

3 OPTIMALIZÁCIA VÝROBY VÝTVARKU TECHNOLÓGIOU CNC KONVENČNÉHO TLAČENIA

Úvod

Jedným z výrazných trendov v oblasti spracovania materiálov technológiou tvárnenia, zaznamenanom v ostatnom období, je zvýšený záujem o procesy, založené na princípe lokálnej plastickej deformácie materiálu, ktorá je realizovaná postupne v malých objemoch, prírastkovým (inkrementálnym) spôsobom. Takýto spôsob plastického pretvorenia materiálu, nazývaný inkrementálne tvárnenie (IF – Incremental Forming) sa v praxi uplatňuje v objemovom tvárnení a v nasledovných technologických procesoch plošného tvárnenia a v oblasti dokončovacích technológií, ako sú: vyklepávanie (Hammering), viacbodové tvárnenie (Multi-Point Forming), tvárnenie laserovým zväzkom (Laser Forming), tvárnenie kvapalinovým prúdom (Water Jet Forming), inkrementálne plošné tvárnenie (Incremental Sheet Forming), tlačenie (Metal Spinning), guľčkovanie (Shot Peen Forming) a valčekovanie (Roller Peening). (Câmara, 2009) (Šugárová, 2016)

Medzi základné znaky aplikácie inkrementálneho pretvorenia materiálu v procesoch plošného tvárnenia patrí skutočnosť, že získanie požadovaného tvaru výtvarku možno aj bez použitia formy (pozitívneho alebo negatívneho modelu výtvarku), s použitím univerzálnych a relatívne ľahko dostupných výrobných zariadení. Pozitívum je aj vysoká pružnosť na zmeny výrobného sortimentu, čo predurčuje túto technológiu na využitie v segmente kusovej a malosériovej výroby. Druhou, nemenej dôležitou skutočnosťou je fakt, že v procese inkrementálneho tvárnenia sa zlepšujú – často významne – charakteristiky tváriteľnosti spracovávaného materiálu (Emmens et al., 2010), ale aj výsledné exploatačné vlastnosti výtvarkov (Šugárová, 2008).

3.1 Technológia tlačenia

Pre proces tlačenia je charakteristické, že rotujúci polotovar, pôsobením tlačného nástroja sa postupne plastickey deformuje a nadobúda tvar predom zhotoveného modelu. (Šugár a Šugárová, 2009) Dochádza k prírastkovému pretvoreniu materiálu rotujúceho polotovaru (prístrihu, výtvarku alebo rúry) nástrojom (pri CNC tlačení je to najčastejšie kladka), ktorý v kontaktnom mieste pôsobí na polotovar a tvaruje ho do požadovaného tvaru natláčaním na tvárnicu (model), ako je uvedené na Obr. 3.1 (Music et al., 2010). V minulosti bol pohyb tlačného nástroja aktivovaný a riadený manuálne, neskôr hydraulicky. Začiatkom 70. rokov 20. storočia viedli neustále sa zvyšujúce požiadavky na skrátenie výrobného času výtvarku pri zachovaní jeho kvalitatívnych parametrov, k vývoju CNC strojov pre technológiu tlačenia, ktoré umožňujú väčšiu flexibilitu výroby, nakoľko pohyb tlačného nástroja môže byť vopred naprogramovaný. Týmto procesom možno vyrábať tvarovo zložité rotačne symetrické výtvarky s rôznym tvarom povrchovej krivky, ktorých tvar sa dosahuje na jednu, alebo viac operácií, pričom riadením dráhy nástroja a tvárniacej sily možno vyrobiť aj osovo asymetrické súčiastky. (Šugárová, 2016) CNC stroje, v porovnaní s hydraulicky vedenými pohybmi, rozšírili výrobné možnosti súčiastok, ktoré môžu byť touto technológiou vyrobené, však na druhej strane, nevýhodou týchto strojov je ich vysoká obstarávacía cena a tiež potreba kvalifikovanej pracovnej sily so skúsenosťami v programovaní (Wong et al., 2003).

V súčasnosti sa tvárnenie materiálu realizuje najmä použitím viacerých dopredných a spätných prechodov tlačného nástroja, ktoré prebieha pri teplote okolia. Existujú však

špeciálne prípady, keď je proces tlačenia realizovaný pri zvýšených teplotách, a to napr. pri výrobe súčiastok z hrubostenných materiálov alebo materiálov s nízkou hodnotou ťažnosti (Zhan et al. 2015). Technológia tlačenia je finančne efektívna najmä pre malosériovú výrobu (do 1 000 kusov), rozsiahlo je využívaná najmä pri výrobe prototypov. Na výrobu väčšieho počtu kusov je vhodnejšie aplikovať technológiu hlbokého ťahania, alebo kombináciu hlbokého ťahania a tlačenia. Výhodami tlačenia sú nízke tvárniace sily, jednoduchá konštrukcia náradia, flexibilita výrobného procesu, vysoká kvalita povrchu a dobré finálne vlastnosti výtvarku (Bewlay a Furrer, 2006).

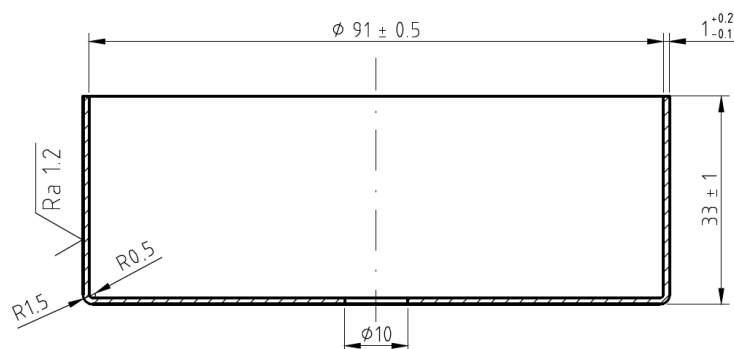


Obr. 3.1. Proces tlačenia
1 – kladka, 2 – model, 3 – upínací prípravok, 4 – výtvarok

V nasledujúcej časti štúdie bude uvedený postup návrhu a optimalizácie výroby valcového výtvarku technológiou CNC konvenčného tlačenia.

3.2 Voľba polotovaru

Voľba polotovaru vychádza z výrobného výkresu súčiastky, uvedeného na Obr. 3.2. Je to súčiastka, ktorá sa aplikuje vo vzduchotechnike. Je vyrábaná z oceľového materiálu DC01 plechu nízkouhlíkovej ocele (1.0330; chemické zloženie materiálu je uvedené v Tab. 3.1 a mechanické vlastnosti získané podľa ISO 6892-1:2016 štandardnou skúškou jednoosovým ťahom sú uvedené v Tab. 3.2) s východiskovou hrúbkou $s_0 = 1$ mm.



Obr. 3.2. Tvar a rozmery výtvarku

Tabuľka 3.1. Chemické zloženie materiálu DC01 (Alfun, 2018)

	C (hm. %)	Mn (hm. %)	P (hm. %)	S (hm. %)	Si (hm. %)	Al (hm. %)
DC01	0,050	0,260	0,010	0,009	0,007	–

Tabuľka 3.2. Vybrané mechanické vlastnosti materiálu DC01 (Alfun, 2018)

Vlastnosť	Hodnota
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	297,0
Dohovorená medza skľuzu $R_{p0,2}$ (MPa)	216,0
Tvrdosť podľa Vickersa $HV0,05$	125,8
Ťažnosť A_{80} (%)	38,1

Pri výpočte rozmeru východiskového polotovažu sa vychádza z objemu 3D CAD modelu výtvarku, a to: $V_{3D} = 15\,838,5 \text{ mm}^3$. Pri výpočte je nutné brať do úvahy aj technologický prídavok na strihanie, ktorý je definovaný koeficientom k_p . Objem prístrihu V_B sa vypočíta podľa (3.1), ako:

$$V_B = V_{3D} \cdot k_p = 15\,838,5 \cdot 1 = 15\,838,5 \text{ mm}^3 \quad (3.1)$$

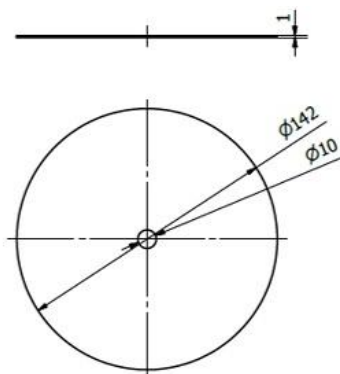
kde k_p je empirický koeficient technologického prídavku na strihanie prístrihu a jeho hodnota je 1.

