

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

zveřejněná podle § 31 zákona č. 527/1990 Sb.

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **23.07.2010**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **01.02.2012**
(Věstník č. 5/2012)

(21) Číslo dokumentu:

2010-571

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

B24C 1/02	(2006.01)
B24C 1/00	(2006.01)
B24C 3/02	(2006.01)
B24C 1/04	(2006.01)

(71) Přihlašovatel:

Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava, CZ

(72) Původce:

Valíček Jan Doc. Ing. Ph.D., Bystřice pod Lopeníkem,
CZ

Borovička Alois Ing., Partizánske, SK

Hloch Sergej Doc. Ing. Ph.D., Prešov, SK

Hlaváček Petr Ing., Polešovice, CZ

(74) Zástupce:

Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., Patentové a
licenční služby, Národní 1009/3, Praha 1, 11000

(54) Název přihlášky vynálezu:

**Způsob navrhování technologie
hydroabrazivního dělení materiálů**

(57) Anotace:

Způsob navrhování technologie hydroabrazivního dělení materiálů je založen na určení konstanty hydroabrazivní dělitelnosti materiálů Kawj, a to tak, že se buď podle verze A změní tři deformační parametry na zkušebním řezu/vzorku, vybraná hloubka h_x [mm], lokální drsnost Ra_x [μm] v hloubce h_x a lokální odchylka řezné stopy od normálové roviny Y_{re}_x v hloubce h_x , nebo podle verze B pouze dva deformační parametry, a to etalonová hloubka h_a [mm] a odchylka řezné stopy od normálové roviny Y_{re}_x [mm], nebo podle verze C jeden parametr, buď rychlost šíření ultrazvuku V_{LIZ} [m/s] nebo modul pružnosti v tahu E_{mat} [MPa], přičemž Kawj se vypočítá z odpovídajících deformačních parametrů, a nebo se podle verze D návrh celé technologie provede výpočtem Kawj podle modulu pružnosti v tahu E_{mat} nebo podle rychlosti ultrazvuku V_{LIZ} děleného materiálu. Konstanta hydroabrazivní dělitelnosti materiálů Kawj z verzí A, B, C, D se následně dosadí jako vstupní hodnota do algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení. Výsledkem výpočtu podle algoritmu 1 je expresní získání technologicky vyčerpávající a pro všechny technické materiály obecně platné řady numerických a grafických údajů potřebných pro optimální nastavení hlavních parametrů technologie a dále údajů o kvalitě/jakosti řezů, o limitní hloubce řezů a o ekonomických parametrech, jakož i o mechanických vlastnostech děleného materiálu z hlediska jeho zařazení do třídy obrobitelnosti T_{cut} a standardizace technologického postupu.

Způsob navrhování technologie hydroabrazivního dělení materiálů

Oblast techniky

Předmět vynálezu se týká způsobu navrhování technologických parametrů pro hydroabrazivní dělení materiálů.

Dosavadní stav techniky

Současné způsoby navrhování hlavních technologických parametrů technologického postupu pro hydroabrazivní dělení materiálů se provádí pouze na základě subjektivních zkušeností technologa. Pro tuto technologii dosud není vypracovaná snadno a rychle v praxi použitelná exaktní výpočtová metoda. Jako technologické pomůcky jsou již dostupné některé programy, které však mají pouze rámcově orientační charakter, protože nevycházejí z konkrétně proměřených technologických parametrů hydroabrazivní dělitelnosti typu právě obráběného materiálu ani z technického stavu právě použité soupravy, týkají se velmi omezeného počtu technologických parametrů a nedostatečně řeší technologické vlastnosti děleného materiálu. Přitom již samotné mechanické vlastnosti každého materiálu, které vstupují do technologických výpočtů, vykazují tak značný rozdíl, že tabulkové hodnoty těchto parametrů nutno taktéž považovat za orientační. Z teoretických řešení se nejvíce blíží praktickým požadavkům technologa výpočty podle Hashishe (HASHISH, M. Prediction models for AWJ machining operation. In *7th American Water Jet Conference*, 1993, p. 205-216. ISBN 1-880342-02-2.), Zenga (ZENG, J., KIM, T. Parameter prediction and cost analysis in abrasive waterjet cutting operations, In *7th American Water Jet Conference*, 1993, p. 175-189. ISBN 1-880342-02-2.), Wanga (WANG, J. A new model for predicting the depth of cut in abrasive waterjet contouring of alumina ceramics. *Journal of materials processing technology*, 2009, p. 2314–2320. ISSN 0924-0136). Tato řešení jsou však těžko obecně použitelné v praxi, protože vyžadují řadu teoretických v praxi neměřitelných předpokladů a konstant a navíc jsou použitelné pouze pro specifické skupiny materiálů a neplatí obecně pro celou škálu technických materiálů. V praxi jsou potom optimální technologické parametry hydroabrazivní soupravy subjektivně odhadovány technologem podle dosažené hloubky dělení a vizuálního stavu povrchu dělicí stěny zkušební vzorku, přičemž se zkouší či odhadují zejména různé rychlosti posuvu řezné hlavy, tlak čerpadla, hmotnostní tok abraziva, velikost a druh abraziva.

Hlavními nedostatky současného stavu je dosud nevypracovaná zkušební metoda, kterou by mohl být dělený materiál předem jednoznačně otestován na základní technologickou vlastnost, kterou je jeho hydroabrazivní dělitelnost, dále dosud nevypracovaný v praxi a výzkumu použitelný způsob pro stanovení optimálních technologických parametrů (rychlost posuvu řezné hlavy, tlak čerpadla, množství, velikost a druh abraziva a dalších) podle předem stanovené hydroabrazivní dělitelnosti (AWJ) konkrétního materiálu a na základě výše uvedených příčin dosud stále chybějící jednotná technologická klasifikace technických materiálů jak podle deformačních parametrů, tak i podle optimálních technologických parametrů, neboť pro vytvoření takovéto klasifikace dosud stále chybí návrh vhodného zobecňujícího kritéria, které by technicky jednoznačně dělený materiál charakterizovalo.

Podstata vynálezu

Nevýhody odstraňuje řešení, které je předmětem tohoto vynálezu tak, že se u každého materiálu předem určí konstanta hydroabrazivní dělitelnosti materiálů K_{awj} [μm], a to tak, že se buď změří: A) tři deformační parametry vzorku materiálu: vybraná hloubka řezu h_x [mm], lokální drsnost Ra_x [μm] v hloubce h_x a lokální odchylka řezné stopy od normálové roviny Y_{ret_x} v hloubce h_x , nebo za B) pouze dva deformační parametry vzorku materiálu: a to etalonová hloubka h_{et} [mm] a odchylka řezné stopy od normálové roviny Y_{ret_x} [mm] v etalonové hloubce h_{et} [mm] v řezu provedeného v materiálu předem vypočtenou optimální posuvnou rychlostí $V_{popt_{et}}$ [mm/min] pro tento materiál, nebo za C) jeden parametr vzorku materiálu, a to buď rychlost šíření podélné vlny ultrazvuku V_{LUZ} [m/s] nebo modul pružnosti v tahu E_{mat} [MPa], přičemž konstanta hydroabrazivní dělitelnosti materiálů K_{awj} se vypočítá z odpovídajících parametrů, a nebo za D) se určí přímo výpočtem na základě znalosti rychlosti šíření podélné vlny ultrazvuku V_{LUZ} [m/s] nebo modulu pružnosti v tahu E_{mat} děleného materiálu, konstanta K_{awj} se následně dosadí jako vstupní hodnota do algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení (zkráceně algoritmus 1).

Algoritmus 1 je v technologii hydroabrazivního dělení nová soustava rovnic, které na sebe navazují tak, aby výsledkem výpočtu byl komplexní matematicko-fyzikální model, který numericky a graficky popisuje proces dělení materiálu hydroabrazivním proudem. Tímto algoritmem 1 lze obdržet základní optimalizované vstupní diskrétní hodnoty pro nastavení technologie hydroabrazivního dělení (např. rychlost posuvu dělicí hlavy pro daný materiál V_{popt} [mm/min], tlak čerpadla P_v [MPa], průtočné množství abraziva m_a [g/min]). Diskrétní

hodnoty dodávané algoritmem 1 jsou takové, které získáme z kontinuálních průběhů jednotlivých funkcí definovaných v soustavě rovnic na určité diskrétní časo-prostorové úrovni. Pro volbu diskrétních optimalizovaných technologických parametrů se zde vychází z hloubkové úrovně neutrální roviny h_0 pro daný dělený materiál na základě předpokladu, že v této rovině vyrovnaného napětového stavu lze určit optimální parametry dělení. Potom tyto diskrétní údaje může technolog navíc srovnávat z diskrétními údaji z jiné volené hloubkové úrovně h_x různé od h_0 , např. v maximální hloubce dělicího řezu požadované zákazníkem, odvozovat tak náročnost, výkon a cenu práce. Vedle těchto diskrétních údajů výpočet současně produkuje grafické záznamy kontinuálního průběhu dělení a změn hlavních materiálových i technologických parametrů v čase v závislosti na hloubce h_x a na dalších vstupních technologických a materiálových parametrech (např. drsnost dělicí stěny $Ra_x = f(h_x, V_{popt}, P_v, m_a, Y_{ret_x}, E_{mat})$, lokální odchylka řezné stopy od normálové roviny $Y_{ret_x} = f(h_x, V_{popt}, P_v, m_a, E_{mat}, Ra_x)$, $h_x = f(V_{popt}, P_v, m_a, Y_{ret_x}, E_{mat}, Ra_x)$). Předkládaný algoritmus 1 má obecnou platnost pro všechny technické materiály.

Výsledkem výpočtu podle algoritmu 1 po dosazení vstupní hodnoty Kaw_j , zjištěné výše uvedenými způsoby ad A), B), C), D) je expresní získání technologicky vyčerpávající řady numerických a grafických údajů, jak o mechanických vlastnostech děleného materiálu, tak o strojně-technologických a ekonomických parametrech hydroabrazivního dělení. Technologický výpočet dle algoritmu 1 lze použít pro dělení všech technických materiálů užívaných v průmyslu (např. barevné kovy a jejich slitiny, oceli, keramika, dřevo, stavební materiály, horniny, kůže, plasty atd.). Viz. klasifikace materiálů podle druhů do tříd hydroabrazivní dělitelnosti T_{cut} 1 – 6 na obr. 5, dle předmětu vynálezu, přitom obecně platí podmínka, že pevnost abraziva SIG_{da} je vyšší než pevnost děleného materiálu SIG_{dm} . Pro všechny uvedené materiály se po zjištění jejich konstant hydroabrazivní dělitelnosti materiálů Kaw_j [μm], jako vstupního parametru do algoritmu 1, získají výpočtem diskrétní a časově-průběhové hodnoty analogické níže uváděným v tabulkách a grafech vypracovaným zde pro výběr 6-ti materiálů prezentovaných v rámci příkladu realizace vynálezu.

Kaw_j [μm] je nový technologický délkový parametr, který se prodlužuje s rostoucí plasticitou děleného materiálu, a stanoví se buď ze tří deformačních parametrů, dle $Kaw_j = Ra_x * h_x / Y_{ret_x}$, [μm] nebo z deformačních parametrů dle $E_{mat_x} = (10^{24} * Y_{ret_x} / (Y_{ret_{et}} * Kaw_{j_{et}}^2))^{0,25}$, [MPa], $Kaw_{j_x} = 10^{12} / E_{mat_x}^2$, [μm] nebo z rychlosti šíření ultrazvuku V_{LUZ} [m/s] dle $Kaw_{j_x} = (10^4 / V_{LUZ})^6$, [μm], a nebo z modulu pružnosti v tahu E_{mat} děleného materiálu dle $Kaw_{j_x} = 10^{12} / E_{mat}^2$, [μm]. Fyzikálně je to parametr komplexní, souvisí jak s mechanickými vlastnostmi materiálu, tak i s parametry

technologie. Tyto souvislosti jsou explicitně vyjádřeny nově odvozenými vztahy v algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení. Tento údaj o děleném materiálu je jediným a postačujícím vstupním parametrem do nového algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení materiálů. Dalšími 11-ti vstupními údaji (parametry) do algoritmu 1, které jsou již jeho součástí, jsou parametry technologicky dané, neměnné (zpoždění stopy v neutr. rovině h_0 /teor. daná konst./ Y_{ret_0} [mm], drsnost stopy v neutrální rovině h_0 /teor. daná konst./ Ra_0 [μ m], hustota vody Rov [g/cm^3], poměr průměrů dýz $Dvo/Dabro = Kdvdao$ [1]) nebo technologem volené, nastavitelné (hmotnost celková proudu AWJ R_{oj} [g/cm^3], hmotnost abraziva R_{oa} [g/cm^3], hloubka řezu volená/požadovaná h_x [mm], volba průměru abrazivní dýzy d_a [mm], průměr abrazivního zrna d_{azr} [mm], objem. podíl abraziva v proudu AWJ λ [1], cena el. energie C_{kwhod} [Kč/kWh] – nastavitelná dle aktuálních potřeb). Výpočtem jsou potom volené parametry upřesněné a optimalizované, a to na základě konkrétně zjištěné konstanty hydroabrazivní dělitelnosti materiálů K_{awj} [μ m] tak, že subjektivně volený údaj např. poměr průměrů dýz $Dv/Dabr$ $Kdvdao = 0,329$ [1] jako např. konstantně nastavený výrobcem (obr. 7, obr. 8 – řádek 8) vyjde z výpočtu jako optimalizovaný parametr $Kdvd_a$ v rámci celé technologie dělení pro konkrétní materiál, jehož dělitelnost je definovaná podle návrhu zjištěnou konstantou hydroabrazivní dělitelnosti materiálu a je uveden na obr. 7, obr. 8 na řádku 27 pro zde prezentované materiály. Dané a volené technologické parametry vstupující do algoritmu 1 jsou vyspecifikované na obr. 22, tam jsou uvedeny také konkrétní hodnoty použité pro níže prezentovaný příklad, ale mohou být použity obecně jako pomocné, protože se přepočtem upravují na konkrétní stav technologie dělení podle zjištěné hodnoty K_{awj} . Z výše uvedeného vyplývá, že algoritmus 1 je obecně platný pro všechny technické materiály s tím, že vedle hlavního vstupního parametru K_{awj} je třeba vydefinovat pouze parametry, které jsou dané a neměnné a proto trvale uvedené v zadání vstupů: zpoždění stopy v neutr. rovině h_0 /teor. daná konst./ $Y_{ret_0} = 1$ [mm], drsnost stopy v neutrální rovině h_0 / teor. daná konst. / $Ra_0 = 3,7$ [μ m], hustota vody $Rov = 1$ [g/cm^3], hmotnost celková proudu AWJ R_{oj} [g/cm^3], hmotnost abraziva R_{oa} [g/cm^3], hloubka řezu volená/požadovaná h_x [mm], volba průměru abrazivní dýzy d_a [mm], průměr abrazivního zrna d_{azr} [mm], objem. podíl abraziva v proudu AWJ λ [1], cena el. energie C_{kwhod} [Kč/kWh], vstupní poměr průměrů dýz $Dvo/Dabro = Kdvdao = 0,329$ [1]. Nastavení technologie podle konkrétního parametru K_{awj} děleného materiálu by mělo za účelem optimalizace celé technologie respektovat výpočtem upřesňované parametry jako optimalizovaný poměr průměrů dýz $Dv/Dabr = Kdvd_a = f(d_{azr})$, kde d_{azr} je optimalizovaný průměr zrna abraziva podle vstupní hodnoty K_{awj} daného materiálu, kterou si algoritmus 1 vyčíslí a provede konečnou optimalizaci poměru $Kdvd_a$.

Optimalizovaný průměr zrna dazr se s rostoucí pevností materiálu zmenšuje. Technolog pro svůj materiál nastaví poměr dýz podle upřesněného/optimalizovaného výpočtu $Dv/Dabr = Kdvda = f(dazr)$.

Důležitým analytickým faktorem je určení geometrických parametrů a polohy rovnovážné/neutrální roviny (Ra_0, h_0) v hydroabrazivním dělicím řezu. Obecně jde o hloubkovou úroveň v dělicích řezech, kde dochází k vyrovnání tahových a tlakových napětí. Pro $h < h_0$ převažuje podíl tahové napjatosti, drsnost povrchu je relativně nízká. Pro $h > h_0$ roste podíl tlakové složky a drsnost povrchu dělicí stěny se zvyšuje. Zjistili jsme, že při dělení hydroabrazivním nástrojem dochází k vyrovnání tahové σ_{tah} a tlakové σ_{tlak} napjatosti vždy při hodnotách drsnosti $Ra_0 = 3,7 \mu m$ a retardace $Yret_0 \sim \sigma_{tah}/\sigma_{tlak} = 1$ a to nezávisle na materiálu, ale v adekvátních hloubkách neutrální roviny h_0 , která je pro různé materiály různá. Potom hloubka neutrální roviny v řezu h_0 musí být adekvátní těmto hodnotám a rovnici mechanické rovnováhy na hloubkové úrovni neutrální roviny h_0 definujeme $Ra_0 \cdot h_0 / Yret_0 - Kawj_0 = 0$, a na obecné hloubkové úrovni $Ra_x \cdot h_x / Yret_x - Kawj_x = 0$. Přitom $Kawj_0 = Kawj_x = Kawj \sim 10^{12} / E_{mat}^2$ pro daný materiál je po celé hloubce dělicího řezu konstanta a hloubka neutrální roviny $h_0 = Kawj / Ra_0$ [mm].

Takto připravený algoritmus 1 technologie hydroabrazivního dělení materiálů, který je obecně platným pro všechny způsoby A, B, C, D, je naprogramovaný do programovatelného technologického kalkulátoru nebo PC. Výpočet proběhne po dosazení jediné hledané vstupní hodnoty $Kawj$ a dalších 11-ti daných hodnot, vstupních parametrů (zpoždění stopy v neutr. rovině h_0 / teor. daná konst./ $Yret_0$ [mm], drsnost stopy v neutrální rovině h_0 / teor. daná konst./ Ra_0 [μm], hustota vody Rov [g/cm^3], hmotnost celková proudu AWJ Roj [g/cm^3], hmotnost abraziva Roa [g/cm^3], hloubka řezu volená/požadovaná h_x [mm], volba průměru abrazivní dýzy da [mm], průměr abrazivního zrna $dazr$ [mm], objem. podíl abraziva v proudu AWJ $lambda$ [1], cena el. energie $Ckwhod$ [Kč/kWh], poměr průměrů dýz $Dvo/Dabro = Kdvdao = konst$ [1], stejná pro všechny materiály) bez dalšího zásahu technologa automaticky. Technologem neovlivnitelné jsou např. aktuální cena el. energie, cena vody, cena abraziva, hmotnost vody a teoreticky dané konstanty Ra_0 a $Yret_0$. Naopak, předem si může modelově dle algoritmu 1 propočítat pro dělený materiál např. dosaženou hloubku dělicího řezu, drsnost dělicích stěn, celkový výkon a cenu práce rozhodne-li se např. místo drahého abraziva granát použít olivín, sklo nebo jiné levnější abrazivum, materiálově v algoritmu 1 definovaného hmotností abraziva a cenou, odkud se odvíjí další parametry, jako je průtočné množství abraziva a váhový podíl abraziva v toku. Podle obr. 22 lze vyčíslit, které hodnoty platí trvale a obecně a které musíme aktualizovat u uváděných 11 hodnot, vstupních parametrů.

Důsledkem toho je, že změníme-li tyto vstupní hodnoty, změní se adekvátně výsledek výpočtu podle algoritmu 1.

Výstupem jsou všechny potřebné údaje o materiálu, technologii a o technickém průběhu celého dělicího řezu v numerické a grafické formě na displeji programovatelného technologického kalkulátoru nebo na PC. Po spuštění algoritmu 1 technologie hydrabrazivního dělení materiálů obdrží technolog během cca jedné minuty na displeji celkem 110 technologických údajů v numerické (tabulkové) formě a 90 grafů predikčně popisujících po technické stránce časo-prostorový průběh celého dělicího řezu, včetně optimální rychlosti posuvu, tlaku čerpadla, množství abraziva, finální jakosti dělicí stěny, optimální a dosažitelné hloubky řezu, rozboru nákladů a celkové ekonomiky provozu hydroabrazivní soupravy pro konkrétní materiál. Protože Kawj je parametr délkový a prodlužuje se s rostoucí plasticitou děleného materiálu, může se doba automatického výpočtu při konstantní hustotě vzorkování prodlužovat až na 2 – 3 minuty. Např. pro běžné oceli je Kawj v rozmezí 18 – 40 [μm], zatímco pro slitiny Al již v rozmezí 200 – 700 [μm] podle chemického složení a mechanické plasticity a u slitin Pb již Kawj přesahuje 1000 [μm]. Proto je vhodné u méně výkonných počítačů zmenšit hustotu vzorkování (pozice 14 v základní sestavě algoritmu 1 pro volbu hustoty vzorkování na hloubce řezu h, krok vzorkování lze pro běžné PC volit např. pro pevné oceli v řádech 10 – 4 až 10 – 3 mm, pro středně pevné materiály měď, hliník 10 – 2, pro měkké materiály olovo, dřevo, horniny, plasty 10 – 1). Celý výpočet lze provádět pomocí programovatelného technologického kalkulátoru nebo na PC. Přitom je umožněn interaktivní vstup a vlastní modelování procesu technologem.

Předmět vynálezu dále řeší i nedostatek chybějící jednotné technologické klasifikace technických materiálů podle parametru dělitelnosti Kawj tím, že toto zobecňující kritérium umožňuje zařazení jednotlivých materiálů do 6-ti tříd hydroabrazivní dělitelnosti Tcut. Třída hydroabrazivní dělitelnosti se určí na základě parametru Kawj, resp. podle $Emat = f(Kawj)$ podle rovnic (1) a (2). Třídám hydroabrazivní dělitelnosti potom algoritmus 1 technologie hydrabrazivního dělení materiálů přiřazuje optimalizované technologické parametry příslušné soupravy výpočtem. Třídou dělitelnosti tvoří skupina materiálů podobných mechanických vlastností z hlediska jejich hydroabrazivního dělení. Třídy dělitelnosti rozdělují materiály rámcově a podle modulu pružnosti v tahu $Emat$ na ose x a zahrnují všechny druhy technických materiálů, viz. schéma na obr. 5. Modul pružnosti v tahu $Emat$ lze podle návrhu předmětu vynálezu ověřit, popř. stanovit současně s konstantou Kawj. Uvnitř jednotlivých tříd je provedena detailizace do podtříd automaticky po spuštění algoritmu 1 a celý soubor algoritmem 1 vypočítaných parametrů charakterizuje danou podtřídou. Příkladně

pro materiál ocel ČSN 17 251 vychází v grafu na obr. 5 i v tabulce na obr. 7 ve sloupci č. 14 automatické zařazení do třídy dělitelnosti $T_{cut} = 5$ a do detailizované podtřídy $T_{cut} = 5,2232$, je-li detailizace do podtřídy volena na 4 desetinná místa. Zařazení děleného materiálu do technologické klasifikace je potom automaticky provedeno algoritmem 1 na základě rovnic:

$$T_{cut} = \log(10^6/Kawj^{0,5}), \quad [-] \quad (1)$$

$$T_{cut} = \log(Emat), \quad [-] \quad (2)$$

Testování materiálu na vstupní technologický parametr $Kawj$ lze jednoduchým výpočtem buď podle deformačních parametrů dělicí stěny zkušební vzorku nebo ověřených parametrů pro $Emat$, resp. V_{LUZ} realizovat, jak již bylo výše naznačeno, čtyřmi způsoby.

Buď za A: měříme 3 deformační parametry vzorku materiálu, a to vybranou hloubku řezu h_x [mm], lokální drsnost Ra_x [μm] v hloubce h_x a odchylku řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$ v hloubce h_x .

Nebo za B: měříme pouze 2 deformační parametry vzorku materiálu, známe-li $Kawj_{et}$ etalonového materiálu, nebo $Emat_{et}$ nebo V_{LUZet} , a to etalonovou hloubku h_{et} [mm] stejnou pro všechny testované materiály a odchylku řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$ [mm] testovaného materiálu v etalonové hloubce h_{et} .

Nebo za C: neřezaný vzorek materiálu se proměří buď na rychlost šíření podélné vlny ultrazvuku V_{LUZ} [m/s] nebo se změří (stanoví) modul pružnosti v tahu $Emat$, a na základě jednoho z těchto parametrů se určí vstupní údaje do algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení materiálů.

Nebo za D: máme-li ověřeně zjištěný modul pružnosti v tahu $Emat$, resp. podélnou rychlost šíření ultrazvuku V_{LUZ} děleného materiálu, můžeme vstupní parametr $Kawj$ do algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení materiálů stanovit výpočtem, tj. bez jakéhokoliv měření a bez potřeby jakéhokoliv speciálního přístrojového vybavení.

Hloubku h_x je nutno měřit pouze v případě ad A a ad B. Způsoby ad A až ad D lze v podstatě rozdělit na přímé a nepřímé. Mezi přímé metody lze řadit metody ad A a ad B, protože vyžadují přímé uskutečnění dělicího řezu, získání zkušební vzorku a přímá měření drsnosti Ra_x a délková měření hloubky h_x , resp. odchylky řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$. Metody ad C a ad D lze označit jako nepřímé, protože nevyžadují realizaci zkušební řezu.

Princip předmětu vynálezu podle verze provedení A spočívá v tom, že se na dělicí stěně kontrolního řezu zvolí hloubka h_x [mm] s dobře patrnými stopami po řezném nástroji.

Na této hloubce h_x se změří lokální drsnost Ra_x [μm] a odchylka řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$ [mm]. Z těchto údajů se výpočtem určí podle vztahu (3) konstanta hydroabrazivní dělitelnosti materiálu Kaw_j , která se dále dosadí jako vstupní hodnota do algoritmu 1 a doplnkově také modul pružnosti v tahu E_{mat} podle vztahu (4) jako přímá funkce $E_{mat} = f(Kaw_j)$:

$$Kaw_{j_x} = Ra_x * h_x / Yret_x, \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

$$E_{mat_x} = 10^6 / Kaw_{j_x}^{0,5}, \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Potom také optimalizovaná posuvná rychlost pro dělení různých materiálů a pro realizaci dalších zkušebních řezů je

$$V_{popt} = (10^{-3} * Ra_0)^{0,5} * 10^6 / E_{mat}^{0,5}, \quad [\text{mm/min}] \quad (5)$$

kde Ra_0 je drsnost stopy řezu na úrovni h_0 , tj. v neutrální rovině, $Ra_0 = 3,7$ [μm].

Výhoda provedení vynálezu podle verze A spočívá v tom, že všechny 3 nejdůležitější proměnné jsou po fyzikální stránce měřeny přímo. Nevýhodou je zejména nutnost proměřování drsnosti Ra_x v hloubce řezu h_x vlastním drsnoměrem nebo dodavatelsky.

Princip vynálezu podle verze provedení B spočívá v tom, že se na dělicí stěně kontrolního řezu provede jedno kompletní etalonové měření podle verze A pro jeden etalonový materiál, a to ve zvolené etalonové hloubce h_{et} [mm], nebo se dle ověřených hodnot $E_{mat_{et}}$ či $V_{LUZ_{et}}$ stanoví $Kaw_{j_{et}}$ a další parametry etalonového materiálu, a stejnou, tj. etalonovou posuvnou rychlostí $V_{popt_{et}}$ [mm/min] se nařežou kontrolní vzorky ze všech ostatních materiálů, přičemž etalonová hloubka h_{et} [mm] zůstává pro všechny materiály konstantní a měří se pouze velikost odchylky řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$ [mm] v hloubce h_{et} a odpadá tak potřeba měření drsnosti Ra_x [μm] v hloubce h_{et} [mm]. Parametry Kaw_{j_x} [μm] a E_{mat_x} [MPa] jsou stanoveny z odchylky řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$ [mm], etalonové odchylky $Yret_{et}$ [mm], parametru $Kaw_{j_{et}}$ [μm].

Postup a vztahy pro určení vstupního parametru do algoritmu 1:

- a) zvolíme etalonovou hloubku h_{et} [mm] (např. $h_{et} = 8$ mm),
- b) změříme odchylku řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$ [mm] na zkušebním řezu neznámého materiálu v hloubce h_{et} ,
- c) zvolíme etalonový materiál, např. ocel ČSN 17 251 se známou odchylkou $Yret_{et} = 0,644$ mm v hloubce h_{et} , známým, předem stanoveným, parametrem

$Kawj_{et} = 35,77 \text{ } \mu\text{m}$ podle verze provedení A, nebo při dodavatelsky nebo laboratorně ověřeném modulu pružnosti v tahu $Emat_{et}$ nebo V_{LUZet} určíme $Kawj_{et}$ podle upraveného vztahu (7) jako $Kawj_{et} = 10^{12} / Emat_{et}^2 \text{ } [\mu\text{m}]$ nebo podle vztahu (10) jako $Kawj_{et} = (10^4 / V_{LUZet})^6, \text{ } [\mu\text{m}]$,

- d) dosadíme do vztahu (6) a vypočteme $Emat_x \text{ [MPa]}$ neznámého materiálu,
- e) dosadíme do vztahu (7) a vypočteme $Kawj_x$ neznámého materiálu a dosadíme jako vstupní údaj pro spuštění algoritmu 1,
- f) dosadíme s výhodou do vztahu (8) a vypočteme jako kontrolní údaj hodnotu drsnosti $Ra_x \text{ } [\mu\text{m}]$ v hloubce h_{et} na zkušebním řezu neznámého materiálu,
- f) dosadíme s výhodou do vztahu (3) a provedeme kontrolu $Kawj_x$ neznámého materiálu.

$$h_{et} = 8 \text{ mm},$$

$$Emat_x = (10^{24} * Yret_x / (Yret_{et} * Kawj_{et}^2))^{0,25}, \text{ [MPa]} \quad (6)$$

$$Kawj_x = 10^{12} / Emat_x^2, \text{ } [\mu\text{m}] \quad (7)$$

$$Ra_x = Yret_x * Kawj_x / h_{et}, \text{ } [\mu\text{m}] \quad (8)$$

$$Kawj_x = Ra_x * h_{et} / Yret_x, \text{ } [\mu\text{m}] \quad (3)$$

Výhoda provedení vynálezu podle verze B spočívá v tom, že odpadá nutnost přímého měření drsnosti Ra_x v hloubce řezu h_{et} , protože tato operace se nahrazuje srovnávacím etalonovým výpočtem. Potřeba znalosti modulu pružnosti v tahu $Emat_{et} \text{ [MPa]}$ nebo pevnosti $SIG_{met} \text{ [MPa]}$ materiálu a dalších etalonových hodnot Ra_{et} , resp. $Yret_{et}$ pro h_{et} platí pouze pro jeden, tj. pro etalonový materiál, který lze stanovit jen jednou a pak už stále používat k porovnání s jinými technickými dělenými materiály.

