

# TRDE PVD-PREVLEKE ZA ZAŠČITO ORODIJ ZA OBLIKOVANJE PLASTIKE

Peter Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

## POVZETEK

Vse hujše zahteve po povečanju produktivnosti in kvaliteti izdelkov so razlog, da so trde PVD-prevleke našle pot tudi v industrijo plastike. Tribološki problemi, s katerimi se srečujejo pri oblikovanju plastike, so: adhezijska obraba orodnih delov, ki so v medsebojnem stiku, abrazija zaradi učinka toka taline plastičnega materiala, korozija, ki jo povzročajo izhodni plini, poškodbe, ki nastanejo med izbijanjem izdelka iz orodja, in težave pri polnjenju gravure orodja s talino plastičnega materiala. Vse te težave lahko odpravimo ali vsaj zmanjšamo, če orodje zaščitimo z ustreznim postopkom inženirstva površin. V tem prispevku je poudarek na uporabi trdih PVD-prevlek za zaščito orodij za oblikovanje plastike.

## PVD coatings for protection of tools for plastic moulding

### ABSTRACT

Heavy demands for increased productivity and product quality are forcing the application of PVD hard coatings also in plastics industry. Tribological problems in tools for moulding of plastics are mainly adhesive wear of tool part surfaces which are in contact with each other, abrasion from the flow of molten plastic materials, corrosion of tool surfaces subjected to corrosive exhaust gases, release problems on surfaces in contact with the plastics and filling problems. All these problems can be solved or reduced by protection of tools with an appropriate surface treatment. In this paper the use of PVD hard coating for protection of plastic moulding tools is described.

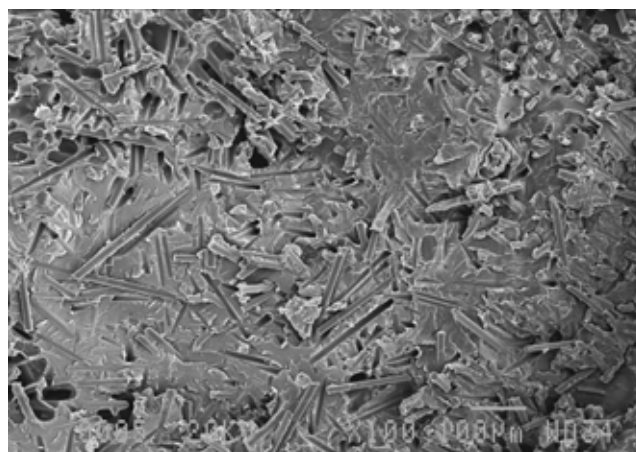
## 1 UVOD

V industrijski proizvodnji se uporabljajo različni postopki oblikovanja plastike: tlačno litje, tlačno brizganje in stiskanje v kalupe, pihanje in ekstruzija. Plastike, ki jih oblikujemo, pa so bodisi termoplasti (npr. polialkeni, polistireni, polivinilklorid, fluorirani polimeri, poliamidi, poliakrilat, linearni poliuretani), duroplasti (npr. fenolne in epoksi smole, aminoplasti, zamreženi poliuretani) ali elastomeri (npr. sintetični kaučuk, fluorirani elastomeri). Proizvodnja izdelkov iz plastike je eno od industrijskih področij z največjo rastjo. Zahtevajo se vse večje serije izdelkov, vse krajši časi izdelave, čim nižje cene in konstantna kakovost izdelkov. S plastikami na osnovi poli-acetatov, polikarbonatov, bakelita itd. se zamenjuje najrazličnejše materiale, npr. tekstil, les, papir, steklo in kovine.

Orodja za oblikovanje plastike so draga in v splošnem zelo zahtevna, saj vsebujejo veliko delov, ki so v medsebojnem gibanju. Da bi se zadostilo vsem tehničnim zahtevam uporabnikov glede mehanskih, obrabnih in drugih lastnosti izdelka, se plastiki dodaja najrazličnejša polnila (steklena vlakna,  $Al_2O_3$ -vlakna

in pigmente (npr.  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ), ki so trši od orodnega jekla, zato razijo delovno površino orodja (slika 1). Večja kot je koncentracija polnil, manjša je obstojnost kalupov za oblikovanje plastike. Oblikovanje plastike poteka pri velikih pritiskih, visokih temperaturah (do  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ) in hitrostih ter pri intenzivnem hlajenju. Hitrosti brizganja morajo biti čim večje, da talina zalije kalup, preden se strdi. To je še zlasti pomembno, če je talina zelo viskozna. Posledica velikih termičnih, mehanskih in korozijskih obremenitev je obraba orodja. Težave v proizvodnji izdelkov iz plastike pogosto nastanejo tudi pri snemanju oz. izmetavanju izdelka. Zaradi izredno hitrega ohlajanja in sprijemanja se izdelek lahko v kalup zagozdi.