Východiskový priemer polotovaru d_p sa opiera o zákon konštantnosti objemu a vypočíta sa podľa vzťahu (3.2):

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot V_B}{\pi \cdot s_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15\,838,5}{\pi \cdot 1}} = 142,04 \cong 142 \text{ mm} \quad (3.2)$$

kde s_0 je východisková hrúbka materiálu (mm).

Kruhový polotovar (prístrih) s priemerom 142 mm bol vyrezaný pomocou laserového zväzku. Laserovým zväzkom bol taktiež vytvorený kruhový otvor na dne výtvarku priemeru 10 mm (Obr. 3.3), ktorý slúži na upnutie a ustavenie prístrihu na model.



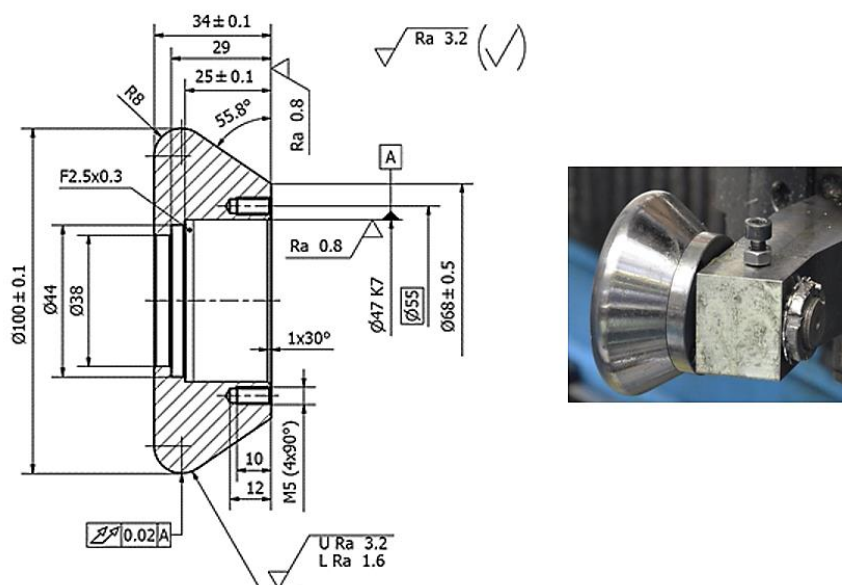
Obr. 3.3. Tvar a rozmery polotovaru

3.3 Návrh modelu a tlačného nástroja

Pri procese tlačenia sa na dosiahnutie požadovaného tvaru výtvarku používa trecí tlačný nástroj alebo tlačná kladka. Pri výrobe uvedeného výtvarku sa aplikovala tlačná kladka (Obr. 3.4), ktorej základné rozmery (priemer kladky D_K a polomer zaoblenia aktívnej časti kladky r_K) boli navrhnuté podľa vzťahov (3.3) a (3.4) (Music et al. 2010):

$$D_K = 0,1 \cdot d_p + 120 \pm 60 = 0,1 \cdot 142 + 120 - 34,2 = 100 \text{ mm} \quad (3.3)$$

$$r_K = (0,012 \text{ až } 0,05) \cdot d_p = 0,05 \cdot 142 = 7,1 \text{ mm} \cong 8 \text{ mm} \quad (3.4)$$



Obr. 3.4. Tvar a rozmery tlačnej kladky

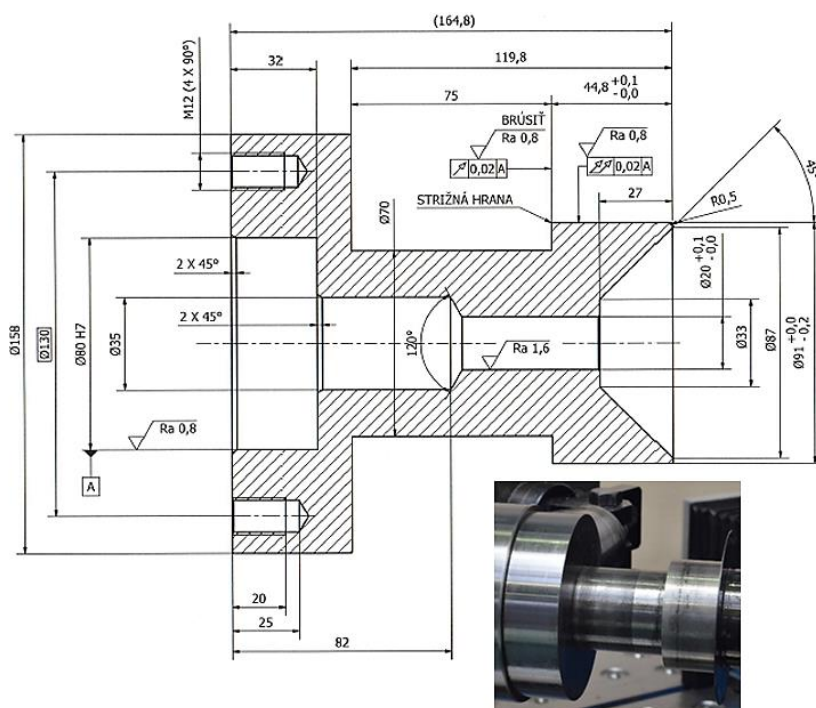
Ako materiál kladky bola zvolená nástrojová oceľ 90MnCrV8 (1.2842), ktorá bola kalená a potom popustená na tvrdosť 60 ± 1 HRC. Ide o nízkoalegovanú mangánovo-chrómvanádovú oceľ, určenú na prácu za studena (Bolzano, 2016). Vybrané mechanické vlastnosti nástrojového materiálu sú uvedené v Tab. 3.3.

Tabuľka 3.3. Vybrané mechanické vlastnosti materiálu 90MnCrV8 (Bolzano, 2016)

Vlastnosť	Hodnota
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	min. 860
Dohovorená medza sklzu $R_{p0,2}$ (MPa)	min. 771
Tvrdosť podľa Brinella HB	min. 229

Počas procesu tlačenia je prístrih pritláčaný k modelu (Obr. 3.5), ktorý definuje tvar budúceho výrobku. Je upevnený na vreteno výrobného stroja a rotuje spolu s polotovarom stanovenou frekvenciou otáčania.

Výber materiálu vhodného na výrobu modelu je podmienený najmä jeho životnosťou. Všetok výber materiálu je tiež determinovaný aj tvarom a rozmermi výtvarku, materiálom výtvarku a sériovosťou výroby. Napríklad modely z liatiny s lupienkovým grafitom sa používajú pri kusovej výrobe výtvarkov (od 10 do 100 kusov) najmä pri tvárnení mäkkých materiálov, modely z legovanej liatiny sa používajú pri výrobných dávkach 100 až 250 kusov. Pri počte vyrábaných kusov nad 250 (do 750) sa odporúča vyrábať modely z ocelí triedy 14 (napr. STN 41 4109) alebo 15 (napr. STN 41 5020) kalených na tvrdosť 60 HRC. Pre hromadnú výrobu je potom vhodné voliť nástrojovú oceľ triedy 19 (napr. STN 41 9573 alebo STN 41 9312) s následným kalením a popúšťaním na tvrdosť vyššiu ako 60 HRC. Rovnako dôležité je model vyrobiť s optimálnou kvalitou povrchu, t. j. drsnosť povrchu R_a by nemala byť vyššia ako $1,6 \mu\text{m}$.



Obr. 3.5. Tvar a rozmery modelu

V našom prípade materiál modelu bola zvolená oceľ 16MnCr5 (1.7131), kalená a zošľachtená na tvrdosť 56 ± 2 HRC. Ide o nízkolegovanú ušľachtilú mangánovo-chrómovú oceľ, určenú na cementovanie. Vybrané mechanické vlastnosti nástrojového materiálu sú uvedené v Tab. 3.4.