Princip předmětu vynálezu podle verze provedení C spočívá v tom, že odpadá měření deformačních parametrů na dělicí stěně a případně i potřeba vyhotovení kontrolního vzorku, protože se nahradí nedestruktivním prozářením neděleného vzorku materiálu ultrazvukem k určení rychlosti šíření podélných elastických vln $V_{LUZ} \text{ [m/s]}$, přičemž parametry $Kawj \text{ } [\mu\text{m}]$ a $Emat \text{ [MPa]}$ jsou jako odvozené funkce k rychlosti $V_{LUZ} \text{ [m/s]}$ a to na základě výchozího funkčního vztahu (13) a funkčních vztahů (10), resp. (9) a nebo se stanoví $Emat_x$, ze kterého se dále určí $Kawj$ a případně V_{LUZ} .

Algoritmus 1 tedy doplňkově vyhodnotí i kontrolní hodnoty $Emat$ a V_{LUZ} pro daný materiál.

Postup a vztahy pro určení vstupního parametru do algoritmu 1:

- a) neznámý materiál k dělení proměříme buď na V_{LUZx} nebo stanovíme $Emat_x$,
- b) dosadíme do vztahu (10) nebo (7) a vypočteme parametr $Kawj_x$ neznámého materiálu a tento dosadíme jako vstupní údaj pro spuštění algoritmu 1,
- c) s výhodou dosadíme do vztahu (9) a vypočteme modul pružnosti v tahu $Emat_x$ [MPa] neznámého materiálu nebo do vztahu (13) pro výpočet V_{LUZx} [m/s],
- d) s výhodou provedeme kontrolu ve smyslu vztahu (4) nebo (14) dosazením do analogických rovnic (7) a (4) nebo (10) a (14)

$$Emat_x = 10^{-6} \cdot V_{LUZ}^3, \text{ [MPa]} \quad (9)$$

$$Kawj_x = (10^4 / V_{LUZ})^6, \text{ [}\mu\text{m]} \quad (10)$$

$$Kawj_x = 10^{12} / Emat_x^2, \text{ [}\mu\text{m]} \quad (7)$$

$$Emat_x = 10^6 / Kawj_x^{0,5}, \text{ [MPa]} \quad (4)$$

$$V_{LUZ} = 10^4 / Kawj_x^{(1/6)}, \text{ [m/s]} \quad (14)$$

$$V_{LUZ} = (Emat \cdot 10^6)^{(1/3)}, \text{ [m/s]} \quad (13)$$

Výhoda provedení vynálezu podle verze C spočívá v tom, že odpadá nutnost provádění zkušebních řezů a veškerých přímých měření deformačních parametrů povrchu Ra_x , h_x a $Yret_x$ pro stanovení konstanty hydroabrazivní dělitelnosti materiálu $Kawj$ a z toho plynoucí nejnížší pracnost a nákladovost testování, protože náhradní měření stolní ultrazvukovou soupravou je expresní, jednoduché a levné, a případně i potřeba znalosti mechanických parametrů materiálu ($Emat$, SIG_m). Ověřovací práce ukazují, že výsledky tohoto testování jsou dostatečně přesné, přestože jde o fyzikálně nepřímé stanovení vstupů do algoritmu 1.

Princip vynálezu podle verze provedení D spočívá v tom, že v případě ověřené znalosti modulu pružnosti v tahu $Emat$ nebo V_{LUZ} děleného materiálu, stanovíme vstupní parametr $Kawj$ do algoritmu 1 výpočtem, tedy bez jakéhokoliv měření a bez potřeby jakéhokoliv speciálního přístrojového vybavení. Algoritmus 1 doplnkově vyhodnotí i kontrolní hodnotu V_{LUZ} nebo $Emat$ pro daný materiál.

Postup a vztahy pro určení vstupního parametru do algoritmu 1:

- a) ověřenou hodnotu modulu pružnosti v tahu $Emat_x$ nebo V_{LUZx} děleného materiálu dosadíme do vztahu (7) nebo (10) a vypočteme parametr $Kawj_x$ děleného materiálu a tento dosadíme jako vstupní údaj pro spuštění algoritmu 1,
- b) kontrolně můžeme vypočítat drsnost Ra_x [μm] v libovolně zvolené hloubce h_x [mm], případně také odchylku řezné stopy od normálové roviny $Yret_x$ [mm] a zpětně ověřit

vstupní technologický parametr Kaw_j a platnost $Emat = f(Kaw_j)$ podle rovnic (11), (12), (3) a (4).

$$Kaw_{j_x} = 10^{12} / Emat_x^2, \quad [\mu m] \quad (7)$$

$$Ra_x = (-10) * (1 - Kaw_{j_x} / (Kaw_{j_x} - h_x)), \quad [\mu m] \quad (11)$$

$$Yret_x = Ra_x * h_x / Kaw_{j_x}, \quad [\mu m] \quad (12)$$

$$Kaw_{j_x} = Ra_x * h_x / Yret_x, \quad [\mu m] \quad (3)$$

$$Emat_x = 10^6 / Kaw_{j_x}^{0,5}, \quad [MPa] \quad (4)$$

$$V_{LUZ} = (Emat * 10^6)^{(1/3)}, \quad [m/s] \quad (13)$$

$$V_{LUZ} = 10^4 / Kaw_{j_x}^{(1/6)}, \quad [m/s] \quad (14)$$

Výhoda provedení vynálezu podle verze D spočívá v tom, že odpadá potřeba vyhotovení zkušebního vzorku a jakéhokoliv měření a potřeba jakéhokoliv speciálního přístrojového vybavení, dále v nejmenší pracnosti a v nejmenších nákladech na spuštění algoritmu 1 pro výpočet technologických a materiálových parametrů k optimalizaci technologie dělení.

Veškeré vztahy, které jsou používány ve způsobech A, B, C a D pro stanovení Kaw_j , lze s výhodou pro jednotlivé způsoby zadat jako počáteční vztahy do nového algoritmu 1, podle předmětu vynálezu, který na základě vstupních zadaných naměřených nebo známých hodnot vypočítá Kaw_j , popřípadě také ($Emat$, V_{LUZ}) a následně tak všechny další technologické parametry.

Pro realizaci vynálezu, co se týká nezbytného zařízení, vystačíme ve verzi provedení A a B s mikrometrickým pravítkem s přesností měření délek $\pm 0,05$ [mm], přičemž ve verzi provedení A je navíc nutno měřit lokální drsnost Ra_x s přesností $\pm 0,05$ [μm], nebo toto měření taktéž zajistit dodavatelsky. Ve verzi provedení C přibývá potřeba stolní ultrazvukové aparatury s přesností ± 1 [m/s] a nebo zařízení pro zjištění materiálových hodnot ($Emat$), a nebo se V_{LUZ} [m/s] a $Emat$ může zajistit dodavatelsky, verze D. Výpočetní techniku představuje počítač s naprogramovaným algoritmem 1, nebo programovatelný technologický kalkulátor.

Řešení dle předmětu vynálezu tak zahrnuje jednoduché měřické postupy podle verzí A, B, C, D na stanovení parametru Kaw_j materiálů, jednoduchý a rychlý výpočet technologických parametrů jednotně platný pro všechny verze A, B, C, D z jednoho parametru Kaw_j , automatické obdržení všech potřebných výsledků pro nastavení optimálního technologického režimu dělení libovolného materiálu z jednoho parametru Kaw_j podle algoritmu 1, obecnou

platnost měřických postupů a algoritmu 1 pro všechny technické materiály, subjektivní rozhodování ve fázi projektování prací nahrazuje komplexně exaktním řešením, technologicky vyhovující přesnost řešení, možnost zpětných kontrol správnosti nastavení technologie graficky, analyticky, fyzicky na vzorcích. Řešení dále umožňuje standardizaci technologických postupů/režimů podle Kawj a tříd Teut, fyzikálně-matematické modelování technologického procesu, predikci kvantitativních i kvalitativních parametrů technologického procesu, použití řešení a uplatnění výsledků nejen v praxi, ale i v základním a aplikovaném výzkumu, komplexní analytický popis mechanismu dezintegrace hydroabrazivním nástrojem, odvození rovnic pro řídicí funkce pro plně automatizované on-line řízení provozů, získání řady technicky důležitých informací o mechanických vlastnostech dělených materiálů, které doplňují nebo nahrazují velmi drahá a zdlouhavá dodatečná laboratorní měření, nový způsob výpočtu dynamiky napětově-deformačních stavů soustav deformační nástroj-materiál, který je navíc zobecnitelný a aplikovatelný v řadě dalších technologiích průmyslu.

Přehled obrázků na výkresech

Obr. 1 Schéma pro verzi A provedení vynálezu.

X -	vybraný měřický bod na řezné stopě	
h_x -	hloubka měřického bodu X (na řezu)	[mm],
hvz -	tloušťka vzorku	[mm],
Y_{ret_x} -	odchylka řezné stopy od normálové roviny v bodě X	[mm],
$arcD_x$ -	úhel deviace řezné stopy v bodě X	[deg],
Ra_x -	drsnost v bodě X	[μ m].

Obr. 2 Schéma pro verzi B provedení vynálezu.

$E_{mat} = E_{mat_{et}}$ -	modul pružnosti v tahu etalonového materiálu	[mm],
h_0 -	hloubka neutrální roviny	[mm],
h_{et} -	hloubka etalonové roviny	[mm],
h_{vz} -	celková dělená hloubka, resp. výška vzorku	[mm],
$Y_{ret_{et}}$ -	odchylka řezné stopy od normálové roviny etalonového materiálu	[mm],
Y_{ret_a} -	odchylka řezné stopy od normálové roviny neznámého testovaného materiálu (a)	[mm],
Y_{ret_b} -	odchylka řezné stopy od normálové roviny neznámého testovaného materiálu (b)	[mm].

Obr. 3 Schéma pro verzi C provedení vynálezu.

Obr. 4 Princip hydroabrazivního dělení materiálů a nomenklaturní označení základních technologických a geometrických prvků AWJ.

- 1 - horní hrana vzorku,
- 2 - řezná stěna,
- 3 - osa souměrnosti AWJ,
- 4 - vstupní průměr proudu AWJ na hlavě řezu,
- 5 - tvar řezné štěrbině na hlavě řezu,
- 6 - řezná fronta, stopa řezné fronty,
- 7 - spodní hrana vzorku,
- 8 - tvar řezné štěrbině na patě řezu,
- 9 - křivky vnějších proudnic v rovině řezu,
- 10 - výstupní průměr proudu AWJ na patě řezu,
- 11 - průměr proudu AWJ po opuštění spodní hrany vzorku,
- 12 - výstupní tryska AWJ,
- Vp - směr posuvu,
- hc - kritická hloubka řezu,
- hv - hloubka prořezání vzorku (výška vzorku).

Obr. 5 Schéma klasifikačního řazení technických materiálů do tříd hydroabrazivní dělitelnosti T_{cut} [-] na základě hodnot kalkulovaných podle předmětu vynálezu jako funkce materiálové konstanty $T_{cut} = f(K_{awj})$.

Obr. 6 Technologické parametry hydroabrazivní soupravy při ověřovací provozní zkoušce.

Obr. 7 Tabulka ukazující skladbu numerických výsledků technologie na displeji kalkulátoru pro materiály oceli ČSN 17 251, ČSN 13180 a nekovovou slitinu SnPb40 (základní provedení algoritmu 1: 110 sloupců diskř. numerických údajů a 90 grafů).

Obr. 8 Tabulka ukazující skladbu numerických výsledků technologie na displeji kalkulátoru pro materiály ocel ČSN 11140, měď Cu 99,5 a pro ocel ČSN 17618 (základní provedení algoritmu 1: 110 sloupců diskř. numerických údajů a 90 grafů).

Obr. 9 Druhy a distribuce drsnosti na hloubce řezu-predikované průběhy v závislosti na okamžité hloubce řezu $H_{abs} = 0 - H_{lim}$ [mm] při technologii dané algoritmem 1 podle návrhu předmětu vynálezu pro materiál ocel ČSN 17 251; analogicky obdržíme graf pro ostatní materiály podle vstupního parametru jejich hydroabrazivní dělitelnosti.

Ra_{st} - drsnost ve stopě [μm],

Ra_{sk} - drsnost, kterou skutečně naměříme v radiálním směru [μm],

Ra_{rad} - teoretická nosná drsnost v radiálním směru [μm],

Ra_0 - drsnost na neutrální rovině [μm],

$Z1+Z2+Z3+Z4$ - hlavní deformační zóny na hloubce řezu a jejich hloubkové úrovně:

Hin - hloubka iniciační zóny $Z1$ [mm],

Ho - hloubka zóny pružných deformací $Z2$ [mm],

Hpp - hloubka zóny pružně-plastických deformací $Z3$ [mm],

$Hlim$ - hloubka zóny plastických deformací $Z4$ a limitní hloubka řezu v daném materiálu a při dané technologii určené algoritmem 1 [mm].

Obr. 10 Predikce prostorových vztahů sledovaných průběhových parametrů h , $Ra = Rast$ a $Yret$ podle okamžité hloubky $h = 0 - Hlim = 35,77$ mm, na hloubce $h_x = h_{et} = 8$ mm a na hlavních deformačních mezích pro materiál ocel ČSN 17 251.

Obr. 11 Predikční vytyčení hloubkových úrovní hlavních deformačních mezí s vyjádřením nosné vlnitosti a retardace stop řezů v 3D projekci na hloubce řezu $h = 0 - Hlim$ [mm] podle rovnic algoritmu 1, materiál ocel ČSN 17251.

Obr. 12 Predikční vytyčení hloubkových úrovní hlavních deformačních mezí, vyjádření nosné vlnitosti a retardace stop řezů v 3D vizualizaci na celkově dosažitelné hloubce řezu $h = 0 - Hlim$ [mm] podle rovnic algoritmu 1, materiál ocel ČSN 17251.

Obr. 13 Predikční vytyčení hloubkových úrovní hlavních deformačních mezí s možností kvantifikovaného odečtu vývoje hodnot sledovaných technických a technologických parametrů na celé hloubce řezu $h = 0 - Hlim$ [mm].

Hloubkové úrovně hlavních deformačních mezí korespondují s 3-D vizualizací pro materiál ČSN 17251 s tím, že grafy ve stejném provedení obdržíme i pro další materiály na displeji technologického kalkulátoru, případně na displeji PC výpočtem podle algoritmu 1. Toto grafické provedení umožňuje kontrolu vstupních testovaných údajů $Kawj$ a $Emat = f(Kawj)$ dosazením hodnot Ra , $Yret$ a h z grafu do rovnic (3) a (4). Graf je z hlediska mechanismu dělení poměrně komplexní, protože zahrnuje vedle deformačních parametrů také parametry materiálové dané algoritmem 1 jako funkce $Kawj$. Jde o materiálové parametry pevnost v tahu $SIGm$ [MPa] a mez kluzu $SIGkl$ [MPa], dále jsou vyjádřeny průběhy rychlostí dělení ve stopě řezu $Vpst$ [mm/min] v radiální rovině Vpr [mm/min] a technologicky optimální rychlost posuvu řezné hlavy $Vpopt$ [mm/min]. Vyjádřen je také úhel zakřivení řezné stopy $arcD$ [°]. Odpor materiálu proti dělení vyjadřují průběhy

funkcí SIG_{rt} [MPa], který klesá s přibývajícím hloubkou v plastické oblasti dělicího řezu na hodnotu své deformační větve SIG_{rd} [MPa]. Napěťová funkce SIG_{dh} [MPa] představuje složku odporu proti prohlubování a napěťové funkce SIG_{dt} a $SIG_d = T_n$ [MPa] představují vývoj mechanické tuhosti dezintegračního nástroje teoreticky tuhého, resp. flexibilního typu AWJ.

- Obr. 14 Predikční vytyčení hloubkových úrovní hlavních deformačních mezí s možností kvantifikovaného odečtu vývoje hodnot sledovaných technických a technologických parametrů na celé hloubce řezu $h = 0 - H_{lim}$ [mm] – jde o detail z předchozího grafu v úseku $y = 0,001 - 2$ pro funkce s nízkou hodnotovou hladinou. Je kvantifikovaně vyjádřena energie E_{kabr} [J], výkon P_{abr} [W] abrazivních sil, hmotnostní průtok abraziva M_{abr} [kg/s] a deformační čas T_{cuth} [s] se svými hodnotami dosahovanými na hloubkové úrovni neutrální roviny $h_0 = 9,67$ mm i na dalších deformačních mezích pro prezentovaný materiál ocel ČSN 17251.
- Obr. 15 Graf pro optimální volbu hmotnostního toku abraziva. Optimální volba hmotnostního toku abraziva $M_{abro} = M_{abropt} = 7,6$ [g/s] (tj. 27,36 kg/hod), pro testované materiály viz. také obr. 7 a obr. 8 a vyjádření teoretické potřeby velikosti aktivně působící frakce hmotnostního toku $M_{avph} = f_{ce}(V_{post}, E_{mat}, H_{abs})$ [g/s] na jednotlivých deformačních mezích a podle okamžité hloubky řezu obecně $h = 0 - H_{lim} = 35,77$ mm.
- Obr. 16 Graf pro limitní hloubku H_{lim} [mm] v závislosti na modulu E_{mat} a rychlosti posuvu V_{popt} . Limitní hloubky řezu H_{lim} [mm] v závislosti na E_{mat} [MPa] při dodržení optimální posuvné rychlosti V_{popt} [mm/min] pro daný materiál dle předmětu vynálezu. Vytyčené diskrétní hodnoty jsou pro prezentovaný materiál ocel ČSN 17251s modulem pružnosti v tahu $E_{mat} = 167200$ [MPa].
- Obr. 17 Hlavní složky mechanismu abraze na hloubce řezu $h = 0 - H_{lim}$ [mm] a jejich teoretický rozklad na složky podle algoritmu odpovídající flexibilnímu (abrazivní napětí $SIG_{abrflex}$ [MPa] a abrazivní síla $F_{abrflex}$ [N]), resp. teoreticky tuhému dezintegračnímu nástroji (abrazivní napětí SIG_{abrtn} [MPa] a abrazivní síla F_{abrtn} [N]).
- Obr. 18 Stanovení ukazatele nákladovosti Kn_{kl} [-] pro různé materiály podle modulu pružnosti v tahu děleného materiálu E_{mat} [MPa].
- Obr. 19 Graf bilance náklady/výkon a odpovídající optimální rychlosti posuvu řezné hlavy V_{pxopt} [mm/min] pro testované materiály podle modulů pružnosti $E_{mat} = 41,1 - 256,5$ [GPa].

- Obr. 20 Cenové relace podle nákladů na energii.
- Obr. 21 Predikce nákladových relací na dělení z hlediska energetické náročnosti podle modulu pružnosti v tahu E_{mat} [MPa] materiálů při kalkulované ceně 3,50 [Kč/kWh] do hloubky neutrální roviny h_0 [mm] pro daný materiál v jednotkách [Kč/bm] ad a), resp. [Kč/hod] ad b).
- Půjde-li v provozní praxi o dělení do větších hloubek $h > h_0$ [mm], potom náklady na energii a tím i požadované ceny za výkon budou narůstat.
- Obr. 22 Specifikace vstupních parametrů do algoritmu 1 z kategorie technologicky nebo teoreticky daných, přičemž konstantu hydroabrazivní dělitelnosti považujeme za hlavní vstupní parametr hledaný.
- Obr. 23 Zařazení testovaných materiálů v rámci příkladu provedení do tříd hydroabrazivní dělitelnosti.
- Obr. 24 Srovnávací tabulka ve stanovení hodnoty K_{awj} podle způsobů A, B, C, D.
- Obr. 25 Tabulka diferencí v naměřených hodnotách K_{awj} k průměrům dle Obr. 24.
- Obr. 26 Graf kalibrační závislosti $K_{awj} = f_{ce}(E_{mat})$ podle vztahu (7) v algoritmu 1.
- Obr. 27 Návrh technologických parametrů pro testované materiály 1-6 stanovené algoritmem 1 podle dělitelnosti K_{awj} v logaritmických souřadnicích, kde stanovené hodnoty technologického režimu korespondují s údaji na Obr. 8-13. Zde označení materiálů (na x-ové souřadnici): 1-ocel ČSN 17 251; 2- ocel ČSN 13180; 3- slitina SnPb40; 4- ocel ČSN 11140; 5- Cu 99,5; 6- ocel 17 618. Optimalizované parametry vypočtené na základě $K_{awj}(A)$ dosazením do algoritmu 1 v logaritmických souřadnicích s vykreslením diferencí 10 % v K_{awj} (přerušované linie) .
- Obr. 28 Topografické parametry v hloubce řezu $h = 8\text{mm}$ pro testované materiály 1 – 6 vypočtené podle algoritmu 1 na základě vstupní hodnoty $K_{awj}(A)$ v logaritmických souřadnicích s vykreslením diferencí 10 % v K_{awj} (přerušované linie) a kontrolních hodnot pro dosazení do kontrolního výpočtu podle (3) $K_{awj}(kontr) = R_a(kontr) \cdot h(kontr) / Y_{ret}(kontr)$.
- Obr. 29 Vyhodnocení vlivu diferencí v parametru K_{awj} na hlavní technologické parametry a na drsnost.

Příklad provedení vynálezu

Příprava měření byla pro všechny materiály a verze provedení stejná. K nařezání zkušebních vzorků o délce 30 mm byla použita tyčovina délky 1000 mm čtvercového profilu 30 x 30 mm. Tyčovina byla dělena standardně používanou hydroabrazivní technologií s parametry podle obr. 6 na délku vzorků 30 mm.

Měření deformačních parametrů Ra_x , h_x a Y_{ret_x} na dělicích plochách zkušebních vzorků bylo provedeno podle schématu na obr. 1 s krokem topografického profilování na hloubce řezu $kh = 1$ mm. Dle verze A byl stanoven koeficient hydroabrazivní dělitelnosti $Kawj$ všech 6-ti testovaných materiálů a dosazením $Kawj$ příslušného materiálu do algoritmu 1 byly předem vypočteny optimalizované technologické parametry jejich hydroabrazivního dělení.

V rámci příkladu realizace byly testovány tyto materiály:

Materiál 1: ocel ČSN 17 251; Materiál 2: ocel ČSN 13180; Materiál 3: slitina SnPb40; Materiál 4: ocel ČSN 11140; Materiál 5: Cu 99,5; Materiál 6: ocel 17 618.

Laboratorně ověřené hodnoty E_{mat} a V_{LUZ} pro tyto materiály byly následující:

Materiál 1: ocel ČSN 17 251	$E_{mat} = 168500$ MPa; $V_{LUZ} = 5543,27$ m/s;
Materiál 2: ocel ČSN 13180	$E_{mat} = 248700$ MPa; $V_{LUZ} = 6312,6$ m/s;
Materiál 3: slitina SnPb40	$E_{mat} = 41710$ MPa; $V_{LUZ} = 3461,5$ m/s;
Materiál 4: ocel ČSN 11140	$E_{mat} = 198700$ MPa; $V_{LUZ} = 6154$ m/s;
Materiál 5: Cu 99,5	$E_{mat} = 99400$ MPa; $V_{LUZ} = 4587,5$ m/s;
Materiál 6: ocel 17 618	$E_{mat} = 144900$ MPa; $V_{LUZ} = 5309,55$ m/s.

Vstupní parametry do algoritmu 1 byly:

Ckwhod = 3,5, **lambd** = 0,7, **dazr** = 0,000188, **da** = 4*dazr, **hx** = 8, **Kdvdao** = 0,329,
Roabr = 3,4, **Roa** = Roabr, **Rov** = 1, **Roj** = 1,3, **Rao** = 3,7, **Yreto** = 1.

Výstupy numerických hodnot z algoritmu 1 pro materiály 1 – 6 vypočtené na základě $Kawj$ jsou uvedeny v tabulkách na Obr. 7 a na Obr. 8. Vybrané příklady grafických výstupů průběhových hodnot podle rovnic v algoritmu 1, příkladem pro materiál 1 (ocel ČSN 17 251), jsou zde uváděny na Obr. 9 – 19 a na Obr. 21. Tento výběr grafických výstupů si může technolog. (resp. výzkumný pracovník) doplnit podle aktuální potřeby individuálně.

Individuálně lze vykreslovat/modelovat nebo detailizovat a konfigurovat vzájemné vztahy různých funkcí podle vlastní volby, které v prezentované grafické části algoritmu 1 provedeny nejsou.

Soubor numerických výstupů (viz. řádek 14 na Obr. 7 a Obr. 8) obsahuje také technologicky důležitou možnost zařazení testovaných materiálů do tříd hydroabrazivní dělitelnosti T_{cut} (-), viz. také Obr. 5. Pro nejměkčí a relativně snadno dělitelný materiál 3 (slitina SnPb40) vychází třída $T_{cut} = 4,614$. Pro nejpevnější a méně snadno dělitelný materiál 2 (ocel ČSN 13180) vychází třída $T_{cut} = 5,409$. Zařazení testovaných materiálů 1 – 6 je v tabulce na Obr. 23. Postup řazení technických materiálů pro potřebu hydroabrazivní technologie dělení/obrábění je na základě původního návrhu způsobu klasifikace popsán výše. Klasifikace technických materiálů do tříd hydroabrazivní dělitelnosti T_{cut} má výhodu, že pro zvolené reprezentanty jednotlivých tříd lze zpracovat standardní režimy hlavních technologických parametrů pro jednotlivé třídy a jejich podtřídy. Pro standardizaci technologických režimů mohou sloužit i výsledky v tabulkách na Obr. 7 a na Obr. 8 získané v rámci příkladu realizace.

Graf na Obr. 26 je vykreslení závislosti parametru K_{awj} na modulu pružnosti materiálu E_{mat} pro testované materiály 1 – 6. Tato kalibrační závislost $K_{awj} = f(E_{mat})$ umožňuje v praxi orientační odečet a rychlou kontrolu.

Pro vykreslení a zdůraznění rozdílů v technologiích podle dělitelnosti testovaných materiálů 1 – 6 je algoritmem 1 zkonstruován samostatný graf na Obr. 27 vybraných technologických parametrů v závislosti na parametru K_{awj} jednotlivých materiálů. Podobně je na Obr. 28 zkonstruován graf pro topografické parametry povrchu ve srovnávací hloubce $h = 8$ mm. Zde je taktéž vyznačen způsob kontroly na stanovení parametru K_{awj} z grafických hodnot podle vztahu (3), kde $K_{awj}(kontr) = R_a(kontr) \cdot h(kontr) / Y_{ret}(kontr)$ (μm) (analogie k verzi A přímých měření na zkušebním řezu).

Ilustrativně a pro přehlednost jsou pro konstrukci grafu na Obr. 27 vybrány pouze ty technologické parametry, které jsou pro rozhodování a pro první názor technologa podstatné. Jsou to zejména tyto výpočtem optimalizované parametry pro volbu technologického režimu:

- posuvná rychlost V_{popt} (mm/min),
- tlak vody před tryskou P_v [MPa],
- hmotnostní tok abraziva m_a [g/min],
- limitní/maximální dořezaná hloubka H_{lim} [mm] ,
- hodinová spotřeba elektrické energie pro dělení N_{kwhod} [kWhod],
- aktuální náklady na elektrickou energii pro dělení C_{kwhod} [Kč/hod].

Tyto parametry technologie jsou podle příslušných rovnic algoritmem 1 vykresleny průběhově, jako přímé funkce k parametru dělitelnosti Kawj (x-ová souřadnice). Potom hodnoty technologických parametrů příslušné konkrétnímu materiálu odečteme na y-ové souřadnici průsečíků se svislými řezy 1 až 6 grafem podle Kawj konkrétního materiálu. V rámci příkladu realizace jsou níže popsána a výsledky dokumentována tato témata:

- a) Provedení experimentů podle verzí A, B, C, D a výsledné hodnoty parametru Kawj;
- b) Vyhodnocení výsledných hodnot a zjištěných diferencí v parametru Kawj;
- c) Vyhodnocení vlivu diferencí v parametru Kawj na hlavní technologické parametry;
a na drsnost;
- d) Celkové zhodnocení příkladu realizace.