Od orodnega materiala za oblikovanje plastike zato zahtevamo, da je odporen proti abrazijski obrabi, veliki tlačni napetosti in koroziji, imeti mora veliko toplotno prevodnost in majhno kemijsko afiniteto do taline. Še posebej pomembno je dobro tečenje snovi v modelu in lahko ločevanje izdelka od orodja. Ključni mehanizmi obrabe orodij za oblikovanje plastike so torej abrazija, adhezija, korozija, sprijemanje in utrujanje. Tovrstne tribološke probleme najpogosteje rešujemo z ustreznim postopkom površinske zaščite<sup>(1-5)</sup>. V praksi se uporabljajo postopki, kot so plazemsko nitriranje, nanos trdih PVD-prevlek (fizikalni postopki nanašanja), dupleksni postopki (kombinacija plazemskega nitriranja in nanosa PVD-prevleke), kemijski postopek nanašanja iz parne faze v plazmi (PACVD) in ionska implantacija.



Slika 1: Steklena vlakna v plastični snovi na osnovi polifenil sulfida (PPS), ki jo v podjetju Metallflex uporabljajo za izdelavo mikrostikal

## 2 MEHANIZMI OBRABE ORODIJ

V nadaljevanju so opisani tribološki problemi, s katerimi se srečujemo pri brizganju plastike. Vzroki za obrabo orodja so naslednji:

**1. korozija**, ki jo povzročajo reakcijski plini ali razgradnja produktov. Korozijo orodja za oblikovanje plastike povzroča vlaga iz granulata, sredstvo za ločevanje in plini, ki izhajajo iz taline plastike. V nekaterih primerih, npr. PVC, deluje površina jekla kot katalizator za njegov razpad. Pri tem nastaja klorovodik, ki reagira s parami vode in tvori solno kislino. Na površini orodja se zato pojavi jamičasta korozija. Korozijski produkti se odlagajo na površini orodja in se pogosto prenašajo na izdelek. Koroziji so izpostavljeni vsi deli orodja, ki so v neposrednem stiku s plastiko, najbolj intenzivna pa je na mestu odzračevanja.

**2. abrazija** zaradi pretoka materiala v stiku z delovno površino gravure. Abrazijsko obrabo povzročajo delci polnil in barvil v staljeni snovi. Do abrazijske obrabe pride na vseh tistih delih orodja, ki so neposredno izpostavljeni curku staljene snovi. Orodja za oblikovanje plastike so toliko bolj občutljiva za abrazijsko obrabo, ker mora biti njihova površina visoko polirana. V industrijski proizvodnji je zato potrebno pogosto poliranje takšnega orodja.

**3. adhezija**, ki jo povzroča ciklično medsebojno gibanje nekaterih delov orodja (npr. drsenje različnih trnov in ejetorjev po kanalnih matrice). Pri tem nastanejo mikrosprimki, še zlasti, če ne uporabljamo mazanja. Drugi vzrok za adhezijsko obrabo je kemijska afiniteta med talino in jeklom, ki vodi do nastanka oblog.

**4. toplotno-mehanske obremenitve**; zaradi cikličnih termičnih in mehanskih obremenitev nastane termično in mehansko utrujanje orodnega jekla.