Tabuľka 3.4. Vybrané mechanické vlastnosti materiálu 16MnCr5 (Virgamet, 2020)

Vlastnosť	Hodnota
Pevnosť v ťahu R_m (MPa)	min. 880
Dohovorená medza sklzu $R_{p0,2}$ (MPa)	min. 600
Tvrdosť podľa Brinella HB	min. 207

3.4 Návrh procesu tlačenia

Daná súčiastka bola vyrobená na CNC stroji ZENN 80 (fa DENN) (Obr. 3.6). Tento typ výrobného zariadenia je schopný tvárniť oceľové plechy do hrúbky 2 mm, plech z koróziivzdornej ocele do hrúbky 1 mm a hliníkové plechy do hrúbky 4 mm s maximálnym priemerom polotovaru 800 mm. Interval možného nastavenia frekvencie otáčania modelu je od 200 do 3 000 min⁻¹ a veľkosti posuvu tlačného nástroja do 1 000 mm. Stroj je riadený prostredníctvom riadiaceho systému Siemens Sinumerik (DENN, 2016).



Obr. 3.6. CNC stroj ZENN 80 (DENN, 2016)

Technologické parametre procesu tlačenia boli zvolené takto:

- frekvencia otáčania modelu je definovaná vzťahom (3.5) (Hayama, 1989):

$$n = \frac{(9\,500 \text{ až } 320\,000)}{d_p} = \frac{113\,600}{142} = 800 \text{ min}^{-1} \quad (3.5)$$

kde d_p je východiskový priemer polotovaru (mm),

- uhol nastavenia tlačnej kladky $\beta = 35^\circ$ (tento uhol zvierá os rotácie modelu s osou rotácie kladky),
- posuv kladky bol zvolený na 2 úrovniach, nakoľko najvýznamnejšie ovplyvňuje výslednú kvalitu výtvarku, a to $f_1 = 0,4 \text{ mm}$ a $f_2 = 1,2 \text{ mm}$.

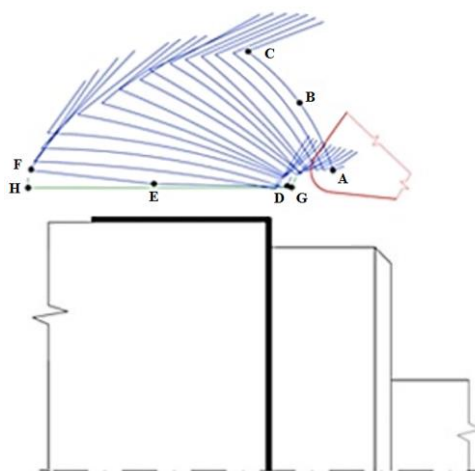
Tvar trajektórií nástroja rovnako významne ovplyvňuje kvalitu finálnych výtvarkov a je obzvlášť dôležitý v procesoch konvenčného tlačenia s viacnásobným prechodom nástroja. Na výrobných strojoch, určených na tlačenie, riadených počítačom v súčasnosti možno nastaviť rôzne tvary trajektórií nástroja, napr. lineárny, konvexný, konkávny, evolventný a pod. Optimálny počet dopredných a spätných prechodov a hlavne tvar trajektórií nástroja vedie k dosiahnutiu vysokej kvality produktu bez tvorby zvlnenia steny alebo porušenia súdržnosti materiálu súčiastky (Music et al., 2010). Konkrétne na výrobu výtvarku boli navrhnuté 3 typy trajektórií, a to konkávna, konvexná a lineárna. Návrh pri všetkých typoch

pozostával celkovo zo 16 dráh (15 tvárniacich a 1 kalibračnej). Sumárny prehľad vstupných technologických parametrov procesu je uvedený v Tab. 3.5.

Tabuľka 3.5. Vstupné technologické parametre procesu tlačenia

Parameter			
Typ trajektórie	konvexná	lineárna	konkávna
Posuv kladky f (mm)	0,4		1,2
Frekvencia otáčania modelu n (min^{-1})	800		

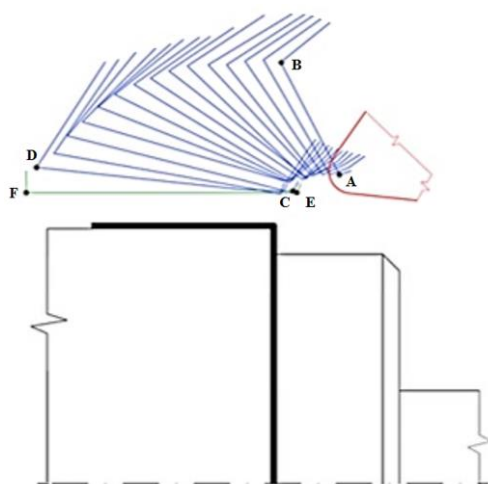
Na Obr. 3.7, 3.8 a 3.9 sú znázornené detaily, použitých tvarov trajektórií. Návrh pri všetkých typoch pozostával, ako už bolo uvedené, z 15 dopredných dráh (modrá farba) a jednej kalibračnej trajektórie (zelená farba). Jednotlivé súradnice vyznačených bodov, ktorými je definovaná krivka trajektórie, sú uvedené v Tab. 3.6, 3.7 a 3.8. Týmto bodmi bol definovaný matematický opis vybraných trajektórií (resp. častí trajektórií, keď je nástroj v kontakte s tvárneným materiálom) v tvare polynomickej funkcie.



Obr. 3.7. Konvexné trajektórie kladky

Tabuľka 3.6. Polynomická interpolácia vybraných konvexných profilov dráhy nástroja

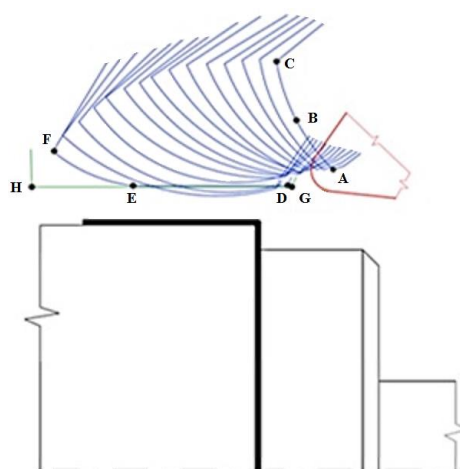
	X	Y	Rovnica
A	12,293	55,694	$y = -0,0659 \cdot x^2 - 0,809 \cdot x + 75,6$
B	6,230	67,999	
C	-3,534	77,634	
D	3,997	52,820	$y = -0,832 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0,064 \cdot x + 52,94$
E	-19,729	54,188	
F	-43,454	55,693	
G	4,615	52,451	$y = 52,451$
H	-43,770	52,451	



Obr. 3.8. Lineárne trajektórie kladky

Tabuľka 3.7. Polynomická interpolácia vybraných lineárnych profilov dráhy nástroja

	X	Y	Rovnica
A	12,293	55,694	$y = -1,92 \cdot x + 79,3$
B	1,756	75,929	
C	3,997	52,582	$y = -0,0944 \cdot x + 53,06$
D	-41,926	57,016	
E	4,615	52,451	$y = 52,451$
F	-43,775	52,451	



Obr. 3.9. Konkávne trajektórie kladky

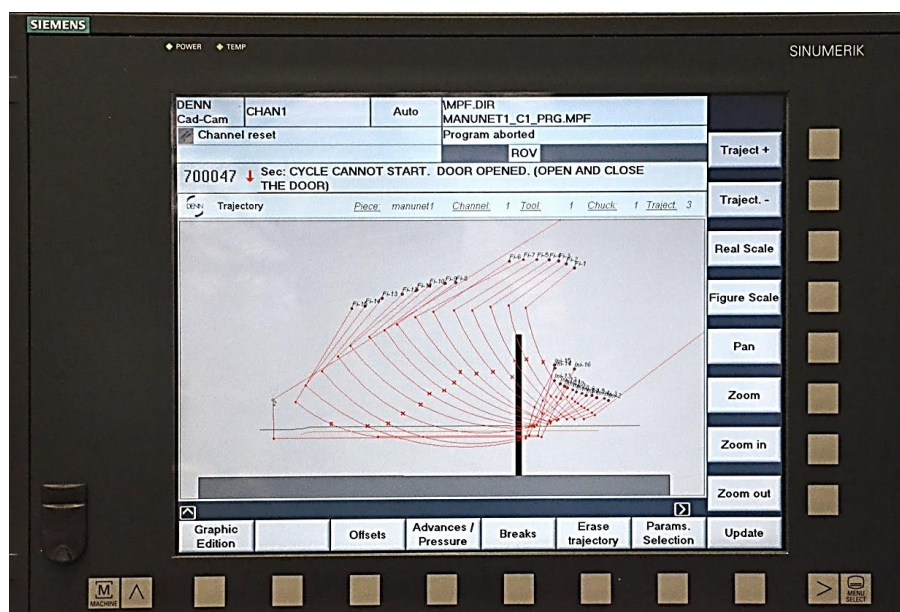
Tabuľka 3.8. Polynomická interpolácia vybraných konkávných profilov dráhy nástroja

