	5,1	4,8	5,7	5,4
$R_{Sm} [\mu\text{m}]$	36	32	36	31	35	37	34,5
$R_q [\mu\text{m}]$	0,8	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,816
$R_{dq} [^\circ]$	11,9	11,2	11,6	11,9	12,2	11,9	11,783
$R_{ku} [-]$	3,052	3,280	3,276	2,976	3,053	3,226	3,144
$R_{mr} [\%]$	51,7	51,8	50,8	52,5	51,9	50,2	51,483
$R_{dc} [\mu\text{m}]$	2,0	1,9	2,0	1,7	1,9	2,1	1,933

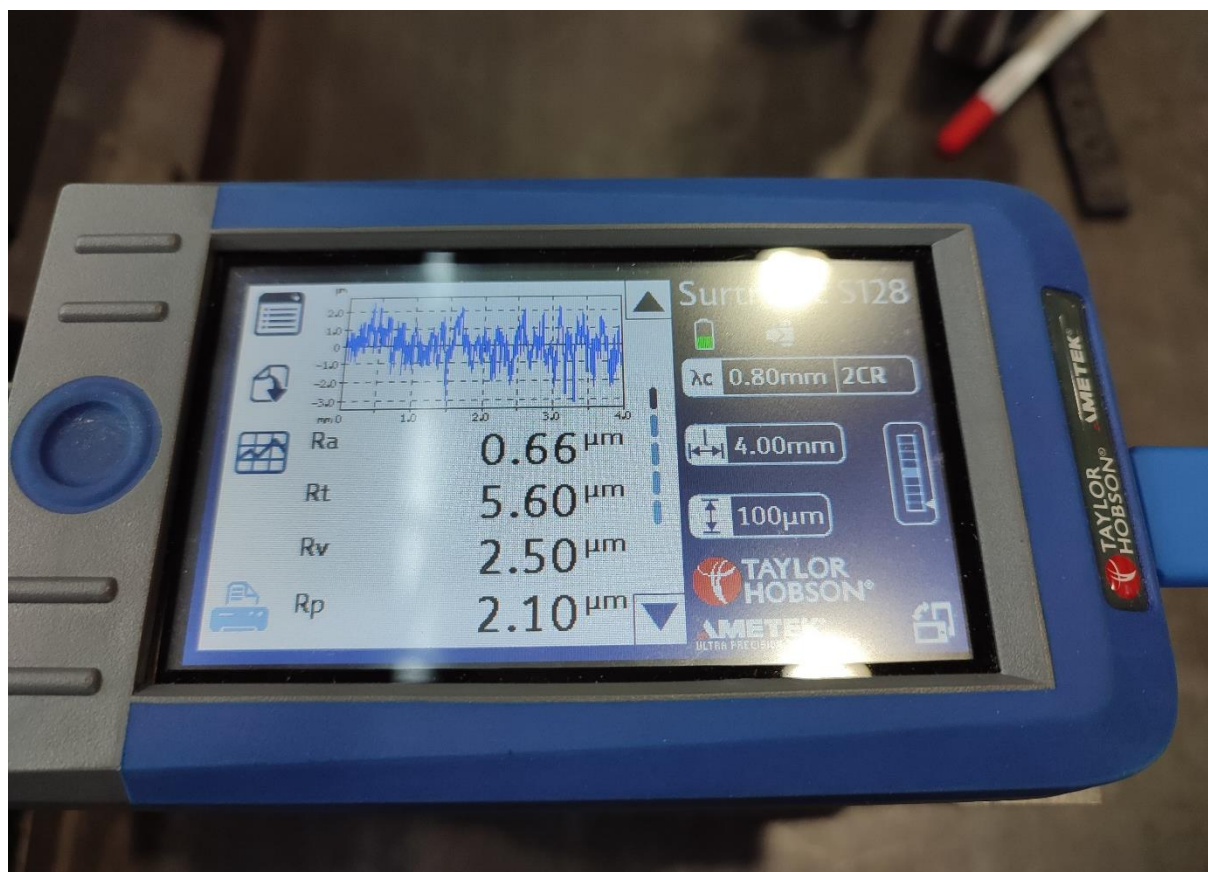
Naměřené hodnoty střední aritmetické odchylky R_a se pohybují v rozmezí od 0,61 do 0,70 μm . Tyto hodnoty značně převyšují hodnotu 0,3 μm , kterou by měly dosahovat, viz tab. 21 [30]. Je možné, že došlo buď k chybě měření nebo že tato nepřesnost nastala kvůli oblému vnějšímu povrchu součásti a měřicí přístroj nedokázal tento povrch správně vyhodnotit. Pokud je jsou tyto hodnoty ale skutečné, tak je třeba říci, že měřený povrch není správně dokončen a je třeba provést přebroušení. Na obr. 53, obr. 54, obr. 55, obr. 56, obr. 57 a obr. 58 jsou na měřicím přístroji zobrazeny výstupy jednotlivých měření.



