

Mgr. Jakub Harašta

Přehled zahraničních zkušeností s vlivem aditivní výroby na vývoj a nasazení vojenských technologií

Overview of the Foreign Experience of the Influence of additive manufacturing on development and deployment of military technology

Vojenské rozhledy, 2015, roč. 24 (56), č. 2, s. 64–71, ISSN 1210-3292 (tištěná verze), ISSN 2336-2995 (on-line).

Abstrakt:

Príspevok predstavuje metodu aditívnej výroby ako možnú alternatívu k súčasným subtraktívnym výrobným kapacitám. Na základe průzkumu literatury identifikuje některé problematické aspekty nesouladu mezi dlouhým vývojovým cyklem a rychle se měnícími operačními potřebami reagujícími na aktuální hrozby. Součástí jsou i úvahy, jak by nedostatky ve vývojovém cyklu i rozsáhlém logistickém aparátu mohly být vyřešeny právě nasazením aditivních výrobních prostředků. V zájmu zachování objektivity je poslední část věnována nedostatkům aditivní výroby, ať už nedostatkům inherentním této technologii nebo nedostatkům, k jejichž odstranění může dojít dalším vývojem v oblasti.

Abstrakt anglicky:

The paper presents the additive manufacturing method as a possible alternative to the current subtractive manufacturing methods. Based on literature survey, some of the problematic aspects of the discrepancy between the lengthy development cycles and rapidly changing operational demands responsive to current threats are identified. The paper also includes some thoughts on possibilities of solving inadequacies in the development cycles, as well as related logistical apparatus, by additive manufacturing. For the sake of objectivity, the last part is dedicated to deficits of additive manufacturing, being inherent to technology or possibly to be overcome by further development of the field.

Klíčová slova:

aditivní výroba, vývojový cyklus, moderní technologie, 3D tisk

Klíčová slova:

additive manufacturing, development cycle, modern technology, 3D print

Úvod a technologie samotná

Aditivní výroba, v médiích často zjednodušovaná na pojem 3D tisku, v současné době představuje velice turbulentní technologické odvětví. Objevuje se v médiích i popularizačních člancích a spekuluje se o možném i nemožném, kterého lze použitím této technologie dosáhnout. V předkládaném textu se pokusím zasadit tento výrobní proces do kontextu problémů identifikovaných v rámci vývoje vojenských technologií. Jakkoli se jedná o technologii neomezenou geograficky, nejdostupnější a informačně nejbohatší jsou dokumenty věnované vojenským silám USA. Proto, ač mají některé závěry v této práci prezentované obecnou platnost, budou demonstrovány na příkladech vývoje právě z USA.

Termín aditivní výroba, který v této práci používám, představuje zastřešující termín pro metody trojdimenzionálního tisku z různých materiálů, protože běžně používaným termínem 3D tisk se označuje používání polymerů jako materiálu. Jako materiál je přitom dnes možné použít kromě polymerů i kovy (včetně titanu [1]), biomateriály (včetně živé lidské tkáně [2]) nebo jídlo [3]. Možnost použití různých materiálů se liší v závislosti na použité technologii aditivní výroby. K dispozici je tak stereolitografie umožňující používat fotopolymery, dále technologie Solid Ground Cutting (fotopolymery, nylon), Selective Laser Sintering (polyamidy, nylon, vosk, kovové prášky), Direct Metal Laser Sintering (kovové prášky), Fused Deposition Modeling (polykarbonát) a další.

Aditivní výroba zároveň představuje vymezení technologie vůči předchozím výrobním postupům, tzv. subtraktivním. Zdůrazňuje základní rozdíl, kterým je přidávání, namísto odebírání. Zatímco v subtraktivní výrobě dochází k odebírání materiálu za účelem dosažení kýženého tvaru, v rámci aditivních výrobních procesů dochází k přidávání materiálu, kterým je zvolená látka v práškové formě. Účelem je, kromě níže uvedeného, i snížení množství odpadu z výroby [4].

Technologie samotná vznikla na University of Texas v polovině 80. let 20. století [5] a postupně byla zdokonalována až do nynější podoby. V současné době se však i přesto dá mluvit o přelomovém období pro tuto technologii, protože od října 2013 do června 2015 vyprší doba ochrany přiznaná některými pro rozvoj tohoto odvětví klíčovými patenty [6]. Otevře se tak cesta pro výzkum dalšího užití, rozšířené možnosti komercializace a snad bude dosaženo i nižší ceny.

