

Oponentní posudek na disertační práci

Ing. Libora Horáčka: Rapid prototyping – využití technologie Sandprint

Vedoucí práce: Doc.Ing. Viktor Kreibich, CSc, ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Technologie 3D tisku představuje velmi progresivní technologii, pomocí níž se ve slévárenství vyrábí především modelové zařízení jak pro standardní způsoby formování, tak i netrvalé modely pro technologie přesného lití. Zatímco 3D-tisk modelů a modelového zařízení z pryskyřic, tvrzeného papíru nebo dalších materiálů různými metodami je už dobře zvládnutým postupem, tisk samotných forem a jader z disperzních formovacích směsí je doposud výjimkou. Současné zkušenosti, které s formami a jádry, vyrobených 3D tiskem naznačují, že jde o technologii s významnými aplikačními možnostmi, především při kusové výrobě odlitků a jader, zejména středních a velkých rozměrů, u nichž by výroba klasického modelového zařízení byla nerentabilní, nebo se jedná o tvarově složitě odlitky, které lze standardními slévárenskými postupy vyrobit jen obtížně. Velká tvarová volnost forem a jader je jednou z klíčových pozitivních vlastností této technologie. Příčinou doposud malého rozšíření je především vysoká cena velkých tiskáren i vysoké výrobní náklady na formy a jádra, s touto technologií spojené, které se oproti obvyklým slévárenským postupům kompenzují především při kusové výrobě a u tvarově velmi složitých forem a jader. Předností je rovněž operativnost výroby, která významně zkracuje dobu přípravy výroby odlitků, výrobu prototypů a zhotovení příslušných modelů a pomůcek. Vzhledem k technologickým výhodám této metody a snižujícím se cenám tiskáren lze očekávat, že technologie 3D tisku forem a jader si v určitém segmentu výroby najde stále širšího uplatnění. Z těchto důvodů považuji zaměření disertační práce za velmi přínosné. Z práce je patrné, že disertant má s technologií 3D tisku forem a jader s disperzních formovacích směsí velké zkušenosti, které dokládá i řadou publikací.

Jak naznačuje již název práce – Využití technologie Sandprint, nejedná se o práci teoretickou. Rešeršním způsobem jsou prezentovány nejdůležitější současné metody 3D tisku anorganických i organických materiálů, jejich principy a rovněž způsob přípravy dat. Každá z uvedených metod 3D tisku má specifické využití a výhody. Detailněji se uvádí popis tiskáren S-Max od firmy ExOne pro výrobu forem a jader z křemičitých ostřiv, pojených furanovou pryskyřicí, vytvrzovanou příslušným katalyzátorem - aktivátorem. Princip výroby forem a jader je z uvedeného popisu jasně zřejmý.

O aplikaci této technologie rozhoduje mnoho hledisek jak ekonomických, tak technologických. Příklad komplexního rozboru mohl být v práci vzorově proveden na nějakém konkrétním odlitku. Srovnání závislosti nákladů tištěné formy a klasické výrobní technologie, uvedené na obr. 25 a dále v tab. 4 a 5 je nekonkrétní a proto není relevantní. Popisy technologických kroků při standardních slévárenských postupech jsou hodně zjednodušené, v této práci zbytečné a navíc naznačují, že nejsou profesní doménou dizertanta. Popis účelu vtokové soustavy, ventilační soustavy (výfuků) je rovněž velmi zjednodušený a nemá v tomto podání žádnou vazbu na interakci kovu s vytištěnou formou. Stejně tak simulace plnění zcela nekonkrétního odlitku je jenom efektním zpestřením práce, ale bez jakéhokoliv využití.