Obr. 53 Měření soudečku 23164CJ-3 číslo 1.



Obr. 54 Měření soudečku 23164CJ-3 číslo 2.



Obr. 55 Měření soudečku 23164CJ-3 číslo 3.



Obr. 56 Měření soudečku 23164CJ-3 číslo 4.

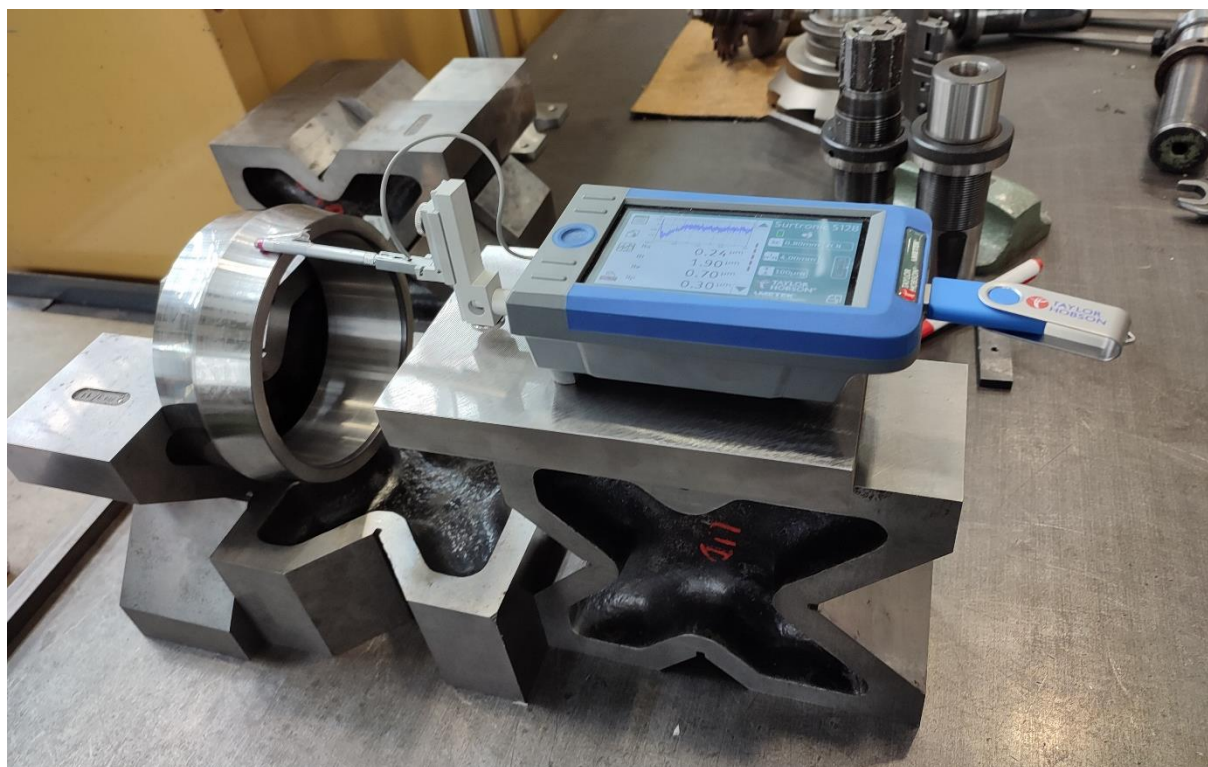


Obr. 57 Měření soudečku 23164CJ-3 číslo 5.



Obr. 58 Měření soudečku 23164CJ-3 číslo 6.

Poslední měřenou součástkou byl vnitřní ložiskový kroužek 22224EKJ-N7-2. U této součástky byl trochu problém ji postavit tak, aby nepadala a aby byla možnost změřit vnější povrch. Tento problém nastal kvůli šikmému tvaru vnější plochy. Problém byl vyřešen tak, že se součást z jedné strany podepřela, viz obr. 59.



Obr. 59 Usazení vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2 pro měření drsnosti povrchu.

Bylo zase měřeno šestkrát na šesti různých místech. V tab. 25 jsou zobrazeny všechny hodnoty z šesti provedených měření na této součásti a také jejich průměry. Na obou šikmých plochách bylo měřeno třikrát. Ovšem po prvních třech měřeních nastal problém, protože měřicí přístroj přestal ukazovat výsledné hodnoty a začal požadovat zvětšení rozsahu. Rozsah byl u všech předchozích měření nastaven na 100 μm a vše vždy proběhlo v pořádku. Rozsah byl tedy zvýšen na následující hodnotu, kterou bylo 400 μm . Po nastavení tohoto většího rozsahu začal ovšem měřič ukazovat mnohem vyšší hodnoty drsnosti než doposud na té stejné ploše, viz příloha 4. Z toho důvodu byla provedena kalibrace měřicího přístroje, viz obr. 60.