Aditivní výroba představuje způsob demokratizace výrobního procesu a možnost vytvářet nízkonákladové série vysoce specializovaných výrobků. Zároveň dojde k možnosti levné výroby součástí, které již nejsou z různých důvodů k dispozici (ztráta dokumentace, zastarání) pomocí zpětného inženýrství, protože předloha pro výrobu může být vytvořena i skenováním fyzicky dostupného dílu [7][8]. Zároveň nebude nutné vyrábět výrobky do skladu [9], ale bude možné přesně ovládat nabídku podle poptávky [10]. Potenciál je tedy obrovský a dobře si jej uvědomuje i americký prezident Obama, který potenciál aditivní výroby zmínil ve *Zprávě o stavu Unie 2013* [11][12]. Celkem logicky o aditivní výrobu jeví zájem i armáda, která s touto inovací spojuje možnosti změny některých problematických aspektů jejího fungování, zejména s přihlédnutím k vývoji a nasazení nových technologií.

1. Problémy vývoje

Na udržení technologické převahy amerických vojenských sil jsou ročně vynakládány miliardy dolarů, nicméně systém, který rozhoduje o vynakládání těchto prostředků, je zastaralý, neefektivní a uzavřený inovacím [13]. Registrujeme tak snahy otevřít systém inovacím v podobě nástupu nové generace důstojníků, ty jsou ale zatím v menšině [14] a jsou reflektovány spíše výjimečně [15]. Celý tento neflexibilní systém tak způsobuje, že s každým dalším technologickým krokem náklady na udržení technologické převahy rostou. Alarmujícím je kupř. srovnání vývojového cyklu a nákladů u již vyraženého letounu F-4 Phantom II a letounu F-22 Raptor, který představuje zatím poslední krok k vybojování vzdušné nadvlády. Zatímco letoun F-4 byl uveden do provozu po 6 letech vývoje, vývoj F-22 Raptor trval 22 let. I rozdíl v ceně kusu očištěné o inflaci je více než osminásobný. Problémy tak lze jenom v této oblasti identifikovat dva – neustále se prodlužující vývojový cyklus a neustále rostoucí cenu kusu [16].

Vývojový cyklus trvající desítky let vytváří zásadní tlak na předvídaní nejen vojenského, ale i geopolitického vývoje tak, aby byl výsledný produkt konkurenceschopný a zároveň odpovídal potřebám ozbrojených složek. F-22 Raptor byl původně zamýšlen jako náhrada F-15E Strike Eagle a byl zamýšlen především pro lety nad Evropou [17]. Geopolitická situace se nicméně změnila a těžiště zájmů se přesunulo do prostorů Asie a Pacifiku, což si vyžádalo úpravy v designu směrem k dosažení většího doletu, což vývoj dále prodlužovalo.

V důsledku úzké specializace a potřebě menšího počtu vyrobených strojů je nutné promítnout cenu specializovaných výrobních kapacit do stále menšího počtu strojů v nich vyrobených [18]. Tím opět roste cena jednotlivého kusu. Vzhledem k obrovským investicím, které si vývoj nového prostředku žádá, vzniká silný tlak na maximální prodloužení jeho životnosti. Délka vývojového cyklu je tedy reflektována požadavkem na délku cyklu operačního [19]. Ten si opět žádá větší náklady na použité materiály, na jejich odolnost, ale také na údržbu. Kromě samotné ceny jednotlivého kusu tedy rostou i náklady spojené se zásobováním. Tímto se zásadně snižuje schopnost pružně reagovat na případné nové hrozby související s politickým či vojenským vývojem (v důsledku dlouhého vývojového cyklu) i dosáhnout pružného dodání nových kusů techniky v rámci aktuální krize (v důsledku vysokých nákladů a napjatých rozpočtů). Dalším aspektem je i snadná zneužitelnost ztráty takto nákladného stroje, kterou je možné snadno využít v informačních či dezinformačních kampaních nepřítel [20].

