

VYUŽITÍ COSMOS FLOWWORKS VE VÝUCE PŘI NÁVRHU DIFERENCIÁLNĚ ČERPANÉ KOMORY

MAXA Jiří – NEDĚLA Vilém, ČR

Resumé: V předloženém článku je popsáno využití systému Cosmos FloWorks ve výuce při řešení problematiky z oblasti elektronové mikroskopie. Tato výuka probíhá jako podмноžina výuky systémů Elektronické definice výrobku (EPD) a Řízení a správy podnikových dat (PDM). Výuka v tomto prostředí je vedena v širší souvislosti v návaznosti na probíhající výzkum na našem ústavu ve spolupráci s Ústavem přístrojové techniky Akademie věd ČR v oblasti elektronové mikroskopie.

Klíčová slova: CAx, EPD, PDM, PLM, Cosmos, FloWorks, EREM

DIFFERENTIALLY PUMPED CHAMBER OF VP-SEM COMPUTED BY THE USE OF COSMOS FLOWWORKS SOFTWARE

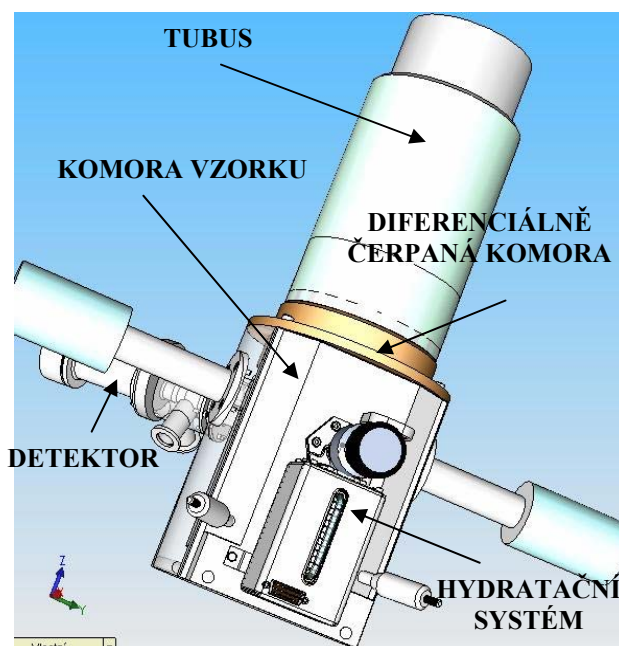
Abstract: *The world trend TPV tends complex solutions of the system from the from of a sketch to manufacture. In order to be prepared for this trend, the Universities are required to react to it. There is a system of courses described in the article which in forms the students about this methodology.*

Key words: CAx, EPD, PDM, PLM, Cosmos, FloWorks, EREM

1. Úvod

V předchozím článku *Propojení prostředí EPD a PDM ve výuce* byla popsána metoda výuky, při které studenti v prostředí simulující práci v podniku se zavedenými technologiemi Elektronické definice výrobku (EPD-SolidWorks) a systému pro správu a řízení podnikových dat (PDMWorks) v návaznosti na probíhající výzkum na ústavu ve spolupráci s ÚPT AV ČR vyvíjí Enviromentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM). V následujícím článku je popsána metoda, kdy studenti pomocí systému COSMOS FloWorks navrhují optimální tvar diferenciálně čerpané komory. Studenti tak při výuce systémů SolidWorks, PDMWorks a Cosmos FloWorks přímo řeší problematiku z praxe v návaznosti na teoretickou výuku z oblasti elektronové mikroskopie.