Ad a) Provedení experimentů podle verzí A, B, C, D a výsledné hodnoty parametru Kawj

Podle verze provedení vynálezu A (viz. schéma na obr. 1) byl vyčíslen hlavní vstupní parametr do algoritmu 1, tj. konstanta hydroabrazivní dělitelnosti uvedených materiálů Kawj tak, že naměřené hodnoty drsnosti Ra_x a odchylka řezné stopy $Yret_x$ ve zvolené hloubce zkušebních řezů/vzorků $h_x = 8 \text{ mm}$ byly dosazeny do rovnice (3). Potom hodnoty Kawj a také teoretické ekvivalenty pro E_{mat} , resp. pro V_{LUZ} s výhodou doplňkově vyčíslené podle vztahu (4), resp. (14), které jsou taktéž součástí soustavy rovnic algoritmu 1, byly pro jednotlivé materiály následovné:

pro ocel ČSN 17 251: $h_x = 8 \text{ mm}$; $Ra_x = 2,88 \text{ } \mu\text{m}$; $Yret_x = 0,644 \text{ mm}$;

potom: Kawj = 35,77 μm ; $E_{mat} = 167200 \text{ MPa}$; $V_{LUZ} = 5461,82 \text{ m/s}$;

pro ocel ČSN 13180: $h_x = 8 \text{ mm}$; $Ra_x = 11,089 \text{ mm}$; $Yret_x = 5,835 \text{ mm}$;

potom: Kawj = 15,203 μm ; $E_{mat} = 256466 \text{ MPa}$; $V_{LUZ} = 6298,06 \text{ m/s}$;

pro slitinu SnPb40: $h_x = 8 \text{ mm}$; $Ra_x = 0,146 \text{ } \mu\text{m}$; $Yret_x = 0,002 \text{ mm}$;

potom: Kawj = 591,672 μm ; $E_{mat} = 41110 \text{ MPa}$; $V_{LUZ} = 3423,29 \text{ m/s}$;

pro ocel ČSN 11140: $h_x = 8 \text{ mm}$, $Ra_x = 6,04 \text{ } \mu\text{m}$, $Yret_x = 2,27 \text{ mm}$

potom: Kawj = 21,284 μm ; $E_{mat} = 216753 \text{ MPa}$; $V_{LUZ} = 5954,93 \text{ m/s}$;

pro Cu 99,5: $h_x = 8 \text{ mm}$, $Ra_x = 0,838 \text{ } \mu\text{m}$, $Yret_x = 0,063 \text{ mm}$

potom: Kawj = 106,423 μm ; $E_{mat} = 96935 \text{ MPa}$; $V_{LUZ} = 4555,1 \text{ m/s}$;

pro ocel 17 618: $h_x = 8 \text{ mm}$, $Ra_x = 2,1119 \text{ } \mu\text{m}$, $Yret_x = 0,3701 \text{ mm}$

potom: Kawj = 45,653 μm ; $E_{mat} = 148010 \text{ MPa}$; $V_{LUZ} = 5244,5 \text{ m/s}$.

Podle verze provedení vynálezu B (viz. schéma na obr. 2), ve které se s výhodou vyhneme nutnosti příliš specializovaného měření parametru drsnosti R_a v etalonové hloubce řezu h_{et} , postupujeme v těchto krocích:

a) jako etalonový materiál se zvolí v tomto případě ocel ČSN 17 251 (materiál 1), a využitím laboratorně naměřeného modulu pružnosti v tahu $E_{mat} = 168500 \text{ MPa}$ se vypočítá optimální a v tomto případě i etalonovou posuvnou rychlost dělicí hlavy pro tento materiál dosazením do vztahu (5) $V_{popt_{et}} = 148,184 \text{ mm/min}$ a dosazením laboratorní hodnoty E_{mat} do vztahu (7) se stanoví etalonová hodnota $Kawj_{et} = 35,221 \text{ } \mu\text{m}$;

b) vzorek o výšce 10 mm se prořeže vypočtenou etalonovou rychlostí $V_{popt_{et}}$ a ve zvolené etalonové hloubce, např. $h_{et} = 8 \text{ mm}$, se změří etalonová odchylka/retardace stopy řezu od radiální roviny v hodnotě $Y_{ret_{et}} = 0,651 \text{ mm}$ (kontrolním výpočtem se můžeme přesvědčit, že podle algoritmu 1 vychází pro vstupní hodnotu $Kawj_{et} = 35,221 \text{ } \mu\text{m}$ v hloubce $h_x = h_{et} = 8 \text{ mm}$ odchylka stopy na $Y_{ret_x} = 0,668 \text{ mm}$);

c) při stejných technologických parametrech prořežeme vzorky o výšce 10 mm všech dalších 5 testovaných materiálů a v hloubce $h_{et} = 8 \text{ mm}$ změříme odchylky řezných stop Y_{ret_x} a tyto dosadíme do vztahů (6) a (7), vypočteme tak E_{mat_x} a $Kawj_x$ a doplňkově/kontrolně také V_{LUZ_x} ze vztahu (13) pro tyto neznámé materiály a s výhodou obdržíme následující testovací hodnoty:

pro ocel ČSN 13180 (materiál 2):

$Y_{ret_x} = 3,09 \text{ mm}$; $E_{mat_x} = 248710 \text{ MPa}$; $Kawj_x = 16,166 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 6288,8 \text{ m/s}$;

pro slitinu SnPb40 (materiál 3):

$Y_{ret_x} = 0,0024 \text{ mm}$; $E_{mat_x} = 41520 \text{ MPa}$; $Kawj_x = 580,077 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 3462,7 \text{ m/s}$;

pro ocel ČSN 11140 (materiál 4):

$Y_{ret_x} = 1,723 \text{ mm}$; $E_{mat_x} = 214920 \text{ MPa}$; $Kawj_x = 21,65 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 5990 \text{ m/s}$;

pro měď Cu 99,5 (materiál 5):

$Y_{ret_x} = 0,079 \text{ mm}$; $E_{mat_x} = 99451 \text{ MPa}$; $Kawj_x = 101,106 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 4633,1 \text{ m/s}$;

pro ocel ČSN 17 618 (materiál 6):

$Y_{ret_x} = 0,36 \text{ mm}$; $E_{mat_x} = 145300 \text{ MPa}$; $Kawj_x = 47,363 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 5257,3 \text{ m/s}$.

Hodnoty $Kawj_x$ pro jednotlivé materiály dosadíme do algoritmu 1.

Jako etalonový materiál může být zvolena např. ocel ČSN 17 251 (materiál 1), kde konstanta dělitelnosti byla postupem podle verze A stanovena na hodnotu $Kawj = 35,77 \text{ } \mu\text{m}$, a tedy $E_{mat_{et}} = 167200 \text{ MPa}$, $Y_{ret_{et}} = 0,644 \text{ mm}$. Hodnoty se pak změní odpovídajícím způsobem, avšak stále jsou v požadovaném rozmezí možných chyb.

Podle verze provedení vynálezu C (viz. schéma na obr. 3), ve které se v tomto případě využitím expresního a nedestruktivního proměření vzorků neznámých materiálů ultrazvukovou stolní aparaturou na rychlost šíření podélných ultrazvukových vln V_{LUZ} (m/s) s výhodou vyhneme zejména jinak nutné realizaci zkušebního řezu, nutnosti příliš specializovaného měření parametru drsnosti R_a i délkových měření a postupujeme rychleji, levněji a zjednodušeně v těchto krocích:

- a) vzorky testovaných materiálů o rozměrech, jaké máme k dispozici, proměříme podle schématu na obr. 3 vlastní aparaturou, nebo využijeme dodavatelsky naměřených hodnot rychlosti podélných ultrazvukových vln V_{LUZ} (m/s);
- b) dosazením hodnot do vztahu (10) s výhodou snadno vypočteme konstantu hydroabrazivní dělitelnosti Kaw_j daných materiálů a dosazením do vztahu (9) si s výhodou snadno doplnkově vypočteme také hodnotu modulu pružnosti v tahu E_{mat} těchto materiálů;
- c) hodnotu konstanty hydroabrazivní dělitelnosti Kaw_j dosadíme jako vstupní údaj do algoritmu 1 a obdržíme optimalizované vstupní parametry technologického režimu včetně modelového řešení časo-prostorového průběhu i finálních topografických parametrů řezu konkrétně pro každý materiál;

Pro zde testované materiály po dosazení laboratorních hodnot V_{LUZx} do vztahů (10) a (9) vycházejí následující hodnoty:

pro ocel ČSN 17 251 (materiál 1):

$V_{LUZx} = 5543,27$ m/s; $Kaw_{jx} = 35,221$ μ m; $E_{matx} = 168499,7$ MPa;

pro ocel ČSN 13180 (materiál 2):

$V_{LUZx} = 6312,6$ m/s; $Kaw_{jx} = 16,166$ μ m; $E_{matx} = 248713,1$ MPa;

pro slitinu SnPb40 (materiál 3):

$V_{LUZx} = 3461,5$ m/s; $Kaw_{jx} = 580,077$ μ m; $E_{matx} = 41519,98$ MPa;

pro ocel ČSN 11140 (materiál 4):

$V_{LUZx} = 6154$ m/s; $Kaw_{jx} = 21,65$ μ m; $E_{matx} = 214917,1$ MPa;

pro měď Cu 99,5 (materiál 5):

$V_{LUZx} = 4587,5$ m/s; $Kaw_{jx} = 101,106$ μ m; $E_{matx} = 99451,55$ MPa;

pro ocel ČSN 17 618 (materiál 6):

$V_{LUZx} = 5309,55$ m/s; $Kaw_{jx} = 47,36$ μ m; $E_{matx} = 145304,9$ MPa.

Dle vztahu (7) lze hodnotu Kaw_{jx} získat i na základě laboratorně získané (stanovené) hodnoty E_{matx} (uvedené výše).

Podle verze provedení vynálezu D, ve které se s výhodou vyhneme jak realizaci zkušebního řezu, tak nutnosti příliš specializovaného měření parametru drsnosti R_a i délkových měření, jakož i dalších vlastních nebo dodavatelských měření, a to v případě, že máme spolehlivé údaje od výrobce nebo z materiálových listů a dosud funkčně nenamáhaný nebo nekorodovaný materiál. Potom stačí vycházet z hodnoty výchozího materiálového parametru, a to v tomto případě z ověřené hodnoty modulu pružnosti E_{mat} a postupovat v těchto krocích:

- a) dosazením laboratorních hodnot E_{mat} v [MPa] do vztahu (7) s výhodou snadno vypočteme konstantu hydroabrazivní dělitelnosti K_{awj} daných materiálů a dosazením do vztahu (13) si také s výhodou snadno doplnkově vypočteme technicky a kontrolně důležitou hodnotu rychlosti šíření podélných ultrazvukových vln V_{LUZ} [m/s];
- b) hodnotu konstanty hydroabrazivní dělitelnosti K_{awj} dosadíme jako vstupní údaj do algoritmu 1 a obdržíme optimalizované vstupní parametry technologického režimu včetně modelového řešení časo-prostorového průběhu i finálních topografických parametrů řezu konkrétně pro každý materiál;

Pro zde testované materiály 1 – 6 po dosazení laboratorně ověřených hodnot E_{mat} do vztahů (7) a (13) vycházejí následující hodnoty:

pro ocel ČSN 17 251 (materiál 1):

$E_{mat_x} = 168500 \text{ MPa}$; $K_{awj_x} = 35,221 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 5523,3 \text{ m/s}$;

pro ocel ČSN 13180 (materiál 2):

$E_{mat_x} = 248700 \text{ MPa}$; $K_{awj_x} = 16,168 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 6288,7 \text{ m/s}$;

pro slitinu SnPb40 (materiál 3):

$E_{mat_x} = 41710 \text{ MPa}$; $K_{awj_x} = 574,804 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 3468 \text{ m/s}$;

pro ocel ČSN 11140 (materiál 4):

$E_{mat_x} = 198700 \text{ MPa}$; $K_{awj_x} = 25,328 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 5835,3 \text{ m/s}$;

pro měď Cu 99,5 (materiál 5):

$E_{mat_x} = 99400 \text{ MPa}$; $K_{awj_x} = 101,211 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 4632,3 \text{ m/s}$;

pro ocel ČSN 17 618 (materiál 6):

$E_{mat_x} = 144900 \text{ MPa}$; $K_{awj_x} = 47,628 \text{ } \mu\text{m}$; $V_{LUZ_x} = 5252,4 \text{ m/s}$.

Dle vztahu (10) lze hodnotu K_{awj_x} získat i na základě dodavatelem získaných hodnot V_{LUZ_x} .

Ad b) Vyhodnocení výsledných hodnot a zjištěných diferencí v parametru Kawj

Výsledné hodnoty Kawj z experimentů provedených postupy podle verzí provedení vynálezu A, B, C, D jsou pro testované materiály 1 - 6 shrnuty v tabulce na Obr. 24 včetně vyhodnocení procentuálních diferencí v hodnotě Kawj podle jednotlivých verzí. Největší difference podle verzí provedení byla zjištěna v postupu podle verze D a to -1,33 % k průměru. Difference podle verzí a materiálů jsou uvedeny v tabulce na Obr. 25. Největší difference k průměru podle materiálů byla zjištěna v hodnotách Kawj pro nejpevnější ze souboru ocel ČSN 13180 (materiál 2) a to 3,739 % taktéž podle verze D.

Ad c) Vyhodnocení vlivu diferencí v parametru Kawj na hlavní technologické parametry a na drsnost

Pro kvalitní volbu/nastavení technologických parametrů podle mechanických vlastností a hydroabrazivní dělitelnosti toho kterého materiálu, což je hlavním cílem a smyslem postupů podle vynálezu, potřebujeme vědět, jak se případné vyskytnuté difference/chyby ve stanovení Kawj, které se nedají úplně vyloučit, projeví na konečných hodnotách parametrů technologie a na konečných hodnotách kvality povrchu dělicích stěn řezů. Komplexní vyhodnocení vlivu největší difference v parametru Kawj 3,739 % v oceli ČSN 13180 (materiál 2) na hlavní technologické parametry a na parametr drsnosti v radiálním směru R_{arad} v hloubce dělicí stěny $h = 8$ mm je vyčísleno v tabulce na Obr. 29. Difference se projeví nejvíce v hodnotách pro limitní hloubku H_{lim} v procentuálním vyjádření 2,101 % a dále pro spotřebu a náklady na el. energii -2,684 %, v drsnosti R_{arad} -1,034 %.

Ad d) Celkové zhodnocení příkladu realizace a výhod navrhovaného řešení

Prezentované výsledky v rámci příkladu realizace podle bodů a) až c) dokumentují dostatečnou přesnost, dle požadavků by fluktuace neměly přesahovat ± 10 %, a technickou využitelnost navrhovaného řešení na úrovni současných potřeb praxe a současný stav v technologii posunují na úroveň vyšší. Přitom opakujeme, že postupy stanovení vstupního parametru Kawj pro dosazení do algoritmu 1 včetně závěrů z příkladu realizace jsou pro technické materiály obecně platné. Tenkostěnné polotovary, jako je kůže, papír, textil apd. lze testovat na Kawj s výhodou použitím metod ad C) a D) nebo potom metodami ad A) a B) v zatížených vrstvách o tloušťce 10 až 20 cm.

Algoritmus 1 technologie hydroabrazivního dělení :

Kawj=vstupní údaj zjištěný způsoby A,B,C nebo D

Emat= $10^6/1./Kawj.^{0.5}$,

Ckwhod= dle ceny

Imbd= dle abraziva

dazr= dle abraziva

da= $4.*dazr$, dle abraziva

hx= dle požadavků zákazníka

Kdvdao=0,329,

Roabr= dle abraziva;**Roa**=Roabr,

Rov=1,

Roj= dle abraziva

Rao=3.7,

Yreto=1,

Tcut= $\log_{10}(Emat)$,

Hlim = $10.^{12}/1./Emat.^2$

Kcut= $10.^{12}/1./Emat.^2$;**Kplmat**= $10.^{12}/1./Emat.^2$;**Kawj**=Kcut,

ho= $Hlim/1./Rao$,**SIGm**= $1190.31.*20/1./Kcut$,

h=0.01:0.1:Hlim;**Hrel**= $h/1./Kplmat$;**Hekvp**= $h/1./Kplmat.*100$;**Hrelp**=**Hekvp**;

Ra= $(-10)*(1-Kplmat/1./(Kplmat-h))$;**Kpl**=**Ra.*h**;**figure**;**plot**(**h**,**Ra**,**h**,**Kpl**);**grid**

Eretz= $Emat.*(Kpl/1./Kcut).^0.5$;**Eret**= $Emat.*(Kcut/1./Kpl).^0.5$;**figure**;**plot**(**h**,**Eretz**,**h**,**Eret**,**h**,**Emat**);**grid**

V_{LUZ}= $(Emat.*10.^6).^{(1/3)}$,

Yret= $Kpl/1./Kplmat$;**tanD**= $Yret/1./h$;**tgD**=**tanD**;**EPSyretV**= $10.^3.*Yret/1./Emat$;**Indho**= $\log_{10}(5.41)/1./\log_{10}(ho)$;**figure**;**plot**(**h**,**Ra**,**h**,**Yret**,**h**,**h**);**grid**;**figure**;**plot**(**h**,**Ra**,**h**,**Kpl**,**h**,**Yret**,**h**,**Rao**,**h**,**Kplmat**,**h**,**Yreto**);**grid**

SIGrz= $Eretz.^0.5.*20/1./Kplmat$;**SIGrzx**=**SIGrz.*cos(atan(tgD))**;**SIGret**= $Eret.^0.5$;**SIGklo**= $Emat.^0.5$;**figure**;**plot**(**h**,**SIGrz**,**h**,**SIGrzx**,**h**,**SIGret**,**h**,**SIGklo**);**grid**

SIGrzPlimEPSrz=1001;**EPSrz**=**SIGrz/1./Emat**;**EPSret**=**SIGret/1./Emat**;**EPSklo**=**SIGklo/1./Emat**;**figure**;**plot**(**h**,**EPSrz**,**h**,**EPSret**,**h**,**EPSklo**);**grid**;**SIGrz**= $Eretz.^0.5.*20/1./Kplmat$;**SIGeretz**= $Eretz.^0.5$;**SIGeretzx**= $Eretz.^0.5.*cos(atan(tgD))$;**SIGrzx**=**SIGrz.*cos(atan(tgD))**;**SIGret**= $Eret.^0.5$;**SIGklo**= $Emat.^0.5$;**SIGrz**= $Eretz.^0.5.*20/1./Kplmat$;**SIGeretz**= $Eretz.^0.5$;**SIGeretzx**= $Eretz.$

27.05.11

$\text{fceRasklog} = 1001; \text{SIGpr} = \text{Eret}/1./\text{Emat}; \text{Rarado} = \text{Rao} * 10.^3 * (\text{Emat}).^0.5/1./\text{Emat}; \text{Rarad} = \text{Rao} * 10.^3 * (\text{Eretz}).^0.5/1./\text{Emat}; \text{Rasklog} = (10.^{((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(\text{SIGpr})).^2).^0.5} + \text{Rarad}).^0.5; \text{Raskyo} = 10.^{\log_{10}((\log_{10}(\text{ho})).^2 + (\log_{10}(1/1./\text{Yreto})).^2 + \text{Rarado}).^0.5}, \text{Rasky} = 10.^{\log_{10}((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(1/1./\text{Yret})).^2 + \text{Rarad}).^0.5}; \text{Rarado} = \text{Rao} * 10.^3 * (\text{Emat}).^0.5/1./\text{Emat}; \text{Rarad} = \text{Rao} * 10.^3 * (\text{Eretz}).^0.5/1./\text{Emat}; \text{Rasklog} = (10.^{((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(\text{SIGpr})).^2).^0.5} + \text{Rarad}).^0.5; \text{Rarado} = (\text{Rao} * 10.^3 * (\text{Emat}).^0.5/1./\text{Emat}); \text{Rasklog} = (10.^{((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(\text{Emat}/1./\text{Eret})).^2).^0.5} + \text{Rarad}).^0.5; \text{Rasklogo} = (10.^{((\log_{10}(\text{ho})).^2 + (\log_{10}(\text{Emat}/1./\text{Emat})).^2).^0.5} + \text{Rarado}).^0.5; \text{Rarad} = (\text{Rao} * 10.^3 * (\text{Eretz}).^0.5/1./\text{Emat}); \text{Raradye} = 3.7 * 10.^3 * \text{Yret}.^0.25 * \text{Emat}.^0.5; \text{Rasklogye} = (10.^{((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(\text{SIGpr})).^2).^0.5} + \text{Raradye}).^0.5; \text{Rasky} = 10.^{\log_{10}((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(1/1./\text{Yret})).^2 + \text{Rarad}).^0.5}; \text{Raradye} = 3.7 * 10.^3 * \text{Yret}.^0.25 * \text{Emat}.^0.5; \text{Raske} = 10.^{\log_{10}((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(\text{Eret}/1./\text{Emat})).^2 + (\text{Rarad}).^0.5}; \text{Rasky} = 10.^{\log_{10}((\log_{10}(\text{h})).^2 + (\log_{10}(1/1./\text{Yret})).^2 + \text{Rarad}).^0.5}; \text{figure; plot(h, Ra, h, Rao, h, Rarad, h, Rarado, h, Rasky, h, Raskyo); grid; figure; plot(h, Raske, h, Rasky); grid; figure; plot(h, Rarad, h, Rasklog, h, Rasklogo, h, Raradye); grid$

$\text{arcDo} = \text{atan}(\tan(\text{Yreto}/1./\text{ho})) * 180/1./3.14; \text{arcD} = \text{atan}(\tan(\text{Yret}/1./\text{h})) * 180/1./3.14; \text{figure; plot(h, arcDo, h, arcD, h, Yreto, h, Yret, h, Rao, h, h, Ra, h, Rarad, h, Rarado, h, Rasky, h, Raskyo); grid}$

$\text{Vpopt} = (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{Emat}.^0.5}, \text{Vpostopt} = \text{Vpopt}; \text{Vcutrast} = (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{SIGrz}}; \text{x} = \text{Kplmat}; \text{Kxy} = \text{SIGm}/1./\text{x}; \text{Plim} = \text{Kxy} * \text{h}/1./\text{Rarado}; \text{SIGrasky} = 10.^{-3} * \text{Rasky} * \text{Emat}/1./\text{Rao}; \text{Vcutrasky} = (10.^{-3} * \text{Raskyo}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{SIGrasky}}; \text{SIGrzrast} = 10.^{-3} * \text{Ra} * \text{Emat}/1./(\text{Rao}); \text{SIGrzrarad} = 10.^{-3} * \text{Rarad} * \text{Emat}/1./\text{Rao}; \text{SIGrzrasklog} = 10.^{-3} * \text{Rasklog} * \text{Emat}/1./(\text{Rao}); \text{SIGrzrasklogo} = 10.^{-3} * \text{Rasklogo} * \text{Emat}/1./(\text{Rao}); \text{Vpregulrast} = (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{SIGrzrast}}; \text{Vpregulsigrast} = (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{SIGrz}}; \text{Vpregulararad} = (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{SIGrzrarad}}; \text{Vpregulrasklog} = (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{SIGrzrasklog}}; \text{figure; plot(h, Vpopt, h, Vcutrast, h, Vcutrasky); grid; figure; plot(h, Vpregulararad, h, Vpregulrasklog, h, Vpopt, h, Vpregulrast); grid$

$\text{Pvpopt} = \text{lmbd}.^{-1} * \text{Rov}/1./\text{Roabr} * (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{Vpopt}}, \text{Pvpcut} = \text{lmbd}.^{-1} * \text{Rov}/1./\text{Roabr} * (10.^{-3} * \text{Rao}).^0.5 * 10.^{6/1./\text{Vpopt}}$

```

3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./Vcutrast;Pvpcutx=Pvpcut.*cos(atan(tgD));figure;plot(h,Pvpopt,h,Pvpcut,h,Pvpcutx,h,Vpopt,h,Vcutrast,h,Vcutrasky);grid
ROskd=0.5.*(Emat/1./0.55688/1./4000).^0.33333,
ROskW=(10.^6/1./((10.^12/1./Emat.^2)/1./16).^0.27,
Maho=lmbd.*Rao.^-1.*Kdvdao.*ROskW.*10.^-3.*Vpopt.*60.^-
1.*(Kcut/1./ho),Mahcut=lmbd.*Rao.^-1.*Kdvdao.*ROskW.*10.^-3.*Vcutrast.*60.^-
1.*(Kcut/1./ho);figure;plot(h,Maho,h,Mahcut);grid
Kdvda=2.*Rao.*10.^3.*60.*Maho/1./((lmbd.*ROskW.*Vpostopt.*Rarado),
Kplmat=Kcut;Kplmat=Hlim;Rax=(-10).*(1-Kplmat/1./((Kplmat-
hx)),Emi=0:10000:400000;Kmi=10.^12/1./Emi.^2;Vopti=(10.^-3.*Rao).^0.5.*10.^6.*Emi.^-
0.5;figure;plot(Emi,Kmi,Emi,Vopti);grid
Raradx=Rarado.*hx.*ho.^-1,
Yretx=Rax.*hx/1./Kcut,
arcDx=atan(tan(Yretx/1./hx)).*180/1./3.14
hp=Kcut/1./2
SIGm=1190.31.*20/1./Kcut,
Raskyx=10.^log10((log10(hx)).^2+(log10(1/1./Yretx)).^2+Raradx.^2).^0.5
Feutsto=10.^-3.*Rao.*Emat/1./((Rao)
Feutstx=10.^-3.*Rax.*Emat/1./((Rao)
SIGcutsko=10.^-3.*Raskyo.*Emat/1./((Raskyo)
SIGcutskx=10.^-3.*Raskyx.*Emat/1./((Raskyo)
Rap=(-10).*(1-Kplmat/1./((Kplmat-hp))
Raradp=Rarado.*hp.*ho.^-1,
Yretp=Rap*hp/1./Kcut,
arcDp=atan(tan(Yretp/1./1./hp)).*180/1./3.14,
Raskyp=10.^log10((log10(hp)).^2+(log10(1/1./Yretp)).^2+Raradp.^2).^0.5
Feutstp=10.^-3.*Rap.*Emat/1./((Rao);
SIGcutskp=10.^-3.*Raskyp.*Emat/1./((Raskyo)
Scuto=Feutsto/1./SIGcutsko
Scutp=Feutstp/1./SIGcutskp
Kzro=0.001,dhmcmo=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rao/1./((Rao.*10.^3.*ho)+1)-
(Rao.*10.^3.*ho)/1./Rao);dho=dhmcmo;Udho=10.^-3.*Scuto.*dho
dhmcmp=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rap/1./((Rap.*10.^3.*hp)+1)-
(Rap.*10.^3.*hp)/1./Rap);dhp=dhmcmp;Udhp=10.^-3.*Scutp.*dhp

```

Scutx=Fcustx/1./SIGcutskx

dhmcmx=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rax/1./((Rax.*10.^3.*hx)+1)-

(Rax.*10.^3.*hx)/1./Rax);dhx=dhmcmx;Udhx=10.^-3.*Scutx.*dhx

Gudhod=10.^-3.*Udho.*ROskd

Gudhpd=10.^-3.*Udhp.*ROskd

Gudhxd=10.^-3.*Udhx.*ROskd

Gudhow=10.^-3.*Udho.*ROskW

dhmcmo=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rao/1./((Rao.*10.^3.*ho)+1)-(Rao.*10.^3.*ho)/1./Rao)

dhmcmp=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rap/1./((Rap.*10.^3.*hp)+1)-(Rap.*10.^3.*hp)/1./Rap)

dhmcmx=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rax/1./((Rax.*10.^3.*hx)+1)-(Rax.*10.^3.*hx)/1./Rax)

Dzrrasto=dho.^-1,Dzrrastp=dhp.^-1,Dzrrastx=dhx.^-1

dhmcmraskh=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rasky/1./((Rasky.*10.^3.*h)+1)-

(Rasky.*10.^3.*h)/1./Rasky);dskh=dhmcmraskh;Dzrraskh=dskh.^-

1;figure;plot(h,Dzrrasto,h,Dzrrastp,h,Dzrrastx,h,Dzrraskh,(Kplmat-h),Dzrraskh);grid

dhmcmradh=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Rarad/1./((Rarad.*10.^3.*h)+1)-

(Rarad.*10.^3.*h)/1./Rarad);dradh=dhmcmradh;Dzrradh=dradh.^-

1;figure;plot(h,dhmcmo,h,dhmcmp,h,dhmcmx,h,dradh,(Kplmat-

h),dradh);grid;figure;plot(h,Dzrrasto,h,Dzrrastp,h,Dzrrastx,h,Dzrradh,(Kplmat-

h),Dzrradh);grid

dhmcmrasth=Kzro.*(10.^3.*Kcut.*(Ra/1./((Ra.*10.^3.*h)+1)-

(Ra.*10.^3.*h)/1./Ra);dsth=dhmcmrasth;Dzrrasth=dsth.^-

1;figure;plot(h,dhmcmo,h,dhmcmp,h,dhmcmx,h,dsth);grid;figure;plot(h,Dzrrasto,h,Dzrrastp,h

,Dzrrastx,h,Dzrrasth,(Kplmat-h),Dzrrasth);grid;figure;plot(h,Dzrrasto,h,Dzrrasth,(Kplmat-

h),Dzrrasth,h,Dzrraskh,(Kplmat-h),Dzrraskh,h,Dzrradh,(Kplmat-h),Dzrradh);grid

Gudhpdw=10.^-3.*Udhp.*ROskW

Gudhxdw=10.^-3.*Udhx.*ROskW

SIGyx=SIGm-SIGm.*(cos(arcDx)).^2,

SIGxx=SIGm-SIGm.*(sin(arcDx)).^2

SIGnx=SIGxx-SIGyx

Taux=(SIGxx-SIGyx)/1./2.*sin(2.*arcDx)