Z hlediska aplikace tištěných forem je ale důležité, jaké jsou geometrické možnosti metody, jaké jsou mechanické vlastnosti vytištěné formy, jaká je tepelná odolnost směsi (parametry tepelné degradace systému) a odolnost proti rozplavení proudícím kovem. Zajímavé by byly informace o citlivosti na změnu morfologie ostřiva, a o vlivu procesních parametrů při tisku – zejména o citlivosti na teplotě a vlhkosti písku a okolního prostředí. V práci není uvedeno, pro jaké lící teploty jsou tištěné formy použitelné, zejména, zda je do nich možno odlévat i ocelové odlitky. Některé z těchto aspektů jsou obecně naznačeny v kap. 2.4.6. „Konstrukce a rozměry

formy“. Informace o zvýšení pevnosti vzorků formovací směsi při ohřevu v obr. 45 a 46 je sice zajímavá, v praxi však pravděpodobně nevyužitelná, neboť poměrně dlouhodobý ohřev vytištěných polotovaru (a jejich ochlazení na teplotu při lití) je asi nereálný. To změny parametrů při tisku, zmíněné v této kapitole, jsou mnohem schůdnější a zasluhovaly by si podrobnější rozbor.

Dovoluji si nesouhlasit s názorem na s. 27, že produkce odlitků ze šedé litiny je považována za hlavní ukazatel spotřeby kovu ve slévárenství. Pojem šedá litina je navíc technicky nesprávný, neboť se pod ním obvykle chápe litina s lupínkovým grafitem, ne však litina s kuličkovým grafitem, běžně nazývaná jako litina tvárná. Zajímavou informací by byla zmínka o eventuální možnosti změny dávkování komponent směsi v závislosti na tepelném a mechanickém namáhání formy pro různé typy slitin (míněno zejména menší namáhání při odlévání slitin hliníku oproti slitinám železa).

V kap. 3 jsou stanoveny cíle vlastní práce disertanta. Směřování na problematiku předlévání složitých tvarů odlitků typu žeber, drážek, výstupků a otvorů je velmi užitečné z hlediska výroby tenkostěnných a tvarově komplikovaných odlitků. Pro analýzu těchto parametrů byla navržena vhodná zkušební tělesa a odlity zkušební vzorky ze slitiny AlSi10Mg. Typy navržených zkušebních těles umožňují dobře hodnotit jednotlivé sledované parametry. Zde je nutno uvést, že získané výsledky se vztahují právě jen k této slitině s poměrně nízkou licí teplotou, za zde použité konstrukce vtokové soustavy a licí výšky. Mohou se lišit jak pro různé typy slitin typu Al-Si, tak zejména pro jiné slitiny (zejména slitiny železa), proto ve vyhodnocení použité konkrétní hodnoty budou za jiných podmínek jiné. Zde by bylo zajímavé, sledovat i vliv parametrů tisku na sledované hodnoty. Ve vyhodnocení jsou uváděny i skutečnosti, jako např. nedolití vlivem nedostatečného odvodu plynů z formy, nebo ohnutí vzorků, které nijak nesouvisí s vlastnostmi vytištěné formy a jsou způsobeny špatnou konstrukcí výfuků nebo vnitřním pnutím v odlitcích. Ani hodnoty smrštění nelze na zkušebních odlitcích hodnotit, neboť je ovlivněno druhem slitiny a konstrukcí odlitků. Je však pozitivem, že podle skutečného smrštění, vyhodnoceného na zkušebním odlitku daného typu a materiálu, je možné při následující výrobě reálné série odlitků upravit míru smrštění v každém směru (což u konvenční výroby není možné nebo jen s obtížemi).