Obraba površine orodja nastane tudi med izbijaanjem oz. snemanjem izdelka iz kalupa. Vzrok za sprijemanje je bodisi neustrezna geometrija orodja ali pa velika kemijska afiniteta obeh materialov. Po brizganju in hitri ohladitvi se izdelek zagozdi v kalup oz. sprime z njegovo površino. Pri izbijaanju izdelka iz kalupa je odločilen parameter koeficient trenja, ki ga določata hrapavost površine in temperatura. Kadar temperatura orodja preseže neko mejno vrednost, ki je odvisna od vrste plastike, koeficient trenja skokovito naraste. Sile izbijaanja izdelka morajo biti zato zelo velike, zato se izdelki pri tem deformirajo. Orodja za brizganje plastike morajo biti zato visoko polirana. Problem sprijemanja se zmanjša z uporabo ustreznega ločilnega sredstva. Poseben problem je lokalno sprijemanje plastike na tiste dele orodja, kjer je temperatura največja (npr. področje tankih sten).

Mehanske lastnosti, dimenzijska natančnost in kakovost površine izdelka so zelo odvisni od tečenja taline v kalup. Če so poti tečenja dolge, lahko zaradi trenja nastanejo zaostanki, izguba pritiska in temperaturne razlike. Vse to vpliva na krčenje izdelka in potek kristalizacije taline. V nekaterih primerih staljena snov ne zapolni vseh delov orodja, preden se strdi, tedaj so končni izdelki neuporabni. Vzrok za takšne težave je lahko v geometriji orodja, neustrezno izbranih parametrih brizganja ali veliko trenje med staljeno snovjo in površino orodja.

Naslednji problem pri orodjih za oblikovanje plastike so obloge. Nastanejo iz hlapov, ki izhajajo iz taline in se kondenzirajo v gnezdih orodja. Obloge ovirajo polnjenje kalupov s talino, poslabšajo kakovost površine izdelka in ovirajo izbijaanje izdelka. Odstranjevanje oblog je zamudno in drago opravilo. Hkrati obstaja nevarnost, da poškodujemo površino orodja. Neizbežno je ponovno poliranje ali zamenjava delov orodja.

Posledice obrabe orodja so: nezadovoljiva kakovost površine brizganih delov, sprijemanje izdelkov na gravuro orodij, zastoji v proizvodnji, majhne proizvodne serije in majhna produktivnost.

## 3 ZAŠČITA ORODIJ ZA OBLIKOVANJE PLASTIKE

Mehanske lastnosti plastike izboljšamo z dodatkom polnil, kot so npr. steklena vlakna ali vlakna  $Al_2O_3$ . Trdota *HV* steklenih vlaken je 1200, vlaken  $Al_2O_3$  pa 2300. Tudi trdota pigmentov, ki se dodajajo plastiki, je večja od trdote orodnega jekla. Tako je npr. trdota *HV* pigmentov  $TiO_2$  1200, trdota pigmentov  $Cr_2O_3$  pa 2300. Zato ni presenetljivo, da so orodja za oblikovanje plastike izpostavljena veliki abrazijski obrabi. Nitiranje orodnega jekla ne rešuje tega problema, saj je trdota *HV* površine jekla po nitiranju okrog 1200, kar je manj od trdote večine polnil in pigmentov.

Abrazijsko obrabo lahko preprečimo le z nanosom nekaj mikrometrov debele trde PVD-prevleke, ki mora imeti trdoto *HV* večjo kot 2000. Zaščita pred abrazijsko obrabo je še zlasti pomembna pri orodjih za brizganje plastike, kjer je treba preprečiti topografske spremembe in nastanek luknjic. Abrazijsko obrabo lahko v veliki meri preprečimo z nanosom TiN- ali TiAlN-prevleke ali pa z nanosom mehkejše, vendar debelejše (5–10  $\mu m$ ) CrN-prevleke. Prvi dve prevleki sta primerni zlasti v primeru, kadar vsebuje plastika pigment  $Cr_2O_3$  in vlakna  $Al_2O_3$  za ojačitev. V tem primeru mehkejša CrN-prevleka (*HV* 1850) ni primerna za zaščito. Obstočnost orodja za brizganje plastike, ki ga zaščitimo s trdimi PVD-prevlekami, se poveča tudi za desetkrat. Drugi primer uporabe trdih



**Slika 2:** Polž za ekstruzijo PVC, zaščiten z dupleksnim postopkom: kombinacija plazemskega nitriranja in nanosa PVD-prevleke (v tem primeru je bila to večplastna struktura na osnovi CrN. Vir: Metaplas, Nemčija)

PVD-prevlek za zaščito pred močno abrazijsko obrabo so noži za peletizacijo in polž plastifikatorja (slika 2).