Přítomnost vysokého tlaku



Obr. 1 EREM AQUASEM II

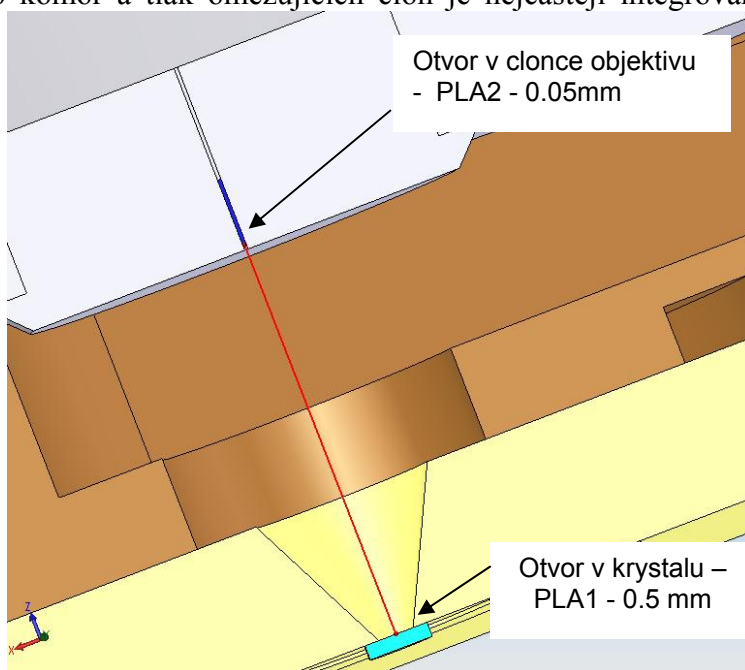
plynů (až 3000Pa) v komoře vzorku elektronového rastrovacího mikroskopu vytváří specifické nároky na konstrukci mikroskopu a jeho čerpací systém. Jednotlivé konstrukční části EREM, zejména diferenciálně čerpané komory, musí být navrženy tak, aby vyhovely náročným požadavkům na účinné čerpání jejich vnitřního prostoru a minimalizaci tlaku v něm. Relativní technologická náročnost tohoto mikroskopu je však více než kompenzována širokou škálou možností jeho využití a to ať již v módu vakua, nebo v módu vysokého tlaku.

Značnou tlakovou diferencí, vznikající mezi komorou vzorku ($3 \cdot 10^3$ Pa) a prostorem zdroje elektronů ($10^{-3} - 10^{-9}$ Pa, podle typu katody) VP-SEM, lze udržet díky systému diferenciálně čerpaných komor, tlak omezujících clon (PLA1 a PLA2 na obr.2) a účinnému systému čerpání plynu. Clony jsou opatřeny otvory s průměrem řádově desítek až stovek mikrometrů a umožňují účinné omezení proudění plynů mezi jednotlivými částmi mikroskopu a současně dovolují průchod elektronů od jejich zdroje až na vzorek. Systém těchto komor a tlak omezujících clon je nejčastěji integrován v tubusu EREM.

Mikroskop je zpravidla čerpán soustavou rotačních, difúzních či turbomolekulárních vývěv (prostor komory vzorku a s ním těsně sousedící diferenciálně čerpané komory), popřípadě iontových vývěv (prostor zdroje elektronů).

V důsledku vysokého tlaku plynů v komoře vzorku EREM, dochází ke zvýšenému počtu interakcí elektronů s molekulami a atomy plynu (nejčastěji vodní páry), což má za následek rozptyl primárního elektronového svazku.

Rozptyl primárních elektronů roste zejména se zvyšujícím se tlakem a středním atomovým číslem plynu, pracovní vzdáleností a s klesajícím urychlovacím napětím svazku. Tento rozptyl má za následek zvětšení průměru stopy primárního elektronového svazku, což se projeví zhoršením poměru signál šum v detekovaném signálu a v konečném důsledku to může vést až ke zhoršením rozlišovací schopnosti mikroskopu.



Obr. 2 Dráha primárního svazku elektronů při průchodu diferenciálně čerpanou komorou.

2. EREM AQUASEM II

Stavba dnes již plně funkčního experimentálního EREM AQUASEM II, jako nástupce starší verze tohoto mikroskopu, byla ve spolupráci s firmou TESCAN s.r.o dokončena v roce 2007 na ÚPT AV ČR v Brně. Jeho hlavním úkolem je testování nových detekčních systémů pracujících v podmínkách vysokého tlaku plynu nebo

vakua, studium obtížně pozorovatelných nebo speciálních vodu obsahujících nevodivých vzorků a realizace „in-situ“ dynamických experimentů.