	X	Y	Rovnica
A	12,293	55,694	$y = 0,153 \cdot x^2 - 4,072 \cdot x + 82,618$
B	5,443	64,988	
C	1,756	75,939	
D	3,997	52,682	$y = 0,0098 \cdot x^2 + 0,206 \cdot x + 51,703$
E	-24,900	53,750	
F	-39,796	59,100	
G	4,615	52,451	$y = 52,451$
H	-43,775	52,451	

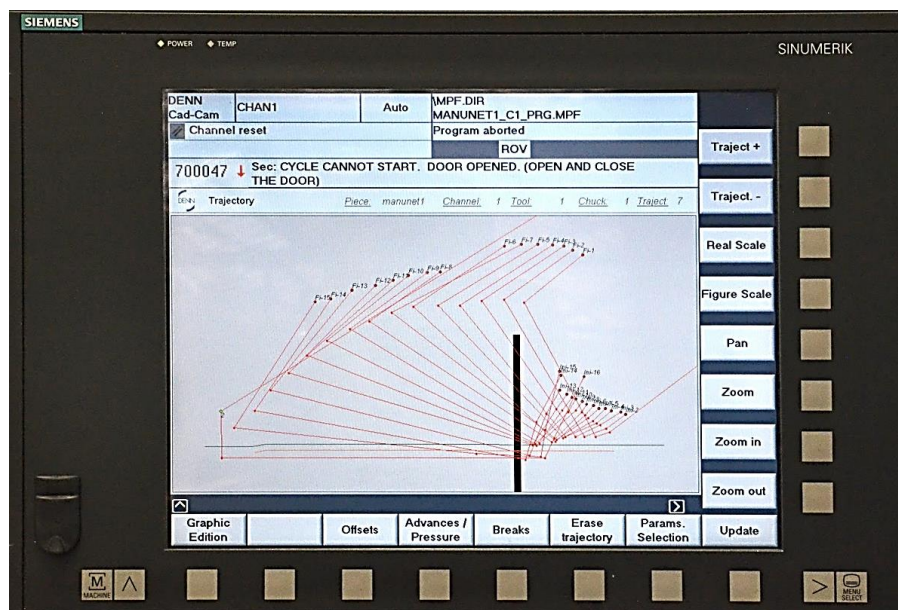
Tvorba NC kódu, potrebného na tvárnenie súčiastky prebieha priamo na riadiacom paneli stroja prostredníctvom softvéru DENN Cad-Cam (Obr. 3.10), kde sa navrhujú tvary trajektórie pohybu tvárniaceho nástroja (kladky) vzhľadom na polotovar, ich počet a aj smer pohybu kladky (dopredný, alebo spätný pohyb), ktoré majú zásadný vplyv na kvalitu finálneho produktu. Na Obr. 3.10 je uvedený návrh konkávnych, lineárnych (Obr. 3.11) a konvexných dráh (Obr. 3.12) NC programu.

Pri tvorbe kódu je postup takýto:

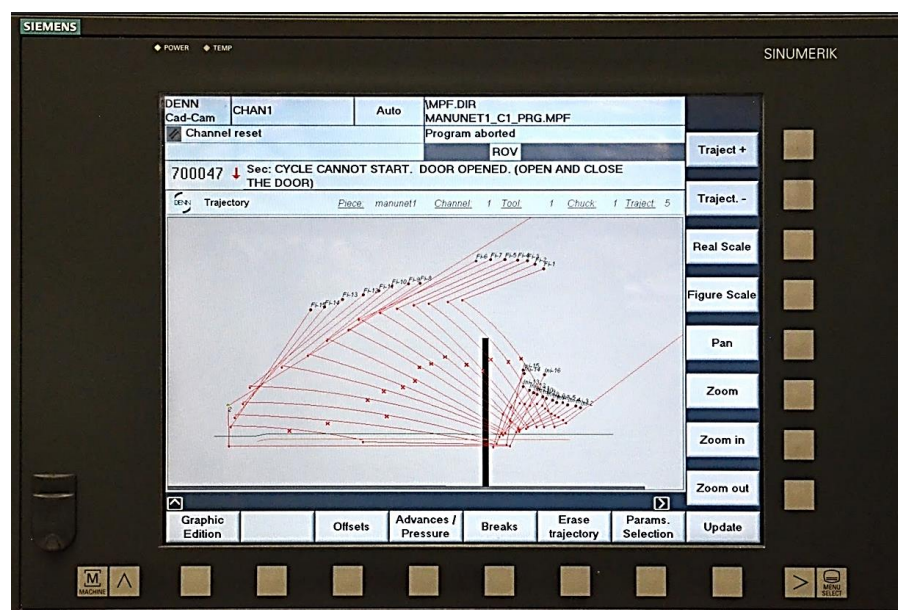
- V grafickom kresliacom softvéri (napr. AutoCad) sa zostroja náčrty obrysu modelu, polotovaru a tvárniaceho nástroja v pozíciách, ako budú umiestnené pri procese tvárnenia. Nasleduje import tohoto CAD súboru (tvar a rozmery), najčastejšie vo formáte *.dxf, do softvéru DENN Cad-Cam.
- Tvar a počet trajektórií tvárniaceho nástroja sa rovnako importuje vo formáte *.dxf, pričom je nutné ich navrhovať vzhľadom na nulový bod, ktorý je umiestnený v osi rotácie na rozhraní modelu a výtvarku. Potom možno v CAM softvéri veľmi ľahko graficky upravovať tvar a rozmery jednotlivých trajektórií podľa potreby metódou „chyt' a potiahni“, čo umožňuje veľmi jednoduché programovanie pohybu nástroja.
- Jednotlivým dráham sa v nasledujúcom kroku priradia hodnoty posuvov kladky f , tvar a veľkosť posuv nájazdov a odjazdov nástroja, hodnota offsetu a frekvencia otáčania modelu.
- Nakoniec je podľa definovaných informácií automaticky vygenerovaný NC kód, potrebný na realizáciu procesu tlačenia.



Obr. 3.10. Tvorba NC kódu na riadiacom paneli stroja pre konkávny typ dráhy kladky



Obr. 3.11. Tvorba NC kódu na riadiacom paneli stroja pre lineárny typ dráhy kladky



Obr. 3.12. Tvorba NC kódu na riadiacom paneli stroja pre konvexný typ dráhy kladky

3.5 Hodnotenie výtvarkov

Na základe stanovených technologických parametrov procesu tlačenia (kap. 3.4) bolo vyrobených 6 výtvarkov, ktorých kódy označenia vychádzajú zo skratiek KV – konvexná dráha, L – lineárna dráha a KK – konkávna dráha a číselného označenia frekvencie otáčania modelu a posuvu kladky, a ktoré sú uvedené v Tab. 3.9.

Tabuľka 3.9. Prehľad označenia výtvarkov

<i>Typ trajektórie</i>	<i>Frekvencia otáčania modelu n (min⁻¹)</i>	<i>Posuv kladky f (mm)</i>	<i>Kód výtvarku</i>
<i>konvexná trajektória</i>	800	0,4	KV804
		1,2	KV812
<i>lineárna trajektória</i>		0,4	L804
		1,2	L812
<i>konkávna trajektória</i>		0,4	KK804
		1,2	KK812

Hodnotenie odoziev procesu tlačenia sa orientovalo na tvarové a rozmerové parametre výtvarkov (hrúbka steny, výška steny a uhol odpruženia steny) a integritu povrchovej vrstvy výtvarkov (drnosť povrchu a mikrotvrdosť povrchovej vrstvy).