Velmi zajímavé jsou výsledky mechanických vlastností, provedených na vzorcích ve stavu po vytištění a po napuštění napouštěcími nebo laminovacími pryskyřicemi. Zkoušky nasákovosti prokázaly, že pryskyřice jsou schopny ve vytištěné struktuře po ponoření vzorků vzlínat do hloubky několik desítek mm. Vzorky nasycené pryskyřicí Jatapol WR 90N se vytvrzují při teplotě 85 °C, u ostatních pryskyřic se teplota vytvrzování neuvádí a z práce není zřejmé zda a za jakých parametrů na vzorcích bylo vytvrzování provedeno. Na takto napuštěných vzorcích byla hodnocena pevnost v tahu, tlaku, ohybu, teplotní dilatace a teplotní odolnosti. Při aplikaci všech sledovaných pryskyřic došlo k velmi podstatnému zvýšení mechanických vlastností. Domnívám se, že v tabulkách výsledků by měly být zejména uvedeny hodnoty při zkouškách naměřených veličin, u mechanických hodnot tedy velikost maximální zátěžné síly nebo síly při zlomení tělesa. Tomu tak ale není a uvedené hodnoty pevnosti se musí zjišťovat z dílčích grafů (znázorněných jen pro některá zkušební tělesa). Pak například zatížení při tahové zkoušce je pro vzorky napuštěné pryskyřicemi Jatapol a Epolam nutno odečíst z obr. 91 a jsou v intervalu 3000-4500 N. Tomu při průměru vzorku \varnothing 30 mm odpovídá pevnost v tahu cca 4,2-6,3 MPa a tedy nikoliv 9-28 MPa, uvedené v tab.17. Pevnost v tahu nelaminovaného vzorku se pravděpodobně bere z výsledků zkoušky vaznosti v tab. 12 (číselně to tak odpovídá - to je ale de facto zkouška v tlaku). Jak se v této tabulce uvádí, je vaznost (pevnost) závislá na čase vytvrzování. Skutečný čas do doby zkoušky ale v tab. 17 není udán. U zkoušek pevnosti v tlaku hodnoty vzorků s pryskyřicí Jatapol v tab. 20 odpovídají maximálnímu zatížení 15-20000 N dle grafu v obr. 99. Křivky zatížení nenapuštěných vzorků ale v tomto grafu nejsou zaznamenány

a udávaná pevnost kolem 4,8 MPa se naprosto rozchází s tab. 12. Tato pevnost v tlaku je ve srovnání s běžnými slévárenskými směsami s furanovými pojivy neobvykle vysoká. U grafů pro ohyb na obr. 103 a 104 popis vzorků neodpovídá číslování vzorků v tab. 23 a není tedy jasné, kterých vzorků se křivky týkají. V každém případě je zvýšení mechanických vlastností napuštěním pryskyřicemi významné a technicky zajímavé. Protože v praxi asi nebude možno vytisknutý objekt ponořovat do pryskyřic, bylo by vhodné zjistit hloubku nasycení při nanášení stříkáním nebo natíráním.

Zkouškami teplotní roztažnosti bylo zjištěno, že součinitel délkové roztažnosti laminovaných systémů je 1,5 až 2 krát větší, než systémů po vytisknutí. To společně s vyšší intenzitou ochlazování odlitého kovu vlivem zvýšení hustoty keramiky bude mít vliv na průběh teplot ve stěně formy (jádra). Bylo by rovněž vhodné prakticky ověřit, zda v důsledku rozdílu teplotní roztažnosti v laminované vrstvě a v podkladovém výtisku nebude docházet k odlupování povrchové vrstvy nebo k jiným anomáliím.

K formální stránce disertační práce konstatuji, že práce odpovídá požadavkům, na tento typ publikací kladené, má dobré grafické zpracování a jazykovou úroveň. Práci by asi prospělo poněkud hustší řádkování.

Rozsah provedených experimentů je značný, zpracování tabulek a grafů však často není přehledné ani obsahově optimální. Zejména teoretická část někdy obsahuje obecnou slévárenskou problematiku, která je zde zjednodušená a není pro řešený úkol podstatná. Experimentální část přináší řadu nových poznatků, které mohou být pro rozvoj užití této metody užitečné.

Práce cituje 47 literárních pramenů, některé z nich však nejsou správně kompletně uvedeny a není je možné dohledat. Některé publikace neodpovídají problematice, k níž jsou uvedeny, některé literární zdroje se na uvedených webovských adresách nedají dohledat.

Celkově konstatuji, že disertant prokázal odpovídající znalosti oboru a řešené problematiky a práci doporučuji k obhajobě.

Doc.Ing. Jaromír Roučka, CSc

VUT v Brně, FSI, Ústav strojírenské technologie, odbor slévárenství