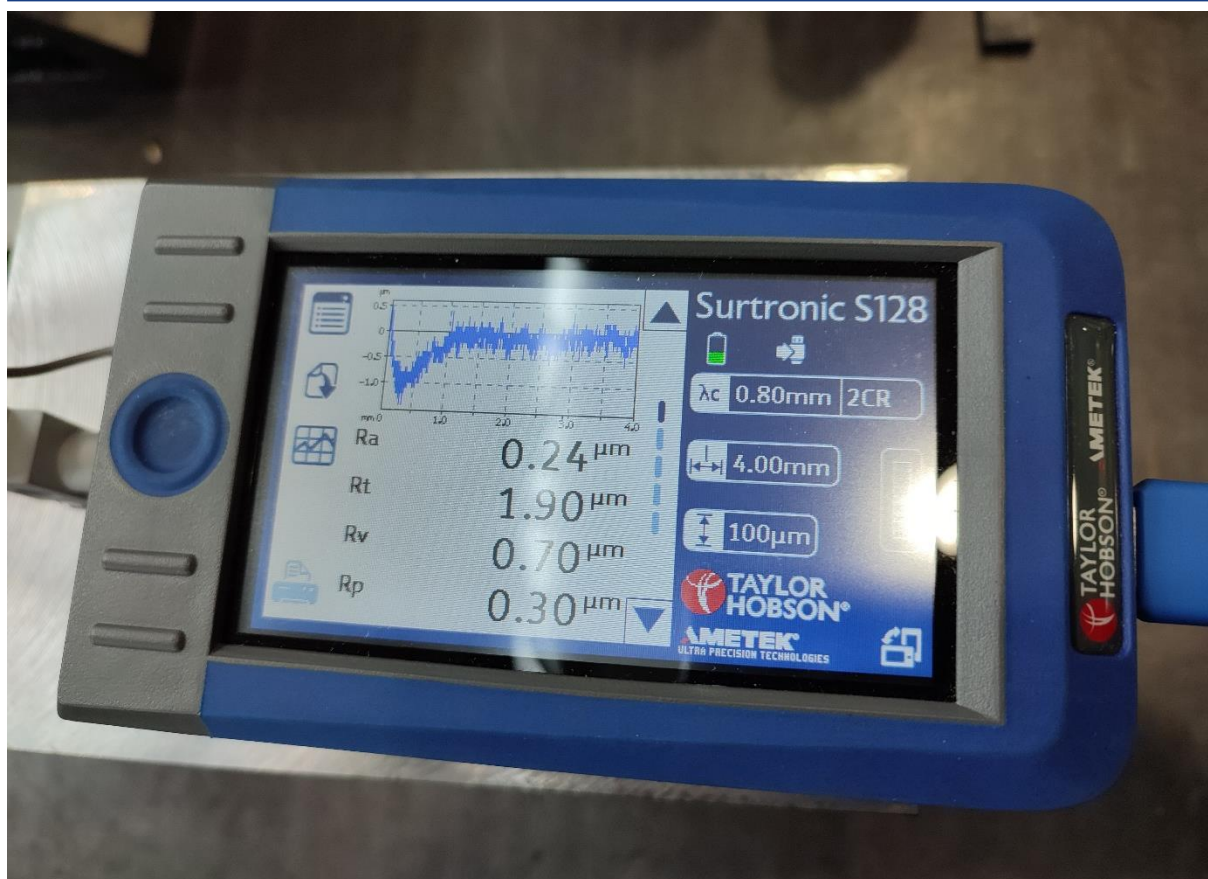
Obr. 60 Kalibrace měřicího přístroje.

Kalibrace ukázala, že je přístroj zkalibrován správně (příloha 5), ale přesto i další měření po kalibraci ukázalo vyšší hodnotu než při předchozích měřeních, viz příloha 4. Odhad byl tedy takový že nepřesnost měření způsobilo nastavení vyšší hodnoty rozsahu, a proto byl rozsah opět snížen na hodnotu 100 μm . Po snížení rozsahu se ovšem na přístroji znovu rozsvítila chybová hláška a požadavek na zvýšení rozsahu. Nakonec se ukázalo, že problém byl v tom, že měřicí tyčinka byla položena moc daleko od kraje měřené plochy, kde bylo příliš strmé zešíkmení na to, aby to měřicí přístroj mohl změřit v rozsahu 100 μm . Po posunutí tyčinky měřicího nástroje blíže k hraně měřené plochy už další naměřené hodnoty zhruba odpovídaly hodnotám z prvních třech měření.