Celý tento systém je někdy připodobňován k systému luxusních automobilů, které mají sice v době svého vyrobení nejlepší dostupné součásti, ale v důsledku míry integrace těchto součástí rychle zastarávají [21]. Řada letadel či lodí má v současné době takovou míru integrovanosti původních zbraňových či senzorových systémů, že je jejich přizpůsobení aktuálním požadavkům téměř nemožné. Je tedy nutné absolvovat celý výrobní cyklus znovu za účelem vytvoření vhodnějšího stroje. Nemožnost úpravy používaných strojů v souladu s požadavky konkrétní mise vytváří značný finanční tlak. Cílem by tedy mohlo být vytvoření modulárních platform, které budou mít minimum integrovaných systémů a bude možné v nich měnit i senzorické nebo komunikační vybavení [22].

Reforma systému v souladu s výše uvedenými požadavky by měla vést k vytvoření koncepce, která výrazně zkrátí délku operačního cyklu použité platformy až na 5 let. Tato platforma, namísto schopnosti plnit různé mise se svým integrálním vybavením,

bude vybavována podle aktuálních potřeb kompatibilními systémy při dodržení standardu umožňujícího použitelnost starších systémů na nových platformách a *vice versa*. Tím dojde ke snížení standardu použité technologie a zkrácení životního cyklu platformy – cílem mají být nakonec nižší náklady na mírovou údržbu i na výcvik obslužného personálu [23].

Posledním problémem, který je tak starý jako vojenské síly samotné, je zásobování. Delší zásobovací trasy způsobují (kromě nutnosti zajistit jejich bezpečnost) zvýšené náklady a zpomalení při dodávkách konkrétních náhradních dílů. Probíhající operace v Iráku či Afghánistánu ukázaly, že poruchy či poškození mohou vyloučit bojový prostředek z operační činnosti na dlouhé týdny, protože možnost zásobování je velmi omezená [24]. Problematickým je i zásobování lodí nacházejících se na volném moři. Zároveň je, vzhledem k nepružnosti subtraktivní výroby, nutné mít daný náhradní díl k dispozici v rámci skladových zásob. Náklady na skladování a expedici, ať už lidské, organizační či finanční, jsou tak značné.

2. Možná řešení použitím aditivní výroby

Aditivní výroba, respektive prostředky aditivní výrobu umožňující, jsou v současné době schopné nahradit běžné strojírenské operace, jako je soustružení, frézování, vrtání, broušení a svařování [25]. Z hlediska problému délky vývojového cyklu nemá aditivní výroba potenciál vyřešit problém sama o sobě, nicméně při širších koncepčních změnách k tomu může výrazně přispět. Z hlediska vývoje alternativy pro motor ruské výroby RD-180, který probíhá za účasti společností Aerojet Rocketdyne (v současnosti vyrábí druhý stupeň, který má zážeh po odpojení motoru RD-180, tedy motor RL-10) a Dynetics, je deklarována značná časová úspora při vyrobění prototypu, ověření jeho vlastností a re-designu. Práce, které by při použití subtraktivních metod trvaly 15 měsíců, trvaly údajně pouze dva týdny [26]. Cílem tohoto projektu tak je mít funkční prototyp motoru do konce roku 2019.

V červnu 2014 společnost Aerojet Rocketdyne úspěšně otestovala motor nazvaný Baby Bantam, který byl kompletně sestaven z částí vyrobených aditivní metodou [27]. Kromě návrhu dochází použitím subtraktivní metody k výraznému zrychlení výroby. Injektor pro raketové motory vyrobený NASA je subtraktivní metodou vyráběn 6 měsíců, zatímco aditivní metodou byl vytvořen za 3 týdny [28]. Aditivní metodou je tedy možné vyrábět stejně funkční části jako metodou subtraktivní. Při úpravě návrhu a jeho přepracování se časová úspora samozřejmě kumuluje. Pokud budu pokračovat v příkladu injektoru vytvořeného NASA, znamená pět přepracování téhož návrhu cyklus v celkové délce čtyř měsíců namísto tří let. To představuje značnou a velice zajímavou úsporu minimálně na personálních nákladech.

