

# PRVNÍ ČESKÁ PORTÁLOVÁ 3D TISKÁRNA

Marek Štádlér, Josef Kamenický, Jiří Kotrba, Martin Podzimek, Jan Machovec, Pavel Reiterman

3D tisk z plastu a z kovu si již našel místo v průmyslové praxi, ale tisk budov je stále ještě novinkou. Na základě spolupráce mezi Ústavem konstruování a částí strojů Fakulty strojní ČVUT, Experimentálním centrem Fakulty stavební ČVUT a společnostmi Strojírny Podzimek a Podzimek a Synové vznikla v Třešti unikátní 3D tiskárna pro tisk konstrukcí budov. Součástí řešení byl návrh nejen vlastní 3D tiskárny, ale i vlastní hmoty na bázi cementu. V současnosti se jedná o největší portálovou 3D tiskárnu v České republice, která je schopna tisku nosné konstrukce budov v běžných venkovních podmínkách.

## THE FIRST CZECH GANTRY 3D PRINTER

3D printing by metals or plastics is currently widely used in many industrial branches. However, 3D printing of buildings is still in the development. The unique 3D printing machine has been created for the production of building structures in Třešť on the basis of collaboration of Department of Designing and Machine Components of Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague, Experimental Centre of Faculty of Civil Engineering CTU in Prague, Strojírny Podzimek Ltd. and Podzimek a Synové Ltd. It is the biggest 3D printing machine in Czech Republic, which is able to print supporting structures of the buildings under common external conditions.

Současným trendem v technologickém vývoji v mnoha oborech je využívání 3D tisku jako pomocníka pro vytváření různých modelů a výrobků, kterých jinými postupy lze dosáhnout velmi komplikovaně a draze, v některých případech je dokonce 3D tisk jedinou možností výroby. Lékaři si tisknou modely orgánů jako pomůcku před operacemi, letecký průmysl 3D tiskem odlehčuje letadla, strojní průmysl díky 3D tisku získává obrovské možnos-

ti výroby prototypů. Bylo tak jen otázkou času, kdy 3D tisk pronikne i do stavebnictví.

Hlavními přednostmi 3D tisku jsou:

- úspora materiálu – při klasické betonáži se vyplní i objem konstrukcí, kde z technického hlediska beton zapotřebí není,
- úspora času – jedná se především o čas samotné stavby, příprava ale může být časově náročnější,
- potřeba menšího počtu pracovníků – je sice zapotřebí menšího počtu řemeslníků, na druhou stranu je ale nutná spolupráce se specialisty z jiných oborů,
- snadnější replikovatelnost,
- architektonická svoboda – možnost použití organických tvarů.

## Vývoj 3D tiskárny

Cílem našeho projektu byl nejen vývoj 3D tiskárny, ale také zvládnutí problematiky zpracování a řízení vlastností tiskové hmoty.

Pracovníci Ústavu konstruování a částí strojů Fakulty strojní ČVUT navrhli kompletní konstrukční část 3D tiskárny včetně technologie dopravy tiskové směsi k trysce a zajišťovali řízení prvních tisků a přípravu vstupních dat. Součástí projektu byl také návrh testovací tiskárny (obr. 1). Ta byla vyvinuta pro prvotní experimenty s tiskovou hmotou, resp. k vývoji speciální hmoty vhodné pro 3D tisk, kterou si vzali na starost odborníci z Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT. Pro dopravu hmoty bylo zvoleno větvenové čerpadlo kvůli efektivnější regulaci toku materiálu. Klasická pístová čerpadla jsou sice výkonnější, ale obtížně se u nich dosahuje nižšího průtoku.