Tab. 25 Hodnoty naměřené na vnějším povrchu soudečku 22224EKJ-N7-2.

	Měření číslo						Ø
	1	2	3	4	5	6	
R_a [μm]	0,24	0,28	0,24	0,22	0,24	0,25	0,245
R_t [μm]	1,9	2,6	1,9	1,8	2,1	2,1	2,067
R_v [μm]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
R_p [μm]	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,35
R_z [μm]	1,1	1,1	1,1	1,0	1,2	1,1	1,1
R_c [μm]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$R_{z1\text{max}}$ [μm]	1,9	2,6	1,9	1,8	2,1	2,1	2,067
R_{Sm} [μm]	40	36	32	29	26	48	35,167
R_q [μm]	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,417
R_{dq} [$^\circ$]	7,2	6,9	7,1	7,0	7,1	6,9	7,033
R_{ku} [-]	4,999	5,499	4,883	5,488	5,630	5,213	5,285
R_{mr} [%]	52,6	56,3	59,1	60,0	60,4	50,2	56,433
R_{dc} [μm]	0,5	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,633

Naměřené hodnoty střední aritmetické odchylky R_a se pohybují v rozmezí od 0,22 do 0,28 μm . Přitom podle tab. 20 by se tato hodnota měla pohybovat okolo 0,2 μm [30]. Vzhledem k problémům, které nastaly během měření této součásti je možné, že došlo k chybě měření a měřicí přístroj si nedokázal poradit s nerovným povrchem součásti, takže naměřené hodnoty nemusí odpovídat skutečnosti. Měření číslo 1, 2, 3, 5 a 6 jsou zobrazeny na obr. 61, obr. 62, obr. 63, obr. 64 a obr. 65. měření číslo 4 nebylo fotograficky zaznamenáno kvůli problémům s měřicím přístrojem, ale hodnoty z tohoto měření stejně jako hodnoty z ostatních měření jsou vidět v příloze 3.



Obr. 61 Měření vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2 číslo 1.



Obr. 62 Měření vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2 číslo 2.



Obr. 63 Měření vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2 číslo 3.



Obr. 64 Měření vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2 číslo 5.



Obr. 65 Měření vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2 číslo 6.

ZÁVĚR

Při zpracování této diplomové práce byly rozebrány jednotlivé metody dokončovacího obrábění. Konkrétně byly popsány metody honování, lapování, leštění, omílání a superfinišování. Byl popsán princip těchto technologií, jejich použití, používané nástroje a stroje. Dále byla obecně popsána integrita povrchu včetně zbytkové napjatosti pro technologii superfinišování a byly popsány metody měření zbytkového napětí.

V experimentální části této práce byly popsány konkrétní procesy dokončování použité na třech vybraných součástech ložisek. Jednalo se o ložiskový soudeček pro axiální soudečkové ložisko 29434EJ-3, ložiskový soudeček pro dvouřadé soudečkové ložisko 23164CJ-3 a vnitřní ložiskový kroužek pro dvouřadé soudečkové ložisko 22224EKJ-N7-2. Následně byly na všech těchto součástech změřeny drsnosti povrchu přístrojem pro měření drsnosti povrchu Taylor Hobson Surtronic S-128. Měření povrchu u soudečku 29434EJ-3 a u vnitřního kroužku 22224EKJ-N7-2 ukázalo, že drsnosti měřených povrchů zhruba odpovídají požadovaným hodnotám. Ovšem měření drsnosti na povrchu soudečku 23164CJ-3 ukázalo, že drsnost jeho povrchu neodpovídá požadavkům a je nutné jej přebrousit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK. Technologie obrábění: 3. díl. Praha: ČVUT, 2000, 81 s. ISBN 80-01-02-091-6.
2. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.
3. BORSKÝ, Václav. Obráběcí stroje. Vyd. 1. Brno: Nakladatelství VUT, 1992, 216 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214- 0470-1.
4. Způsoby a postupy rovinného broušení. TECHCENTRUM [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.prodej Brusiva.cz/zpusoby-a-postupy-rovinneho-brouseni>
5. Broušení rotačních ploch aneb jak a čím brousit do kulata. TECHCENTRUM [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.prodej Brusiva.cz/brouseni-rotacnich-ploch-aneb-jak-a-cim-brousit-do-kulata-vnejsi>
6. Bezhruté broušení. DS METAL [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ds metal.cz/brouseni>
7. Hydraulics. Honování [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.hydraulics.cz/25042-honovani>
8. Postupy při honování a vhodná brusiva. TECHCENTRUM [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.prodej Brusiva.cz/postupy-pri-honovani-a-vhodna-brusiva-techcentrum?fbclid=IwAR28b6NRx-cpfEvNQSFHb-QKMhccFeyk_ItK_O-6cx_F4q_W_JdEzvV-L8
9. SMETANOVÁ, Anna. Obrábění 3. Kuřim. Dostupné také z: https://www.zamek kurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/10_Sada_Obrabeni_3/VY_32_INOVACE_10_04_Lapovani_lesteni.pdf
10. Diamantový ruční lapovací nástroj. Prestige technology [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://prestige-technology.cz/diamantove-a-cbn-odhrotovaci-a-lapovaci-nastroje/11453-diamant-handlapper-10x30mm-d76-200-kunststoffbindung-21011390.html>
11. Lapování. ELUC [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1385>
12. Wilhelm Tatje KG. [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.tatje.com/werkzeugmaschinen/schleifen-entgraten/>
13. BB-ZB radiální štětinový kotouč, 8 řad lamel, typA, P50, prům. 150 mm, zelený (27605). In: 3MARKET [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.3market.cz/bb-zb-radialni-stetinovy-kotouc--8-rad-lamel--typ-a--p50--prum--150-mm--zeleny--27605-/?gclid=Cj0KCQjwjN-SBhCkARIsACsrBz4--HP7sg67dPwZ08NXQE7PJ0oqo1SLmeAeLsjglurEt3Ow49eF23YaAtErEALw_wcB
14. Praktické rady pro leštění. TOP abrasive [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.topabrasive.cz/cz/prakticke-rady-pro-lesteni/>
15. Leštící pás 760 x 40 S600 FLEX 326917. In: PEDDY [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.peddy.cz/naradi-prislusenstvi-naradi-brusne-pasy-a-papiry-lestici-nastroje/lestici-pas-760-x-40-s600-flex-326917>