Aditivní výroba je, kromě potenciálu zkrátit vývojový cyklus, zajímavá i z hlediska nákladů na výrobu. Opakovaně zmiňovaný injektor stál za použití aditivní výroby polovinu z 10 000 USD nutných na výrobu subtraktivní. Některé části použité v rámci testování aditivních technologií v rámci letounu Panavia Tornado stojí méně než 150 USD za kus a celková částka, kterou je možno ušetřit použitím této technologie představuje možnosti úspor v řádu milionů dolarů [29]. Aditivní metody tak v současné době používá řada prominentních společností, mezi nimi např. Apple, BMW, Boeing,

Ford, General Electric [30]. Po překlenutí omezenosti technologie aditivní výroby na polymer jako výrobní materiál je možné dosáhnout vysoké materiálové odolnosti nutné k některým pokročilým projektům. Injektor vytvořený NASA odolal v rámci testů v kumulované době 46 sekund teplotám 3300 °C [31] a spalovací komora přidavných motorů SuperDraco od firmy SpaxeX vydržela 80 testovacích zážehů v celkové délce 300 vteřin, při požadavcích na 25vteřinový zážeh [32]. Také je možné vyrábět komplikované tvary, které by jinak musely být složeny z jednotlivých dílů, a tím dosahovat jejich vyšší odolnosti [33].

Tiskárny v tuto chvíli představují i unikátní prostředek ke zlepšení zásobování. Na místo je totiž možné dopravit tiskárnu, včetně zvoleného materiálu v práškové formě [34]. Zásadně se tím, v případě dostupnosti designů jednotlivých dílů, snižují náklady související se skladováním, katalogizací a dopravou konkrétních náhradních dílů. Pokud je k dispozici design dílu, lze jej vytisknout přímo na místě. Přímou na místě by pak bylo možné vyrábět kompletně prostředky pomocí aditivní výroby. Příkladem může být Razor, což je bezpilotní prostředek vyvinutý na University of Virginia, který může být vytvořen za částku přibližně 2 500 USD [35]. Samotná jeho doprava na místo by tak v případě jeho ztráty v rámci operační činnosti či poškození při přepravě mohla být dražší než jeho výroba.

Takovým mobilním prostředkem směřujícím k významnému zkrácení zásobovacích cest a ke zjednodušení logistiky je Expeditionary Laboratory Mobile (ELM) [36][37]. Tato mobilní laboratoř představuje kontejner ISO 1C vybavený tiskárnou, CNC frézami a laserovými pálicími stroji, generátorem, vytápěním a chladicí jednotkou [38]. Laboratoř pak má v současné době primárně sloužit k vylepšování nedokonale fungujících součástí existující výstroje [39]. Poté může přímo dojít k vytvoření prototypu, který zjištěný problém vyřeší. Funkčnost a efektivitu nově vyrobené součástky je následně možné přímo ověřit v bojových podmínkách ještě před tím, než započne případná hromadná výroba, ať už aditivními, nebo subtraktivními metodami. S tím by samozřejmě měly jít ruku v ruce i organizační změny, protože existující byrokracie není determinovaná pouze technologicky.

3. Problémy aditivní výroby

Přestože tedy aditivní výroba poskytuje prostor pro vyřešení některých problémů, sama technologie s sebou nese některé problémy. Některé z nich souvisejí s faktem, že tato technologie není stále tak pokročilá, jak bychom chtěli, aby byla. Některé potíže jsou pak specifické a této technologii vlastní a budou vyžadovat hlubší organizační či myšlenkové změny.

Jedním z technologických limitů je v současné době velikost tiskáren, respektive maximální přípustná velikost výsledných výrobků. Tiskárny, které se používají v rámci projektu ELM (a které jsou umístěny do ISO 1C kontejnerů), jsou tak schopné produkovat pouze malé díly, které jsou připevnitelné nebo komplementární ve vztahu k existujícím systémům. Není na nich v současné době možné vytisknout ani komplexní předměty složené z různých materiálů, jako je třeba munice. Ani snaha vyřešit problém se zásobováním lodí na otevřeném moři není možné bezesbýtku vyřešit prostým instalováním tiskárny na hladinové plavidlo, přestože k tomuto kroku přistoupila

v dubnu 2014 americká armáda na lodi USS Essex [40][41], a zřejmě i čínská armáda [42]. Problémem je zde zejména nestabilní platforma, na které je tiskárna umístěna, tedy samotné plavidlo. Problémy s nenadálými pohyby v důsledku vln zůstávají nevyřešené, stejně jako pravidelné chvění vyvolávané lodními motory.