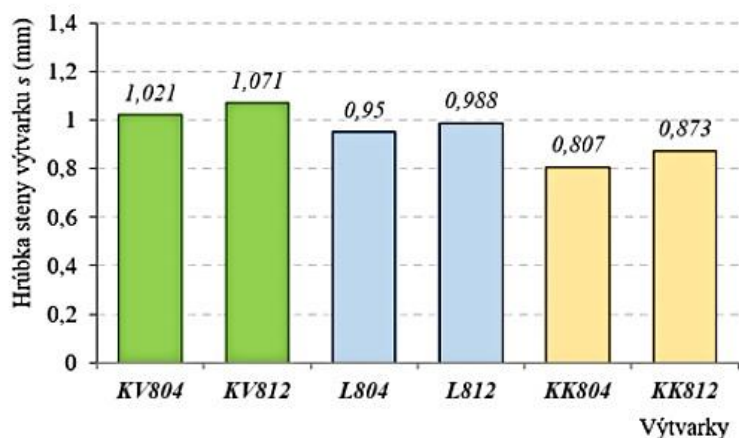
Meranie hrúbky steny výtvarku s sa realizovalo mikrometrom s kužeľovými dotykmi (Obr. 3.13) v strede výšky steny (približne 15 mm odo dna výtvarku) v smere valcovania východiskového polotovaru. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.10 sú uvedené stredné hodnoty hrúbky všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.14.



Obr. 3.13. Meradlá na hodnotenie tvarových a rozmerových parametrov výtvarkov

Tabuľka 3.10. Hrúbka steny výtvarku s ($s_0 = 1,005 \pm 0,01$ mm (merané na východiskovom polotovare))

<i>Výtvarok</i>	<i>KV804</i>	<i>KV812</i>	<i>L804</i>	<i>L812</i>	<i>KK804</i>	<i>KK812</i>
<i>s (mm)</i>	1,021 $\pm 0,003$	1,071 $\pm 0,004$	0,950 $\pm 0,003$	0,988 $\pm 0,002$	0,807 $\pm 0,004$	0,873 $\pm 0,006$

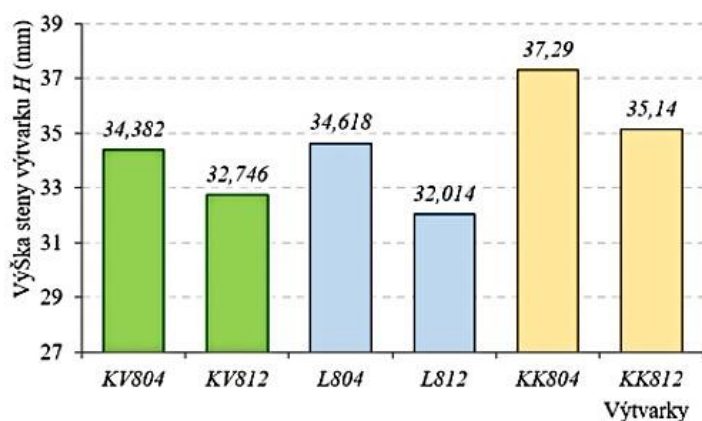


Obr. 3.14. Porovnanie nameraných hrúbok stien výtvarkov

Meranie výšky steny výtvarku H sa realizovalo posuvným meradlom (Obr. 3.13) v smere valcovania polotovaru. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.11 sú uvedené stredné hodnoty výšky všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.15.

Tabuľka 3.11. Výška steny výtvarku H ($H_0 = 33 \pm 1$ mm (na výkrese))

Výtvarok	KV804	KV812	L804	L812	KK804	KK812
H (mm)	34,382 $\pm 0,009$	32,746 $\pm 0,016$	34,618 $\pm 0,011$	32,014 $\pm 0,005$	37,290 $\pm 0,011$	35,140 $\pm 0,028$

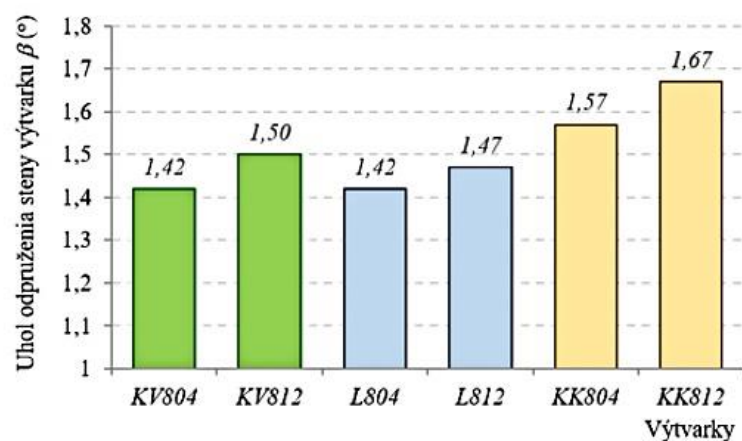


Obr. 3.15. Porovnanie nameraných výšok stien výtvarkov

Meranie uhla odpruženia steny výtvarku β sa realizovalo optickým uhlomerom (Obr. 3.13) v smere valcovania polotovaru. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.12 sú uvedené stredné hodnoty uhlov odpruženia všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie (s údajmi uvedenými v stupňoch) je uvedené na Obr. 3.16.

Tabuľka 3.12. Uhol odpruženia β ($\alpha = 90^\circ$ (uhol, ktorý zvierá stena a dno výtvarku (na výkrese))

Výtvarok	KV804	KV812	L804	L812	KK804	KK812
β (°)	1° 25' ± 2'	1° 30' ± 1'	1° 25' ± 3'	1° 28' ± 2'	1° 34' ± 1'	1° 40' ± 1'



Obr. 3.16. Porovnanie nameraných uhlov odpruženia stien výtvarkov

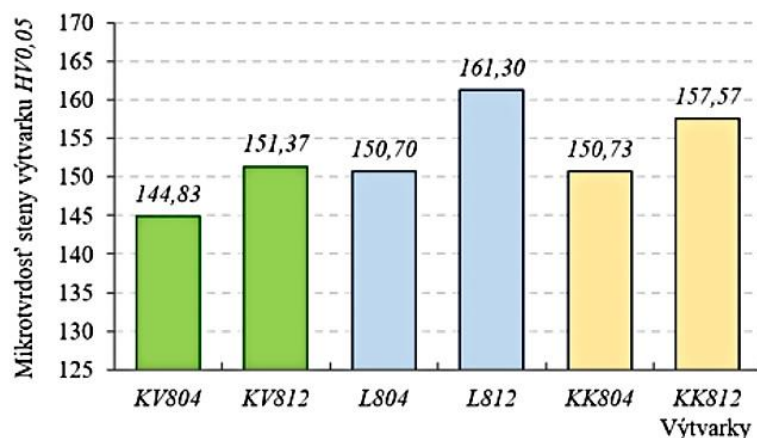
Meranie mikrotvrdości povrchovej vrstvy steny výtvarku $HV0,05$ sa realizovalo na zariadení IndentaMet 1 100 (fa Buehler) (Obr. 3.17) v strede výšky steny (približne 15 mm odo dna výtvarku) v smere valcovania polotovaru podľa normy STN EN ISO 6507-1:2006. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.13 sú uvedené stredné hodnoty mikrotvrdości všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.18.



Obr. 3.17. Meracie zariadenie IndentaMet 1 100

Tabuľka 3.13. Mikrotvrdosť HV 0,05 (hodnota mikrotvrdosti polotovaru pred tvárnením $125,80 \pm 2,70$ (merané na východiskovom polotovare))

Výtvarok	KV804	KV812	L804	L812	KK804	KK812
HV 0,05	144,83 $\pm 1,11$	151,37 $\pm 2,98$	150,70 $\pm 3,30$	161,30 $\pm 1,20$	150,73 $\pm 2,89$	157,57 $\pm 3,11$



Obr. 3.18. Porovnanie nameraných hodnôt mikrotvrdosti stien výtvarkov

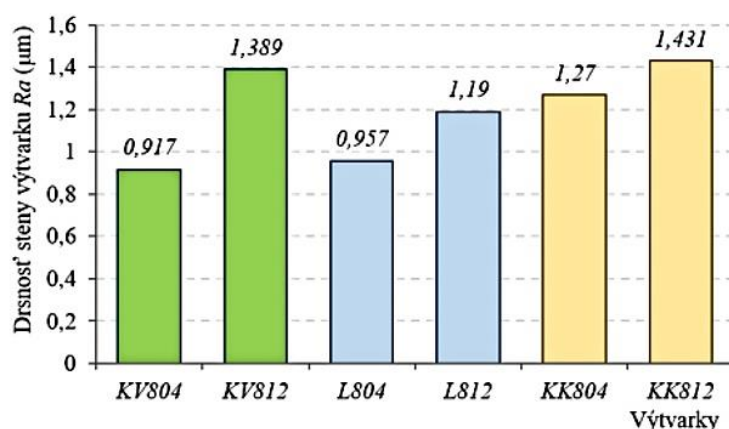
Meranie parametra drsnosti steny výtvarku R_a sa realizovalo na zariadení Surf test SJ 210 (fa Mitutoyo) (Obr. 3.19) v strede výšky steny (približne 15 mm odo dna výtvarku) v smere valcovania polotovaru podľa normy STN EN ISO 6507-1:2006. Meranie sa opakovalo 3-krát, z ktorých sa potom vypočítala stredná hodnota a stredná aritmetická odchýlka. V Tab. 3.14 sú uvedené stredné hodnoty mikrotvrdosti všetkých hodnotených výtvarkov a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.20.