TauVx=(SIGxx-SIGyx)/1./2.*sin(2.*arcDx)

SIGyo=SIGm-SIGm.*(cos(arcDo)).^2

SIGxo=SIGm-SIGm.*(sin(arcDo)).^2

SIGno=SIGxo-SIGyo

$\text{Tauo} = (\text{SIGxo} - \text{SIGyo}) / 1.2 * \sin(2 * \text{arcDo})$
 $\text{TauVo} = (\text{SIGxo} - \text{SIGyo}) / 1.2 * \sin(2 * \text{arcDo})$
 $\text{SIGyp} = \text{SIGm} - \text{SIGm} * (\cos(\text{arcDp}))^2$
 $\text{SIGxp} = \text{SIGm} - \text{SIGm} * (\sin(\text{arcDp}))^2$
 $\text{SIGnp} = \text{SIGxp} - \text{SIGyp}$
 $\text{Taup} = (\text{SIGxp} - \text{SIGyp}) / 1.2 * \sin(2 * \text{arcDp})$
 $\text{TauVp} = (\text{SIGxo} - \text{SIGyp}) / 1.2 * \sin(2 * \text{arcDp})$
 $\text{Tpopt} = \text{Hlim} / 1 / (\text{ho} * \text{Vpostopt} * 60.^{-1})$
 $\text{Tphxopt} = \text{hx} / 1 / (\text{ho} * \text{Vpostopt} * 60.^{-1})$
 $\text{Mavpopt} = \text{Rao}.^{-1} * \text{lmbd} * \text{Kdvda} * \text{ROskW} * 10.^{-3} * \text{Vpostopt} * 60.^{-1} * (\text{Kcut} / 1 / \text{ho}), \text{Mavpoptx} = \text{Mavpopt} * \text{Tphxopt}, \text{Mio} = 0.5 * \text{Emat}.^{0.5} / 1 / \text{SIGm}$
 $\text{Mio} = 0.5 * ((\text{Emat}.^{0.5} / 1 / \text{SIGm}).^2).^{0.5}; \text{Astrobj} = ((1 - 2 * \text{Mio}) / 1 / (6 * \text{Emat}) * (\text{SIGm} + \text{SIGm}).^2).^{0.5}; \text{Atstr} = (1 + \text{Mio}) / 1 / (3 * \text{Emat}) * (\text{SIGm}.^2 + \text{SIGm} * \text{SIGm}); \text{Acelstr} = 1.5 * (\text{Astrobj} + \text{Atstr}), \text{SIGeret} = \text{Eret}.^{0.5}; \text{SIGyield} = \text{SIGeret}; \text{SIGyieldo} = \text{Emat}.^{0.5}, \text{Mixao} = 0.5 * \text{Emat}.^{0.5} / 1 / \text{SIGm}; \text{Mixa} = 0.5 * ((\text{Emat} * (\text{Kplmat} / 1 / (\text{Ra} * \text{h})).^{0.5}).^{0.5} / 1 / (1190.31 * 20 / 1 / (\text{Ra} * \text{h} / 1 / \text{Yret}))); \text{Mixa} = 0.5 * \text{SIGeret} / 1 / \text{SIGm}; \text{Mixao} = 0.5 * \text{SIGyieldo} / 1 / \text{SIGm}; \text{SIGmXao} = \text{SIGyieldo} + \text{SIGyieldo} * \text{Mio} / 1 / \text{Mixao}; \text{SIGmXa} = \text{SIGeret} + \text{SIGeret} * \text{Mio} / 1 / \text{Mixa}; \text{MiXa} = 0.5 * (1 - \text{SIGeret} / 1 / \text{SIGmXa}); \text{MiXao} = 0.5 * (1 - \text{SIGyieldo} / 1 / \text{SIGmXao}); \text{figure}; \text{plot}(\text{h}, \text{SIGmXa}, \text{h}, \text{SIGmXao}, \text{h}, \text{SIGm}, \text{h}, \text{SIGeret}, \text{h}, \text{SIGyieldo}); \text{grid}; \text{figure}; \text{plot}(\text{h}, \text{Mixa}, \text{h}, \text{Mio}, \text{h}, \text{MiXa}, \text{h}, \text{MiXao}); \text{grid}$
 $\text{Tphxopto} = \text{ho} / 1 / (\text{ho} * \text{Vpostopt} * 60.^{-1})$
 $1), \text{Tpoptho} = \text{Tphxopto}; \text{Ncelstr} = \text{Acelstr} / 1 / \text{Tphxopto}; \text{figure}; \text{plot}(\text{h}, \text{Astrobj}, \text{h}, \text{Atstr}, \text{h}, \text{Acelstr}); \text{grid}$
 $\text{Tphcut} = \text{h} / 1 / (\text{ho} * \text{Vcutrast} * 60.^{-1})$
 $1); \text{Ncelstrcut} = \text{Acelstr} / 1 / \text{Tphcut}; \text{figure}; \text{plot}(\text{h}, \text{Tphxopto}, \text{h}, \text{Tphcut}, \text{h}, \text{Ncelstr}, \text{h}, \text{Ncelstrcut}, \text{h}, \text{Acelstr}); \text{grid}$
 $\text{Fcutst} = 10.^{-3} * \text{Ra} * \text{Emat} / 1 / (\text{Rao}); \text{SIGcutsk} = 10.^{-3} * \text{Rasky} * \text{Emat} / 1 / (\text{Raskyo}); \text{Scut} = \text{Fcutst} / 1 / \text{SIGcutsk}; \text{figure}; \text{plot}(\text{h}, \text{Fcutst}, \text{h}, \text{SIGcutsk}, \text{h}, \text{Scut}, \text{h}, \text{Fcutsto}, \text{h}, \text{SIGcutsko}, \text{h}, \text{Scuto}); \text{grid}$
 $\text{Kzro} = 0.001, \text{dhmcmcut} = \text{Kzro} * (10.^3 * \text{Kcut} * (\text{Ra} / 1 / (\text{Rao} * 10.^3 * \text{ho}) + 1) - (\text{Rao} * 10.^3 * \text{ho}) / 1 / \text{Rao}); \text{dhcut} = \text{dhmcmcut}; \text{Udhcut} = 10.^{-3} * \text{Scut} * \text{dhcut}; \text{figure}; \text{plot}(\text{h}, \text{dhmcmo}, \text{h}, \text{dhmcmcut}, \text{h}, \text{Udho}, \text{h}, \text{Udhcut}, \text{h}, \text{Scut}, \text{h}, \text{Scuto}); \text{grid}$

```

Xdhmcmo=ho/1./ (10.^-3.*dhmcmo),Xdhmcmx=hx/1./ (10.^-
3.*dhmcmx),Xdhmcmcut=h/1./ (10.^-
3.*dhmcmcut);figure;plot(h,Xdhmcmo,h,Xdhmcmcut);grid
Nstrhod=10.^-3.*Ncelstr.*3600,Ncelstrcuthod=10.^-
3.*Ncelstrcut.*3600;figure;plot(h,Nstrhod,h,Ncelstrcuthod);grid
Ccutxhod=Nstrhod.*Ckwhod,Cskcutxhod=Ncelstrcuthod.*Ckwhod;Cskcutxsm=Ncelstrcuthod.*Ckwhod.*7;Cskcutxrok=Ncelstrcuthod.*Ckwhod.*7.*280;
Vpostopt=Vpostopt,Lhxcuthod=10.^-3.*Vpostopt.*60,Lhxcutsm=10.^-
3.*Vpostopt.*60.*7,Lhxcutrok=10.^-3.*Vpostopt.*60.*7.*280,
CcelLhj=10.*Ccutxhod/1./Lhxcuthod,CskcelLhj=10.*Cskcutxhod/1./Lhxcuthod;figure;plot(h
,CcelLhj,h,CskcelLhj);grid,figure;plot(h,Nstrhod,h,Ncelstrcuthod,h,Ccutxhod,h,Cskcutxhod,h
,Lhxcuthod,h,CcelLhj);grid
GudhoD=10.^-3.*Udho.*ROskd,GudhoW=10.^-3.*Udho.*ROskW,GudcuthoD=10.^-
3.*Udhcut.*ROskd;Gudcuthod=GudcuthoD;GudcuthoW=10.^-
3.*Udhcut.*ROskW;Gudcuthow=GudcuthoW;figure;plot(h,GudhoD,h,GudhoW,h,GudcuthoD,h,GudcuthoW);grid
GhxkgWhod=Xdhmcmx.*Gudhwx.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-
3,GeutkgWhod=Xdhmcmcut.*GudcuthoW.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-3;
GhxkgDhod=Xdhmcmx.*Gudhxd.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-
3,GeutkgDhod=Xdhmcmcut.*GudcuthoD.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-3;
GhxkgWsm=Xdhmcmx.*Gudhwx.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*10^-
3,GeutkgWsm=GeutkgWhod.*7;
GhxkgDsm=Xdhmcmx.*Gudhxd.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*10^-3,GeutkgDsm=GudcuthoD.*7;
GhxkgWrok=Xdhmcmx.*Gudhwx.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*280.*10^-
3,GeutkgWrok=GeutkgWsm.*280;GeuttunaWrok=GeutkgWsm.*280.*10.^-3;
GhxkgDrok=Xdhmcmx.*Gudhxd.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*280.*10^-
3,GeutkgDrok=GeutkgWsm.*280;GeuttunaDrok=GeutkgWsm.*280.*10.^-3;
GhokgWhod=Xdhmcmo.*Gudhow.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-
3,GhcutkgWhod=Xdhmcmcut.*Gudcuthow.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-
3;figure;plot(h,GhokgWhod,h,GhcutkgWhod);grid
GhokgDhod=Xdhmcmo.*Gudhod.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-
3,GhcutkgDhod=Xdhmcmcut.*Gudcuthod.*Lhxcuthod.*10.^3.*10^-
3;figure;plot(h,GhokgDhod,h,GhcutkgDhod);grid

```

GhokgWsm=Xdhmemo.*Gudhow.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*10^-
 3,GhcutkgWsm=Xdhmcut.*Gudcuthow.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*10^-
 3;figure;plot(h,GhokgWsm,h,GhcutkgWsm);grid
GhokgDsm=Xdhmemo.*Gudhod.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*10^-
 3,GhcutkgDsm=Xdhmcut.*Gudcuthod.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*10^-
 3;figure;plot(h,GhokgDsm,h,GhcutkgDsm);grid
GhokgWrok=Xdhmemo.*Gudhow.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*280.*10^-3,GhotunaWrok=10.^-
 3.*GhokgWrok;GhcutkgWrok=Xdhmcut.*Gudcuthow.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*280.*10^-
 3;figure;GhcuttunaWrok=10.^-
 3.*GhcutkgWrok;plot(h,GhokgWrok,h,GhcutkgWrok,h,GhotunaWrok,h,GhcuttunaWrok);grid
GhokgDrok=Xdhmemo.*Gudhod.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*280.*10^-
 3,GhcutkgDrok=Xdhmcut.*Gudcuthod.*Lhxcuthod.*10.^3.*7.*280.*10^-
 3;GhotunaDrok=10.^-3.*GhokgDrok,GhcuttunaDrok=10.^-
 3.*GhcutkgDrok;figure;plot(h,GhokgDrok,h,GhcutkgDrok,h,GhotunaDrok,h,GhcuttunaDrok)
 ;grid
Mavpoptk=lmbd.*Kdvda.*ROskW.*10.^-3.*Vpostopt.*60.^-
 1.*(Kcut/1./ho);Mavpoptcut=lmbd.*Kdvda.*ROskW.*10.^-3.*Vcutrast.*60.^-
 1.*(Kcut/1./h);figure;plot(h,Mavpoptk,h,Mavpoptcut);grid
Mavpopthodk=Mavpoptk.*3600
Mavpopthod=Mavpopt.*3600,KkomplNVr=0.01404.*2.718.^(-Emat/1./-38120.35969) +
 0.27047.*2.718.^(-Emat/1./1.81394E90),KkomplVNr=(0.01404.*2.718.^(-Emat/1./-
 38120.35969) + 0.27047.*2.718.^(-Emat/1./1.81394E90)).^-1,
Ccelxsm=10.*Nstrhod.*Ckwhod.*7,Ccelstrecutsm=10.*Ncelstrecuthod.*Ckwhod.*7;figure;plot(h,Ccelxsm,h,Ccelstrecutsm);grid
Ccelxrok=10.*Nstrhod.*Ckwhod.*7.*280,Ccelstrecutrok=10.*Ncelstrecuthod.*Ckwhod.*7.*280;
 figure;plot(h,Ccelxrok,h,Ccelstrecutrok);grid
Ccelxhod=10.*Nstrhod.*Ckwhod,Ccelstrecuthod=10.*Ncelstrecuthod.*Ckwhod;figure;plot(h,Ccelxhod,h,Ccelstrecuthod);grid
CcelhtunaDrok=10.^3.*Ccelxrok/1./GhcutkgDrok;CcelhotunaDrok=10.^3.*Ccelxrok/1./GhokgDrok;
 figure;plot(h,CcelhtunaDrok,h,CcelhotunaDrok);grid
CcelhtunaWrok=10.^3.*Ccelxrok/1./GhcutkgWrok;CcelhotunaWrok=10.^3.*Ccelxrok/1./GhokgWrok;
 figure;plot(h,CcelhtunaWrok,h,CcelhotunaWrok);grid;figure;plot(h,CcelhtunaWrok,

```

k,h,CcelhotunaWrok,h,CcelhtunaDrok,h,CcelhotunaDrok);grid,figure;plot(CcelhtunaWrok,G
hcutkgWrok.*10.^-3);grid
ROskdkontr=Gudhxd/1./(10.^-3.*Udhx)
RoskWkontr=Gudhxd/1./(10.^-3.*Udhx)
Vpostoptk=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./Emat.^0.5,UZkpl=(Emat.*10.^6).^0.3333,UZkpli=(Eret.*10.^6).^0.33
33;figure;plot(h,UZkpl,h,UZkpli);grid
Pvpoptk=lmbd.^-1.*Rov/1./Roabr.*(10.^-3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./Vpostopt,
Mavpoptk=Rao.^-1.*lmbd.*Kdvda.*ROskW.*10.^-3.*Vpostopt.*60.^-1.*(Kcut/1./ho)
Kdvdk=2.*Rao.*10.^3.*60.*Maho/1./(lmbd.*ROskW.*Vpostopt.*Rarado),
PRODUKTnanox=1001;CcuttunaWrok=Ccelxrok/1./GhcuttunaWrok;CcuttunaDrok=Ccelxr
ok/1./GhcuttunaDrok;figure;plot(CcuttunaWrok,GhcuttunaWrok,CcuttunaDrok,GhcuttunaDr
ok,CcuttunaDrok,h);grid
va=(2.*Pvpopt.*1000/1./(Roj.*1000))^0.5,
Ckh=4.*Mavpopt/1./(3.14.*Roa.*1000.*va.*da.^2),
da=10.*4.*Mavpopt/1./(Ckh.*3.14.*Roa.*1000.*va).^0.5;damm=10.*10.^3.*(4.*Mavpopt/1./
(Ckh.*3.14.*Roa.*1000.*va).^0.5),
dv=da.*Kdvda;dvm=damm.*Kdvda,
fceVteorHteorVhlHhl=1001;Sp=1;HlimHL=Kcut;hv=0:1:Kcut;VpHL=((Ckh.*Sp.*3.14.*0.
00025.*(2.*1300.*3000000.^3.*2.178.^(-5.*0.6.*1)).^0.5.*(1-0.5.^2)).*(8.*hv.*10.^-
3.*(3000000.*7800.*0.5.^2.*2.178.^(-2.*0.6.*1)+600.*10.^6.*1300)).^(-1)).^0.67-
0.0001;hteor=Ra.^-1.*Kplmat.*(((10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./Vcutrast).^2/1./Emat).^2;figure;plot(hv,VpHL.*1000.*60);grid,figure;
plot(hteor,Vcutrast);grid,figure;plot(hv,VpHL.*1000.*60,hteor,Vcutrast);grid
Ckhm=0.74414.*(0.04133 + 1.93305.*2.718.^(-Emat/1./13119.96742) + 0.25291.*2.718.^(-
Emat/1./322550.21047))
E=10000:10000:700000;Ckhe=0.74414.*(0.04133 + 1.93305.*2.718.^(-E/1./13119.96742) +
0.25291.*2.718.^(-E/1./322550.21047));
damme=10.^3.*10.^4.*Mavpopt/1./(Ckhe.*3.14.*Roa.*1000.*va).^0.5;dvmme=Kdvdk.*da
mme;figure;plot(E,Ckhe,E,damme,E,dvmme);grid
dammh=10.^3.*10.^4.*Mavpoptcut/1./(Ckh.*3.14.*Roa.*1000.*va).^0.5;dvmmh=Kdvdk.*
dammh;figure;plot(h,dammh,h,dvmmh);grid
OKfceMacut=1001;Mavpoptthinxy=100.*(2.*Rao.^2.*lmbd.*Kdvda.*ROskW.*10.^-
3.*Vpostopt.*60.^-

```


$1) \cdot (ho/1./Kcut+h/1./Kcut)/1./\cos(\text{atan}(\text{tgD})).^1; \text{Mavpophthinvo}=100 \cdot (2 \cdot \text{Rao} \cdot ^2 \cdot \text{Imbd} \cdot \text{K}$
 $\text{dvda} \cdot \text{ROskW} \cdot ^{10} \cdot ^{-3} \cdot \text{Vpostopt} \cdot ^{60} \cdot ^{-}$
 $1) \cdot (ho/1./Kcut+h/1./Kcut); \text{figure}; \text{plot}(\text{Mavpophthinvy}, h, \text{Mavpophthinvo}, h); \text{grid}$
ROZBORxABRAZE=2222; $\text{SIGrzo}=\text{Emat} \cdot ^{0.5}; \text{SIGabr}=\text{SIGrzo} \cdot \text{Pvpcut}; \text{SIGabro}=\text{SIGrzo} \cdot$
 $\text{Pvpoptk}, \text{SIGabrXY}=\text{SIGabr}/1./\cos(\text{atan}(\text{tgD})).^{\text{Kplmat}}; \text{Srah}=\text{Ra} \cdot h \cdot ^{10} \cdot ^{-}$
 $3; \text{Sraskh}=\text{Rasky} \cdot h \cdot ^{10} \cdot ^{-}$
 $3; \text{Fabr}=\text{SIGabr} \cdot \text{Srah}; \text{Fabrxy}=\text{Fabr}/1./\cos(\text{atan}(\text{tgD})); \text{FabrXY}=\text{Fabr}/1./\cos(\text{atan}(\text{tgD})).^{\text{Kplm}}$
 $\text{at}; \text{SIGcutabrsk}=\text{SIGcutsk} \cdot \text{Pvpcut}; \text{SIGcutabrsko}=\text{SIGcutsko} \cdot$
 $\text{Pvpoptk}, \text{SIGabrskV}=(\text{SIGcutabrsk} \cdot ^2 + \text{SIGabr} \cdot ^2) \cdot ^{0.5}; \text{SIGabrskVo}=(\text{SIGcutabrsko} \cdot ^2 + \text{SIGa}$
 $\text{bro} \cdot ^2) \cdot ^{0.5}, \text{Sraskh}=\text{Rasky} \cdot h \cdot ^{10} \cdot ^{-3}; \text{Sraskho}=\text{Raskyo} \cdot ho \cdot ^{10} \cdot ^{-}$
 $3, \text{FabrskV}=\text{SIGabrskV} \cdot \text{Sraskh}; \text{FabrskVo}=\text{SIGabrskVo} \cdot \text{Sraskho}, \text{Fabrsk}=\text{SIGabr} \cdot \text{Sraskh}; \text{Fa}$
 $\text{brskXY}=\text{Fabrsk}/1./\cos(\text{atan}(\text{tgD})).^{\text{Kplmat}}; \text{Fabrskx}=\text{Fabrsk} \cdot \cos(\text{atan}(\text{tgD})); \text{Srah}=10 \cdot ^{-}$
 $3 \cdot \text{Ra} \cdot h; \text{Sraho}=10 \cdot ^{-}$
 $3 \cdot \text{Rao} \cdot ho, \text{FabrV}=\text{SIGabrskV} \cdot \text{Srah}; \text{FabrskVo}=\text{SIGabrskVo} \cdot \text{Sraskho}, \text{FabrVo}=\text{SIGabrskVo}$
 $\cdot \text{Sraho}, \text{RqhodsklogV}=\log_{10}(5.41)/1./\log_{10}(ho) \cdot \text{Rao} \cdot ((\log(h) \cdot ^2 + \log((h \cdot \text{tgD}) \cdot ^{-}$
 $1) \cdot ^{0.25}) \cdot ^2) \cdot ^{0.333}; \text{RqhodsklogxxxV}=\text{RqhodsklogV} \cdot \cos(\text{atan}(\text{tgD})).^{\text{Indho} \cdot ^{-}$
 $1); \text{SIGrzhoxV}=10 \cdot ^{-}$
 $3 \cdot \text{Emat} \cdot ^2 \cdot \text{RqhodsklogxxxV}/1./\text{Rao}; \text{SIGrzhoxVVV}=\text{SIGrzhoxV} \cdot (20/1./\text{Kplmat}) \cdot ^{0.5}; \text{fi}$
 $\text{gure}; \text{plot}(h, \text{SIGabr}, h, \text{SIGabrskV}, h, \text{FabrskV}, h, \text{Sraskh}, h, \text{SIGabr}, h, \text{FabrVo}, h, \text{Yret}); \text{grid}, \text{figure}; \text{p}$
 $\text{lot}(h, \text{SIGabr}, h, \text{SIGabrXY}, h, \text{FabrskXY}, h, \text{Fabrskx}, h, \text{SIGrzhoxVVV}, h, \text{Sraskh}, h, \text{Sraskh}/1./h); \text{g}$
 rid
PRODUKTnano=1001; $\text{CcuttunaWrok}=\text{Ccelxrok}/1./\text{GhcuttunaWrok}; \text{CcuttunaDrok}=\text{Ccelxro}$
 $\text{k}/1./\text{GhcuttunaDrok}; \text{figure}; \text{plot}(\text{CcuttunaWrok}, \text{GhcuttunaWrok}, \text{CcuttunaDrok}, \text{GhcuttunaDro}$
 $\text{k}, \text{CcuttunaDrok}, h); \text{grid}$
feeNOVAxSIGrzhoxVB=1001; $\text{EPSyretV}=10 \cdot ^3 \cdot \text{Yret}/1./\text{Emat}; \text{Indho}=\log_{10}(5.41)/1./\log_{10}$
 $(ho); \text{Yreto}=1; \text{Rarado}=\text{Rao} \cdot ^{10} \cdot ^3 \cdot (\text{Emat}) \cdot ^{0.5}/1./\text{Emat}; \text{Kcut}=\text{Kplmat}; \text{SIGm}=1190.31 \cdot 20/1.$
 $/\text{Kcut}, \text{SIGret}=\text{Eret} \cdot ^{0.5}; \text{Yret}=\text{Kpl}/1./\text{Kcut}; \text{tgD}=\tan(\text{Yret}/1./h); \text{arcD}=\text{atan}(\text{tgD}) \cdot ^{180}/1./3.14; x=$
 $\text{Kplmat}; \text{Kxy}=\text{SIGm}/1./x;$
 $\text{Plim}=\text{Kxy} \cdot h; \text{EPSyretV}=10 \cdot ^3 \cdot \text{Yret}/1./\text{Emat}; \text{Indho}=\log_{10}(5.41)/1./\log_{10}(ho); \text{Rqhodsklog}=\log_{10}(5.41)/1./\log_{10}(ho) \cdot \text{Rao} \cdot ((\log(h) \cdot ^2 + \log((h \cdot \text{tgD}) \cdot ^{-}$
 $1) \cdot ^{0.25}) \cdot ^2) \cdot ^{0.333}/1./\cos(\text{atan}(\text{tgD})); \text{RqhodsklogV}=\log_{10}(5.41)/1./\log_{10}(ho) \cdot \text{Rao} \cdot ((\log(h)$
 $) \cdot ^2 + \log((h \cdot \text{tgD}) \cdot ^{-}$
 $1) \cdot ^{0.25}) \cdot ^2) \cdot ^{0.333}; \text{RqhodsklogxxxV}=\text{RqhodsklogV} \cdot \cos(\text{atan}(\text{tgD})).^{\text{Indho} \cdot ^{-}$
 $1); \text{Rqhodsklogxxx}=\text{Rqhodsklog} \cdot \cos(\text{atan}(\text{tgD})).^{\text{Indho} \cdot ^{-1}}; \text{SIGrzhoxV}=10 \cdot ^{-}$

3.*Emat.*2.*RqhodsklogxxxV/1./Rao;SIGrzqhoxVV=10.^-

3.*Emat.*RqhodsklogxxxV/1./Rarado;EPSelrzq=SIGrzqhoxV/1./Emat;SIGrzqEPSabsH=100
1;EPSelrzq=SIGrzqhoxV/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;Kekvhpel=27/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./
0.006;RqhodsklogVB=log10(5.41)/1./log10(ho).*Rao.*((log(h).^2+log((h.*tgD).^-
1).^0.25).^2).^0.5;RqhodsklogxxxVB=RqhodsklogVB.*cos(atan(tgD)).^(3.*Indho.^-
1);SIGrzqhoxVB=10.^-

3.*Emat.*2.*RqhodsklogxxxVB/1./Raskyo;Kekvhel=27/1./0.006;figure;plot(EPSyretV,SIGrzqhoxVB,EPSyretV,SIGrzqhoxV);grid,figure;plot(h,SIGrzqhoxVB,h,SIGrzqhoxV);grid
komplMOHRxrozkladHabsHrelp=1001;SIGind=SIGm;SIGy=SIGind-
SIGind.*(cos(atan(tgD))).^2;SIGx=SIGind-SIGind.*(sin(atan(tgD))).^2;SIGn=SIGx-
SIGy;Tau=(SIGx-SIGy)/1./2.*sin(2.*atan(tgD).*180/1./3.14);TauV=(SIGx-
SIGy)/1./2.*sin(2.*atan(tgD).*180/1./3.14);Yretn=Yret.*cos(atan(tgD));arcD=atan(tgD).*180/1./3.14;SIGy=SI
Gind-SIGind.*(cos(atan(tgD))).^2;SIGx=SIGind-
SIGind.*(sin(atan(tgD))).^2;SIGn=SIGind.*(cos(atan(tgD))).^2+SIGind.*(sin(atan(tgD))).^2;
SIGn=SIGx-SIGy;Yretn=Yret.*cos(atan(tgD));Tau=(SIGx-
SIGy)/1./2.*sin(2.*atan(tgD).*180/1./3.14);TauV=(SIGx-
SIGy)/1./2.*sin(2.*atan(tgD).*180/1./3.14);arcD=atan(tgD).*180/1./3.14;arcDr=atan(tgD);SIGy=SIGind-
SIGind.*(cos(atan(tgD))).^2;SIGx=SIGind-
SIGind.*(sin(atan(tgD))).^2;SIGn=SIGind.*(cos(atan(tgD))).^2+SIGind.*(sin(atan(tgD))).^2;
SIGn=SIGx-
SIGy;Yretn=Yret.*cos(atan(tgD));EPSelrzq=SIGrzqhoxV/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;Kekvhpe
l=27/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;figure;plot(EPSelrzq.*Kekvhpel,SIGrzqhoxVB,Hrelp,
SIGy,Hrelp,SIGx,Hrelp,SIGn,Hrelp,h,Hrelp,Tau,Hrelp,TauV,Hrelp,arcD,Hrelp,Yret,Hrelp,SIGrzqhoxVB);grid,figure;plot(EPSelrzq.*Khel,SIGrzqhoxVB,h,SIGy,h,SIGx,h,SIGn,h,h,h,Tau
,h,TauV,h,arcD,h,Yret,h,SIGrzqhoxVB);grid
komplMOHRxrozkladEPSyretV=1001;figure;plot(EPSelrzq,SIGrzqhoxVB,EPSyretV,SIGy
.EPSyretV,SIGx,EPSyretV,SIGn,EPSyretV,h,EPSyretV,Tau,EPSyretV,TauV,EPSyretV,arcD,
EPSyretV,Yret,EPSyretV,SIGrzqhoxVB);grid
Tphcut=h/1./((ho.*Vcutrast.*60.^-1);Tphcuto=ho/1./((ho.*Vpostopt.*60.^-
1);Tphcuth=Tphcuto.*h/1./ho;figure;plot(h,Tphcut,h,Tphcuto,h,Tphcuth);grid
ROZBORxFcutFabrxPvpvSIGxHefekt=1001;Fcutrask=SIGcutsk.*Srah;Fcutrzra=SIGrz.*S
rah;Sraho=10.^-

3.*Rao.*ho;Fcutrasko=SIGcutsko.*Sraho;Fcutrzrao=SIGrzo.*Sraho;SIGrzo=Emat.^0.5;Pvp
cuto=Pvpopt;figure;plot(h,SIGcutsk,h,SIGcutsko,h,SIGrz,h,SIGrzo,h,SIGrx,h,Fcutrask,h,Fcut

rzra,h,Fcutrasko,h,Sraskh,h,Sraskho,h,Pvpcut,h,Pvpcutx,h,Pvpcuto,h,Yret,h,SIGabrskV,h,SIG
rzqhoxVB,h,Ra,h,Rarad,h,Rasky,h,arcD);grid

NOVAfceSIGefxEPSyretV=1001;SIGef=Kplmat/1./20.*(Plim.*SIGrzqhoxVB).^0.5;EPSele
f=SIGef/1./Emat;EPSelef=ho/1./0.006.*EPSelef;figure;plot(EPSelef,SIGef,h,SIGef,h,Plim)
;grid