Dalším problémem, který s aditivní výrobou souvisí a který se dost možná podaří vyřešit s technologickým pokrokem, je nepředvídatelnost výsledku. Zatímco díly vytvořené subtraktivními metodami mají předvídatelné a opakovatelné fyzikální vlastnosti a jsou známé vzorce jejich opotřebení či únavy materiálu [43], u aditivních metod jsou tyto aspekty neznámé. Většina současných způsobů aditivní výroby, kdy dochází k umístění materiálu do vrstev, navíc vytváří strukturální nedostatky. I když tedy některé nové technologie, jako např. Continuous Liquid Interface Production, mohou vést k odstranění tohoto nedostatku, je v současné době skutečným problémem certifikace. Ta je obzvláště u vojenského použití náročným procesem. Převzetí odpovědnosti za opakovatelné a stabilní vlastnosti výrobků vytvořených aditivní metodou tak není drobným úkolem, a to zejména ve chvíli, kdy na nich závisí lidské životy. I při chybějící certifikaci nicméně existuje modus použití, protože by (hypoteticky) mohla být pro produkty aditivních výrobních procesů zavedena nižší míra certifikace – cílem by bylo vrátit poškozený systém do operačního stavu na dobu dní až týdnů, než by dorazil originální náhradní díl vyrobený subtraktivními metodami. Úspory z hlediska zásobování by nebylo možné dosáhnout, protože standardní zásobovací procedury by musely zůstat zachovány. Došlo by ale ke zvýšení akceschopnosti jednotek rozmístěných v poli.

Problém související s procesem aditivní výroby, který se nepodaří vyřešit technologickým vývojem, ale souvisí s jinými aspekty, jsou práva duševního vlastnictví související s designem. Americké námořnictvo od 80. let nemělo pod kontrolou práva duševního vlastnictví k žádné části, kterou používá [44]. Aby díly mohly být vyráběny aditivní metodou, je nutno tato práva opatřit, což bude zřejmě vytvářet extrémní transakční náklady při přechodu na aditivní výrobu. Problematické je pak i skenování dílu, tedy vytvoření digitálního otisku již vyrobené součásti. Zde se ale otevírá široký prostor pro právní spory, na které nemusí být armáda připravena.

Závěr

Jakkoli aditivní výrobní metody představují atraktivní možnosti z hlediska snížení ceny za kus, zkrácení vývojového cyklu a zkrácení zásobovacích tras, nejedná se o technologii, která je těchto změn schopna svojí samotnou existencí. Existující procesy je nutné upravit, aby byly schopné s touto technologií adekvátním způsobem pracovat. Podle některých přírovnání jsme v současné době s aditivní výrobou ve fázi, v jaké jsme byli s vývojem počítačů na konci 70. a začátku 80. let. Dá se tedy předpokládat další vývoj této technologie, který odstraní některé současné překážky, jež s jejím použitím souvisí. Nicméně problematické nastavení správy práv duševního vlastnictví a zmiňovanou neochotu k inovaci ze strany konzervativních struktur se samotnou technologií zřejmě odstranit nepodaří. Dá se tedy očekávat, že transakční náklady budou značné, nicméně značné jsou i možnosti, které z této technologie vyplývají.