Obr. 3.19. Meracie zariadenie Surf test SJ 210

Tabuľka 3.14. Parameter drsnosti R_a (východiskový stav: $0,985 \pm 0,08 \mu\text{m}$ (merané na východiskovom polotovare))

Výtvarok	KV804	KV812	L804	L812	KK804	KK812
R_a (μm)	0,917 $\pm 0,045$	1,389 $\pm 0,048$	0,957 $\pm 0,031$	1,190 $\pm 0,030$	1,270 $\pm 0,037$	1,431 $\pm 0,036$



Obr. 3.20. Porovnanie nameraných hodnôt parametra drsnosti stien výtvarkov

3.6 Optimalizácia procesu tlačenia

V procese optimalizácie sa opiera o metodiky výberu variantov a ich ďalšie hodnotenie. Ide o proces hľadania optimálneho variantu riešenia (v našom prípade optimálnu kombináciu technologických parametrov procesu tlačenia) a je determinovaný stanovenými kritériami, t. j. splnením stanovených podmienok. Metodika výberu zložitejších variantov a ich hodnotenie sa môže realizovať napr. bodovacou metódou, metódou konečného účinku, metódou výsledného efektu, alebo histogramovou metódou. Metód optimalizácie, či rozhodovania, je však viac a rozdeľujú sa na: *exaktné*, kde patria metódy operačného výskumu, ďalej *empirické*, kde patria analytické, alebo intuitívne metódy a *heuristické*, ktoré vychádzajú z rozhodovacej analýzy.

V našom prípade ide o optimalizáciu, kde bude sledovaných 5 odoziev výrobného procesu, preto bude aplikovaná metóda bodovacia, ktorá sa zaraďuje do skupiny tzv. expertných metód. Pri tejto metóde je dôležité stanovenie si kritérií a ich hodnoty. Stanovením hodnoty, či intervalu hodnôt možno niektorým hodnoteným kritériám zvýšiť tzv. váhu, a tým zdôrazniť jeho dôležitosť v porovnaní s ostatnými kritériami.

3.6.1 Hodnotenie hrúbky steny výtvarku

Na vyhodnotenie hrúbky steny výtvarku bola stanovená bodová stupnica na základe priblíženia sa odmeranej a vyhodnotenej reálnej hrúbky steny výtvarku k hodnote predpísanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2), ktorá je vyhovujúca v intervale od 0,9 do 1,2 mm. Na základe prvého hodnotenia danému intervalu nevyhovujú hrúbky steny výtvarkov KK804 a KK812. Na presnejšie hodnotenie bol stanovený prístup, že optimálna hrúbka je hrúbka, ktorá sa najviac priblíži hodnote 1 mm, pričom z hľadiska exploatácie pri zhode rozdielu od referenčnej hrúbky vyššia váha (bonita) bude pridelená pre nárast hrúbky steny výtvarku, a to vynásobením pridelených bodov s koeficientom 1,4. Výtvarkom, ktorých hrúbka nevyhovuje stanovenej predpísanej hodnote bude pridelených 0 bodov. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3. 16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie hrúbky je:

- (od 0,90 do 0,950) mm: 4 body,
- (od 0,950 do 1,000) mm: 6 body,
- (od 1,000 do 1,050) mm: 10 bodov,
- (od 1,050 do 1,100) mm: 6 body ($\times 1,4$),
- (od 1,150 do 1,200) mm: 4 body ($\times 1,4$).

3.6.2 Hodnotenie výšky steny výtvarku

Na vyhodnotenie výšky steny výtvarku bola stanovená bodová stupnica na základe priblíženia sa nameranej a vyhodnotenej reálnej výšky steny výtvarku k hodnote predpísanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2), ktorá je vyhovujúca v intervale od 32 do 34 mm. Na základe prvého hodnotenia danému intervalu nevyhovujú hrúbky steny výtvarkov KV804, L804, KK804 a KK812. Na presnejšie hodnotenie bol stanovený prístup, že optimálna výška je výška, ktorá sa najviac priblíži hodnote 33 mm, pričom z hľadiska exploatácie pri zhode rozdielu od referenčnej hrúbky vyššia váha (bonita) bude pridelená pre menšiu výšku steny výtvarku, a to vynásobením pridelených bodov s koeficientom 1,4. Výtvarkom, ktorých výška nevyhovuje stanovenej predpísanej hodnote bude pridelených 0 bodov. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie výšky je:

- (od 32,00 do 32,50) mm: 4 body ($\times 1,4$),
- (od 32,50 do 33,00) mm: 8 body ($\times 1,4$),
- (od 33,00 do 33,50) mm: 8 bodov,
- (od 33,50 do 34,00) mm: 4 body.

3.6.3 Hodnotenie uhla odpruženia steny výtvarku

Na vyhodnotenie uhla odpruženia steny výtvarku sa stanovila bodová stupnica na základe priblíženia sa nameranej a vyhodnotenej reálnej hodnoty uhla odpruženia k hodnote definovanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2). Nakoľko na výkrese tolerančný interval nie je určený, ako refrenčný uhol, ktorý je nutné odsiahnuť, je uhol 90° medzi stenou a dnom výtvarku. Hodnotenie bude realizované prístupom, že najvyšší počet bodov bude pridelených výtvarku, ktorého stena dosiahne nameraný uhol odpruženia. Veľkosť intervalu je navrhnutá v rozsahu $0^\circ 05'$, čo je stanovené na základe tolerancií netolerovaných uhlov, podľa normy STN 01 4270 pre výšku 33 mm a stupeň presnosti 10, (Konštruovanie I., 2012). Vo všetkých prípadoch nameraných uhlov odpruženia bola prekročená hodnota 1° , preto je hodnotiacia stupnica, uvedená nižšie, definovaná len pre interval od 1° do 2° .

V prípade, že by sa hodnoty uhla pohybovali od 0° do 1° , pridelené body (tak ako sú definované pre interval od 1° do 2°) by sa navýšili vynásobením s koeficientom 1,4, z dôvodu presnejšieho dosiahnutia tvarovej presnosti výtvarku. V prípade, že by sa hodnoty uhla pohybovali od 2° do 3° , pridelené body (tak ako sú definované pre interval od 1° do 2°) by sa znížili vynásobením s koeficientom 0,4, z dôvodu vyššej nepresnosti vyrobenej valcovej plochy výtvarku. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie uhla odprużenia steny od 1° do 2° je:

- (od 1° 00' do 1° 05') mm: 12 bodov,
- (od 1° 05' do 1° 10') mm: 11 bodov,
- (od 1° 10' do 1° 15') mm: 10 bodov,
- (od 1° 15' do 1° 20') mm: 9 bodov,
- (od 1° 20' do 1° 25') mm: 8 bodov,
- (od 1° 25' do 1° 30') mm: 7 bodov,
- (od 1° 30' do 1° 35') mm: 6 bodov,
- (od 1° 35' do 1° 40') mm: 5 bodov,
- (od 1° 40' do 1° 45') mm: 4 body,
- (od 1° 45' do 1° 50') mm: 3 body,
- (od 1° 50' do 1° 55') mm: 2 body,
- (od 1° 55' do 2° 00') mm: 1 bod.