Na modelové 3D tiskárně byly testovány nejrůznější varianty složení směsi dříve testované v laboratoři. Prvním krokem bylo odladění granulometrie směsi, která by vyhovovala zvolenému typu čerpadla. Oproti původnímu předpokladu musela být hmota výraz-



1



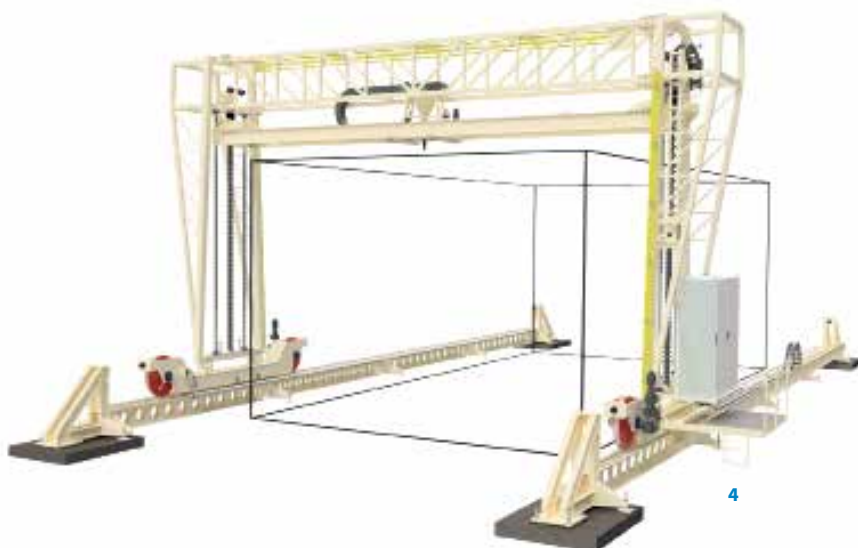
2



3a



3b



**1** Modelová tiskárna pro zkušební tisk a vývoj hmoty **2** Film pojiva mezi vrstvami **3** Zkušební tisk na modelové tiskárně **4** 3D tiskárna s pracovním prostorem 15 × 7,5 × 5,5 m **5** Granulometrie směsi pro 3D tisk **6** První tisky na velké tiskárně **7** Pokusný tisk klenutého prvku

**1** Model 3D printer for the pilot mixture development **2** Film of the cement paste between layers **3** Initial printing on the model 3D printer **4** 3D printer with operating space 15 × 7,5 × 5,5 m **5** Granulometry for the 3D printing **6** Initial print on the 3D printer **7** Trial printing of the arched element

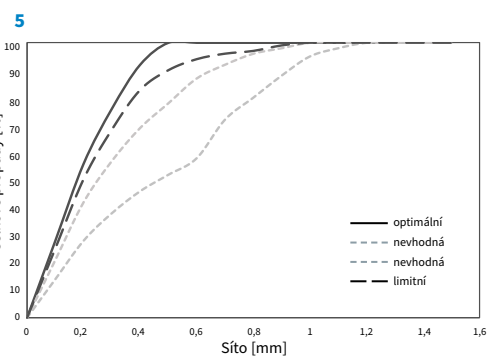
ně jemnozrnější (obr. 5). Tento aspekt pochopitelně není z pohledu betonáře optimální, ovšem odstranil minimálně jednu nepříjemnou vlastnost 3D tištěných struktur – zvýšenou pórovitost mezi navazujícími vrstvami. Při použití hrubšího písku dochází po extruzi hmoty k umocnění tzv. stěnového efektu, kdy mezi jednotlivými vrstvami zůstává tenký film pojiva (obr. 2), který zhoršuje tisknutelnost a zároveň má odlišné mechanické vlastnosti [1]. Navrženou směs pro 3D tisky tedy nelze chápat jako tradiční beton, ale spíše jako jemnozrnou cementovou maltu.