Z adhezijsko obrabo se srečujemo pri tistih delih orodja, ki so v medsebojnem gibanju. Za zaščito takšnih delov zadostuje nekaj mikrometrov debela trda prevleka. Za zaščito jeklenih delov orodja se praviloma uporablja TiAlN-prevleka, CrN-prevleka pa za zaščito delov iz bakrovih zlitin, medtem ko je plazemsko nitriranje najprimernejše za zaščito cilindrov z majhnim premerom.

Kot smo že omenili, so mehanske lastnosti, dimenzijska natančnost in kakovost površine izdelka zelo odvisni od tečenja taline v kalup. V veliko primerih se problem slabega tečenja taline in nepopolne zapolnitve kalupa lahko zmanjša z nanosom trde prevleke, ki mora imeti majhen koeficient trenja. Trda prevleka omogoča lažji tok taline v orodje s kompleksno konturo (dolgi kanali in tankimi stenami) pri manjših pritiskih brizganja.

Oblikovanje plastike poteka pri relativno visokih temperaturah. Če pride takšno orodje v kontakt z vodo (npr. med mokro peletizacijo), lahko nastane elektrokemijska korozija. Tudi plastika ali njeni razpadni produkti lahko povzročijo korozijo. Omenili smo že, da deluje površina jekla kot katalizator za razpad PVC-polimerov. Pri tem se zaradi vodne pare tvori solna kislina. Vpliv korozije lahko zmanjšamo tako, da uporabimo visokolegirana jekla. Ta so po eni strani precej dražja, po drugi strani pa so korozijsko odporna jekla manj trda in zato obrabno manj obstojna. Nitriranje jekel z veliko vsebnostjo kroma ni rešitev tega problema, ker hkrati izgubimo korozijsko obstojnost.

Eden od načinov korozijske zaščite orodij je nanos nekaj mikrometrov debele trde PVD-prevleke. Ker imajo boljše elektrokemijske lastnosti, so korozijsko zelo obstojne. Nanos trde PVD-prevleke lahko prepreči korozijo ali pa jo vsaj zakasni, saj zmanjša dostop elektrolita do jeklene podlage in ovira odstranjevanje korozijskih reakcijskih produktov.

Drug pomen trde prevleke je v tem, da ustavi nastajanje agresivnega medija. Zaščita pred korozijo s PVD-prevlekami je tem bolj učinkovita, čim večja je njena gostota. V nekaterih primerih imajo trde prevleke stebričasto mikrostrukturo. V njih je tudi relativno veliko mikroskopsko majhnih por. Pore in meje med stebričastimi zrni pa omogočijo dostop elektrolita do podlage, zato korozije ne moremo preprečiti, če brizgamo močno korozivno plastiko. Trda prevleka zato sama po sebi torej ne zagotavlja zadostne korozijske obstojnosti. Zato je v takih primerih smiselno nanesti trdo prevleko na predhodno kemijsko poniklano površino orodja.

Večina neželenih (elektro)kemijskih reakcij, ki vodijo do korozije in nastanka oblog, steče pospešeno na trdni površini, zato mora biti stična površina orodja za oblikovanje plastike čim manjša. Zato poliranje površine izboljša korozijsko obstojnost. Polirana površina omogoči rast bolj goste plasti. Omočljivost takšne površine je manjša. Manjša je tudi gostota por.

Problem korozije se najbolj uspešno rešuje z ionsko implantacijo kroma v površinsko plast orodja. Tako lahko pri sobni temperaturi v vrhno plast orodja implantiramo do 30 % kroma. Na površini se med delovanjem orodja tvori pasivacijska oksidna plast, ki preprečuje korozijo. Postopek ionske implantacije je drag in ne omogoča obdelave večje površine orodja. Uporablja se v primerih, ko je korozija lokalizirana na relativno majhno površino (npr. ventili za odzračevanje).

Polirane površine tudi zmanjšajo silo, ki je potrebna za izbijanje izdelka. To silo dodatno zmanjšamo, če uporabimo sredstva za ločevanje, predvsem pa z nanosom trde prevleke. Problem sprijemanja se lahko zmanjša z ionsko implantacijo dušika ali z nanosom trde PVD-prevleke.