Z výše uvedených důvodů se při konstrukci diferenciálně čerpané komory, jako hlavního konstrukčního prvku pro adaptaci mikroskopu na podmínky práce ve vysokém tlaku, hledala optimální varianta tvaru této komory. Schopnost účinného čerpání této komory je kritickým požadavkem ovlivňujícím kvalitativní parametry mikroskopu, jako je např. maximální velikost tlaku plynu v komoře vzorku, množství šumu v detekovaném signálu úzce související s rozlišením mikroskopu atd. Jedním z hlavních kritérií na výsledný design komory diferenciálního čerpání je minimální velikost tlaku plynů v oblasti optické osy mikroskopu, tedy v blízkém okolí svazku primárních elektronů procházejících touto komorou. Na (obr.2) je tato dráha označena červenou čarou. Tento prostor je stejný u všech variant, viz. (obr.3), rozdíly jsou ve tvaru a způsobu čerpání jednotlivých variant komor. Na základě předchozích zkušeností s touto problematikou byly předběžně navrženy tři základní tvary diferenciální komory, ze kterých se vybíral optimální tvar.

Varianta 1 – V této variantě je plyn z prostoru pro průchod primárního elektronového svazku diferenciálně čerpanou komorou čerpán jednosměrně a dále odváděn vymezeným prostorem mezi objektivem mikroskopu a diferenciálně čerpanou komorou (viz. obr. 3). Vymezený prostor pro odvádění plynu je v této variantě realizován tak, aby plyn odcházel po nejkratší možné dráze směrem k rotační vývěvě.

Varianta 2 – V této variantě je plyn z prostoru pro průchod primárního elektronového svazku diferenciálně čerpanou komorou čerpán jednosměrně, stejně jako v případě varianty 1. Odváděn je však celým objemem prostoru mezi objektivem mikroskopu a diferenciálně čerpanou komorou (viz. obr. 3).