KOMPLAWJREZxABRxTphcutxTUH=2222;Tphcut=h/1./(ho.*Vcutrast.*60.^-
1);Hrelp=h/1./Kplmat.*100;SIGrz=(Eretz).^0.5.*20/1./Kplmat;SIGrx=SIGrz.*cos(atan(tgD))
;Khel=ho/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrx=SIGrx/1./Emat;SIGabr=SIGrx-
Pvpcut;SIGabrXY=SIGabr/1./cos(atan(tgD)).^Kplmat;Srah=Ra.*h.*10.^-
3;Sraskh=Rasky.*h.*10.^-
3;Fabr=SIGabr.*Srah;Fabrxy=Fabr/1./cos(atan(tgD));FabrXY=Fabr/1./cos(atan(tgD)).^Kplm
at;Fabrsk=SIGabr.*Sraskh;FabrskXY=Fabrsk/1./cos(atan(tgD)).^Kplmat;EPSelrzqVB=SIGrz
qhoxVB/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;EPSelrzqVBh=EPSelrzqVB.*Khel;Kekvhel=27/1./0.006
;EPSelrzqVBekvp=EPSelrzqVB.*Kekvhel;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzqVByret=EPSelr
zqVB.*Kyretel;figure;plot(EPSelrzqVB,SIGrzqhoxVB,EPsyretV,SIGrzqhoxVB,EPsyretV,P
vpopt,EPsyretV,Pvpcut,EPsyretV,Pvpcutx,EPsyretV,Vpopt,EPsyretV,Vcutrast,EPsyretV,V
cutrasky,EPsyretV,SIGrx,EPsyretV,SIGrz,EPsyretV,Mavpophinvxy,EPsyretV,Mavpophi
nvho,EPsyretV,arcD,EPsyretV,Yret,EPsyretV,Ra,EPsyretV,Rarad,EPsyretV,Rasky,EPsyret
V,SIGabr,EPsyretV,Fabr,EPsyretV,Fabrsk,EPsyretV,Plim,EPsyretV,Yret,EPsyretV,SIGabr
XY,EPsyretV,FabrXY);grid

ABRAZEslozky=1001;SIGabrskV;FabrskXY=Fabrsk/1./cos(atan(tgD)).^Kplmat;Fabrsk=SI
Gabr.*Sraskh;Fabrskx=Fabrsk.*cos(atan(tgD));figure;plot(h,SIGabr,h,SIGabrXY,h,Fabrskx,h
,FabrskXY);grid

SIGrzqEPSxHekvp=1001;SIGkl=Eret.^0.5;SIGklo=Emat.^0.5;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/
1./Emat;Kekvhel=27/1./0.006;figure;plot(EPSelrzq.*Kekvhel,SIGrzqhoxVB,Hekvp,SIGrz,He
kvp,SIGyield,Hekvp,SIGret,Hekvp,SIGyieldo,Hekvp,SIGrzqhoxVB,Hekvp,SIGrzqhoxVV,H
ekvp,Plim,Hekvp,Yret);grid

SIGrzqEPSxYret=1001;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/1./Emat;Kyretel=Yreto/1./0.006;figure;
plot(EPSelrzqVB.*Kyretel,SIGrzqhoxV,Yret,SIGrz,Yret,SIGret,Yret,SIGklo,Yret,SIGrzqhox
VB,Yret,SIGrzqhoxVV,Yret,Plim,Yret,Yret,SIGyield,Yret,SIGyieldo);grid

SIGrzqEPSabsH=1001;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;figure;plot(E
PSelrzqVB.*Khel,SIGrzqhoxV,h,SIGrz,h,SIGret,h,SIGklo,h,SIGrzqhoxVB,h,SIGrzqhoxVV,
h,Plim,h,Yret,h,SIGyield,h,SIGyieldo);grid

SIGrzqEPSretV=1001;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/1./Emat;Kyretel=Yreto/1./0.006;figure;plot(EPSelrzqVB,SIGrzqhoxVB,EPsYretV,SIGrz,EPsYretV,SIGret,EPsYretV,SIGklo,EPsYretV,SIGrzqhoxVB,EPsYretV,SIGrzqhoxVV,EPsYretV,Plim,EPsYretV,Yret,EPsYretV,SIGyield,EPsYretV,SIGyieldo);grid,

SIGrz=Eretz.^0.5.*20/1./Kplmat;SIGrx=SIGrz.*cos(atan(tgD));EPSelr=SIGrz/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;Kekvhel=27/1./0.006;figure;plot(EPSelr.*Khel,SIGrz,h,SIGrz,h,SIGrx,h,Plim,h,Yret);grid,figure;plot(EPSelr,SIGrz,EPsYretV,SIGrz,EPsYretV,SIGrx,EPsYretV,Plim,EPsYretV,Yret);grid,figure;plot(EPSelr.*Kyretel,SIGrz,Yret,SIGrz,Yret,SIGrx,Yret,Plim,Yret,Yret);grid,figure;plot(EPSelr.*Kekvhel,SIGrz,Hekvp,SIGrz,Hekvp,SIGrx,Hekvp,Plim,Hekvp,Yret,Hekvp,SIGyield,Hekvp,SIGyieldo);grid,figure;plot(EPSelrzqVB.*Khel,SIGrzqhoxVB,h,SIGyield,h,SIGyieldo,h,SIGkl,h,SIGklo,h,SIGrzqhoxVB,h,SIGrz,h,SIGrx);grid

KOMPLAWJREZxABRxHabsxVxTcutTUHxMOD=3333;Hrelp=h/1./Kplmat.*100;SIGrz=(Eretz).^0.5.*20/1./Kplmat;SIGrx=SIGrz.*cos(atan(tgD));Khel=ho/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrx=SIGrx/1./Emat;SIGabr=SIGrx-Pvpcut;Srah=Ra.*h.*10.^-

3;Sraskh=Rasky.*h.*10.^-

3;Fabr=SIGabr.*Srah;Fabrxy=Fabr/1./cos(atan(tgD));Fabrsk=SIGabr.*Sraskh;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;EPSelrzqVBh=EPSelrzqVB.*Khel;Kekvhpel=27/1./0.006;EPSelrzqVBekvp=EPSelrzqVB.*Kekvhpel;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzqVBh=EPSelrzqVB.*Khel;figure;plot(EPSelrzqVBh,SIGrzqhoxVB,h,SIGrzqhoxVB,h,Pvpopt,h,Pvpcut,h,Pvpcutx,h,Vpopt,h,Vcutrast,h,Vcutrasky,h,Sraskh,h,Ra,h,Rarad,h,Rasky,h,SIGabr,h,Fabr,h,Fabrsk,h,Yret,h,SIGabrXY,h,FabrXY,h,Eretz,h,Eret,h,Emat,h,Emat.^-1,h,Eret.^-1,h,Eretz.^-1,h,Tphcut);grid

fceVdefhxVdefoxVpopto=1001;EPsYretV=10.^3.*Ra.*h.*Kplmat.^-

1/1./Emat;EPsYretV=10.^3.*Yret/1./Emat;EPsYretVo=10.^3.*Rao.*ho.*Kplmat.^-

1/1./Emat,Vdefho=ho/1./(EPsYretVo.*Tpoptho.*ho.^-

1);Vdefh=ho/1./(EPsYretV.*Tpoptho.*h.^-1);Tdefh=Vdefh.^-

1;figure;plot(Hekvp,Vdefho,Hekvp,Vdefh,Hekvp,Tdefh,Hekvp,Yret);grid,

fceHLADxSIGrzqhoxVB=1001;SIGrzqhoxVB=10.^-

3.*Emat.*2.*((log10(5.41)/1./log10(ho)).*Rao.*((log(h).^2+log((Yret).^-

1).^0.25).^2).^0.5).*cos(atan(Yret/1./h)).^(3.*Indho.^-

1))/1./(10.^log10((log10(ho)).^2+(log10(1/1./Yreto)).^2+Rarado.^2).^0.5);figure;plot(h,SIGrzqhoxVB);grid

```

fceHLADkomplMOHRxrozkladHabsHrelp=1001;SIGind=SIGm;SIGy=SIGind-
SIGind.*(cos(atan(Yret/1./h))).^2;SIGx=SIGind-
SIGind.*(sin(atan(Yret/1./h))).^2;SIGn=SIGx-SIGy;Tau=(SIGx-
SIGy)/1./2.*sin(2.*atan(Yret/1./h).*180/1./3.14);TauV=(SIGx-
SIGy)/1./2.*sin(2.*Yret/1./h);Yretn=Yret.*cos(atan(Yret/1./h));arcD=atan(Yret/1./h).*180/1./
3.14;SIGy=SIGind-SIGind.*(cos(atan(Yret/1./h))).^2;SIGx=SIGind-
SIGind.*(sin(atan(Yret/1./h))).^2;SIGn=SIGind.*(cos(atan(Yret/1./h))).^2+SIGind.*(sin(atan(
Yret/1./h))).^2;SIGn=SIGx-SIGy;Yretn=Yret.*cos(atan(Yret/1./h));Tau=(SIGx-
SIGy)/1./2.*sin(2.*atan(Yret/1./h).*180/1./3.14);TauV=(SIGx-
SIGy)/1./2.*sin(2.*Yret/1./h);arcD=atan(Yret/1./h).*180/1./3.14;arcDr=atan(Yret/1./h);SIGy=
SIGind-SIGind.*(cos(atan(Yret/1./h))).^2;SIGx=SIGind-
SIGind.*(sin(atan(Yret/1./h))).^2;SIGn=SIGind.*(cos(atan(Yret/1./h))).^2+SIGind.*(sin(atan(
Yret/1./h))).^2;SIGn=SIGx-
SIGy;Yretn=Yret.*cos(atan(Yret/1./h));EPSelrzq=SIGrzqhoxV/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;Kek
kvhpel=27/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;figure;plot(EPSelrzq.*Kekkvhpel,SIGrzqhoxVB,H
relp,SIGy,Hrelp,SIGx,Hrelp,SIGn,Hrelp,h,Hrelp,Tau,Hrelp,TauV,Hrelp,arcD,Hrelp,Yret,Hrel
p,SIGrzqhoxVB);grid,figure;plot(EPSelrzq.*Khel,SIGrzqhoxVB,h,SIGy,h,SIGx,h,SIGn,h,h,h
,Tau,h,TauV,h,arcD,h,Yret,h,SIGrzqhoxVB);grid
komplDIAGRAMxSIGrqEPSxHabsEPSyretV=1001;RqhodsklogVx=RqhodsklogV.*cos(a
tan(Yret/1./h));SIGrq=RqhodsklogV.*Kplmat.^2/1./20;SIGrqx=RqhodsklogVx.*Kplmat.^2/1.
/20;Vpqx=(10.^-3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./SIGrqx;Vpq=(10.^-3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./
SIGrq;figure;plot(h,Vpq,h,Vpqx);grid,figure;plot(h,SIGrq,h,SIGrqx,h,Vdefho,h,Vdefh,h,Tdef
h,h,Yret,h,RqhodsklogV,h,RqhodsklogVx,h,arcD,h,cos(atan(Yret/1./h)));grid,figure;plot(Hek
vp,RqhodsklogV,Hekvp,RqhodsklogVx);grid,EPSelrq=SIGrq/1./Emat;EPSmelo=SIGm/1./E
mat,Kmelo=ho/1./EPSmelo;figure;plot(EPSelrq,SIGrq,EPSelrq.*Kmelo,SIGrq,h,SIGrq,h,SIG
rqx,h,Plim);grid,figure;plot(EPSelrq,SIGrq,EPSyretV,SIGrq,EPSyretV,SIGrqx,EPSyretV,Pli
m);grid,figure;plot(EPSelrq.*Kmelo,SIGrq,h,SIGrq,h,SIGrqx,h,Plim,h,RqhodsklogV,h,Rqhod
sklogVx,h,Vdefho,h,Vdefh,h,Tdefh,h,Yret,h,arcD,h,cos(atan(Yret/1./h)),h,Vpq,h,Vpregulrara
d,h,Vpregulrast,h,Vpqx,h,Vpregulrasklog);grid,figure;plot(EPSelrq.*Kmelo,SIGrq,EPSelrq,S
IGrq,EPSyretV,SIGrq,EPSyretV,SIGrqx,EPSyretV,Plim,EPSyretV,RqhodsklogV,EPSyretV,
RqhodsklogVx,EPSyretV,Vdefho,EPSyretV,Vdefh,EPSyretV,Tdefh,EPSyretV,Yret,EPSyret
V,arcD,EPSyretV,cos(atan(Yret/1./h)),EPSyretV,Vpq,EPSyretV,Vpregulrarad,EPSyretV,Vpr
egulrast,EPSyretV,Vpqx,EPSyretV,Vpregulrasklog);grid

```

RqhodsklogV=log10(5.41)/1./log10(ho).*Rao.*((log(h).^2+log((h.*tgD).^-1).^0.25).^2).^0.333;**RqhodsklogVx**=**RqhodsklogV**.*cos(atan(Yret/1./h));**RqhodsklogVxy**=**RqhodsklogV**/1./cos(atan(Yret/1./h));**SIGrq**=**RqhodsklogV**.***Kplmat**.^2/1./20;**SIGrqx**=**RqhodsklogVx**.***Kplmat**.^2/1./20;**RqhodsklogVB**=log10(5.41)/1./log10(ho).*Rao.*((log(h).^2+log((h.*tgD).^-1).^0.25).^2).^0.5;**RqhodsklogxxxVB**=**RqhodsklogVB**.*cos(atan(tgD)).^(3.***Indho**).^-1);**SIGrzqhoxVB**=10.^-3.***Emat**.*2.***RqhodsklogxxxVB**/1./**Raskyo**;figure;plot(h,**Rarad**,h,**Rasklog**,h,**Rasklogye**,h,**Raradye**,h,**RqhodsklogVxy**,h,**RqhodsklogV**,h,**RqhodsklogVx**);grid
fccSIGrqHabs=1001;**Yreto**=1;**Rarado**=**Rao**.*10.^3.*(**Emat**).^0.5/1./**Emat**;**Kcut**=**Kplmat**;**SIGm**=1190.31.*20/1./**Kcut**;**SIGret**=**Eret**.^0.5;**Yret**=**Kpl**/1./**Kcut**;**tgD**=tan(**Yret**/1./h);**arcD**=atan(**tgD**).*180/1./3.14;**x**=**Kplmat**;**Kxy**=**SIGm**/1./**x**;
Plim=**Kxy**.*h;**EPSyretV**=10.^3.***Yret**/1./**Emat**;**Indho**=log10(5.41)/1./log10(ho);**Rqhodsklog**=log10(5.41)/1./log10(ho).*Rao.*((log(h).^2+log((h.*tgD).^-1).^0.25).^2).^0.333/1./cos(atan(tgD));**RqhodsklogV**=log10(5.41)/1./log10(ho).*Rao.*((log(h).^2+log((h.*tgD).^-1).^0.25).^2).^0.333;**RqhodsklogxxxV**=**RqhodsklogV**.*cos(atan(tgD)).^(3.***Indho**).^-1);**Rqhodsklogxxx**=**Rqhodsklog**.*cos(atan(tgD)).^(3.***Indho**).^-1);**SIGrzqhoxV**=10.^-3.***Emat**.*2.***RqhodsklogxxxV**/1./**Rao**;**SIGrzqhoxVV**=10.^-3.***Emat**.***RqhodsklogxxxV**/1./**Rarado**;**EPSelrzq**=**SIGrzqhoxV**/1./**Emat**;**SIGrzqEPSabsH**=1001;**EPSelrzq**=**SIGrzqhoxV**/1./**Emat**;**Khel**=ho/1./0.006;**Kekvhpel**=27/1./0.006;**Kyretel**=**Yreto**/1./0.006;
KOMPLAWJREZxABRxHabsxTUH=2222;**SIGrz**=(**Eretz**).^0.5.*20/1./**Kplmat**;**SIGrx**=**SIGrz**.*cos(atan(tgD));**Khel**=ho/1./0.006;**EPSelrx**=**SIGrx**/1./**Emat**;**SIGabr**=**SIGrx**-**Pvpcut**;**SIGabrXY**=**SIGabr**/1./cos(atan(tgD)).^**Kplmat**;**Srah**=**Ra**.*h.*10.^-3;**Sraskh**=**Rasky**.*h.*10.^-3;**Fabr**=**SIGabr**.***Srah**;**FabrXY**=**Fabr**/1./cos(atan(tgD)).^**Kplmat**;**Fabrsk**=**SIGabr**.***Sraskh**;**EPSelrzqVB**=**SIGrzqhoxVB**/1./**Emat**;**Khel**=ho/1./0.006;**EPSelrzqVBh**=**EPSelrzqVB**.***Khel**;figure;plot(**EPSelrzqVBh**,**SIGrzqhoxVB**,h,**SIGrzqhoxVB**,h,**Pvpopt**,h,**Pvpcut**,h,**Pvpcutx**,h,**Vpopt**,h,**Vcutrast**,h,**Vcutrasky**,h,**SIGrx**,h,**SIGrz**,h,**Mavpopthinvxy**,h,**arcD**,h,**Yret**,h,**Ra**,h,**Rarad**,h,**Rasky**,h,**SIGabr**,h,**SIGabrXY**,h,**Fabr**,h,**FabrXY**,h,**Fabrsk**,h,**Plim**,h,**Yret**,h,**Sraskh**);grid
ROZBORxABRAZE=1001;**SIGcutabrsk**=**SIGcutsk**-**Pvpcut**;**SIGabrskV**=(**SIGcutabrsk**.^2+**SIGabr**).^2).^0.5;**Sraskh**=**Rasky**.*h.*10.^-3;**FabrskV**=**SIGabrskV**.***Sraskh**;figure;plot(h,**SIGabr**,h,**Fabrsk**,h,**SIGabrskV**,h,**FabrskV**,h,**Sraskh**,h,**SIGabr**,h,**Fabr**,h,**Fabrsk**,h,**Yret**);grid

figure;plot(EPSelrzqVBh,SIGrzqhoxVB,h,SIGrzqhoxVB,h,Plim);grid,figure;plot(EPSelrzq,SIGrzqhoxVB,EPsyretV,SIGrzqhoxVB,EPsyretV,Plim);grid

KOMPLAWJREZxHrelpxTUH=2222;Hrelp=h/1./Kplmat.*100;SIGrz=(Eretz).^0.5.*20/1./Kplmat;SIGrzx=SIGrz.*cos(atan(tgD));Khel=ho/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzx=SIGrzx/1./Emat;SIGabr=SIGrzx-Pvpcut;Srah=Ra.*h.*10.^-3;Sraskh=Rasky.*h.*10.^-3;Fabr=SIGabr.*Srah;Fabrxy=Fabr/1./cos(atan(tgD));SIGabrXY=SIGabr/1./cos(atan(tgD)).^Kplmat;FabrXY=Fabr/1./cos(atan(tgD)).^Kplmat;Fabrsk=SIGabr.*Sraskh;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;EPSelrzqVBh=EPSelrzqVB.*Khel;Kekvhpel=27/1./0.006;EPSelrzqVBekvp=EPSelrzqVB.*Kekvhpel;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzqVByret=EPSelrzqVB.*Kyretel;figure;plot(EPSelrzqVByret,SIGrzqhoxVB,Hrelp,SIGrzqhoxVB,Hrelp,Pvpopt,Hrelp,Pvpcut,Hrelp,Pvpcutx,Hrelp,Vpopt,Hrelp,Vcutrast,Hrelp,Vcutrasky,Hrelp,SIGrzx,Hrelp,SIGrz,Hrelp,Mavpophthinvxy,Hrelp,Mavpophthinvho,Hrelp,arcD,Hrelp,Yret,Hrelp,Ra,Hrelp,Rarad,Hrelp,Rasky,Hrelp,SIGabr,Hrelp,Fabr,Hrelp,Fabrsk,Hrelp,Plim,Hrelp,Yret,Hrelp,SIGabrXY,Hrelp,FabrXY);grid

KOMPLAWJREZxYretxTUH=2222;Hrelp=h/1./Kplmat.*100;SIGrz=(Eretz).^0.5.*20/1./Kplmat;SIGrzx=SIGrz.*cos(atan(tgD));Khel=ho/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzx=SIGrzx/1./Emat;SIGabr=SIGrzx-Pvpcut;Srah=Ra.*h.*10.^-3;Sraskh=Rasky.*h.*10.^-3;Fabr=SIGabr.*Srah;Fabrxy=Fabr/1./cos(atan(tgD));Fabrsk=SIGabr.*Sraskh;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;EPSelrzqVBh=EPSelrzqVB.*Khel;Kekvhpel=27/1./0.006;EPSelrzqVBekvp=EPSelrzqVB.*Kekvhpel;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzqVByret=EPSelrzqVB.*Kyretel;figure;plot(EPSelrzqVByret,SIGrzqhoxVB,Yret,SIGrzqhoxVB,Yret,Pvpopt,Yret,Pvpcut,Yret,Pvpcutx,Yret,Vpopt,Yret,Vcutrast,Yret,Vcutrasky,Yret,SIGrzx,Yret,SIGrz,Yret,Mavpophthinvxy,Yret,Mavpophthinvho,Yret,arcD,Yret,Yret,Yret,Ra,Yret,Rarad,Yret,Rasky,Yret,SIGabr,Yret,Fabr,Yret,Fabrsk,Yret,Plim,Yret,Yret,Yret,SIGabrXY,Yret,FabrXY);grid

KOMPLAWJREZxEPsyretVxTUH=2222;Hrelp=h/1./Kplmat.*100;SIGrz=(Eretz).^0.5.*20/1./Kplmat;SIGrzx=SIGrz.*cos(atan(tgD));Khel=ho/1./0.006;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzx=SIGrzx/1./Emat;SIGabr=SIGrzx-Pvpcut;Srah=Ra.*h.*10.^-3;Sraskh=Rasky.*h.*10.^-3;Fabr=SIGabr.*Srah;Fabrxy=Fabr/1./cos(atan(tgD));Fabrsk=SIGabr.*Sraskh;EPSelrzqVB=SIGrzqhoxVB/1./Emat;Khel=ho/1./0.006;EPSelrzqVBh=EPSelrzqVB.*Khel;Kekvhpel=27/1./0.006;EPSelrzqVBekvp=EPSelrzqVB.*Kekvhpel;Kyretel=Yreto/1./0.006;EPSelrzqVByret=EPSelrzqVB.*Kyretel;figure;plot(EPSelrzqVB,SIGrzqhoxVB,EPsyretV,SIGrzqhoxVB,EPsyretV,Pvpopt,EPsyretV,Pvpcut,EPsyretV,Pvpcutx,EPsyretV,Vpopt,EPsyretV,Vcutrast,EPsyretV,Vcutrasky,EPsyretV,SIGrzx,EPsyretV,SIGrz,EPsyretV,Mavpophthinvxy,EPsyretV,Mavpo

pthinvho,EPSSyretV,arcD,EPSSyretV,Yret,EPSSyretV,Ra,EPSSyretV,Rarad,EPSSyretV,Rasky,EPSSyretV,SIGabr,EPSSyretV,Fabr,EPSSyretV,Fabrsk,EPSSyretV,Plim,EPSSyretV,Yret,EPSSyretV,SIGabrXY,EPSSyretV,FabrXY);grid

RqhodsklogV=log10(5.41)/1./log10(ho).*Rao.*((log(h).^2+log((h.*tgD).^

1).^0.25).^2).^0.333;RqhodsklogxxxV=RqhodsklogV.*cos(atan(tgD)).^(3.*Indho.^-1);SIGrzqhoxV=10.^-

3.*Emat.*2.*RqhodsklogxxxV/1./Rao;SIGrzqhoxVVV=SIGrzqhoxV.*(20/1./Kplmat).^0.5;

SIGrzqhoxV=10.^-3.*Emat.*2.*RqhodsklogxxxV/1./Rao;

fceNOVAxSIGrzqhoxVB=1001;RqhodsklogVB=log10(5.41)/1./log10(ho).*Rao.*((log(h).^2+log((h.*tgD).^

1).^0.25).^2).^0.5;RqhodsklogxxxVB=RqhodsklogVB.*cos(atan(tgD)).^(3.*Indho.^-1);SIGrzqhoxVB=10.^-

3.*Emat.*2.*RqhodsklogxxxVB/1./Raskyo;Kekvhel=27/1./0.006;figure;plot(EPSSyretV,SIGrzqhoxVB,EPSSyretV,SIGrzqhoxV);grid,figure;plot(h,SIGrzqhoxVB,h,SIGrzqhoxV);grid

ROZBORxFcutFabrxPvpSIGxHefekt=1001;Fcutrask=SIGcutsk.*Srah;Fcutrzra=SIGrz.*Srah;Sraho=10.^-

3.*Rao.*ho;Fcutrasko=SIGcutsko.*Sraho;Fcutrzrao=SIGrzo.*Sraho;SIGrzo=Emat.^0.5;Pvpcto=Pvpopt;figure;plot(h,SIGcutsk,h,SIGcutsko,h,SIGrz,h,SIGrzo,h,SIGrzx,h,Fcutrask,h,Fcutrzra,h,Fcutrasko,h,Sraskh,h,Sraskho,h,Pvpcto,h,Pvpcutx,h,Pvpcto,h,Yret,h,SIGabrskV,h,SIGrzqhoxVB,h,Ra,h,Rarad,h,Rasky,h,arcD);grid

fceTUHOST=1001;figure;plot(h,SIGabr,h,Fabr,h,SIGabrXY,h,FabrXY);grid

SIGrzqEPSretVVV=1001;EPSElrzq=SIGrzqhoxV.*(20/1./Kplmat).^0.5/1./Emat;Kyretel=Yreto/1./0.006;SIGeloV=Emat.^0.5.*(20/1./Kplmat).^0.5;Kxy=SIGm/1./Kplmat;

Plim=Kxy.*h;Kxyo=SIGm/1./ho;

Plimo=Kxyo.*h;Kxyel=SIGeloV/1./ho;Plimel=Kxyel.*h;Kxyelo=Emat.^0.5/1./ho;Plimelo=Kxyelo.*h;figure;plot(EPSElrzq,SIGrzqhoxV,EPSSyretV,SIGrzqhoxV.*(20/1./Kplmat).^0.5,EPSSyretV,Plim,EPSSyretV,SIGyield.*(20/1./Kplmat).^0.5,EPSSyretV,SIGyieldo.*(20/1./Kplmat).^0.5,EPSSyretV,Plimo);grid,

SIGrzqHabsVVV=1001;EPSElrzq=SIGrzqhoxV.*(20/1./Kplmat).^0.5/1./Emat;Kyretel=Yreto/1./0.006;SIGeloV=Emat.^0.5.*(20/1./Kplmat).^0.5;Kxy=SIGm/1./Kplmat;

Plim=Kxy.*h;Kxyo=SIGm/1./ho;

Plimo=Kxyo.*h;Kxyel=SIGeloV/1./ho;Plimel=Kxyel.*h;Kxyelo=Emat.^0.5/1./ho;Plimelo=Kxyelo.*h;figure;plot(h,SIGrzqhoxV.*(20/1./Kplmat).^0.5,h,Plim,h,SIGyield.*(20/1./Kplmat).^0.5,h,Plimo,h,Plimel,h,Plimelo);grid,


```

SIGrzqhoxVVV=SIGrzqhoxV.*(20/1./Kplmat).^0.5;
EmatX=30000:5000:300000;Vpostoptk=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./EmatX.^0.5;KawjEx=10.^12/1./EmatX.^2;figure;plot(EmatX,Vpostop
tk);grid;figure;plot(EmatX,KawjEx);grid
KawjX=10:50:700;Vpostoptk=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^0.5;figure;plot(KawjX,Vpostoptk);grid
KawjX=10:5:700;EmatX=10.^6/1./KawjX.^0.5;VpostoptkX=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^0.5;figure;plot(KawjX,VpostoptkX);grid,Mav
poptkX=lmbd.*Kdvda.*ROskW.*10.^-3.*VpostoptkX.*60.^-
1.*(Kcut/1./ho);MavpoptkhodX=3600.*MavpoptkX;PvpoptkX=lmbd.^-
1.*Rov/1./Roabr.*(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./VpostoptkX;figure;plot(KawjX,VpostoptkX,KawjX,PvpoptkX,KawjX
,MavpoptkhodX,KawjX,KawjX.KawjX,EmatX/1./1000);grid,
KawjX=10:5:700;VpostoptkX=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^0.5;figure;plot(KawjX,VpostoptkX);grid,Mav
poptkX=60.*lmbd.*Kdvda.*ROskW.*10.^-3.*VpostoptkX.*60.^-
1.*(Kcut/1./ho);MavpoptkhodX=3600.*MavpoptkX;MavpoptkminX=60.*MavpoptkX;Pvpop
tkX=lmbd.^-1.*Rov/1./Roabr.*(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./VpostoptkX;KdvdaX=2.*Rao.*10.^3.*60.*Maho/1./(lmbd.*ROskW.
*VpostoptkX.*Rarado);HraXo=KawjX/1./Rao;dammX=20.*(4.*MavpoptkX/1./(Ckh.*3.14.*
Roa.*1000.*va).^0.5);dvmmX=dammX.*2.*Kdvda;figure;plot(KawjX,VpostoptkX,KawjX,P
vpoptkX,KawjX,MavpoptkminX,KawjX,KawjX,KawjX,EmatX/1./1000,KawjX,HraXo,Kawj
X,dammX,KawjX,dvmmX);grid,
techKOMPLEXxPV=1001;KawjX=10:5:700;VpostoptkX=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^0.5;figure;plot(KawjX,VpostoptkX);grid,Mav
poptkX=60.*lmbd.*Kdvda.*ROskW.*10.^-3.*VpostoptkX.*60.^-
1.*(Kcut/1./ho);MavpoptkhodX=3600.*MavpoptkX;MavpoptkminX=60.*MavpoptkX;Pvpop
tkX=1.5.*(lmbd.^-1.*Rov/1./Roabr.*(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./VpostoptkX);KdvdaX=2.*Rao.*10.^3.*60.*Maho/1./(lmbd.*ROskW
. *VpostoptkX.*Rarado);HraXo=KawjX/1./Rao;dammX=20.*(4.*MavpoptkX/1./(Ckh.*3.14.*
Roa.*1000.*va).^0.5);dvmmX=dammX.*2.*Kdvda;Cstrkwhod=Nstrhod.*Ckwhod;Ccelstrkw
hod=Ncelstr.*Ckwhod;figure;plot(KawjX,VpostoptkX,KawjX,PvpoptkX,KawjX,Mavpoptkm
inX,KawjX,EmatX/1./1000,KawjX,HraXo,KawjX,dammX,KawjX,dvmmX,KawjX,Ckwhod);