-
16. Leštění. Oneindustry [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/lesteni/>
 17. Broušení versus leštění. HANYKO Praha [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/metalografie/spotrebni-material-2-2/brouseni-a-leseni/brouseni-versus-lesteni/>
 18. KRUHOVÉ VIBRÁTORY: Tisíckrát osvědčený způsob omílání – kruhové vibrátory. In: RÖSLER [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/omilaci-stroje/kruhove-vibratory/>
 19. Omílání. ELUC [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1388>
 20. Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. MM Průmyslové spektrum: Trendy / Povrchové úpravy [online]. Praha: MM publishing, 2002, 16. 05. 2002, [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu>
 21. Oběhová soustava technologické vody. RÖSLER [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/omilaci-stroje/obehova-soustava-technologicke-vody/>
 22. Honovací a superfinišovací kameny. In: TYROLIT [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.tyrolit.cz/oblasti/obrabeni-kovu-precizni-brouseni/druhy-pouziti/honovani-do-datecne-opracovani.html>
 23. DVOŘÁK, Luděk. Superfinišování a rovinné broušení. MM Průmyslové spektrum: Výroba / Obrábění [online]. Praha: MM publishing, 2011, 13. 04. 2011, [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/superfinisovani-a-rovinne-brouseni>
 24. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
 25. MÁDL, Jan. Experimentální metody v teorii obrábění. Čtvrté přepracované. Ediční středisko ČVUT, Praha I, Husova 5: 350, 1988.
 26. LU. Handbook of Measurement of Residual Stresses. Lilburn: The Fairmont Press, 1996. 238. ISBN: 0-132-55738-X.
 27. SCHMIDOVÁ, Lucie. Analýza integrity povrchu broušených ozubených kol pomocí analýzy Barkhausenova šumu a rentgenové difrakce [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Dostupné také z: https://www.integrita.zcu.cz/download/skola2/liberec_prez2.pdf
 28. Rollscan. PCS analytika [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://pcsanalytika.cz/produkt/rollscan/>
 29. Automatizovaný víceúčelový práškový rentgenový difraktometr: XRDynamic 500. Anton Paar [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.anton-paar.com/cz-cs/produkty/detaily/xrdynamic-500/>
 30. *Firemní materiály*. Brno: ZKL Group.
 31. ZKL Group [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.zkl.cz/cs/>
 32. Taylor Hobson Surtronic S-128 Surface Roughness Tester. Atecorp [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.atecorp.com/products/taylor-hobson/surtronic-s-128>
-

33. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z:
<http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a_e	pracovní (radiální) záběr	[mm]
b_s	šířka brousicího kotouče	[mm]
d_w	průměr broušené součásti	[mm]
f_a	podélný (axiální) posuv	[mm]
f_r	radiální posuv	[mm]
h	hloubka	[μm]
p_k	kinetický tlak	[MPa]
p_s	statický tlak	[MPa]
R_a	střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
R_c	průměrná výška profilu	[μm]
R_{dc}	rozdíl výšky úseku profilu	[μm]
R_{dq}	průměrný kvadratický sklon profilu	[°]
R_{ku}	špičatost profilu	[-]
R_{mr}	vzájemný materiálový poměr	[%]
R_p	největší výška výstupku	[μm]
R_q	průměrná kvadratická úchylka profilu	[μm]
R_{Sm}	střední vzdálenost rýh	[μm]
R_t	celková výška profilu	[μm]
R_v	největší výška prohlubně	[μm]
R_z	výška nerovnosti profilu z 10 bodů	[μm]
R_{z1max}	maximální hloubka drsnosti	[μm]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_f	posuvová rychlost	[m.min ⁻¹]
v_{ft}	tangenciální rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v_k	rychlost kmitavého pohybu	[m.min ⁻¹]
v_w	obvodová rychlost	[m.min ⁻¹]
$2a_e$	přídavek na průměr	[mm]
2α	úhel křížení stop	[°]
α	úhel nastavení	[°]
σ_{zb}	zbytkové napětí	[MPa]
ω_k	frekvence kmitů	[min ⁻¹]

Zkratky

Označení	Legenda
apod.	a podobně
dok.	dokončování
HRC	tvrdost podle Rockwella
hrub.	hrubování
SK	slinuté karbidy
RO	rychlořezná ocel

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Měření soudečku 29434EJ-3
Příloha 2	Měření soudečku 23164CJ-3
Příloha 3	Měření vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2
Příloha 4	Chybné měření vnitřního ložiskového kroužku 22224EKJ-N7-2
Příloha 5	Kalibrace měřicího přístroje

Název dávky = ABC 00030

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.27\mu\text{m}$

$R_t = 2.40\mu\text{m}$

$R_v = 1.00\mu\text{m}$

$R_p = 0.90\mu\text{m}$

$R_z = 1.90\mu\text{m}$

$R_c = 0.70\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.10\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 25\mu\text{m}$

$R_q = 0.30\mu\text{m}$

$R_{dq} = 8.8^\circ$

$R_{ku} = 2.956$

$R_{mr} = 47.0\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.70\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00031

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.26\mu\text{m}$

$R_t = 2.10\mu\text{m}$

$R_v = 0.90\mu\text{m}$

$R_p = 0.80\mu\text{m}$

$R_z = 1.70\mu\text{m}$

$R_c = 0.60\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 1.80\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 26\mu\text{m}$

$R_q = 0.30\mu\text{m}$

$R_{dq} = 8.8^\circ$

$R_{ku} = 2.876$

$R_{mr} = 47.2\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.70\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00032

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.28\mu\text{m}$

$R_t = 2.70\mu\text{m}$

$R_v = 1.00\mu\text{m}$

$R_p = 0.90\mu\text{m}$

$R_z = 1.90\mu\text{m}$

$R_c = 0.70\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.10\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 24\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 8.9^\circ$

$R_{ku} = 3.750$

$R_{mr} = 48.0\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.70\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00033

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.30\mu\text{m}$

$R_t = 2.50\mu\text{m}$

$R_v = 1.20\mu\text{m}$

$R_p = 1.10\mu\text{m}$

$R_z = 2.20\mu\text{m}$

$R_c = 0.80\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.40\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 28\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 9.0^\circ$

$R_{ku} = 2.844$

$R_{mr} = 44.8\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.80\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.31\mu\text{m}$

$R_t = 2.70\mu\text{m}$

$R_v = 1.20\mu\text{m}$

$R_p = 1.10\mu\text{m}$

$R_z = 2.30\mu\text{m}$

$R_c = 0.80\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.40\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 24\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 9.2^\circ$

$R_{ku} = 3.308$

$R_{mr} = 45.7\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.90\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$Mr_1 = \text{----}$

$Mr_2 = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.28\mu\text{m}$

$R_t = 2.60\mu\text{m}$

$R_v = 1.10\mu\text{m}$

$R_p = 0.90\mu\text{m}$

$R_z = 2.00\mu\text{m}$

$R_c = 0.70\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.30\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 27\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 8.7^\circ$

$R_{ku} = 3.652$

$R_{mr} = 47.3\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.70\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$Mr_1 = \text{----}$

$Mr_2 = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00024

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.66\mu\text{m}$

$R_t = 5.90\mu\text{m}$

$R_v = 2.50\mu\text{m}$

$R_p = 2.20\mu\text{m}$

$R_z = 4.70\mu\text{m}$

$R_c = 1.40\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 5.90\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 36\mu\text{m}$

$R_q = 0.80\mu\text{m}$

$R_{dq} = 11.9^\circ$

$R_{ku} = 3.052$

$R_{mr} = 51.7\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 2.00\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00025

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.61\mu\text{m}$

$R_t = 6.00\mu\text{m}$

$R_v = 2.60\mu\text{m}$

$R_p = 1.80\mu\text{m}$

$R_z = 4.40\mu\text{m}$

$R_c = 1.20\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 6.00\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 32\mu\text{m}$