Poznámky k textu a použitá literatura

- [1] Součástky z titanu vyrobené aditivní metodou obsahuje i nový X-47B. Viz MARTIN, Aaron a Ben FITZGERALD. *Process Over Platforms: A Paradigm Shift in Acquisition Through Advanced Manufacturing* [online]. 2013 [cit. 2015-02-10]. Disruptive Defense Papers. Dostupné z: http://www.cnas.org/sites/default/files/publications-pdf/CNAS_ProcessOverPlatforms_FitzGerald.pdf. s. 8.
- [2] Technologie je nicméně stále ještě v plenkách a její použití v klinické praxi zatím není možné.
- [3] THOMPSON, Briar. *Reaching into the Whiter Powder: A Policy Brief on 3D Printing and Pacific Security* [online]. 2014 [cit. 2015-02-10]. Pacific Security Scholars Policy Brief Series. Dostupné z: <http://fas.org/wp-content/uploads/2014/03/Thompson-3d-Printing.pdf>. S. 2.
- [4] Martin a Fitzgerald 2013, op. cit., s. 7–8.
- [5] Patent US4863538 A
- [6] Zejména US5569349 A, US5587913 A, US5597589 A, US 5609812 A, US5610824 A, US 5503785 A, US5637169 A, US 5639070 A, US 5494618 A, US 5651934 A, US 5555176 A, US 5572431 A, US5529471 A, US5733497 A, US5762856 A
- [7] LEXINGTON INSTITUTE. *Some Military Implications of 3D Printing* [on-line]. 2013 [cit. 2015-02-10]. Defencetalk.com. Dostupné z: <http://www.defencetalk.com/some-military-implications-of-3d-printing-48843>.
- [8] NATIONAL INTELLIGENCE COUNCIL. *Global Trends 2030: Alternative Worlds* [on-line]. 2012 [cit. 2015-02-10]. Washington, DC: Office of the Director of National Intelligence, National Intelligence Council. Dostupné z: <http://globaltrends2030.files.wordpress.com/2012/11/global-trends-2030-november2012.pdf>. S. 93.
- [9] MCNULTY, Connor M., ARNAS, Neyla a Thomas A. CAMPBELL. Toward the Printed World: Additive Manufacturing and Implications for National Security. In *Defense Horizons*, no. 73, s. 1–16 [on-line]. 2012 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a577162.pdf>. s. 6.
- [10] SCHUETTE, Larry a Peter W. SINGER. *Direct Digital Manufacturing: The Industrial Game-Changer You've Never Heard Of*. [on-line]. 2011 [cit. 2015-02-10]. Armed Forces Journal. Dostupné z: <http://www.brookings.edu/research/articles/2011/10/10-digital-manufacturing-singer>.
- [11] THE WHITE HOUSE. *Remarks by the President in the State of the Union Address* [on-line]. 2013 [cit. 2015-02-10]. The White House, Office of the Press Secretary. Dostupné z: <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-state-union-address>.
- [12] MINERS, Zach. *Obama plays up 3D printing's military applications under new manufacturing plans* [on-line]. 2013 [cit. 2015-02-10]. NetworkWorld.com. Dostupné z: <http://www.networkworld.com/article/2166151/smb/obama-plays-up-3d-printing--39-s-military-applications-under-new-manufacturing-plans.html>.
- [13] Martin a Fitzgerald 2013, op. cit., s. 3.
- [14] KOHLMANN, Benjamin. *The Military Needs More Disruptive Thinkers*. [on-line]. 2012 [cit. 2015-02-10]. Small Wars Journal. Dostupné z: <http://smallwarsjournal.com/jrnl/art/the-military-needs-more-disruptive-thinkers>.
- [15] CHAYKA, Kyle. *Why is the Pentagon Dragging Its Feet on 3D Printing?* [on-line]. 2013 [cit. 2015-02-10]. DefenseOne.com. Dostupné z: <http://www.defenseone.com/ideas/2013/08/Why-Is-Pentagon-Dragging-Foot-3D-Printing/68936/>.
- [16] Martin a Fitzgerald 2013, op. cit., s. 5.
- [17] Tamtéž, s. 6.
- [18] 187 kusů F-22 Raptor vs. 2078 kusů F-4 Phantom II. Dalších 3 117 kusů bylo určeno k vývozu, na který se v případě F-22 Raptor stále čeká. Viz Martin a Fitzgerald 2013, op. cit., s. 5.
- [19] Tamtéž, s. 12.
- [20] Tamtéž, s. 5.
- [21] GREENERT, Jonathan W. Payloads over Platforms: Charting a New Course. In *U.S. Naval Institute: Proceedings Magazine*, vol. 138/7/1,313 [on-line]. 2012 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.usni.org/magazines/proceedings/2012-07/payloads-over-platforms-charting-new-course>.
- [22] Myšlenka „payloads over platforms“ vycházející ze stejnojmenného článku. Tamtéž.
- [23] Martin a Fitzgerald 2013, op. cit., s. 13
- [24] GROHMANN, Jan. *3D tisk: Tichá revoluce ve vojenství* [on-line]. 2014 [cit. 2015-02-10]. Armádní Noviny.cz. Dostupné z: <http://www.armadinoviny.cz/3d-tisk-ticha-revoluce-ve-vojenstvi.html>.
- [25] Tamtéž.