```

```

grid,figure;plot(KawjX,Nstrhod,KawjX,Ncelstr,KawjX,Cstrkwhod,KawjX,Ccelstrkwhod);grid,
fceRasklogN=1001;Rar=Ra-log10(Ra/1./Rao);Raradr=Rarad-log10(Rarad/1./Rarado);
fceSIGzatN=1001;SIGraradr=10.^-
3.*Raradr.*Emat/1./(Rarado);SIGraradrx=SIGraradr.*cos(atan(tanD));figure;plot(h,SIGraradr,
h,SIGraradrx,h,SIGrz,h,SIGrzx);grid
newPraceXvykonXcenaXhodXKawj=1001;KawjX=10:5:700;EmatX =
10.^6/1./KawjX.^0.5;Ckwhod=3.5;Tpopt=Hlim/1./(ho.*Vpostopt.*60.^-
1),TpoptX=Hlim/1./(ho.*VpostoptkX.*60.^-
1);figure;plot(KawjX,TpoptX);grid,AstrobjX=((1-
2.*Mio)/1./(6.*EmatX).*(SIGm+SIGm).^2).^0.5;AtstrX=(1+Mio)/1./(3.*EmatX).*(SIGm
.^2+SIGm.^2-SIGm.*SIGm);AcelstrX=1.5.*(AstrobjX+AtstrX);
Ncelstr=Acelstr/1./Tphxopto,NstrhodX=AstrobjX/1./TpoptX;NstrobjX=NstrhodX;CstrobjX=
NstrhodX.*Ckwhod;NtstrX=AtstrX/1./TpoptX;CtstrX=NtstrX.*Ckwhod;NcelstrX=AcelstrX/
1./TpoptX;CcelstrX=NcelstrX.*Ckwhod;Cstrhod=Nstrhod.*Ckwhod,PwREGX=1.5.*(83.982
6 + 108.524.*2.718.^(-KawjX/1./13.68504) + 104.30582.*2.718.^(-
KawjX/1./132.7153));NstrhodXREG=25.63546.*2.718.^(-KawjX/1./51.31997) +
325.32423.*2.718.^(-KawjX/1./9.29095) + 4.14871.*2.718.^(-KawjX/1./-
1.37731E84);CstrhodXREG=NstrhodXREG.*Ckwhod;figure;plot(KawjX,NstrhodXREG,Ka
wjX,CstrhodXREG);grid,figure;plot(KawjX,65.*NstrobjX.^-1,KawjX,65.*CstrobjX.^-
1);grid,
figure;plot(KawjX,KawjX,KawjX,VpostoptkX,KawjX,PvpoptkX,KawjX,MavpoptkminX,Ka
wjX,EmatX/1./1000,KawjX,HraXo,KawjX,65.*NstrobjX.^-1,KawjX,65.*CstrobjX.^-1);grid,
ROskWX=(10.^6/1./(10.^12/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^2)/1./16).^0.27;VpostoptkX=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^0.5;MavpoptkX=lmbd.*Kdvda.*ROskWX.*1
0.^-3.*Vpostopt.*60.^-1.*(KawjX/1./ho);MavpoptkXvX=lmbd.*Kdvda.*ROskWX.*10.^-
3.*VpostoptkX.*60.^-1.*(KawjX/1./ho);
newMaKawj=1001;vMavpoptkXX=MavpoptkXvX;vMavpoptkgrminXXbREG=10.*1.3655.*
0.4516.*0.7.*0.269.*ROskWX.*10.^-3.*148.758.*60^
1.*(9.6676/35.77).*1000.*60;figure;plot(KawjX,Mavpoptk,KawjX,vMavpoptkXX.*1000.*60
.KawjX,vMavpoptkgrminXXbREG);grid,
figure;plot(KawjX,1.5.*PvpoptkX);grid,
NstrobjX=NstrhodX;

```

```

FIGkompl=1001;figure;plot(KawjX,KawjX,KawjX,VpostoptkX,KawjX,PvpoptkX,KawjX,v
MavpoptkgrminXXbREG,KawjX,EmatX/1./1000,KawjX,HraXo,KawjX,65.*NstrobjX.^-
1,KawjX,65.*CstrobjX.^-1);grid,
FIGkompltopo=1001;KawjX=10:5:700;hX=8,RaX=(-10)*(1-KawjX/1./(KawjX-
hX));KplX=RaX.*hX;EretzX=EmatX.*(KplX/1./KawjX).^0.5;RaradX=Rao.*10.^3.*(EretzX
).^0.5/1./EmatX;YretX=KplX/1./KawjX;Rasky=10.^log10((log10(hX)).^2+(log10(1/1./YretX
)).^2+RaradX.^2).^0.5;arcDX=atan(tan(YretX/1./hX)).*180/1./3.14;
FcePovchKawjX=1001;KawjX=10:5:700;hX=8,RaX=(-10)*(1-KawjX/1./(KawjX-
8));KplX=RaX.*hX;EretzX=EmatX.*(KplX/1./KawjX).^0.5;RaradX=Rao.*10.^3.*(EretzX).
.^0.5/1./EmatX;YretX=KplX/1./KawjX;arcDX=atan(tan(YretX/1./hX)).*180/1./3.14;RaskyX=
10.^log10((log10(hX)).^2+(log10(1/1./YretX)).^2+RaradX.^2).^0.5;figure;plot(KawjX,hX,K
awjX,RaX,KawjX,RaskyX,KawjX,YretX,KawjX,arcDX);grid,
ROskWX=(10.^6/1./(10.^12/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^2)/1./16).^0.27;VpostoptkX=(10.^-
3.*Rao).^0.5.*10.^6/1./(10.^6/1./KawjX.^0.5).^0.5;MavpoptkX=lmbd.*Kdvda.*ROskWX.*1
0.^-3.*VpostoptkX.*60.^-1.*(KawjX/1./ho);MavpoptkXvX=lmbd.*Kdvda.*ROskWX.*10.^-
3.*VpostoptkX.*60.^-1.*(KawjX/1./ho);
MaKawj=1001;vMavpoptkXX=MavpoptkXvX;vMavpoptkgrminXXbREG=10.*1.3655.*0.4
516.*0.7.*0.269.*ROskWX.*10.^-3.*148.758.*60.^-
1.*(9.6676/35.77).*1000.*60;figure;plot(KawjX,Mavpoptk,KawjX,vMavpoptkXX.*1000.*60
,KawjX,vMavpoptkgrminXXbREG);grid,

```

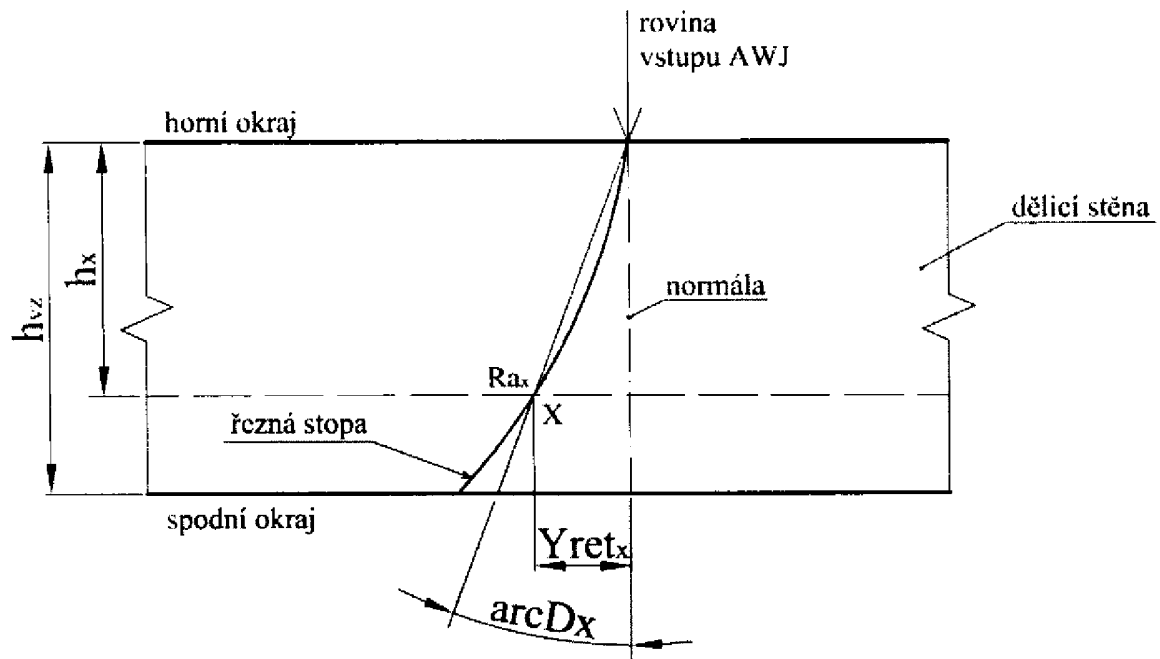
Průmyslová využitelnost

Řešení může být využito ve všech podnicích, provozovnách a na výzkumných pracovištích, které se zabývají dělením technických materiálů hydroabrazivní technologií.

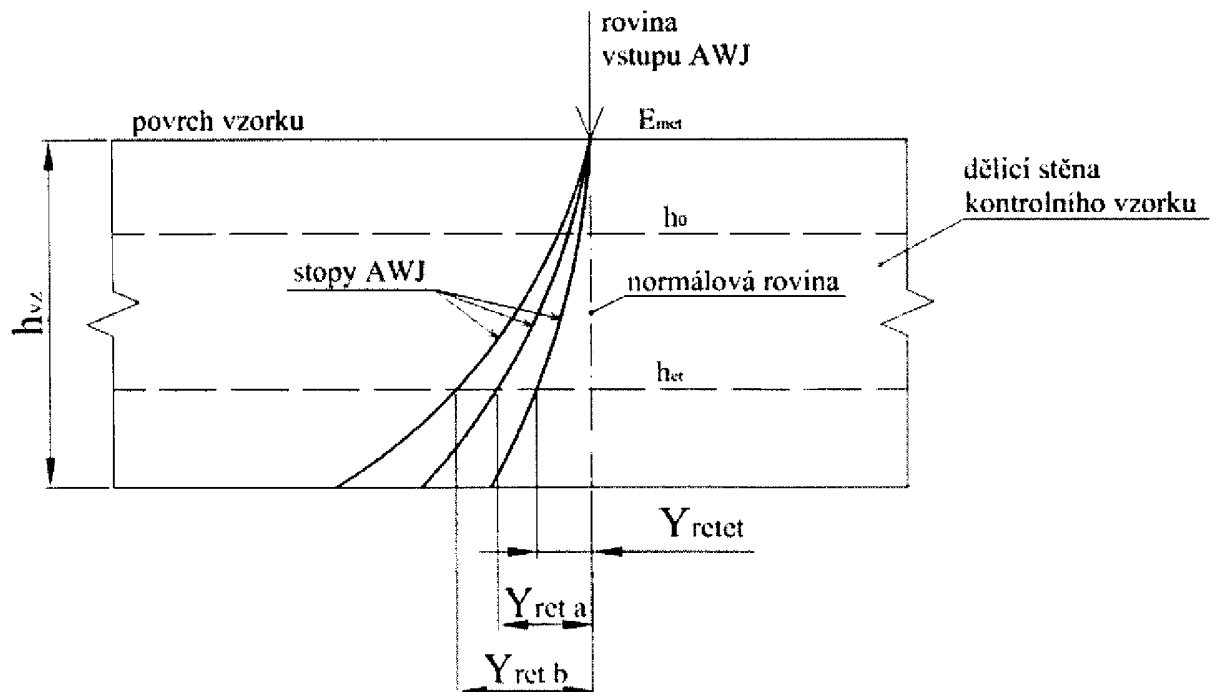
PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob navrhování technologie hydroabrazivního dělení materiálů, *vyznačující se tím*, že se určí konstanta hydroabrazivní dělitelnosti materiálů K_{awj} [μm], a to tak, že se buď změří tři deformační parametry materiálu, vybraná hloubka řezu h_x [mm], lokální drsnost Ra_x [μm] v hloubce h_x a lokální odchylka řezné stopy od normálové roviny Y_{ret_x} v hloubce h_x , nebo pouze dva deformační parametry materiálu, a to etalonová hloubka h_{et} [mm] a odchylka řezné stopy od normálové roviny Y_{ret_x} [mm] v etalonové hloubce h_{et} [mm], nebo jeden parametr materiálu, a to buď rychlost šíření podélné vlny ultrazvuku V_{LUZ} [m/s] nebo modul pružnosti v tahu E_{mat} [MPa], přičemž konstanta hydroabrazivní dělitelnosti materiálu K_{awj} se vypočítá z odpovídajících parametrů, a nebo se určí přímo výpočtem na základě znalosti rychlosti šíření podélné vlny ultrazvuku V_{LUZ} [m/s] nebo modulu pružnosti v tahu E_{mat} děleného materiálu, konstanta K_{awj} se následně dosadí jako vstupní hodnota do algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení.
2. Způsob podle nároku 1 *vyznačující se tím*, že se konstanta hydroabrazivní dělitelnosti materiálů K_{awj} stanoví buď ze tří deformačních parametrů, dle $K_{awj} = Ra_x * h_x / Y_{ret_x}$, [μm] nebo dvou deformačních parametrů dle $E_{mat_x} = (10^{24} * Y_{ret_x} / (Y_{ret_{et}} * K_{awj_{et}}^2))^0{,}25$, [MPa], $K_{awj_x} = 10^{12} / E_{mat_x}^2$, [μm] nebo z rychlosti šíření ultrazvuku V_{LUZ} [m/s] dle $K_{awj_x} = (10^4 / V_{LUZ})^6$, [μm], nebo z modulu pružnosti v tahu E_{mat} děleného materiálu dle $K_{awj_x} = 10^{12} / E_{mat}^2$, [μm].
3. Způsob podle nároku 2, *vyznačující se tím*, že vztahy pro stanovení konstanty hydroabrazivní dělitelnosti K_{awj} se pro každý jednotlivý způsob stanovení K_{awj} s výhodou zadají jako počáteční rovnice do algoritmu 1 technologie hydroabrazivního dělení materiálů.
4. Způsob podle nároku 1 nebo 2 nebo 3 ~~nebo 4~~ *vyznačující se tím*, že se z konstanty hydroabrazivní dělitelnosti materiálů K_{awj} stanoví třída hydroabrazivní dělitelnosti T_{cut} podle: $T_{cut} = \log(10^6 / K_{awj}^{0,5})$ [-], resp. $T_{cut} = \log(E_{mat})$ [-], která umožňuje standardizaci technologických postupů.

1/19



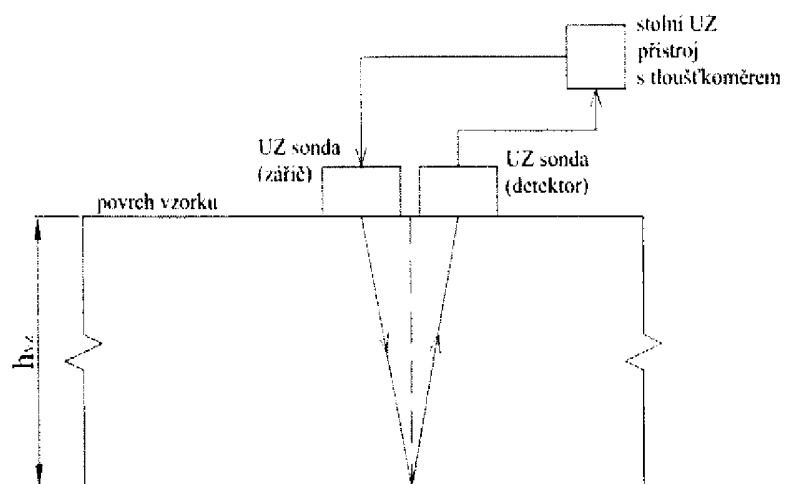
Obr. 1



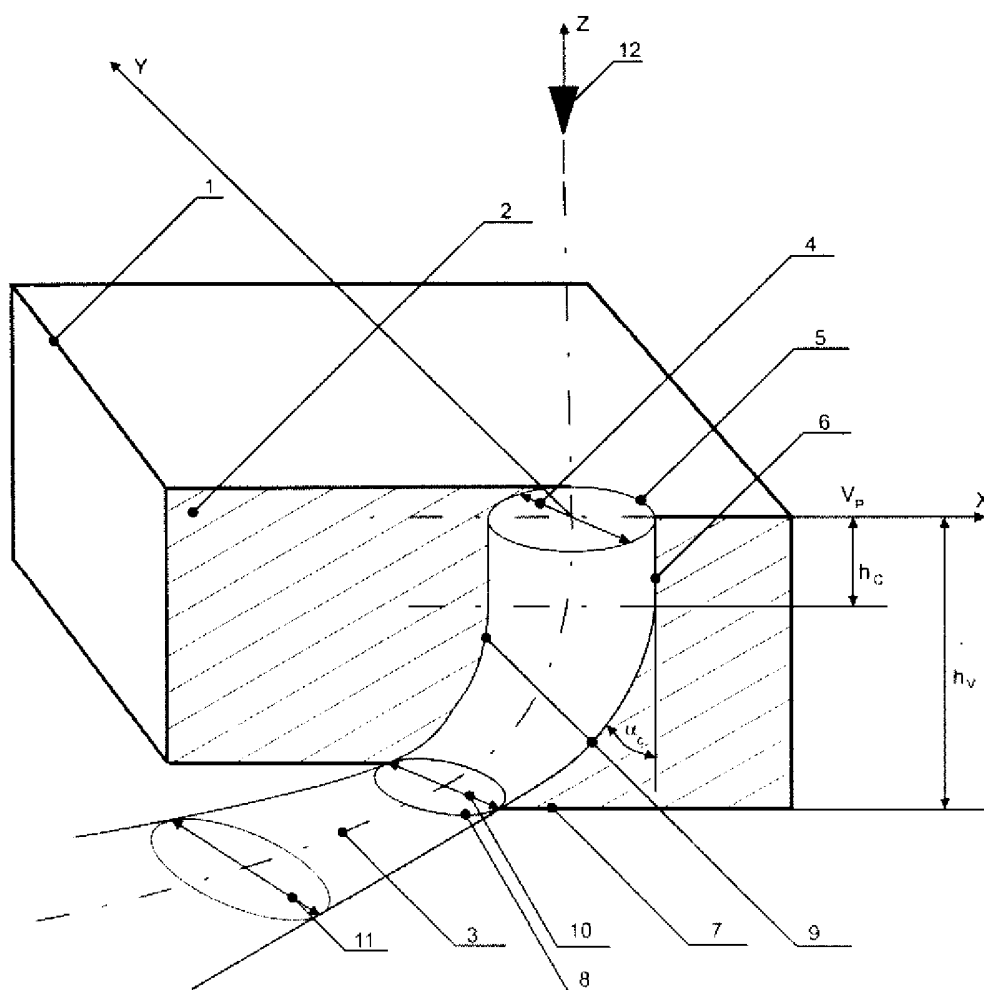
Obr. 2

2/19

27.05.11

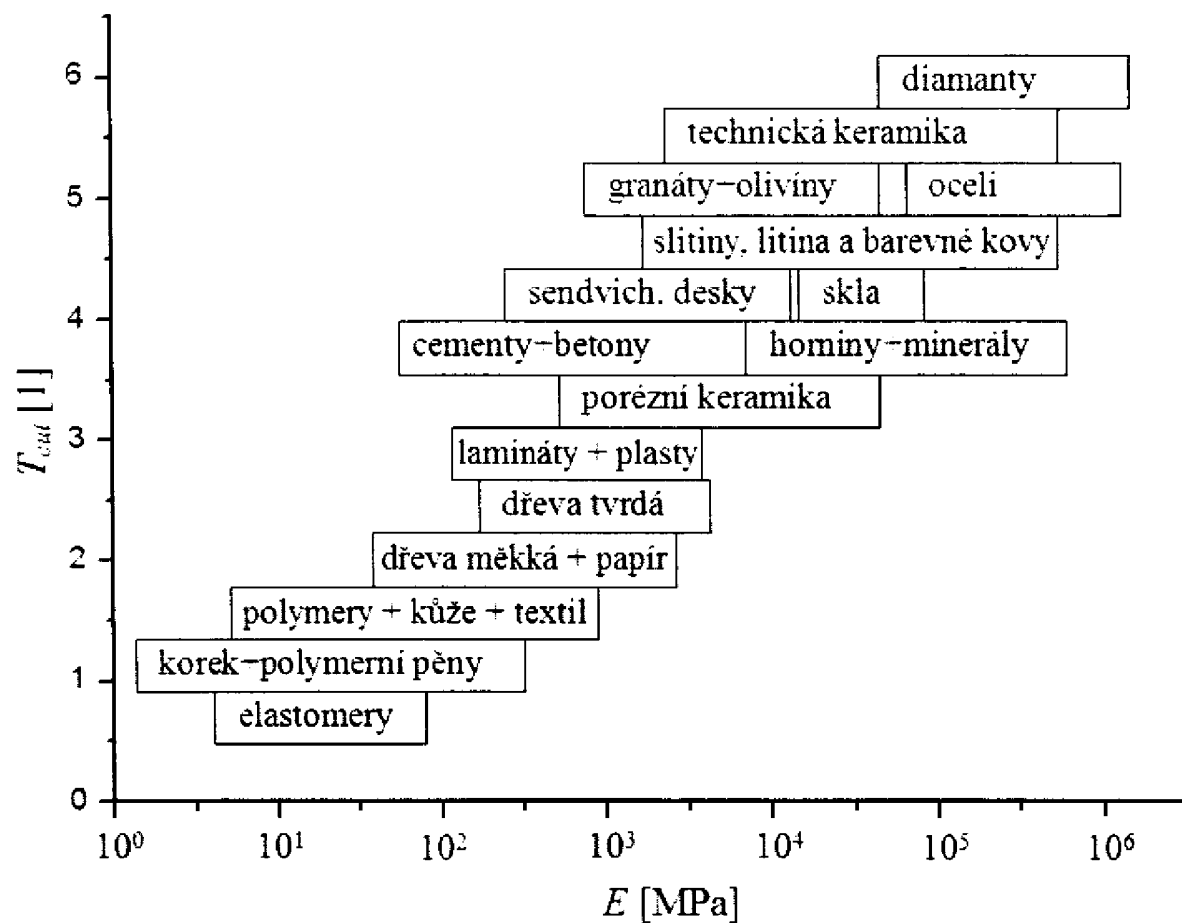


Obr. 3



Obr. 4

3/19 27.05.11



Obr. 5

SL.	TECHNOLOGICKÉ FAKTORY	JEDNOTKA	ZNAČKA	HODNOTA
1	Tlak kapaliny	MPa	p	300
2	Průměr vodní trysky	mm	dv _o	0,247
3	Průměr abrazivní trubice	mm	d _{abro}	0,752
4	Délka abrazivní trubice	mm	l _a	76
5	Hmotnostní průtok abraziva	g/min	m _a	250
6	Vzdálenost trysky od povrchu	mm	L	2
7	Posuvná rychlost	mm/min	v _{popt}	150
8	Velikost abraziva	MESH	-	80
9	Materiál abraziva	-	-	Granát Barton

Obr. 6

4/19 27.05.11

SL.	PARAMETR / MATERIÁL dle ČSN	JEDN.	SYMB.	17251	13180	SnPb40
1	Koeficient hydroabrazivní dělitelnosti	μm	Kawj	35,770	15,203	591,672
2	Modul pružnosti v tahu	GPa	Emat	167,200	256,466	41,110
3	Cena el. energie	Kč/kW	Ckwhod	3,500	3,500	3,500
4	Objem. podíl abraziva v proudu AWJ	l	lambda	0,700	0,700	0,700
5	Průměr abrazivního zrna	mm	dazr	0,188	0,188	0,188
6	Volba průměru abrazivní dýzy	mm	da	0,752	0,752	0,752
7	Hloubka řezu volená/požadovaná	mm	h _r	8,000	8,000	8,000
8	Poměr průměrů dýz Dv/Dabr volený	l	Kdvdao	0,329	0,329	0,329
9	Měrná hmotnost abraziva	kg/m ³	Roa	3,400	3,400	3,400
10	Měrná hmotnost vody	g/cm ³	Rov	1,000	1,000	1,000
11	Měrná hmotnost celková proudu AWJ	g/cm ³	Roj	1,300	1,300	1,300
12	Drsnost stopy v neutrální rovině h ₀	μm	Ra ₀	3,700	3,700	3,700
13	Odchylka stopy od normály v neutr. rovině h ₀	mm	Yret ₀	1,000	1,000	1,000
14	Třída dělitelnosti techn. AWJ	l	Tcut	5,223	5,409	4,614
15	Limitní hloubka řezu	mm	Hlim	35,770	15,203	591,67
16	Koeficient řezatelnosti	mm	Kawj	35,770	15,203	591,67
17	Hloubka neutrální roviny	mm	h ₀	9,668	4,109	159,91
18	Napětí na mezi kluzu v neutrální rovině	MPa	SIGklo	408,90	506,42	34,513
19	Drsnost radiální v neutrální rovině h ₀	μm	Rarado	9,049	7,306	18,248
20	Drsnost komplexní v neutrální rovině	μm	Raskyo	9,102	7,332	18,381
21	Úhel zakřivení stopy v neutr. rovině	grad	arcDo	5,930	13,951	0,359
22	Rychlost posuvu optimální	mm/min	Vpopt	148,76	120,11	300,00
23	Tlak čerpadla optimální	MPa	Pvpopt	171,81	212,78	85,19
24	Ekvivalent hm. mat. křehkých výpočtový	g/cm ³	ROskd	2,109	2,432	1,321
25	Ekvivalent hm. mat. kovových výpočtový	g/cm ³	ROskW	7,507	9,457	3,519
26	Průtok abraziva volený	kg/min	Maho	0,004	0,004	0,004
27	Poměr průměrů dýz Dv/Dabr optimální	l	Kdvda	0,269	0,333	0,133
28	Drsnost stopy v libovolné rovině h _r	μm	Ra _r	2,881	11,106	0,137
29	Drsnost radiální v libovolné rovině h _r	μm	Ra _{radx}	7,49	14,22	0,913
30	Odchylka stopy od normály v libovolné rovině h _r	mm	Yret _r	0,644	5,844	0,002
31	Úhel zakřivení stopy v libovolné rovině h _r	grad	arcDx	4,617	41,875	0,013
32	Hloubka pásma plasticity v řezu	mm	hp	17,885	7,602	295,836
33	Pevnost mat. výpočtová	MPa	SIGm	665,52	1570,0	40,235
34	Drsnost komplexní v libovolné rovině h _r	μm	Raskyx	7,544	14,274	3,019
35	Silový odpor stopy v neutr. rovině h ₀	N	Feutsto	167,20	256,47	41,111
36	Silový odpor stopy v libovolné rovině h _r	N	Feutstx	130,18	769,81	1,523