3.6.4 Hodnotenie mikrotvrlosti steny výtvarku

Na vyhodnotenie mikrotvrlosti steny výtvarku bola stanovená bodová stupnica na základe dosiahnutého pomerného spevnenia materiálu (*PSM*). Jeho hodnota sa vypočíta podľa vzťahu (3.6) z nameraných a vyhodnotených hodnôt mikrotvrlosti základného materiálu (prístrihu) (HV_{ZM}) a mikrotvrlosti nameranej na jednotlivých výtvarkoch ($HV_{V(x)}$):

$$PSM = \frac{(HV_{V(x)} - HV_{ZM})}{HV_{ZM}} \cdot 100 \% \quad (3.6)$$

kde HV_{ZM} je mikrotvrdosť základného materiálu pred tlačením ($125,80 \pm 2,70$),

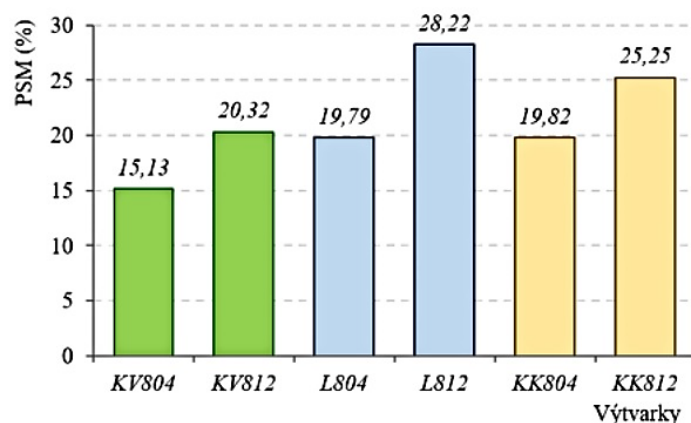
$HV_{V(x)}$ – mikrotvrdosť výtvarku v definovanej pozícii na stene výtvarku.

Príklad výpočtu *PSM* pre výtvarok KV804 uvádza vzťah (3.7). Všetky vypočítané hodnoty *PSM* uvádza Tab. 3.15 a ich grafické porovnanie je uvedené na Obr. 3.21.

$$\begin{aligned} PSM &= \frac{(HV_{V(KV804)} - HV_{ZM})}{HV_{ZM}} \cdot 100 = \\ &= \frac{(144,83 - 125,80)}{125,80} \cdot 100 = 15,13 \% \end{aligned} \quad (3.7)$$

Tabuľka 3.15. Pomerný stupeň spevnenia materiálu na hodnotených výtvarkoch

Výtvarok	KV804	KV812	L804	L812	KK804	KK812
<i>PSM</i> (%)	15,13	20,32	19,79	28,22	19,82	25,25



Obr. 3.21. Porovnanie hodnôt PSM stien výtvarkov

Pri vyhodnocovaní mikrotvrdosti prostredníctvom PSM sa vychádzalo z prístupu zohľadnenia výslednej exploatácie výtvarku, a to tým, že vyššie spevnenie materiálu determinuje lepšiu odolnosť povrchu voči abrazívnemu opotrebeniu, a teda najvyšší počet bodov bude pridelený výtvarku s najvyššou hodnotou PSM. Na základe získaných hodnôt bol stanovený hodnotiaci interval a hodnotiaci škála PSM od 14 do 30 %. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie PSM steny výtvarku je:

- (od 14 do 18) %: 4 body,
- (od 18 do 22) %: 6 bodov,
- (od 22 do 26) %: 8 bodov,
- (od 26 do 30) %: 10 bodov.

3.6.5 Hodnotenie drsnosti steny výtvarku

Na vyhodnotenie drsnosti steny výtvarku (parameter R_a) bola stanovená bodová stupnica na základe priblíženia sa nameranej a vyhodnotenej reálnej hodnoty parametra drsnosti k hodnote predpísanej na výkrese výtvarku (Obr. 3.2), ktorá je vyhovujúca do hodnoty $1,2 \mu\text{m}$. Na základe prvého hodnotenia danej hodnoty nevyhovujú výtvarky KV812, KK804 a KK812. Na presnejšie hodnotenie bol stanovený prístup, že optimálna drsnosť je drsnosť, ktorá nadobudne čo najnižšiu hodnotu drsnosti, pričom spodná hranica drsnosti bola stanovená drsnosť dokončovacích metód, a to $0,4 \mu\text{m}$. Výtvarkom, ktorých hodnota drsnosti prekročila hodnotu $1,2 \mu\text{m}$ bude pridelených 0 bodov. Jednotlivé pridelené body sú uvedené v Tab. 3.16.

Hodnotiaci interval na hodnotenie parametra drsnosti steny výtvarku R_a je:

- (od $0,4$ do $0,5$) μm : 8 bodov,
- (od $0,5$ do $0,6$) μm : 7 bodov,
- (od $0,6$ do $0,7$) μm : 6 bodov,
- (od $0,7$ do $0,8$) μm : 5 bodov,
- (od $0,8$ do $0,9$) μm : 4 body,
- (od $0,9$ do $1,0$) μm : 3 body,
- (od $1,0$ do $1,1$) μm : 2 body,

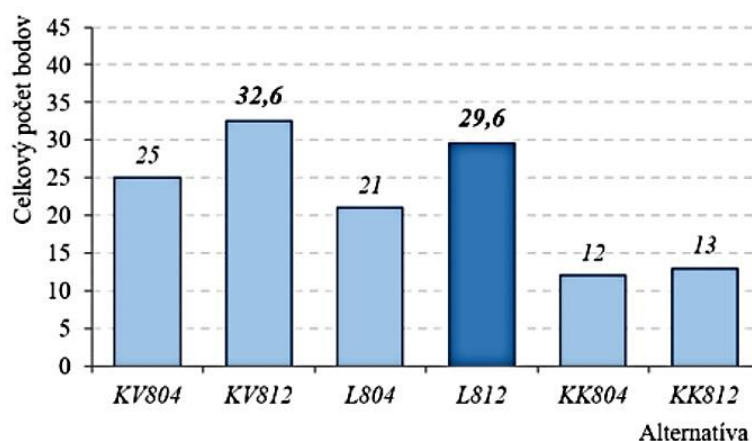
- (od 1,1 do 1,2) μm : 1 bod.

3.6.6 Celkové hodnotenie výtvarkov

Na základe vyššie definovaných hodnotiacich intervalov boli jednotlivým výtvarkom hodnotené dosiahnuté odozvy (kritériá), ktoré uvádza Tab. 3.16 a Obr. 3.22, kde sú definované čiastkové aj celkové hodnoty dosiahnutých bodov, na základe ktorých bolo stanovené poradie kvality výtvarkov, resp. poradie alternatív kombinácií technologických parametrov, a tým optimálna kombinácia typu trajektórie nástroja, frekvencie otáčania modelu a posuvu kladky.

Tabuľka 3.16. Hodnotenie dosiahnutej kvality výtvarkov aplikáciou bodovacej metódy

	<i>KV804</i>	<i>KV812</i>	<i>L804</i>	<i>L812</i>	<i>KK804</i>	<i>KK812</i>
<i>Hrúbka steny</i>	10	8,4	4	6	0	0
<i>Výška steny</i>	0	11,2	0	5,6	0	0
<i>Uhol odpruženia</i>	8	7	8	7	6	5
<i>PSM</i>	4	6	6	10	6	8
<i>Drsnosť</i>	3	0	3	1	0	0
Body spolu	25	32,6	21	29,6	12	13
PORADIE	III.	I.	IV.	II.	VI.	V.



Obr. 3.22. Porovnanie dosiahnutých bodov hodnotených výtvarkov (KV812 – variant s najvyšším počtom bodov, L812 – optimálny variant)

Z čiastového pohľadu na jednotlivé hodnotené odozvy (Tab. 3.16) najvyšší počet bodov pri hrúbke steny výtvarku dosiahla alternatíva KV804 (10 b) a pri výške výtvarku alternatíva KV812 (11,2 b). Čo sa týka uhla odpruženia, tak až v dvoch prípadoch bola bodová hodnota maximálna, a to 8 bodov v prípade výtvarkov KV804 a L804. Pri integrite povrchovej vrstvy steny výtvarku, konkrétne pri *PSM* najvyššia bodová hodnota bola dosiahnutá pri výtvarku L812 (10 b) a pri hodnotení drsnosti povrchu až dve alternatívy (KV804 a L804) dosiahli

3 body, čo je najvyšší počet bodov. Je nutné však aj konštatovať, že z hľadiska predpísaných parametrov na výkrese, ako sú výška a hrúbka steny výtvarku a drsnosť povrchu, sú nevyhovujúce alternatívy KK804 a KK812, pretože ani v jednom prípade neboli tieto hodnoty dosiahnuté, z čoho vyplýva, že pre tento tvarový typ výtvarku nie je vhodné voliť konkávnu trajektóriu tlačného nástroja.