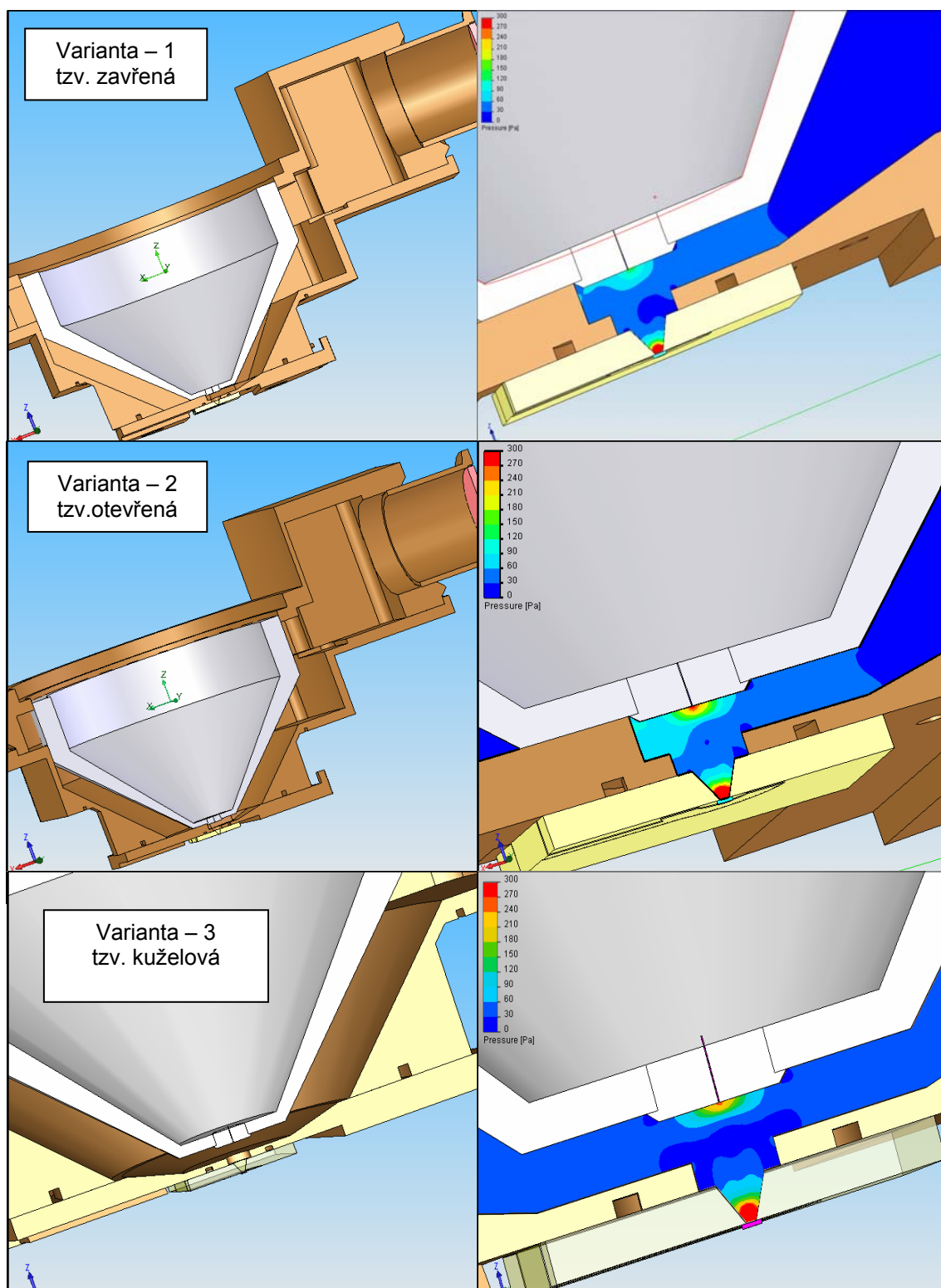
Varianta 3 – V této variantě je plyn z prostoru pro průchod primárního elektronového svazku diferenciálně čerpanou komorou čerpán všemi směry a maximálním možným objemem volného prostoru a stejně tak je i odváděn (viz. obr. 3). Odvod plynu v této variantě je koncipován stejně jako v případě varianty 2.

Tyto varianty byly vymodelovány pomocí systému SolidWorks a za pomoci modulu Cosmos FloWorks, díky kterému je možné analyzovat proudění plynů, byl podle uvedených požadavků hledán nejvhodnější tvar.

Pro výpočty prováděné pomocí Cosmos FloWorks byly definovány tyto okrajové podmínky. Na cloně PLA 2 s otvorem o průměru 0,05 mm umístěné mezi tubusem mikroskopu a diferenciálně čerpanou komorou byla stanovena podmínka statického tlaku 0,01 Pa. Analogicky v případě clony PLA 1 s otvorem 0,5 mm oddělující prostor diferenciálně čerpané komory a komory vzorku mikroskopu (viz obr. 2), byla stanovena hodnota tlaku 1500 Pa. Tato hodnota představuje maximální obvykle používanou hodnotu tlaku v komoře vzorku EREM.

Pro čerpací otvor diferenciálně čerpané komory byla v závislosti na vybraném typu rotační vývěvy nastavena hodnota hmotnostního toku odčerpávaného plynu na 0.00347 kg/s. Cosmos FloWorks umožňuje pro symetrické objekty nastavit výpočet pouze pro polovinu symetrického objektu a významně tím ušetřit čas výpočtu. V reálných podmínkách je proto hodnota hmotnostního toku dvojnásobná.

System Cosmos FloWorks umožňuje zpracovávat výsledky mnoha způsoby. V tomto případě byly sledovány hodnoty tlaku v oblasti dráhy primárního elektronového svazku procházejícího diferenciálně čerpaných komorou.