5/19

27.05.11

37	Napětí komplexní v neutr. rovině h_0	MPa	SIGeutsko	167.20	256.47	41.111
38	Napětí komplexní ve volené rovině h_x	MPa	SIGeutsx	138.58	499.29	6.752
39	Drsnost stopy v rovině pásma plasticity h_p	μm	Rap	10.000	10.000	10.000
40	Drsnost radiální v rovině pásma plasticity h_p	μm	Raradp	16.740	13.516	33.759
41	Odchylka stopy od normály v rovině pásma h_p	mm	Yretp	5.000	5.000	5.000
42	Deviace stopy v rovině pásma plasticity h_p	grad	arcDp	16.026	37.705	0.969
43	Drsnost komplexní v rovině pásma plasticity h_p	μm	Raskyp	16.801	13.563	33.857
44	Napětí komplexní v rovině pásma plasticity h_p	N	SIGeutskp	308.63	474.43	75.73
45	Plocha kontaktu v neutr. rovině h_0	mm^2	Scuto	1.000	1.000	1.000
46	Plocha kontaktu v rovině pásma plasticity h_p	mm^2	Scutp	1.464	1.461	1.467
47	Konstanta pro zmitost	l	Kzro	0.001	0.001	0.001
48	Objem úběru v neutr. rovině h_0	mm^3	Udho	0.026	0.011	0.432
49	Objem úběru v rovině pásma plasticity h_p	mm^3	Udhp	0.026	0.011	0.434
50	Plocha kontaktu v libovolné rovině h_x	mm^2	Scutx	0.939	1.542	0.226
51	Objem úběru v libovolné rovině h_x	mm^3	Udhx	0.026	0.011	0.132
52	Váha okamž. úběru křehkého materiálu pro h_0	mg	Gudhod	0.055	0.027	0.571
53	Váha okamž. úběru křehkého materiálu pro h_p	mg	Gudhpd	0.055	0.027	0.574
54	Váha okamž. úběru křehkého materiálu pro h_x	mg	Gudhxd	0.055	0.027	0.174
55	Váha okamž. úběru kovového materiálu pro h_0	mg	Gudhow	0.196	0.105	1.500
56	Délka třísky v neutr. rovině h_0	μm	dhmemo	26.107	11.098	431.765
57	Délka třísky v rovině pásma plasticity h_p	μm	dhmemp	17.887	7.604	295.838
58	Délka třísky v libovolné rovině h_x	μm	dhmcmx	27.775	7.210	583.747
59	Zmitost drtě v neutr. rovině h_0	μm	Dzrrasto	0.038	0.090	0.002
60	Zmitost drtě v rovině pásma plasticity h_p	μm	Dzrrastp	0.056	0.132	0.003
61	Zmitost drtě v libovolné rovině h_x	μm	Dzrrastx	0.036	0.139	0.002
62	Váha okamž. úběru kovového materiálu pro h_p	mg	Gudhpd	0.197	0.105	1.500
63	Váha okamž. úběru kovového materiálu pro h_x	mg	Gudhxd	0.196	0.105	0.463
64	Napětí sločka SIGy na hloubce h_x	MPa	SIGyx	659.43	1160.0	0.007
65	Napětí sločka SIGx na hloubce h_x	MPa	SIGxx	6.09	408.99	40.228
66	Napětí sločka normál. SIGn na hloubce h_x	MPa	SIGnx	-653.34	-747.88	40.221
67	Smyková složka Tau na hloubce h_x	MPa	Taux	-62.23	-328.53	0.534
68	Smyková složka TauV na hloubce h_x	MPa	TauVx	-62.23	-328.53	0.534
69	Napětí sločka SIGy na hloubce h_0	MPa	SIGyo	79.84	1510.0	4.953
70	Napětí sločka SIGx na hloubce h_0	MPa	SIGxo	585.68	53.67	35.283
71	Napětí sločka normál. SIGn na hloubce h_0	MPa	SIGno	505.83	-1460.0	30.330
72	Smyková složka Tau na hloubce h_0	MPa	Tauo	-164.36	-265.35	9.965
73	Smyková složka TauV na hloubce h_0	MPa	TauVo	-164.36	-265.35	9.965
74	Napětí sločka SIGy na hloubce h_p	MPa	SIGyp	64.935	0.060	27.335
75	Napětí sločka SIGx na hloubce h_p	MPa	SIGxp	600.6	1570.0	12.9
76	Napětí sločka normál. SIGn na hloubce h_p	MPa	SIGnp	535.7	1570.0	-14.4

6/19

27.05.11

77	Smyková složka Tau na hloubce h_p	MPa	Taup	158.945	9,696	-6,737
78	Smyková složka TauV na hloubce h_p	MPa	TauVp	154.521	0,332	3,709
79	Penetrační čas pro limitní hloubku řezu H_{lim}	sec	Tpopt	1.492	1,848	0,740
80	Penetrační čas pro hloubku h_x	sec	Tphxopt	0.334	0,973	0,010
81	Hmotnostní průtok abraziva pro hloubku h_0	kg/s	Mavpopt	0.008	0,009	0,003
82	Hmotnostní průtok abraziva pro hloubku h_x	kg/s	Mavpoptx	0.001	0,004	0,000
83	Poissonova konstanta na úrovni h_0	l	Mio	0.307	0,162	2,520
84	Práce řezného nástroje střední	J	Accelstr	2.744	12,021	0,228
85	Napětí na mezi kluzu v neutrální rovině h_0	MPa	SIGyieldo	408,90	506,42	202,76
86	Penetrační čas pro hloubku h_0	sec	Tphxopto	0.403	0,500	0,200
87	Spotřeba el. energie za hodinu pro řezání	kWh	Nstrhod	24,496	86,635	4,111
88	Cena el. energie za hodinu řezání	Kč/hod	Ccutxhod	85,735	303,222	14,387
89	Metráž za hodinu při hloubce řezu h_0	m/hod	Lhxcuthod	8,926	7,207	18,000
90	Metráž za směnu při hloubce řezu h_0	m/sm	Lhxcutsm	62,479	50,447	126,00
91	Metráž za rok při hloubce řezu h_0	km/rok	Lhxcutrok	17,494	14,100	35,300
92	Náklady na metr řezu při hloubce řezu h_0	Kč/m	Ccellhj	96,056	420,749	7,993
93	Náklady pro řez za směnu při hloubce řezu h_0	tisKč/sm	Ccelxsm	6,001	21,200	1,010
94	Náklady pro řez za rok při hloubce řezu h_0	tis.Kč/rok	Ccelxrok	1680,0	5940,0	282,0
95	Náklady pro řez za hodinu při hloubce řezu h_0	Kč/hod	Ccelxhod	857,3	3030,0	143,9
96	Poměr průměrů dýz $D_v/D_{abr}/optimaliz.$ volby	l	Kdvdak	0,269	0,333	0,198
97	Průměr abrazivní dýzy/optimalizace volby	mm	damm	0,890	0,999	0,610
98	Průměr vodní dýzy/optimalizace volby	mm	dvmm	0,240	0,333	0,081
99	Napětí abrazivní na úrovni hloubce h_0	MPa	SIGabro	237,09	293,64	117,57
100	Plocha abraze v radiálním směru na hloubce h_0	mm ²	Sraskho	0,088	0,030	2,939
101	Abrazivní síla v radiálním směru na hloubce h_0	N	FabrskVo	20,868	8,944	369,06
102	Plocha abraze ve stopě na hloubce h_0	mm ²	Sraho	0,036	0,015	0,592
103	Abrazivní síla v radiálním směru na hloubce h_0	N	FabrskVo	20,868	8,944	369,06
104	Abrazivní síla ve stopě na hloubce h_0	N	FabrVo	8,483	4,514	74,290
105	Hmotnostní průtok abraziva hodinový/kovy	Kg/hod	Mahodk	27,360	58,813	21,885
106	Hmotnostní průtok abraziva hodinový/nekovy	Kg/hod	Mahodn	12,617	15,896	5,915
107	Ukazatel nákladů podle typu materiálu	l	Knaklm	1,398	11,990	0,312
108	Ukazatel nákladů podle změny technologie	l	Knkawj	1,398	11,990	0,312
109	Ukazatel poměru ceny výkonu k nákl. základu	l	KcelVN	1,000	0,665	0,360
110	Ukazatel cenové kompenzace k základu	l	Kckomp	1,000	1,504	2,774

Obr. 7

SL.	PARAMETR / MATERIÁL dle ČSN	JEDN.	SYMB.	11140	Cu 99,5	17618
1	Koeficient hydroabrazivní dělitelnosti	μm	Kawj	21.284	106,423	45,653

7/19 27.05.11

2	Modul pružnosti v tahu	GPa	Emat	216.753	96.935	148.010
3	Cena el. energie	Kč/kW	Ckwhod	3.500	3.500	3.500
4	Objem. podíl abraziva v proudu AWJ	l	lambda	0.700	0.700	0.700
5	Průměr abrazivního zrna	mm	dazr	0.188	0.188	0.188
6	Volba průměru abrazivní dýzy	mm	da	0.752	0.752	0.752
7	Hloubka řezu volená/požadovaná	mm	h _r	8.000	8.000	8.000
8	Poměr průměrů dýz Dv/Dabr volený	l	Kdvdao	0.329	0.329	0.329
9	Měrná hmotnost abraziva	kg/m ³	Roa	3.400	3.400	3.400
10	Měrná hmotnost vody	g/cm ³	Rov	1.000	1.000	1.000
11	Měrná hmotnost celková proudu AWJ	g/cm ³	Roj	1.300	1.300	1.300
12	Drsnost stopy v neutrální rovině h ₀	μm	Ra ₀	3.700	3.700	3.700
13	Odchylka stopy od normály v neutr. rovině h ₀	mm	Yret ₀	1.000	1.000	1.000
14	Třída dělitelnosti techn. AWJ	l	Tcut	5.336	4.987	5.170
15	Limitní hloubka řezu	mm	Hlim	21.284	106.42	45.653
16	Koeficient řezatelnosti	mm	Kawj	21.284	106.42	45.653
17	Hloubka neutrální roviny	mm	h ₀	5.753	28.763	12.339
18	Napětí na mezi kluzu v neutrální rovině	MPa	SIGklo	465.57	98.76	384.71
19	Drsnost radiální v neutrální rovině h ₀	μm	Rarado	7.947	11.884	9.618
20	Drsnost komplexní v neutrální rovině	μm	Raskyo	7.984	11.973	9.679
21	Úhel zakřivení stopy v neutr. rovině	grad	arcDo	9.965	1.993	4.646
22	Rychlost posuvu optimální	mm/min	Vpopt	130.65	195.37	158.11
23	Tlak čerpadla optimální	MPa	Pvpopt	195.62	130.82	161.64
24	Ekvivalent hm. mat. křehkých výpočtový	g/cm ³	ROskd	2.300	1.759	2.025
25	Ekvivalent hm. mat. kovových výpočtový	g/cm ³	ROskW	8.636	5.592	7.028
26	Průtok abraziva volený	kg/min	Maho	0.004	0.004	0.004
27	Poměr průměrů dýz Dv/Dabr optimální	l	Kdvda	0.306	0.205	0.253
28	Drsnost stopy v libovolné rovině h _r	μm	Ra _r	6.022	0.813	2.125
29	Drsnost radiální v libovolné rovině h _r	μm	Raradx	11.052	3.305	6.236
30	Odchylka stopy od normály v libovolné rovině h _r	mm	Yret _r	2.263	0.061	0.372
31	Úhel zakřivení stopy v libovolné rovině h _r	grad	arcDx	16.218	0.438	2.668
32	Hloubka pásma plasticity v řezu	mm	hp	10.642	53.212	22.827
33	Pevnost mat. výpočtová	MPa	SIGm	1110.0	224.00	521.45
34	Drsnost komplexní v libovolné rovině h _r	μm	Raskyx	11.095	3.635	6.315
35	Sílový odpor stopy v neutr. rovině h ₀	N	Feutsto	216.75	96.94	148.00
36	Sílový odpor stopy v libovolné rovině h _r	N	Feutstx	352.78	21.29	84.98
37	Napětí komplexní v neutr. rovině h ₀	MPa	SIGeutsko	216.75	96.94	148.00
38	Napětí komplexní ve volené rovině h _r	MPa	SIGeutskx	301.22	29.430	96.563
39	Drsnost stopy v rovině pásma plasticity hp	μm	Rap	10.000	10.000	10.000
40	Drsnost radiální v rovině pásma plasticity hp	μm	Raradp	14.703	21.985	17.793
41	Odchylka stopy od normály v rovině pásma hp	mm	Yretp	5.000	5.000	5.000

8/19 27.05.11

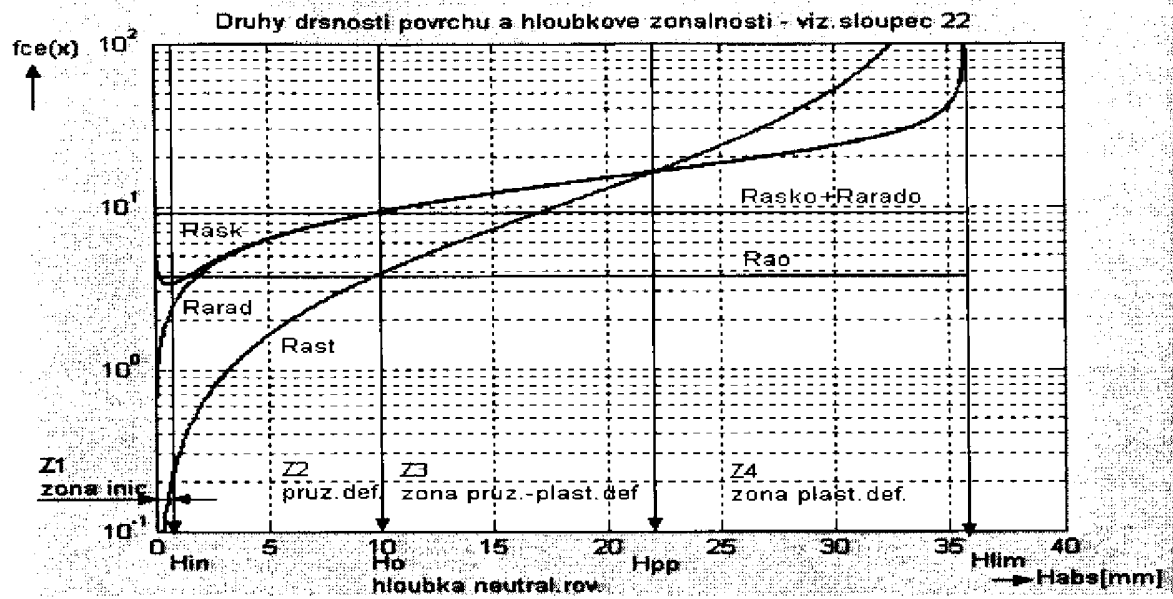
42	Úhel zakřivení stopy v rovině pásma plasticity h_p	grad	arcDp	26.932	5.387	12.556
43	Drsnost komplexní v rovině pásma plasticity h_p	μm	Raskyp	14.755	22.064	17.858
44	Napětí komplexní v rovině pásma plasticity h_p	N	SIGcutskp	400.60	178.63	273.06
45	Plocha kontaktu v neutr. rovině h_0	mm^2	Scuto	1.000	1.000	1.000
46	Plocha kontaktu v rovině pásma plasticity h_p	mm^2	Scutp	1.462	1.467	1.465
47	Konstanta pro zmitost	1	Kzro	0.001	0.001	0.001
48	Objem úběru v neutr. rovině h_0	mm^3	Udho	0.016	0.078	0.033
49	Objem úběru v rovině pásma plasticity h_p	mm^3	Udhp	0.016	0.078	0.033
50	Plocha kontaktu v libovolné rovině h_x	mm^2	Scutx	1.171	0.724	0.880
51	Objem úběru v libovolné rovině h_x	mm^3	Udhx	0.016	0.071	0.033
52	Váha okamžitého úběru křehkého materiálu pro h_0	mg	Gudhod	0.036	0.137	0.675
53	Váha okamžitého úběru křehkého materiálu pro h_p	mg	Gudhpd	0.036	0.137	0.068
54	Váha okamžitého úběru křehkého materiálu pro h_x	mg	Gudhxd	0.036	0.125	0.067
55	Váha okamžitého úběru kovového materiálu pro h_0	mg	Gudhow	0.134	0.434	0.234
56	Délka třísky v neutr. rovině h_0	μm	dhmcmo	15.536	77.664	33.319
57	Délka třísky v rovině pásma plasticity h_p	μm	dhmcmp	10.644	53.214	22.829
58	Délka třísky v libovolné rovině h_x	μm	dhmcmx	13.288	98.437	37.660
59	Zmitost drtě v neutr. rovině h_0	μm	Dzrrasto	0.064	0.013	0.030
60	Zmitost drtě v rovině pásma plasticity h_p	μm	Dzrrastp	0.094	0.019	0.044
61	Zmitost drtě v libovolné rovině h_x	μm	Dzrrastx	0.075	0.010	0.027
62	Váha okamžitého úběru kovového materiálu pro h_p	mg	Gudhpw	0.134	0.436	0.235
63	Váha okamžitého úběru kovového materiálu pro h_x	mg	Gudhwx	0.134	0.398	0.233
64	Napěťová složka SIGy na hloubce h_x	MPa	SIGyx	266.96	40.21	108.57
65	Napěťová složka SIGx na hloubce h_x	MPa	SIGxx	851.50	183.48	412.88
66	Napěťová složka normálová SIGn na hloubce h_x	MPa	SIGnx	584.55	143.28	304.31
67	Smyková složka Tau na hloubce h_x	MPa	Taux	249.18	55.01	-123.56
68	Smyková složka TauV na hloubce h_x	MPa	TauVx	249.18	55.01	-123.56
69	Napěťová složka SIGy na hloubce h_0	MPa	SIGyo	295.81	186.13	519.15
70	Napěťová složka SIGx na hloubce h_0	MPa	SIGxo	822.65	37.560	2.303
71	Napěťová složka normálová SIGn na hloubce h_0	MPa	SIGno	526.84	-148.573	-516.85
72	Smyková složka Tau na hloubce h_0	MPa	Tauo	232.36	55.534	-34.273
73	Smyková složka TauV na hloubce h_0	MPa	TauVo	232.36	55.534	-34.273
74	Napěťová složka SIGy na hloubce h_p	MPa	SIGyp	1060.0	137.00	0.052
75	Napěťová složka SIGx na hloubce h_p	MPa	SIGxp	57.507	87.150	521.40
76	Napěťová složka normálová SIGn na hloubce h_p	MPa	SIGnp	-1000.0	-49.392	521.35
77	Smyková složka Tau na hloubce h_p	MPa	Taup	221.606	24.087	-5.181
78	Smyková složka TauV na hloubce h_p	MPa	TauVp	52.628	48.270	-0.022
79	Penetrační čas pro limitní hloubku řezu Hlim	sec	Tpopt	1.699	1.136	1.404

9/19 27.05.11

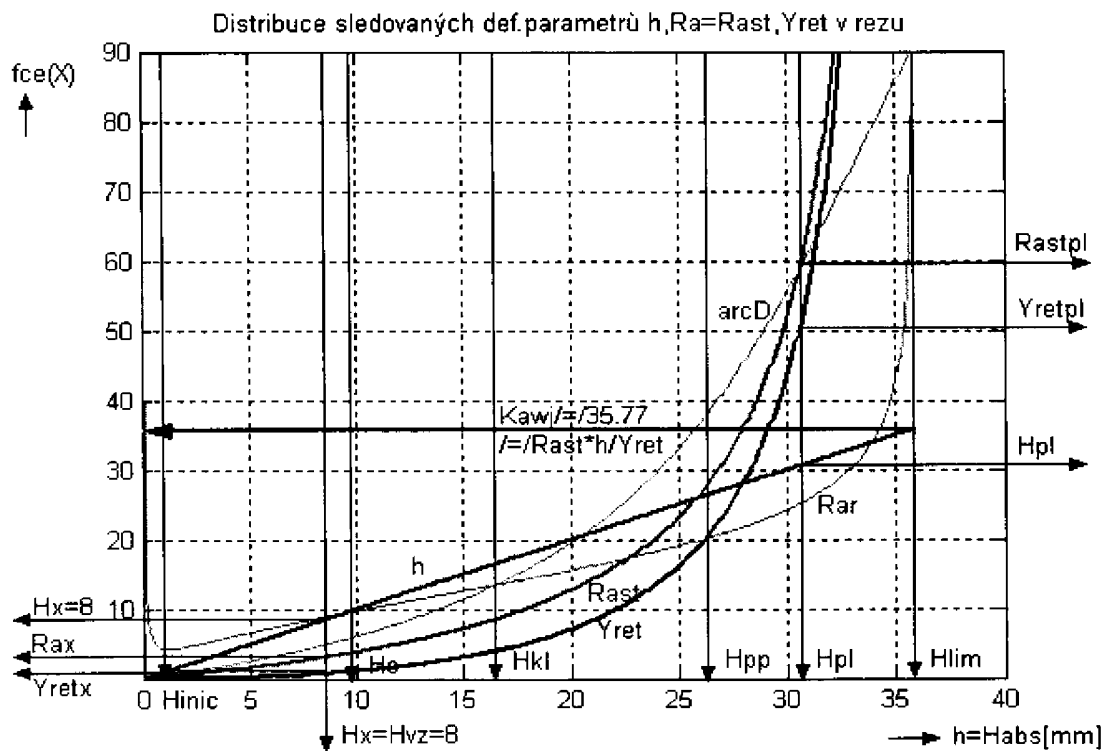
80	Penetrační čas pro hloubku h_x	sec	Tphxopt	0.639	0.085	0.246
81	Hmotnostní průtok abraziva pro hloubku h_0	g/s	Mavpopt	8.000	5.200	6.600
82	Hmotnostní průtok abraziva pro hloubku h_x	g/s	Mavpoptx	2.600	0.223	0.807
83	Poissonova konstanta na úrovni h_0	I	Mio	0.208	0.381	0.369
84	Práce řezného nástroje střední	J	Acelstr	6.855	0.640	1.739
85	Napětí na mezi kluzu na úrovni neutr. roviny h_0	MPa	SIGyieldo	465.57	311.34	384.71
86	Penetrační čas pro hloubku h_0	sec	Tphxopto	0.459	0.307	0.380
87	Spotřeba el. energie za hodinu pro řezání	kWh	Nstrhod	53.739	7.502	16.500
88	Cena el. energie za hodinu řezání	Kč/hod	Ccutxhod	188.09	26.258	57.751
89	Metráž za hodinu při hloubce řezu h_0	m/hod	Lhxcuthod	7.839	11.722	9.487
90	Metráž za směnu při hloubce řezu h_0	m/sm	Lhxcutsm	54.874	82.056	66.408
91	Metráž za rok při hloubce řezu h_0	km/rok	Lhxcutrok	15.400	23.000	18.600
92	Náklady na metr řezu při hloubce řezu h_0	Kč/m	CcelLhj	239.933	22.400	60.875
93	Náklady pro řez za směnu při hloubce řezu h_0	tis.Kč/r	Ccelxsm	13.200	1.840	4.040
94	Náklady pro řez za rok při hloubce řezu h_0	tis.Kč/r	Ccelxrok	3690,0	515,0	1130,0
95	Náklady pro řez za hodinu při hloubce řezu h_0	Kč/hod	Ccelxhod	1880,0	263,00	577,51
96	Poměr průměrů dýz Dv/Dabr - optimalizace volby	I	Kdvdak	0,306	0,205	0,253
97	Průměr abrazivní dýzy - optimalizace volby	mm	damm	0,955	0,769	0,862
98	Průměr vodní dýzy - optimalizace volby	mm	dvmm	0,293	0,157	0,218
99	Napětí abrazivní na úrovni hloubce h_0	MPa	SIGabro	269,95	180,53	223,07
100	Plocha abraze v radiálním směru na hloubce h_0	mm ²	Sraskho	0,046	0,344	0,119
101	Abrazivní síla v radiálním směru na hloubce h_0	N	FabrskVo	12,436	63,257	26,69
102	Plocha abraze ve stopě na hloubce h_0	mm ²	Sraho	0,021	0,106	0,046
103	Abrazivní síla v radiálním směru na hloubce h_0	N	FabrskVo	12,436	63,257	26,691
104	Abrazivní síla ve stopě na hloubce h_0	N	FabrVo	5,763	19,548	10,203
105	Hmotnostní průtok abraziva hodinový - kovy	Kg/hod	Mahodk	53,706	34,778	23,760
106	Hmotnostní průtok abraziva hodinový - nekovy	Kg/hod	Mahodn	14,515	9,399	11,812
107	Ukazatel nákladů podle typu materiálu	I	Knaklm	4,406	0,449	0,952
108	Ukazatel nákladů podle změny technologie	I	Knkawj	4,406	0,449	0,952
109	Ukazatel poměru ceny výkonu k nákladům základu	I	KcelVN	0,766	1,097	1,157
110	Ukazatel cenové kompenzace k základu	I	Kckomp	1,306	0,911	0,864