$R_q = 0.80\mu\text{m}$

$R_{dq} = 11.2^\circ$

$R_{ku} = 3.280$

$R_{mr} = 51.8\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 1.90\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00026

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.66\mu\text{m}$

$R_t = 5.60\mu\text{m}$

$R_v = 2.50\mu\text{m}$

$R_p = 2.10\mu\text{m}$

$R_z = 4.60\mu\text{m}$

$R_c = 1.40\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 4.90\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 36\mu\text{m}$

$R_q = 0.90\mu\text{m}$

$R_{dq} = 11.6^\circ$

$R_{ku} = 3.276$

$R_{mr} = 50.8\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 2.00\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00027

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.59\mu\text{m}$

$R_t = 5.20\mu\text{m}$

$R_v = 2.10\mu\text{m}$

$R_p = 1.90\mu\text{m}$

$R_z = 4.00\mu\text{m}$

$R_c = 1.30\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 5.10\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 31\mu\text{m}$

$R_q = 0.70\mu\text{m}$

$R_{dq} = 11.9^\circ$

$R_{ku} = 2.976$

$R_{mr} = 52.5\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 1.70\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00028

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.66\mu\text{m}$

$R_t = 5.40\mu\text{m}$

$R_v = 2.30\mu\text{m}$

$R_p = 2.30\mu\text{m}$

$R_z = 4.60\mu\text{m}$

$R_c = 1.50\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 4.80\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 35\mu\text{m}$

$R_q = 0.80\mu\text{m}$

$R_{dq} = 12.2^\circ$

$R_{ku} = 3.053$

$R_{mr} = 51.9\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 1.90\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00029

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.70\mu\text{m}$

$R_t = 6.30\mu\text{m}$

$R_v = 2.50\mu\text{m}$

$R_p = 2.20\mu\text{m}$

$R_z = 4.70\mu\text{m}$

$R_c = 1.50\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 5.70\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 37\mu\text{m}$

$R_q = 0.90\mu\text{m}$

$R_{dq} = 11.9^\circ$

$R_{ku} = 3.226$

$R_{mr} = 50.2\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 2.10\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00036

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.24\mu\text{m}$

$R_t = 1.90\mu\text{m}$

$R_v = 0.70\mu\text{m}$

$R_p = 0.30\mu\text{m}$

$R_z = 1.10\mu\text{m}$

$R_c = 0.30\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 1.90\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 40\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 7.2^\circ$

$R_{ku} = 4.999$

$R_{mr} = 52.6\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.50\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00037

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.28\mu\text{m}$

$R_t = 2.60\mu\text{m}$

$R_v = 0.70\mu\text{m}$

$R_p = 0.40\mu\text{m}$

$R_z = 1.10\mu\text{m}$

$R_c = 0.30\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.60\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 36\mu\text{m}$

$R_q = 0.50\mu\text{m}$

$R_{dq} = 6.9^\circ$

$R_{ku} = 5.499$

$R_{mr} = 56.3\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.80\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00038

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.24\mu\text{m}$

$R_t = 1.90\mu\text{m}$

$R_v = 0.70\mu\text{m}$

$R_p = 0.40\mu\text{m}$

$R_z = 1.10\mu\text{m}$

$R_c = 0.30\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 1.90\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 32\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 7.1^\circ$

$R_{ku} = 4.883$

$R_{mr} = 59.1\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.70\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00046

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.22\mu\text{m}$

$R_t = 1.80\mu\text{m}$

$R_v = 0.70\mu\text{m}$

$R_p = 0.30\mu\text{m}$

$R_z = 1.00\mu\text{m}$

$R_c = 0.30\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 1.80\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 29\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 7.0^\circ$

$R_{ku} = 5.488$

$R_{mr} = 60.0\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.60\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00047

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.24\mu\text{m}$

$R_t = 2.10\mu\text{m}$

$R_v = 0.70\mu\text{m}$

$R_p = 0.40\mu\text{m}$

$R_z = 1.20\mu\text{m}$

$R_c = 0.30\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.10\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 26\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 7.1^\circ$

$R_{ku} = 5.630$

$R_{mr} = 60.4\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.60\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00048

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.25\mu\text{m}$

$R_t = 2.10\mu\text{m}$

$R_v = 0.70\mu\text{m}$

$R_p = 0.30\mu\text{m}$

$R_z = 1.10\mu\text{m}$

$R_c = 0.30\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.10\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 48\mu\text{m}$

$R_q = 0.40\mu\text{m}$

$R_{dq} = 6.9^\circ$

$R_{ku} = 5.213$

$R_{mr} = 50.2\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.60\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00039