Obr. 3 Varianty diferenciálně čerpaných komor

3. Grafický výstup

Mezi prvními výsledky je možné sledovat průběh tlaků v diferenciálně čerpané komoře v grafickém vyjádření. Na obr.4 je vidět rozložení tlaků při nastavení stupnice pro tlak: 0 až 300 Pa. Toto rozmezí bylo voleno z důvodu, že jde právě o hodnoty vyskytující se ve sledované oblasti. Tato grafická znázornění rozložení tlaků slouží pro první, pouze orientační zhodnocení.

Obdobným způsobem je možné zobrazit i průběh rychlostí čerpaného plynu v komoře. Tyto informace však mají pro uvedený případ pouze pomocnou výpovědní hodnotu. Vysvětlují jev přechodného zvýšení tlaku u ústí tubusu (PLA2) (obr. 3), který vzniká v důsledku, že při nízkých tlacích molekuly plynu získávají v prostoru PLA1 velkou rychlost a následně dochází k jejich shlukování v horní část diferenciálně čerpané komory v prostoru PLA2. Z dosažených výsledků plyne úměrnost, že k čím vyšší rychlosti proudění ve sledované oblasti dochází, tím více stoupá tlak v oblasti PLA2.

4. Tlak v oblasti primárního svazku u zkoumaných variant

Pro volbu nejvýhodnější varianty je potřeba vyhodnotit průběh tlaků přímo v dráze primárního svazku. Z tohoto důvodu byla v této dráze vytvořena přímka (obr.2), na které systém vyhodnotí výsledky průběhu tlaků a hustoty plynu do tabulkové podoby, která je podkladem k vykreslení grafu. Na (obr. 4 a obr. 5) jsou vyneseny grafy této závislosti u všech tří sledovaných variant, kde na ose X je vynesena délka křivky zobrazující dráhu (obr. 2) průchodu primárního svazku elektronů komorou diferenciálního čerpání a na ose Y průběh tlaku. Pro větší přehlednost je tato dráha primárního svazku, měřící 5.56 mm, rozdělena do dvou grafů (obr. 4 a obr. 5).