Obr. 8

10/19 27.05.11

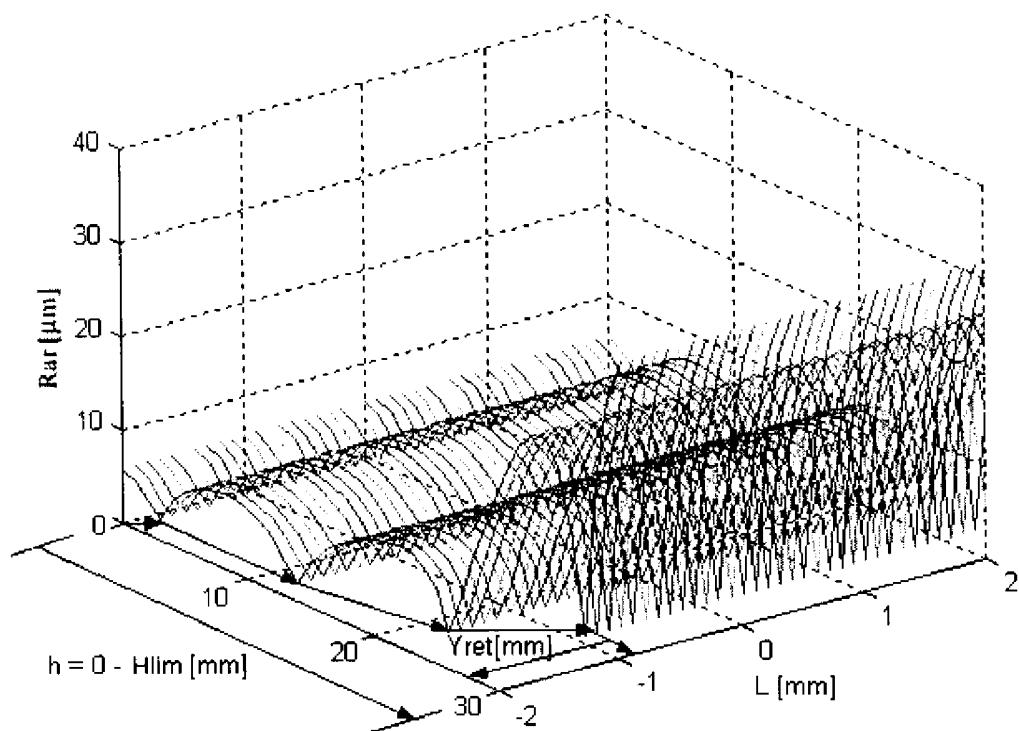


Obr. 9

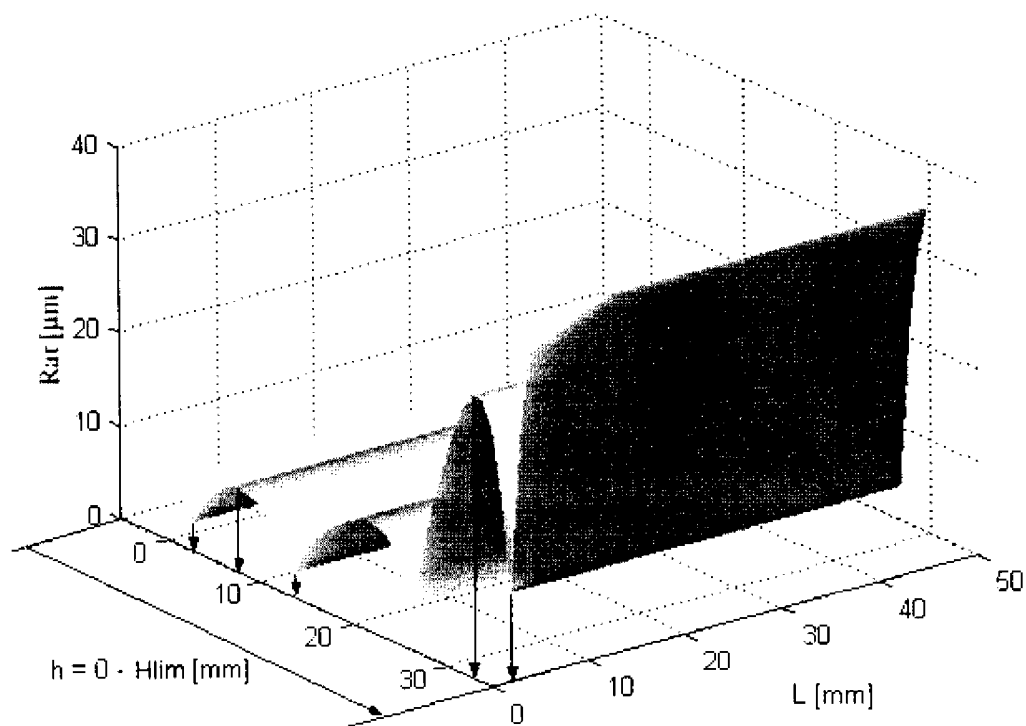


Obr. 10

11/19 27.05.11

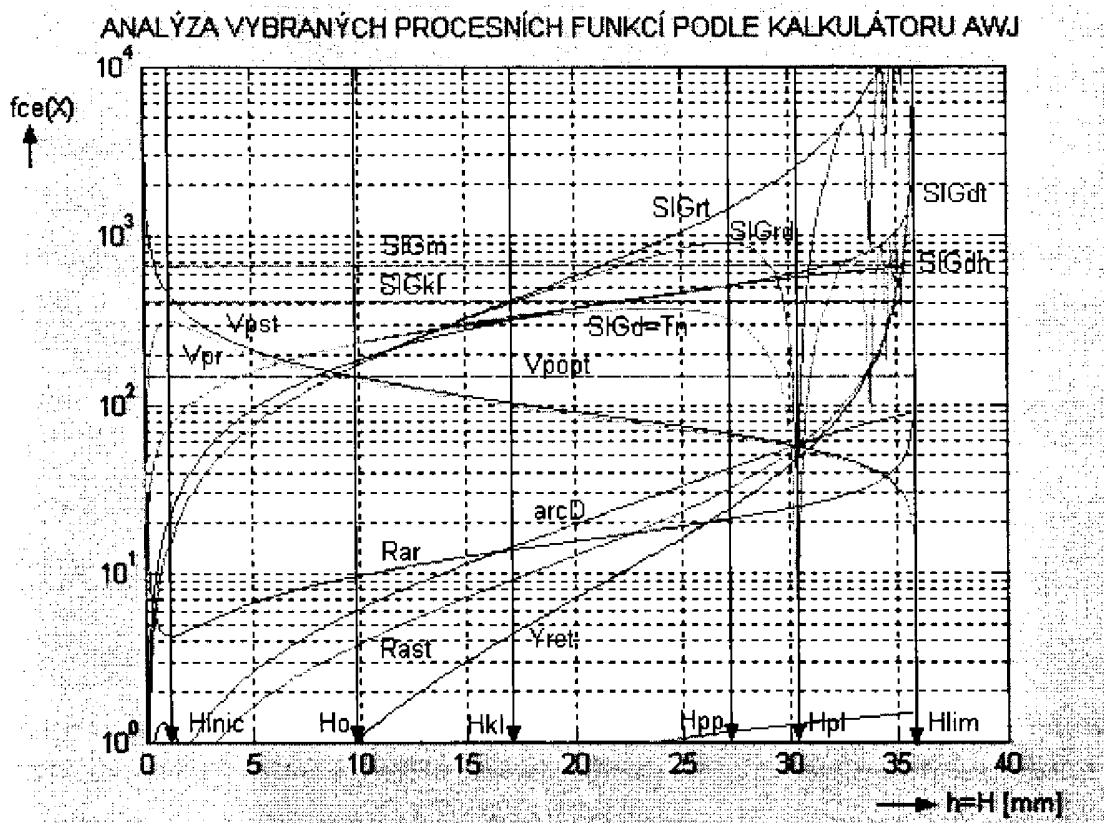


Obr. 11

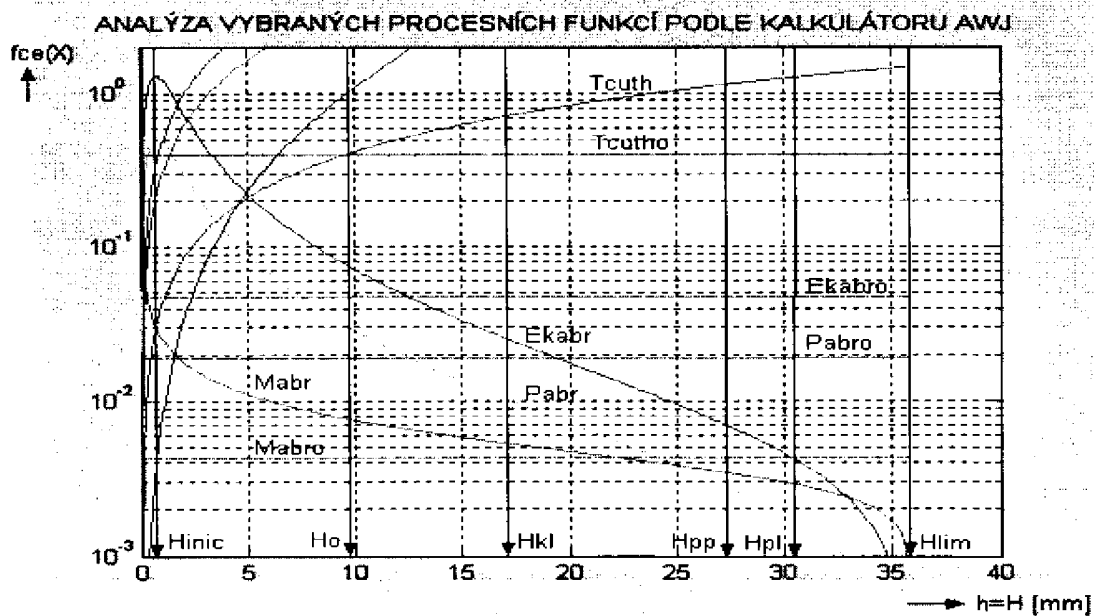


Obr. 12

12/19 27.05.11

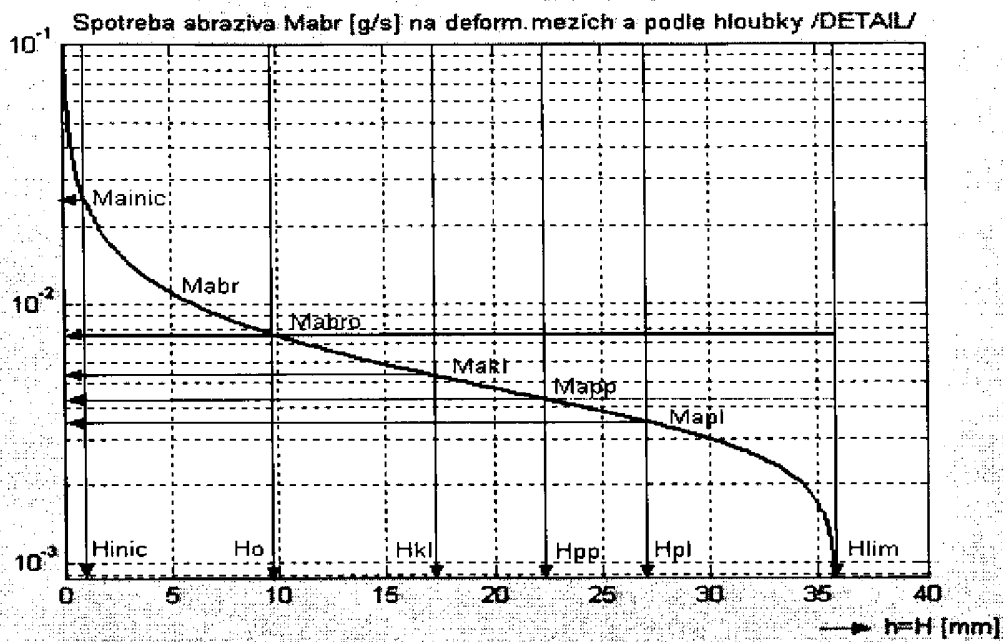


Obr. 13

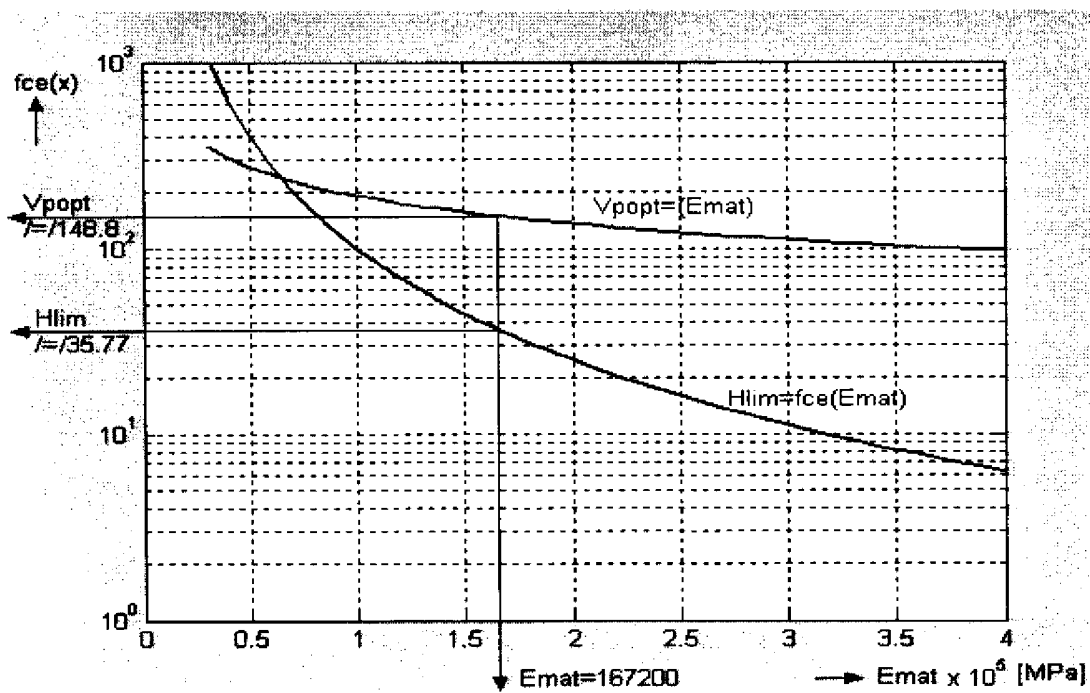


Obr. 14

13/19 27.05.11

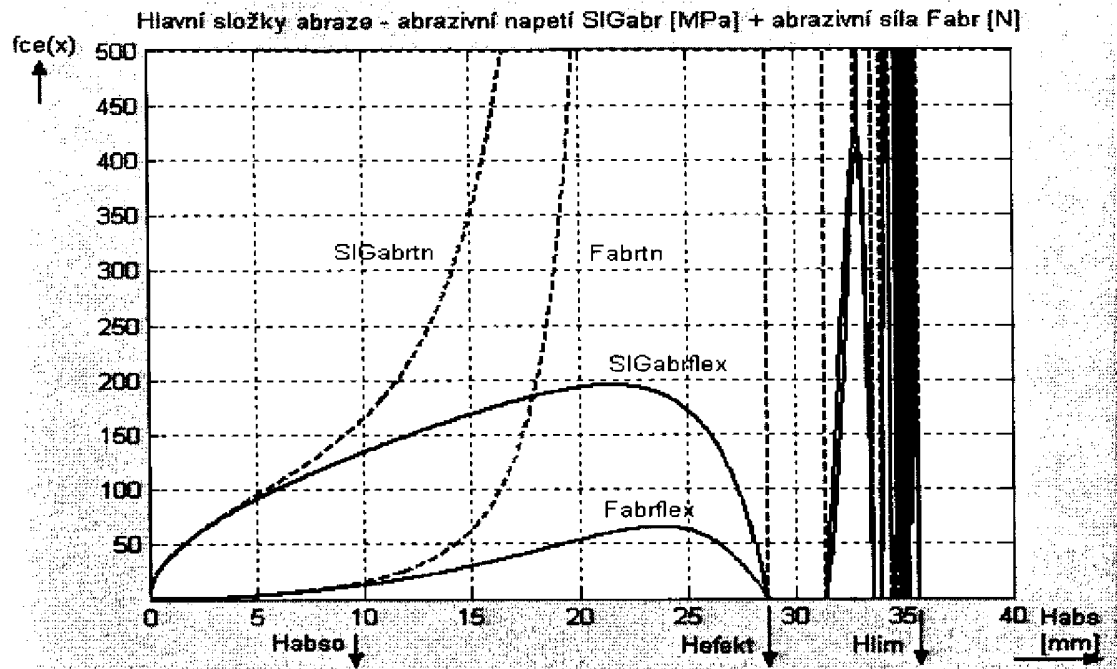


Obr. 15

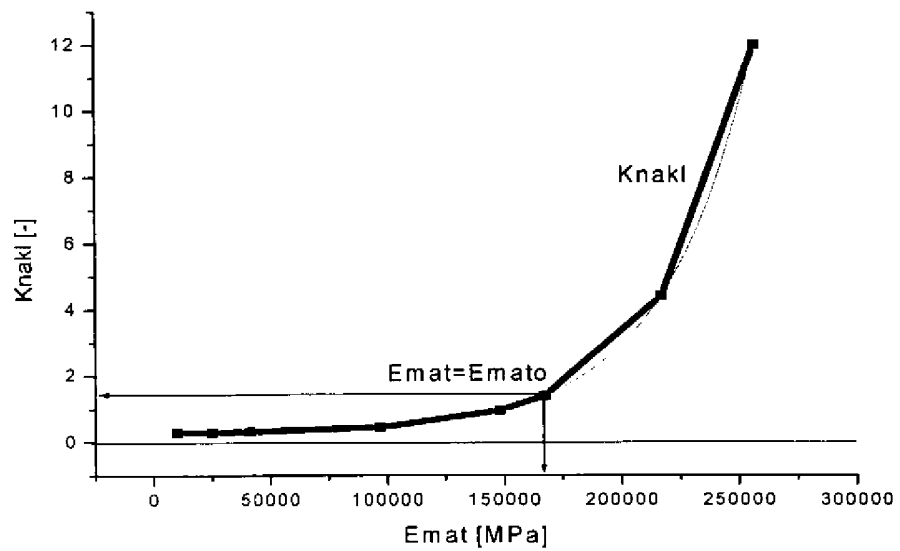


Obr. 16

14/19 27.05.11

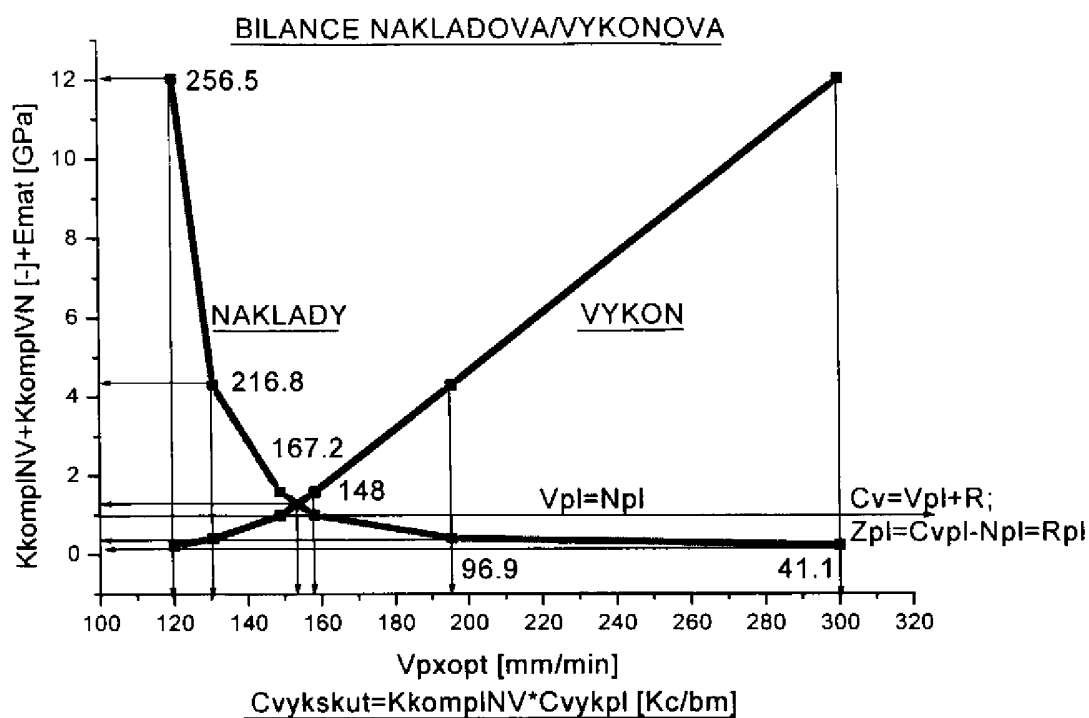


Obr. 17



Obr. 18

15/19 27.05.11

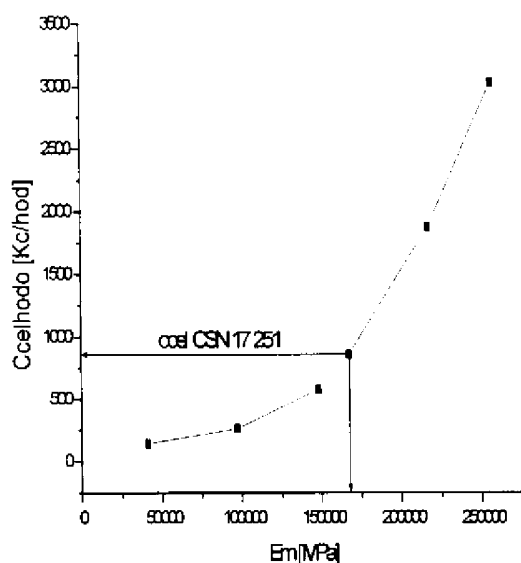


Obr. 19

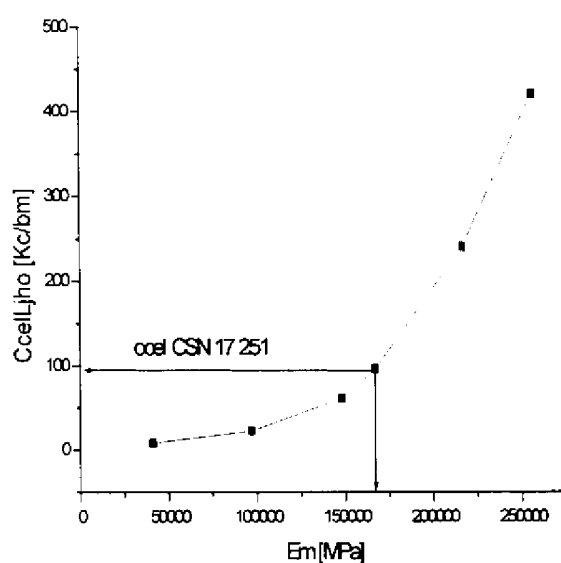
SL.	JEDN.	PARAM	ČSN17251	ČSN 13180	SnPb40	ČSN 11140	Cu 99.5	ČSN 17618
1	μm	Kawj	35,77	15,203	591,672	21,284	106,423	45,653
2	MPa	Emat	167200	256466	41110	216753	96935	148010
3	mm	h _o	9,67	4,11	159,91	5,75	28,76	12,34
4	Kc/bm	Ccell.hj	96,055	420,749	7,992	239,932	22,399	60,874
5	Kc/hod	Ccelhod	857,348	3,03E+03	143,8672	1,88E+03	2,63E+02	577,506

Obr. 20

16/19 27.05.11



a)



b)

Obr. 21

	Vstupní parametry	jednotka	symbol	hodnota	poznámka
1	Cena el.energie	Kč/kWh	Ckwhod	3,5	Aktualizovat dle ceny
2	Objem. podíl abraziva v proudu AWJ	l	lambda	0,7	Aktualizovat dle abraziva
3	Průměr abrazivního zrna	mm	dazr	1,88E-01	Aktualizovat dle použitého abraziva
4	Volba průměru abrazivní dýzy	mm	da=4*dazr	7,52E-01	Aktualizovat dle použitého abraziva
5	Hloubka řezu volená/požadovaná	mm	h _z	8	Aktualizovat dle požadavků zákazníka
6	Konstanta pro výpočet poměru průměrů dýz Dv/Dabr	l	Kdvdao	0,329	Hodnota trvale daná
7	Hmotnost abraziva	g/cm ³	Roa	3,4	Aktualizovat dle abraziva
8	Měrná hmotnost vody	g/cm ³	Rov	1	Hodnota trvale daná
9	Hmotnost celková proudu AWJ	g/cm ³	Roj	1,3	Aktualizovat podle typu abraziva
10	Drsnost stopy v neutrální rovině ho /teor. daná konst./	μm	Ra _o	3,7	Hodnota trvale daná
11	Zpoždění stopy v neutr. rovině ho /teor. daná konst./	mm	Yret _o	1	Hodnota trvale daná

Obr. 22

17/19 27.05.11

JEDNOTKA	SYMBOL	ČSN 17251	ČSN 13 180	slitina SnPb40
μm	Kawj	35,770	15,203	591,67
GPa	Emat	167,200	256,466	41,110
/ - /	Tcut	5,223	5,409	4,614
/ - /	Klasif. skupina	oceli	oceli	slitiny, litiny, barev. kovy
JEDNOTKA	SYMBOL	ČSN 11140	Cu 99,5	ČSN 17618
μm	Kawj	21,284	106,423	45,653
GPa	Emat	216,753	96,935	148,010
/ - /	Tcut	5,336	4,987	5,170
/ - /	Klasif. skupina	oceli	slitiny, litiny, barev. kovy	oceli

Obr. 23

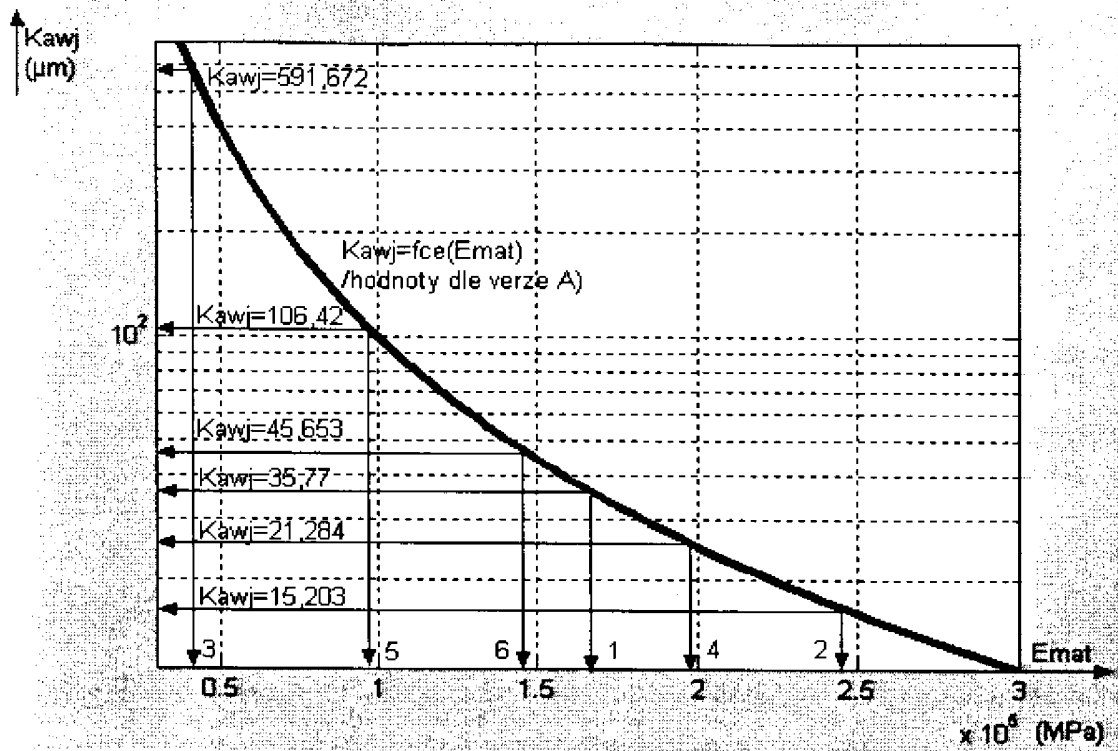
č. materiálu	Materiál	Kawj (A)	Kawj (B)	Kawj (C)	Kawj (D)	průměr
		(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
1	ocel ČSN 17 251	35,77	35,221	34,467	35,221	35,171
2	ocel ČSN 13 180	15,203	16,166	14,804	16,168	15,585
3	slitina SnPb40	591,672	580,077	632,4	574,804	579,429
4	ocel ČSN 11 140	21,284	25,317	24,41	25,328	24,085
5	Cu 99,5	106,423	101,106	117,292	101,211	106,509
6	ocel 17 618	45,653	47,363	44,633	47,628	46,319
	průměr	136	134,208	144,667	133,393	134,516
	dif. k průměru (%)	1,104	-0,229	7,547	-0,835	0

Obr. 24

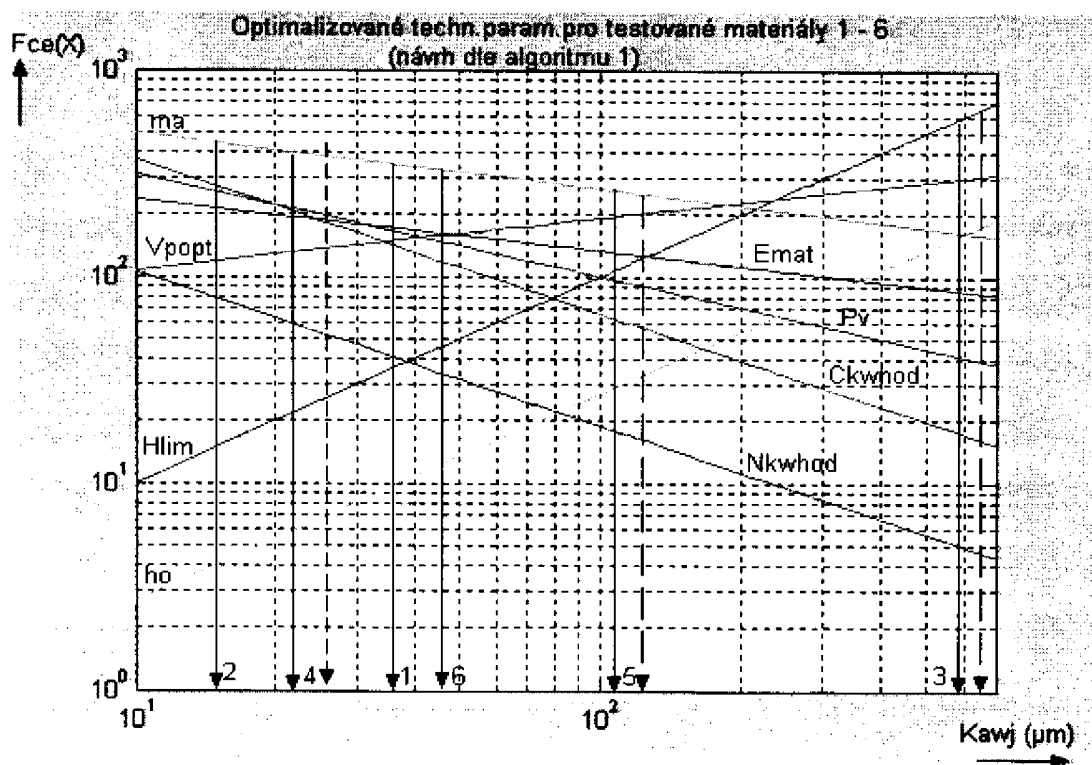
č. materiálu	Materiál	dif. Kawj (A)	dif. Kawj (B)	dif. Kawj (C)	dif. Kawj (D)
-	-	k průměru (%)	k průměru (%)	k průměru (%)	k průměru (%)
1	ocel ČSN 17 251	1,702	0,142	-2,002	0,142
2	ocel ČSN 13 180	-2,453	3,726	-5,013	3,739
3	slitina SnPb40	2,113	0,112	9,142	-0,798
4	ocel ČSN 11 140	-11,631	5,114	1,348	5,160
5	Cu 99,5	-0,080	-5,072	10,125	-4,974
6	ocel 17 618	-1,437	2,255	-3,639	2,827

Obr. 25

18/19 27.05.11

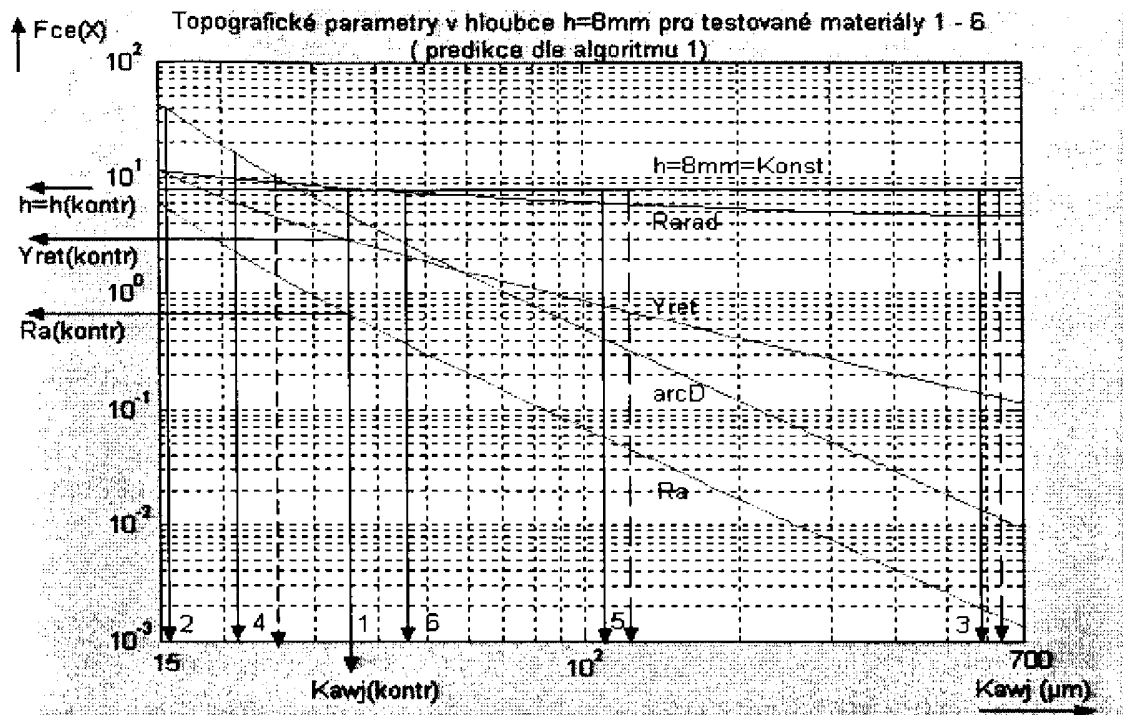


Obr. 26



Obr. 27

19/19 27.05.11



Obr. 28

ocel ČSN 13180(mat.2)	Kawj	Vpopt	Pv	m_a	Hlim	Nkwhod	Ckwhod	h_o	R_{rad} ($h=8\text{mm}$)
fyz.jednotka	(μm)	(mm/min)	(MPa)	(g/min)	(mm)	(kWhod)	(Kč/hod)	(mm)	(μm)
Kawj(A)	16,168	121,973	314,444	434,237	16,168	79,958	279,852	4,37	11,008
Kawj(str)	15,835	121,34	316,022	436,684	15,835	82,163	287,57	4,28	11,123
difer. (fyz.jedn.)	0,333	0,633	-1,578	-2,447	0,333	-2,205	-7,718	0,089	-0,115
difer. (%)	2,101	0,521	-0,499	-0,56	2,101	-2,684	-2,684	2,101	-1,03389

Obr. 29