Principiálním aspektem byla „tisknutelnost“, kterou nelze postihnout žádnou ze standardně používaných zkoušek. V této fázi projektu byly tisknuty rozměrnější prvky, na nichž byla především vizuálně sledována kvalita tisku, ale i schopnost hmoty „unést“ další vrstvy (obr. 3). Byly přitom rovněž monitorovány tlaky v hadicích, objemové toky hmoty apod. jakožto podklady pro návrh dílčích částí 3D tiskárny. Výsledná směs byla koncipována jako suchá

prefabrikovaná směs. Nedílnou součástí byl i vývoj robustního regulačního systému vytvrzování, který je klíčovým prvkem v úspěšném 3D tisku. Před pilotními pokusy na velké tiskárně bylo navrženo několik variant řešení regulace tuhnutí a tvrdnutí směsi zahrnující jednak volitelnou kinetiku vlastní suché směsi, ale i dodatečně přidávaného urychlovače v tiskové hlavě. Regulace tuhnutí směsi tedy měla zohledňovat rychlost tisku z pohledu únosnosti jednotlivých vrstev, ale zároveň poskytovat obsluze dostatečný čas na vyčištění systému v případě přerušení tisku. Na základě získaných poznatků z modelových tisků byl dokončen návrh velké tiskárny a její sestavení.

Pro finální konstrukci tiskárny byla zvolena koncepce portálového jeřábu pojezdícího po kolejnicích. Na rozdíl od obdobných projektů tato tiskárna nevyužívá pro tisk robotickou ruku, ale v portálu tiskárny se vertikálně pohybuje příčník, po kterém pojezdí vlastní tisková hlava. Pracovní prostor tiskárny má půdorys 15 × 7,5 m a výšku 5,5 m (obr. 4).

Řízení 3D tiskárny je založeno na průmyslovém řešení a využívá systém Sinumerik od společnosti Siemens. Činnost tiskárny je tedy analogicky s CNC obráběcími centry ovládána pomocí G-kódu. Tím je také ovládána doba nástupu tuhnutí tiskové hmoty. K tisku budovy tedy stačí projekt předem připravený v počítači, který tvoří základ každého tisku. Pro následnou obsluhu tiskárny jsou zapotřebí dva lidé – jeden se stará o přípravu směsi a druhý řídí a kontroluje průběh tisku. Tiskárna je mobilní, umožňuje tedy tisknout budovu přímo na místě, kde trvale zůstane. A dále je jako jedna z mála na světě