V nekaterih primerih uporaba maziv in sredstev za ločevanje ni dovoljena (npr. izdelki za farmacevtsko ali prehransko industrijo). V takih primerih lahko dele orodja, ki med obratovanjem drsijo, zaščitimo s tanko plastjo trdega maziva (npr. WC/C). WC/C-prevleka ima odlične drsne lastnosti, je relativno trda (HV 1100), odporna proti freting-koroziji in omogoča suho delovanje gibljivih delov (kot so npr. trni za izbijanje, vodila).

Naslednja težava je nastajanje oblog na površini orodja. Obloge nastanejo na mikroskopsko majhnih razpokah. Ker so kemijsko dokaj inertne, trde prevleke onemogočajo nastanek oblog. Čiščenje je manj pogosto in lažje. Orodje naredi zato večje serije, stroški vzdrževanja pa so manjši. Če ni oblog, je tok taline manj oviran.

Opozoriti moramo na še na eno težavo, s katero se srečujemo pri ekstruziji polietilenske (PE) plastike brez polnil – to je kosmičenje. Pigmenti na osnovi

**Tabela 1:** Zaščita orodij za oblikovanje plastike

Vrsta problema	Najprimernejši postopek zaščite
adhezijska obraba	trde TiAlN- in CrN-prevleke
abrazijska obraba	majhna in srednje velika abrazijska obraba: implantacija dušika močna obraba: trde PVD- in PACVD-prevleke
korozijska obraba	za zaščito ventila za odzračevanje: ionska implantacija kroma za luknje in jedra: trda CrN-prevleka
obraba sestavnih delov orodja iz mehkih kovin	trda CrN-prevleka
problem izbijanja izdelkov	Kemijsko afiniteto plastike do jekla zmanjšamo z nanosom PVD-prevleke ali z ionsko implantacijo dušika.
problem oblog	Nastajanje oblog preprečimo z nanosom PVD-prevleke ali z ionsko implantacijo dušika.
problem polnjenja	prevleka z majhnim trenjem (vrsta prevleke je odvisna od vrste plastike)

**Tabela 2:** Primerjava različnih postopkov zaščite orodij za oblikovanje plastike

	Postopek površinske zaščite			
	PVD	PACVD	Plazemsko nitriranje	Ionska implantacija
Delovna temperatura	180–450 °C	500–520 °C	480–580 °C	<200 °C
Debelina prevleke, difuzijske cone, globine implantacije	2–5 µm	2–5 µm	20–300 µm	<0,4 µm
Vpliv površinske obdelave, oblike orodja in dimenzije	zanemarljiv	manjše dimenzijske spremembe, zaobljenje ostrih robov	manjše dimenzijske spremembe	ni vpliva
Optimalne lastnosti	preprečuje adhezijsko in abrazijsko obrabo in v manjši meri korozijsko	preprečuje adhezijsko in abrazijsko obrabo	Preprečuje adhezijsko obrabo, v manjši meri tudi abrazijsko in korozijsko	preprečuje adhezijsko in korozijsko obrabo
Področje uporabe	zaščita vseh sestavnih delov orodja z izjemo delov z ozkimi režami ali luknjami	zaščita orodij s komplicirano geometrijo (luknje, utori)	najpogostje se uporablja v kombinaciji s PVD-prevlekami	manjši deli orodja (npr. deli ventila za odzračevanje)

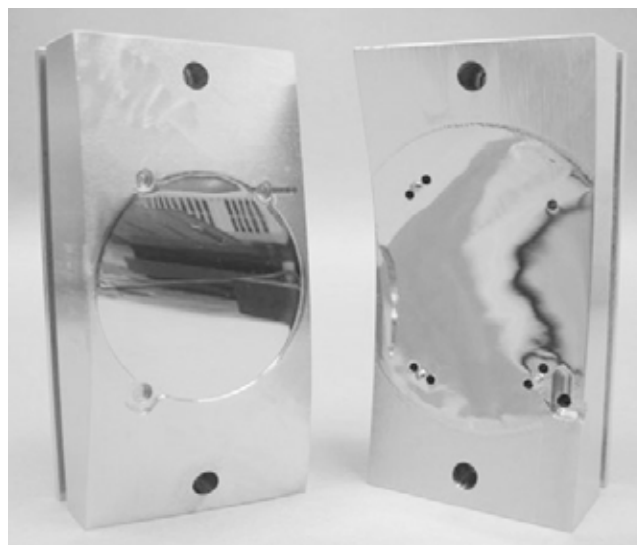
bakrovih, železovih in titanovih oksidov so polarne spojine, zato nastane v nepolarnem mediju, kot je PE, kosmičenje. Posledica je nehomogena barva izdelka. Tudi kosmičenje pigmentov se v veliki meri prepreči, če ekstruzijski polž zaščitimo s trdo TiN- ali TiAlN-prevleko. Pojav makrodelcev opazimo tudi pri