- [26] WEISGERBER, Marcus. *How 3D Printing Could Help Replace Russian Rockets* [on-line]. 2014 [cit. 2015-02-10]. DefenseOne.com. Dostupné z: <http://www.defenseone.com/technology/2014/10/how-3d-printing-could-help-replace-russian-rockets/97088/>.
- [27] WEISGERBER, Marcus. *The Defense Industry Is Expanding the Use of 3D Printing* [on-line]. 2014 [cit. 2015-02-10]. DefenseOne.com. Dostupné z: <http://www.defenseone.com/technology/2014/09/defense-industry-expanding-use-3d-printing/95396/>.
- [28] NASA ADVISORY COUNCIL. [*Presented by: Dr. Bill Ballhaus, Chair*] [on-line]. 2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/BallhausCommitteeReport.pdf>. s. 23.
- [29] MILES, Stuart. *Printing planes: BAE Systems now using 3D printed parts in fighter jets* [on-line]. 2014 [cit. 2015-02-10]. Pocket-lint.com. Dostupné z: <http://www.pocket-lint.com/news/126185-printing-planes-bae-systems-now-using-3d-printed-parts-in-fighter-jets>.
- [30] McNulty et al. 2012, op. cit., s. 12
- [31] NASA. *Hot-Fire Tests Show 3-D Printed Rocket Parts Rivel Traditionally Manufactured Parts* [online]. 2014 [cit. 2015-02-10]. NASA.gov. Dostupné z: <http://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/3dprinting.html#.VL61LUeG9nU>.
- [32] Grohmann 2014, op. cit.
- [33] Již zmíněný motor Baby Bantam měl namísto běžných desítek jen tři oddělené díly, které bylo nutno složit. Weisgerber 2014b, op. cit.
- [34] V případě námořnictva se mluví i o tzv. biominingu, který by umožňoval získávat některé materiály k aditivní výrobě přímo z moře. Viz ESTES, Adam Clark. *Marching into the Future of 3D-Printed War* [on-line]. 2013 [cit. 2015-02-10]. Gizmodo.com. Dostupné z: <http://gizmodo.com/marching-into-the-future-of-3d-printed-war-1474031297>.
- [35] GOLSON, Jordan. *A Military-Grade Drone That Can Be Printed Anywhere* [on-line]. 2014 [cit. 2015-02-10]. Wired.com. Dostupné z: <http://www.wired.com/2014/09/military-grade-drone-can-be-printed-anywhere>.
- [36] COX, Matthew. *Mobile Labs build On-the-Spot Combat Solutions* [on-line]. 2012 [cit. 2015-02-10]. Military.com. Dostupné z: <http://www.military.com/daily-news/2012/08/17/mobile-labs-build-on-the-spot-combat-solutions.html>.
- [37] KUNEINEN, Eetu. *U.S. Army Deploying Mobile FabLabs* [on-line]. 2013 [cit. 2015-02-10]. 3DPrintingIndustry.com. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/2013/03/06/u-s-army-deploying-mobile-fablabs>.
- [38] Lexington Institute 2013, op. cit.
- [39] Srovnáním může být opakovaně medializovaný problém českých vojáků v Afghánistánu s používáním vlastní (nezavedené) balistické ochrany.
- [40] Weisgerber 2014b, op. cit.
- [41] SEVENSON, Brittney. *U.S. Navy Installs 3D Printer On Their First Ship, The USS Essex* [on-line]. 2014 [2015-02-10]. 3DPrint.com. Dostupné z: <http://3dprint.com/2554/uss-essex-3d-printer-navy>.
- [42] ANDERSON, Sara. *China's PLA Navy Deploys 3D Printers Onboard Warships to Replace Small Parts* [online]. 2014 [2015-02-10]. 3DPrint.com. Dostupné z: <http://3dprint.com/35981/china-pla-navy-3d-printing>.
- [43] BROWN, Nick, MALENIC, Marina and Huw WILLIAMS. *Make and mend: the revolutionary promise of 3-D printing* [content preview] [on-line]. 2014 [cit. 2015-02-10]. International Defence Review. Dostupné z: http://www.janes360.com/images/assets/223/43223/the_revolutionary_promise_of_3D_printing.pdf.
- [44] FELLMAN, Sam. *Need a Part? Just Press Print* [on-line]. 2013 [cit. 2015-02-10]. DefenseNews.com. Dostupné z: <http://www.defensenews.com/article/20130609/DEFREG02/306090009/Need-Part-Just-Press-Print>.