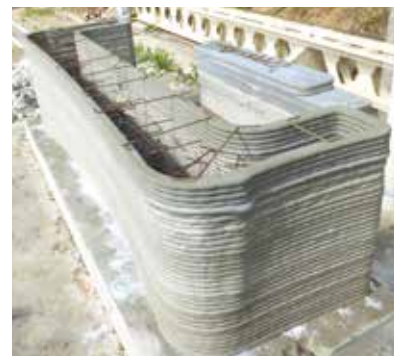
**6a**



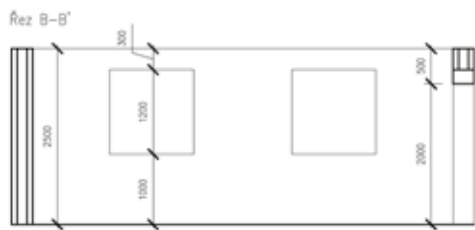
**6b**



**7**

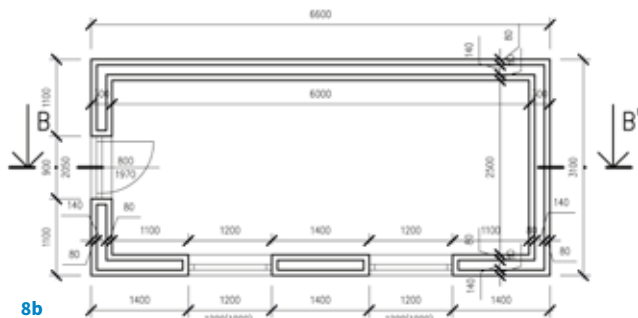


ETAPA 2

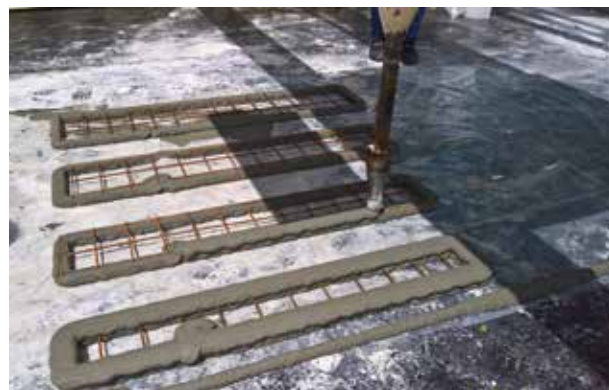


8a

Půdorys



8b



9

8 Model rodinného domu: a) řez, b) půdorys 9 Tisk překládů 10 Schéma zatížení: a) ohybem, b) smykem 11 Základní rám modelového objektu 12 Průběh tisku modelového objektu 13 Detail osazení okenního překládu 14 Přesnost výsledného tisku

8 The drawing of the model building: a) section, b) floor plan 9 The printing of lintels 10 Scheme of testing: a) bend, b) shear 11 The basement of the model building 12 Documentation of the printing 13 The detail of a lintel settlement 14 The accuracy of the printing

schopná pracovat ve venkovním prostředí bez ochranné stavby.

Po dokončení stroje probíhaly další úpravy jak na tiskárně, tak i na navržené směsi, neboť celou řadu aspektů nebylo možné na malé modelové tiskárně objektivně vyzkoušet. Především se jednalo o dopravu směsi. Jelikož tiskárna umožňuje tisk opravdu rozměrného objektu, je i dopravní cesta od kontinuálního míchače a čerpadla k tiskové hlavě cca 45 m dlouhá, což je výrazná technologická komplikace, která

Tab. 1 Výsledné parametry 3D tištěných okenních a dveřních překládů

Tab. 1 Final properties of 3D printed window lintels

hmotnost	61,75 kg
délka	1 519 mm
šířka	331 mm
výška	60,4 mm
maximální spojité zatížení	13,9 kN/m
maximální smykové zatížení	18,9 kN

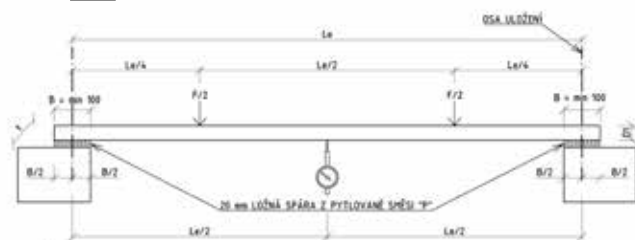
vyžadovala úpravu směsi i konstrukční úpravy na tiskové hlavě. Následně byly obdobně jako na modelové tiskárně realizovány jednoduché prvky pro vyladění pohybů stroje a nastavení parametrů v řídicím G-kódu, které zohledňovaly dynamické vlastnosti stroje. Význam synchronizace všech součástí je dobře patrný na obr. 6.

Po zvládnutí tisku základních a geometricky jednodušších prvků bylo přistoupeno k pokusným tiskům stěnových prvků s klenutým profilem. Postupně byly tištěny jednotlivé vrstvy, ovšem každá další byla nepatrně posunuta mimo osu té předcházející. Na základě výsledků testů a díky schopnosti směsi vydržet mimoosé ukládání jednotlivých vrstev byl pracovníky strojní fakulty vytvořen G-kód pro tisk klenutého prvku (obr. 7). Aby se snížilo riziko zhroutení prvku a nežádoucí deformace při tisku, byly mezi jednotlivé vrstvy vkládány výztužné prvky pro fixaci ke

svislé vrstvě. Tímto způsobem bylo potvrzeno, že tiskárna je schopna tisknout i konvexní či konkávní tvary.