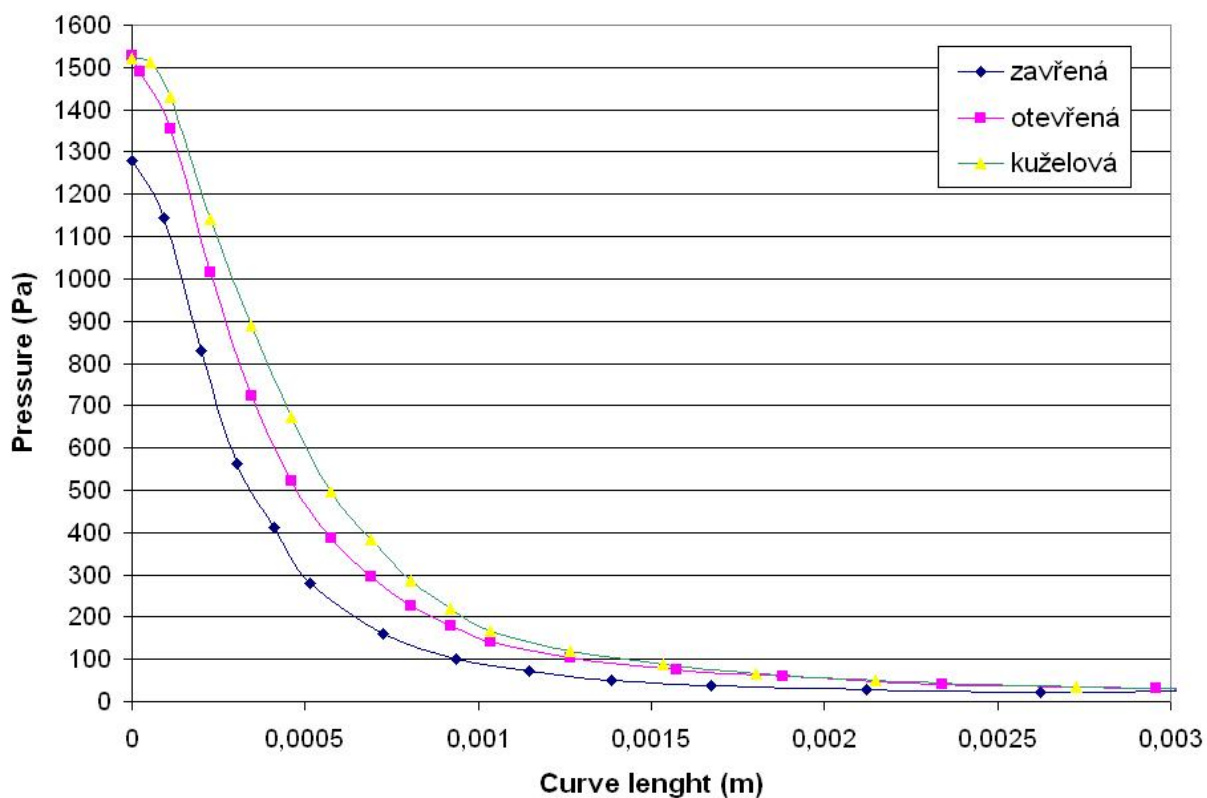
5. První kritérium volby

Vzhledem k tomu, že závislost tlaku na pravděpodobnosti počtu srážek molekul čerpaného plynu z diferenciálně čerpané komory s elektrony primárního svazku je lineární, lze brát jako jedno z kritérií výběru nejvýhodnější varianty tvaru aritmetický průměr tlaků a hustoty čerpaného média zjištěných na dráze primárního svazku.

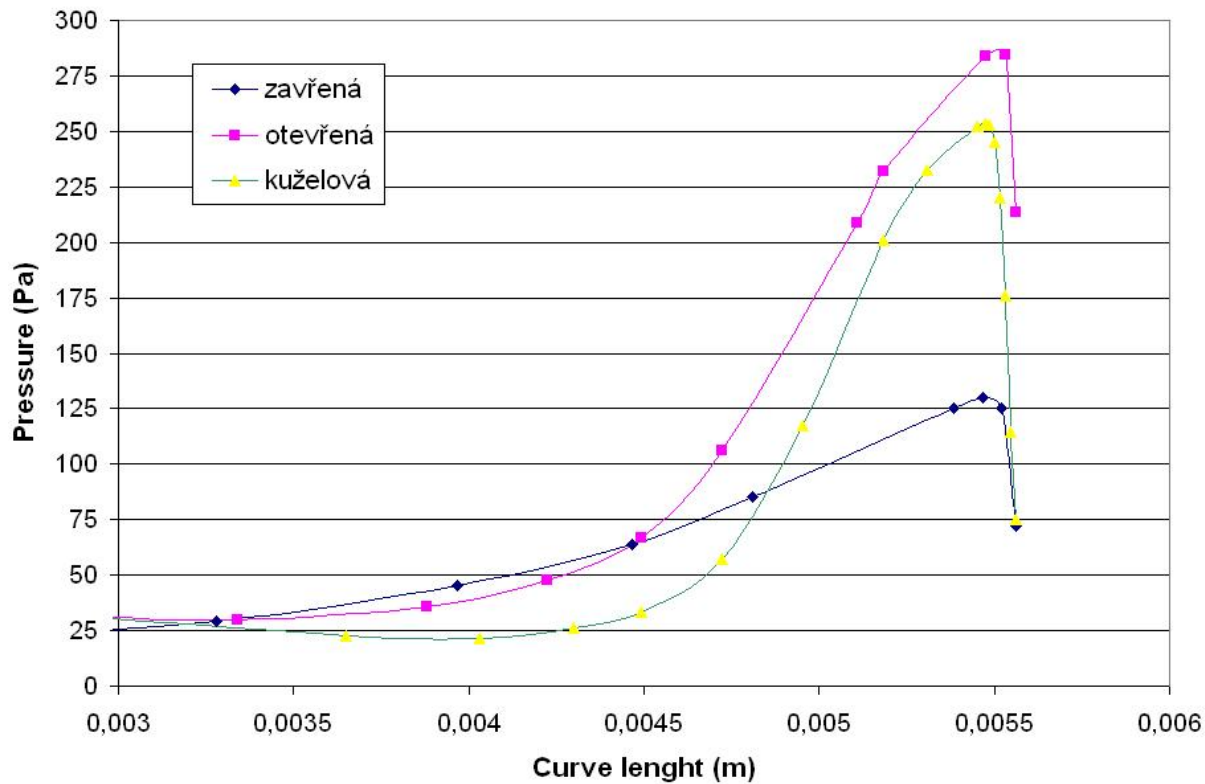
Tabulka 1: Hodnoty prvního kritéria výběru varianty