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $400\mu\text{m}$

$R_a = 0.60\mu\text{m}$

$R_t = 3.00\mu\text{m}$

$R_v = 1.50\mu\text{m}$

$R_p = 0.50\mu\text{m}$

$R_z = 2.50\mu\text{m}$

$R_c = 1.00\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 3.00\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 404\mu\text{m}$

$R_q = 0.79\mu\text{m}$

$R_{dq} = 25.0^\circ$

$R_{ku} = 0.000$

$R_{mr} = 89.2\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.50\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00040

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $400\mu\text{m}$

$R_a = 0.70\mu\text{m}$

$R_t = 4.50\mu\text{m}$

$R_v = 2.00\mu\text{m}$

$R_p = 0.50\mu\text{m}$

$R_z = 2.50\mu\text{m}$

$R_c = 1.00\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 4.50\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 407\mu\text{m}$

$R_q = 1.09\mu\text{m}$

$R_{dq} = 25.1^\circ$

$R_{ku} = 0.000$

$R_{mr} = 80.1\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 1.50\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00044

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $400\mu\text{m}$

$R_a = 0.50\mu\text{m}$

$R_t = 3.50\mu\text{m}$

$R_v = 1.00\mu\text{m}$

$R_p = 0.50\mu\text{m}$

$R_z = 2.00\mu\text{m}$

$R_c = 1.00\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.50\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 393\mu\text{m}$

$R_q = 0.67\mu\text{m}$

$R_{dq} = 25.4^\circ$

$R_{ku} = 0.000$

$R_{mr} = 82.2\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 1.00\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00045

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $400\mu\text{m}$

$R_a = 0.40\mu\text{m}$

$R_t = 2.50\mu\text{m}$

$R_v = 1.00\mu\text{m}$

$R_p = 0.50\mu\text{m}$

$R_z = 1.50\mu\text{m}$

$R_c = 0.00\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 2.50\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 216\mu\text{m}$

$R_q = 0.55\mu\text{m}$

$R_{dq} = 25.8^\circ$

$R_{ku} = 0.000$

$R_{mr} = 85.0\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 0.00\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00049

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 0.58\mu\text{m}$

$R_t = 5.10\mu\text{m}$

$R_v = 2.20\mu\text{m}$

$R_p = 1.80\mu\text{m}$

$R_z = 4.00\mu\text{m}$

$R_c = 1.20\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 4.70\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 37\mu\text{m}$

$R_q = 0.70\mu\text{m}$

$R_{dq} = 11.1^\circ$

$R_{ku} = 3.209$

$R_{mr} = 52.4\%$

$R_{pc} = 0/\text{cm}$

$R_{dc} = 1.70\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00041

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 3.33\mu\text{m}$

$R_t = 13.60\mu\text{m}$

$R_v = 5.90\mu\text{m}$

$R_p = 7.10\mu\text{m}$

$R_z = 13.00\mu\text{m}$

$R_c = 12.50\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 13.60\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 176\mu\text{m}$

$R_q = 3.80\mu\text{m}$

$R_{dq} = 12.1^\circ$

$R_{ku} = 1.770$

$R_{mr} = 49.7\%$

$R_{pc} = 55/\text{cm}$

$R_{dc} = 10.10\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00042

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $100\mu\text{m}$

$R_a = 3.31\mu\text{m}$

$R_t = 14.50\mu\text{m}$

$R_v = 6.00\mu\text{m}$

$R_p = 7.10\mu\text{m}$

$R_z = 13.10\mu\text{m}$

$R_c = 12.40\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 13.80\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 175\mu\text{m}$

$R_q = 3.80\mu\text{m}$

$R_{dq} = 12.0^\circ$

$R_{ku} = 1.563$

$R_{mr} = 49.9\%$

$R_{pc} = 53/\text{cm}$

$R_{dc} = 10.00\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$

Název dávky = ABC 00043

$L_c = 0.80\text{mm}$

$L_n = 4.00\text{mm}$

Filtr = 2CR

Rozsah = $400\mu\text{m}$

$R_a = 3.20\mu\text{m}$

$R_t = 15.00\mu\text{m}$

$R_v = 6.00\mu\text{m}$

$R_p = 7.00\mu\text{m}$

$R_z = 13.00\mu\text{m}$

$R_c = 12.50\mu\text{m}$

$R_{z1\text{max}} = 14.00\mu\text{m}$

$R_{Sm} = 175\mu\text{m}$

$R_q = 3.73\mu\text{m}$

$R_{dq} = 28.2^\circ$

$R_{ku} = 0.000$

$R_{mr} = 54.8\%$

$R_{pc} = 58/\text{cm}$

$R_{dc} = 9.00\mu\text{m}$

$R_k = \text{----}$

$R_{pk} = \text{----}$

$R_{vk} = \text{----}$

$M_{r1} = \text{----}$

$M_{r2} = \text{----}$

$A_1 = \text{----}$