U každého tisku byly monitorovány okolní podmínky, zejména vlhkost a teplota, které mají vliv na průběh 3D tisku. Jelikož cílem byl tisk poměrně rozsáhlých prvků, byla kvůli bezpečnosti provozu 3D tiskárny vybrána směs s pomalejším náběhem tuhnutí, což obsluze tiskárny poskytuje dostatečnou časovou rezervu na případné vyčištění stroje při přerušení tisku nebo poruše. V případě směsi s rychlejším náběhem by reálně hrozilo při neřízeném zastavení tisku tuhnutí směsi již v útrobách stroje. Pro zvolenou směs je však riziková rychlá ztráta vody, která by vedla ke smršťovacím trhlinám. Při sérii pokusných tisků bylo potvrzeno, že lze kontinuálně tisknout při teplotě od 8 do 26 °C. Změny teploty lze regulovat dávkováním urychlovače do tiskové hlavy nebo změnou rychlosti tisku. Zá-

OHYB:



zatěžování:

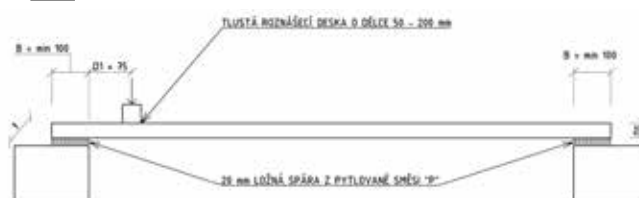
- plynulé
- mez únosnosti po cca 15–30 min od začátku zkoušky

měření:

- v prostředku rozpětí–svislý i vodorovný průhyb
- svislý posun konců překládů

10a

SMYK:



zatěžování:

- plynulé
- mez únosnosti po cca 15–30 min od začátku zkoušky

měření:

- hodnota zatížení na mez únosnosti

10b





11

roveň bylo při četných zkouškách ověřeno, že kompaktní charakter vytištěné směsi umožňuje tisk i za deště s intenzitou do 4 mm/h, který však netrvá déle než 45 min. Po delší době již docházelo k rozplavování směsi a deformacím, které vedly ke zhroucení prvku.

### Tisk nosné konstrukce modelového domu

Hlavním cílem poslední fáze projektu bylo vytištění nosné konstrukce modelového rodinného domu. Nejprve byla navržena geometrie domu, která byla následně digitalizována a konvertována do řídicího systému 3D tiskárny. Tvar modelového objektu je znázorněn na obr. 8.

Strojírny Podzimek byl vyroben ocelový rošt, na který se vytiskl modelový objekt. Uvedený rošt zajišťuje dostatečnou tuhost podkladu a nepřímo i mobilitu výsledného objektu. V průběhu tisku hrubé stavby modelového objektu byly vytištěny i okenní a dveřní překlady (obr. 9). Pro jejich výrobu byla použita totožná směs; na první vrstvu byla umístěna svařovaná síť, která byla vzápětí do prvku „zatištěna“. Část překladů byla laboratorně vyzkoušena pro ověření únosnosti v ohybu a smyku dle ČSN EN 846-9 ed. 2 [2] (obr. 10). Výsledné parametry jsou uvedeny v tab. 1.

Další průběh tisku modelového domu je dokumentován na obr. 11 a 12. V průběhu tisku docházelo k pravidel-



12



13

14



inzerce



**PODZIMEK 4.0**

STAVÍME SI BUDOUCNOST

## 3D TISK BUDOV

PRVNÍ A NEJVĚTŠÍ 3D TISKÁRNA  
PRO TISK BUDOV V ČR

3D tiskárna je výsledkem spolupráce firem Strojírny Podzimek, Podzimek & synové, Ústavu konstruování a částí strojů Fakulty strojní ČVUT a Fakulty stavební ČVUT za podpory TAČR.

[www.podzimek3d.cz](http://www.podzimek3d.cz)



15

15 Hotová nosná konstrukce modelového objektu 16 Nosná konstrukce s keramickou střešní krytinou

15 The finalized load structure of model building 16 The structure equipped with ceramic roofing



16

ným technologickým pauzám využitým pro kontrolu tiskové hlavy a kropení vytištěných prvků. Během těchto přestávek nebylo nutné čistit dopravní cesty.