	ARITMERICKÝ PRŮMĚR TLAKU (Pa)	ARITMERICKÝ PRŮMĚR HUSTOTY MEDIA (KG/M³)
VARIANTA 1	269,2	0.00402009545
VARIANTA 2	372,5	0.004693754
VARIANTA 3	335,8	0,0045173986

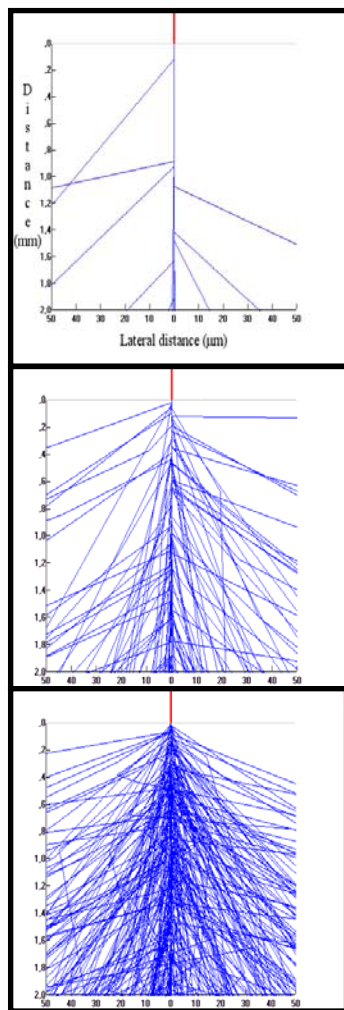
Z uvedených výsledků jako nejvýhodnější varianta vychází varianta 1, u které primární svazek elektronů na své dráze prochází v průměru prostředím s nejnižším tlakem a nejmenší hustotou média.



Obr. 4 Rozložení tlaku na křivce ve vzdálenostech 0 – 3 mm.



Obr. 5 Rozložení tlaku na křivce ve vzdálenostech 3 – 6 mm.



Minimální rozptyl
50 Pa
Rozptyl < 5%
 $M < 0.05$

Částečné rozptylování
1000 Pa
Rozptyl 5% - 95%
 M od 0.05 do 3

Úplný rozptyl
3000 Pa
Rozptyl > 95%
 $M > 3$

Obr. 6 Tři základní rozptylové režimy svazku primárních elektronů

odvodit tři rozptylové režimy (viz obr. 6)..

Režim charakterizovaný velikostí M , kde M nabývá hodnot v rozmezí od 0 do 0,05 je režimem minimálního rozptylu. Rovná-li se M hodnotě 0,05 je procentuelní vyjádření počtu elektronů majících při průchodu prostředím s vyšším tlakem kolizi rovno 5. Tento režim je využíván především při zkoumání látek běžnou metodou REM, při níž se hodnota M blíží velmi nule, tedy účinky rozptylu na svazek jsou minimální.

Režim úplného rozptylu (obr. 6), je charakterizován hodnotou M větší než 3. Zde se elektrony procházející plynným prostředím srážejí s atomy a molekulami z více než 95%, což je z hlediska zobrazení v mikroskopu nevhodující.

Kompromisním režimem je režim částečného rozptylu, na obr.6 uprostřed, pro nějž jsou charakteristické hodnoty m v rozmezí od 0,05 do 3.