oblikovanju polikarbonatov (PC). V tem primeru nastanejo razpadni produkti na osnovi ogljika, ki se združujejo v makrodelce. TiN-prevleka prepreči razpadanje PC.

V nekaterih primerih dosežemo zadovoljivo zaščito orodij za oblikovanje plastike le s kombinacijo



**Slika 3:** Matrice iz elektrolitskega niklja, ki smo jih zaščitili z nizkotemperaturno CrN-prevleko, v proizvodnji zob iz polimetilmetakrilata (PMM) v podjetju Polident (Volčja Draga pri Novi Gorici)



**Slika 4:** Orodje za brizganje plastike v proizvodnji podjetja Hella (Ljubljana), ki smo ga zaščitili s TiN-prevleko

plazemskega nitriranja in trde PVD-prevleke. Tak primer so orodja za oblikovanje plastike z veliko vsebnostjo steklenih vlaken. Konkreten primer je orodje za izdelavo plastičnih ohišij iz poliamida s 35-odstotno vsebnostjo steklenih vlaken. Zahtevana globina nitriranja je od 0,15 mm do 0,3 mm in je odvisna od vsebnosti kroma v jeklu. Trda CrN-prevleka debeline 6  $\mu\text{m}$  v obliki večplastne strukture zagotovi ne samo ustrezno abrazijsko, ampak tudi korozijsko odpornost. Tudi orodja za izdelavo zelo gladkih površin (npr. reflektorji za žaromete) se pogosto zaščitijo s kombinacijo plazemskega nitriranja in nanosa PVD-prevleke. Tako zaščiteno orodje, narejeno iz jekla za delo v toplem, obdrži majhno hrapavost in sijaj tudi po veliki seriji brizgov. Dupleksni postopek zaščite je v primerjavi z nanosom PVD-prevlek precej dražji.

Trde prevleke ne zagotavljajo samo zaščite orodja pred obrabo, ampak so zaradi izrazite barve tudi indikator obrabe. Uporabnik orodja lahko dovolj zgodaj (ko so poškodbe še dovolj plitve) opazi začetek obrabe orodja in pravočasno ukrepa.

#### 4 SKLEP

Trde PVD-prevleke lahko znatno povečajo obstojnost orodja za oblikovanje plastike (tudi deset- in večkrat). Če so orodja prekrita s trdo PVD-prevleko (slika 3, 4), je potrebno manj pogosto čiščenje orodja, izmetavanje izdelkov je lažje, tok taline je lažji, kakovost površine izdelkov pa boljša. Najbolj univerzalna prevleka je CrN, ki je primerna za zaščito orodij za oblikovanje termoplastov, duroplastov in elastomerov. TiN-prevleka je uspešna predvsem pri zaščiti orodij za oblikovanje nekaterih termoplastov. Kadar oblikujemo plastiko z veliko koncentracijo polnil, je najbolj primerna zaščitna prevleka na osnovi TiAlN.

#### LITERATURA

- <sup>1</sup>B. Navinšek, Trde zaščitne prevleke, Institut "Jožef Stefan", 1993
- <sup>2</sup>O. Kayser, Vacuum in Forschung und Praxis 14 (2002) 3, 156–160
- <sup>3</sup>E. J. Bienk, N. J. Mikkelsen, Wear 207 (1997), 6–9
- <sup>4</sup>O. Kayser, Kunststoffe plast Europe, July 1995, 11–13
- <sup>5</sup>[http://www.tribo.dk/plastics\\_moulds.html](http://www.tribo.dk/plastics_moulds.html)
- <sup>6</sup>P. Panjan, M. Čekada, Zaščita orodij s trdimi PVD-prevlekami, Institut "Jožef Stefan", 2005