Pro osazení okenních a dveřních překladů byly v nadpraží vytištěny ozuby, do nichž byly překlady osazeny a po jejich usazení došlo k jejich následnému „zatištění“ do nosné konstrukce objektu. Příprava pro osazení okenních překladů je patrná na obr. 13, kde je zároveň již vidět zabudovaný dveřní překlad.

Pomocí 3D tisku bylo v nadpraží z hmoty vytvořeno „ztracené bednění“, do kterého byl vložen armokoš a které bylo následně vyplněno 3D hmotou. Takto vzniklý věnec zvýšil tuhost a stabilitu objektu a umožnil bezpečné osazení lehké dřevěné střechy s keramickou střešní krytinou (obr. 16). Výsledná hmota vyvinutá pro tuto tiskárnu vykazovala po 28 dnech pevnost v tlaku cca 45 MPa a součinitel mrazuvzdornosti vyšší než 1,0 [3]. Na základě mechanických zkoušek modelových stěnových segmentů bylo zjištěno, že únosnost stěn je srovnatelná s konvenčními řešeními.

Bylo potvrzeno, že vyvinutá 3D tiskárna je plně funkční a umožňuje efektivní výrobu nosné konstrukce rodinného domu dle prostorových limitů, které jsou dány velikostí pojezdové dráhy. Vlastní nosná konstrukce vytištěného objektu vykazuje parametry srovnatelné s parametry objektů z jiných v ČR používaných materiálů a umož-

#### Literatura:

- [1] LE, T. T., AUSTIN, S. A., LIM, S., BUSWELL, R. A., LAW, R., GIBB, A. G. F., THORPE, T. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012, 42(3), 558–566.
- [2] ČSN EN 846-9 ed. 2. *Zkušební metody pro pomocné výrobky pro zděné konstrukce – Část 9: Stanovení únosnosti překladů v ohybu a smyku*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [3] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Praha: ČNI, 2003.

ňuje osazení i dalších navazujících konstrukcí (střecha, kompletační konstrukce apod.). Uvedené zařízení je navíc schopno efektivně tisknout funkční a přesné stavební překlady zvolených dimenzí a tvarů, jejichž únosnost je srovnatelná s běžně používanými stavebními prvky.

#### Závěr

Na otázku, proč se strojírenská a stavební firma Podzimek pustila do vývoje 3D tisku budov, odpovídá její ředitel Martin Podzimek: „Vývoj naznačuje, že na trhu práce v dohledné době možná žádní stavební dělníci nebudou. Pak nám nezbyde než hledat řešení v robotizaci. Hrubou stavbu dokážeme udělat bez zedníků za den nebo dva. Robotizace se dřív nebo později ve stavebnictví prosadí, proto chceme ve vývoji 3D tiskárny pokračovat. V případě zájmu investorů můžeme v budoucnu pokračovat tiskem dalších domů.“

Vývoj této tiskárny i hmoty pro tisk nadále pokračuje. Vlastní výzvou pro celou odbornou komunitu však bude i zvládnutí legislativního rámce technologie 3D tisku budov.

Vývoj tiskárny podpořený TA ČR proběhl v rámci projektu TH 04010143 – 3D tiskárna budov a prefabrikovaných komponent pro stavebnictví 4.0 v rámci programu Epsilon.

Fotografie: archiv autorů



Ing. Marek Štádlér  
Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Ústav konstruování a částí strojů  
marek.stadler@fs.cvut.cz



Ing. Josef Kamenický  
Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Ústav konstruování a částí strojů  
josef.kamenicky@fs.cvut.cz



Ing. Jiří Kotrba  
Strojírny Podzimek, s.r.o.  
jiri.kotrba@podzimek.cz



Ing. Martin Podzimek  
Podzimek a synové s.r.o.  
martin@podzimek.cz



Ing. Jan Machovec  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Experimentální centrum  
jan.machovec@fs.cvut.cz



doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Experimentální centrum  
pavel.reiterman@fs.cvut.cz