Záver

Cieľom predkladanej štúdie bolo podrobné definovanie návrhu technologického postupu výroby výtvarku technológiou CNC konvenčného tlačenia spolu s návrhom výrobného stroja a nástrojov (modelu a kladky), kde okrem návrhu ich geometrie bola časť venovaná aj návrhu vhodných nástrojových materiálov a ich tepelnému spracovaniu, ale tiež návrhu rozmeru východiskového polotovaru, ktorý zásadným spôsobom determinuje v kombinácii s geometrickými a technologickými parametrami výslednú kvalitu finálnych výtvarkov.

Nakoľko v procese tlačenia do procesu vstupuje viacero parametrov, ako bolo vyššie spomenuté, na stanovenie optimálnej kombinácie technologických parametrov bola aplikovaná bodovacia metóda, kde boli hodnotené odozvy, ako hrúbka a výška steny výtvarku, uhol odpruženia steny výtvarku, dosiahnutá mikrotvrdosť, resp. pomerné spevnenie povrchovej vrstvy a drsnosť povrchu.

Na základe navrhnutých hodnotiacich intervalov pre jednotlivé kritériá (odozvy procesu) (Tab. 3.16) možno konštatovať, že konkávny typ dráhy pri obidvoch posuvoch kladky a danej frekvencii otáčania modelu (KK804 a KK812) nie je pre tento tvarový typ výtvarku vhodný, nakoľko neboli dosiahnuté hodnoty hrúbky a výšky steny výtvarku, predpísané na výrobnom výkrese. Rovnako uhol odpruženia nadobúdala najväčšie hodnoty. Jediná relatívne pozitívna odozva je pri pomernom spevnení materiálu, však negatívom je, že ani v jednom prípade hodnota parametra drsnosti R_a nebola dosiahnutá, teda obidve hodnoty prekročili limitnú hodnotu $1,2 \mu\text{m}$, pričom na výtvarku KK812 bola nameraná najvyššia hodnota ($1,431 \pm 0,036 \mu\text{m}$) zo všetkých výtvarkov.

Podobné konštatovanie je možné v prípade výtvarkov KV804 a L804, pri ktorých neboli dosiahnuté vhodné hodnoty výšky steny výtvarkov, ale naopak pri týchto alternatívach boli dosiahnuté veľmi dobré hodnoty uhla odpruženia, pomerného spevnenia materiálu a vynikajúce hodnoty dosiahnutého parametra drsnosti povrchu, pričom na výtvarku KV804 bola nameraná najnižšia hodnota ($0,917 \pm 0,045 \mu\text{m}$) zo všetkých výtvarkov.

Najvyší počet bodov (Obr. 3.20) dosiahli výtvarky vyrobené pri konvexnej dráhe kladky s frekvenciou otáčania modelu 800 min^{-1} a posuve kladky $1,2 \text{ mm}$ (KV812/32,6 bodov) a pri lineárnej dráhe kladky s frekvenciou otáčania modelu 800 min^{-1} a posuve kladky $1,2 \text{ mm}$ (L812/29,6 bodov). V obidvoch prípadoch boli dosiahnuté dobré parametre hrúbky a výšky steny výtvarkov a rovnaké konštatovanie je možné pri hodnotách uhla odpruženia a pomerného spevnenia materiálu. Čo sa týka parametra drsnosti R_a , výtvarok L812 dosiahol predpísanú hodnotu na výkrese ($1,190 \pm 0,030 \mu\text{m}$), však v prípade výtvarku KV812 tento limit bol prekročený ($1,389 \pm 0,048 \mu\text{m}$).

Na základe uvedeného možno definovať optimálne parametre konvenčného tlačenia, a to na základe dosiahnutia najvyššieho počtu bodov z maximálnych možných 51,2 (Obr. 3.20). Pri alternatíve (KV812) s počtom bodov 32,6, čo je dosiahnutie 63,7 % z celkovej maximálnej bodovej kapacity, však z dôvodu prekročenia predpísanej hodnoty drsnosti, nie

je možné konštatovať, že ide o optimálnu alternatívu výroby. Optimálne parametre výroby sú definované v poradí druhou alternatívou (L812), pri ktorej bolo dosiahnutých 29,6 bodov čo je dosiahnutie 57,8 % z celkovej maximálnej bodovej kapacity, a sú to: lineárny typ dráhy kladky s frekvenciou otáčania modelu 800 min^{-1} a posuvom kladky 1,2 mm.

Zoznam bibliografických odkazov

ALFUN, 2018. *Inspection certificate of DC01 steel.* [online] 2019 [cit. 2019-08-11] Dostupné na internete: <http://www.alfun.cz/sk/produkty/ocel/plechy-a-pasy-valcovane-za-studena>.

BEWLAY, B. P. and FURRER, D. U., 2006. Spinning. In: *ASM Handbook: Metalworking – Sheet Forming.* ASM International, pp. 367-374. ISBN 97-8087-1707-1093. [online] 2013 [cit. 2013-08-22] Dostupné na internete: <https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACFAB91.pdf>.

BOLZANO., 2016. *Materiálový list oceli 90MnCrV8* [online] 2016 [cit. 2016-10-13]. Dostupné na internete: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/legovane-nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/materialove-listy/materialovy-list-oceli-90mncrv8>.

CÂMARA, J., 2009. PhD. thesis. *Single point incremental forming.* Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009 [online] 2020 [cit. 2020-06-17] Dostupné na internete: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/573268/1/dissertacao.pdf>.

DENN, 2016. *Denn spinning machines* [online] 2016 [cit. 2016-10-13]. Dostupné na internete: <https://www.formetal.cz/wp-content/uploads/2016/08/Prezentace-DENN.pdf>.

EMMENS, W. C., SEBASTIANI, G. and van den BOOGAARD, A. H., 2010. The technology of Incremental Sheet Forming – a brief review of the history. In *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 210, Issue 8, 2010, pp. 981-997, ISSN 0924-0136. [online] 2012 [cit. 2012-06-12] Dostupné na: <http://doc.utwente.nl/72547/2/Emmens10technology-av.pdf>.

KONŠTRUOVANIE I., 2012. *Tolerovanie uhlových rozmerov.* UNIZA Žilina. 2012 [cit. 2020-09-02]. Dostupné na: <http://www.konstruovanie1.uniza.sk/Subory/5.3a.html>.

MUSIC, O. et al., 2010. A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (1), 3-23. ISSN 0924-0136 [online] 2012 [cit. 2012-06-12] Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609003094>.

ŠUGÁR, P. and ŠUGÁROVÁ, J., 2009. *Výrobné technológie.* Zvolen, DALI-BB, 2009. pp. 291. ISBN 978-80-89090-587.

ŠUGÁROVÁ, J., 2008. *Združene ohýbanie materiálu za rotácie.* Zvolen: Vydavateľstvo TU Zvolen. ISBN 978-80-228-1964-0.

ŠUGÁROVÁ, J., 2016. *CNC metal spinning: Study of properties of spun parts.* Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk. ISBN 978-80-7380-616-3.

VIRGAMET, 2020. *Physical and mechanical properties 16MnCr5*. [online] 2020 [cit. 2020-07-17] Dostupné na: <https://virgamet.com/16mncr5-16mncrs5-20mncr5-20mncrs5-21mncr5-1-2162-case-hardening-steel#properties>.

ZHAN, M. et al., 2015. Review on hot spinning for difficult-to-deform lightweight metals. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (6), pp. 1732-1743. ISSN 1003-6326. [online] 2020 [cit. 2020-03-08] Dostupné na:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632615637785>.

WONG, C. C. et al., 2003. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (14), pp. 1419-1435.

ISSN 0890 -6955. [online] 2020 [cit. 2020-05-10] Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550300172X>.