Z uvedeného vyplývá, že druhým nutným kritériem pro volbu nejvýhodnější varianty je, aby dráha primárního svazku v diferenciálně čerpané komoře v místě nad komorou vzorku procházela prostředím vyššího tlaku po co nejkratší dráze.

6. Druhé kritérium volby

Pro určení druhého kritéria výběru správného řešení je třeba se nad problematikou ještě na chvíli zastavit. Základním požadavkem kladeným na mikroskopy pracující s vyšším tlakem v komoře vzorku, jako je uvedený případ, je tedy vytvořit takové podmínky pozorování, za kterých by převážná část elektronů elektronového svazku zůstala i po průchodu prostředím s vyšším tlakem v původní stopě. Tyto elektrony dopadají na povrch vzorku, od kterého se odrážejí a nesou informaci mající zásadní vliv na rozlišení.

V prostředí vyššího tlaku plynu dochází k četným srážkám primárních elektronů s molekulami plynu, přičemž elektrony ztrácejí část své energie a mění směr dráhy. Důsledkem toho je rozostření (rozptyl) primárního svazku, což lze řešit zvýšením hodnoty jeho proudu. Tím dosáhneme stejného poměru signálu k šumu jako ve vakuu. Závislost rozptylu na počtu interakci elektronů primárního svazku šířících se plynným prostředím, je určována uvedeným průměrným počtem srážek připadajících na jeden elektron, označovaným m . Od této veličiny, lze

Z tabulky 2 vyplývá, že nejkratší dráhu primárního svazku v prostředí s vyšším tlakem urazí elektrony u varianty 1.

Tabulka 2: Hodnoty druhého kritéria výběru varianty

	DÉLKA DRÁHY NA KTERÉ KLESNE TLAK NA HODNOTU (MM)	
	100 (Pa)	30 (Pa)
VARIANTA 1	0.93	1.8
VARIANTA 2	1.2	2.95
VARIANTA 3	1.35	2.7

7. Závěr

Na závěr výuky tak studenti vyhodnotili, že z výsledků obou kritérií výběru vyplynula jako nejvýhodnější varianta 1.

Zkušenosti s výukou, kde studenti při seznamování se systémem pro Elektronickou definici výrobku (EPD) – SolidWorks, systémem pro řízení a správu podnikových dat - PDMWorks a systémem CAE – Cosmos FloWooks využívají příklady řešení přímo z praktického výzkumu, se ukázaly jako velmi vhodně řešené. Tvorba 3D modelů a jejich následná simulace v oblasti proudění přímo doplňuje teoretickou výuku z problematiky elektronové mikroskopie a často se stává prvním krokem k zadání diplomových prací z daného tématu.

U studentů také vědomí, že přímo řeší problémy s praktickým výstupem a podílí se tak na výzkumu, zvyšuje motivaci ve výuce.

8. Literatura

1. MAXA, J. *Teorie zavedení simulovaného prostředí EPD a PDM do výuky*. Brno – VUT, FEKT, 2007.
2. NEDĚLA V., AUTRATA R.: *Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie*, Československý časopis pro fyziku, (3) (2005) 251.
3. MAXA, J.: *Experience with the establishment of teaching EPD and PDM*. Journal of mechanical engineering, 4th Int. Conference Design to Manufacture in Modern Industry, University of Maribor, 1999, str. 811 - 817.
4. www.solidvision.cz

Lektoroval: Doc. Ing. Vladimír Horák, CSc

Článek byl podpořen Akademií věd ČR, Grant KJB 200650602.

Kontaktní adresa:

Jiří Maxa, Ing. Mgr. Ph.D.,
Ústav elektrotechnologie, FEEC, VUT Brno,
Údolní 53, 602 00 Brno, ČR, tel. 00420 541 146
356, fax 00420 541 146 147,

Vilém Neděla, Ing. et Ing.
Ústav Přístrojové techniky AV ČR,
Královopolská 147, 612 64 Brno,
tel.: 420541514333, fax.: 420541514402,