

Aneta Mager, Grzegorz Moryson <sup>1)</sup>  
Andrzej Cellary, Lidia Marciniak <sup>2)</sup>

## ZASTOSOWANIE TECHNIK RAPID PROTOTYPING DO WYTWARZANIA WYROBÓW METALOWYCH

**Streszczenie:** W zakładach przetwórstwa metali wielokrotnie można spotkać się z zapytaniem klientów o możliwości produkcji jednostkowej wyrobów lub produkcji krótkiej serii. Jednym z rozwiązań tego typu problemu może być zastosowanie technik Rapid Prototyping do wytwarzania modeli odlewniczych. Analiza możliwości wykorzystania technik Rapid Prototyping do wykonania modeli odlewniczych w połączeniu z zastosowaniem odlewania precyzyjnego, a w szczególności najstarszej i najbardziej rozpoznawanej metody wytapianych modeli, to zagadnienia, które podejmuje artykuł. Zakres badań dotyczył wykonania odlewów próbnych ze stopu cynku metodą wytapianych modeli z modeli wykonanych techniką Rapid Prototyping oraz ocenę jakości uzyskanego odlewu na podstawie badań chropowatości powierzchni.

**Słowa kluczowe:** odlewanie precyzyjne, Rapid Prototyping, jakość odlewów, chropowatość powierzchni.

### TECHNOLOGIA SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA (RAPID PROTOTYPING)

Metody szybkiego wykonywania prototypów, w tym modeli i rdzennic, określone nazwą Rapid Prototyping rozwinęły się w końcu lat osiemdziesiątych XX wieku głównie w Stanach Zjednoczonych [1]. Szybkie i precyzyjne wytwarzanie jednostkowych wyrobów metodą przyrostową, polega na budowaniu wyrobu warstwa po warstwie z określonego materiału [2].

Modele o bardzo złożonym kształcie zewnętrznym i wewnętrznym mogą być wykonywane w bardzo krótkim czasie, zwykle w ciągu kilku godzin, a największym polem zastosowań tych modeli jest analiza rozwiązań konstrukcyjnych, montażu oraz badania funkcjonalne. Zastosowania te wymagają od prototypowanych modeli dużej dokładności odwzorowania cech geometrycznych, implikujących z kolei właściwości użytkowe prototypowanych części urządzeń.

Z uwagi na uniwersalność budowanych modeli w technice i medycynie najczęściej stosowane są następujące metody Rapid Prototyping: stereolitografia

---

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa.

<sup>2</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych.

(SLA), Solid GroundCuring (SGC), Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) oraz Laminated Object Manufacturing (LOM).

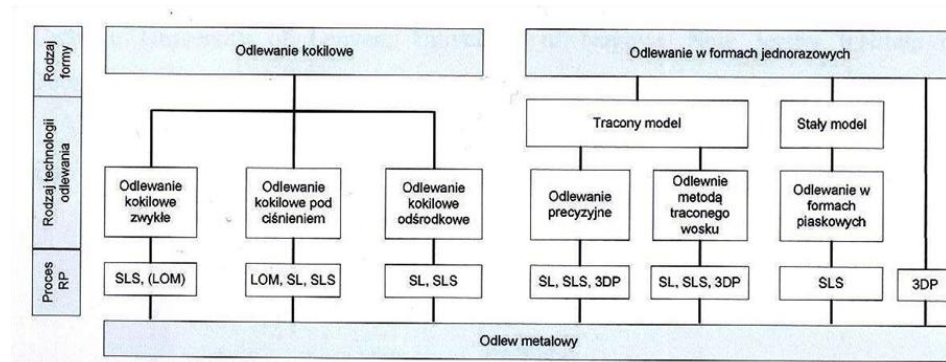
Ponadto zastosowanie znajdują także inne metody jak np. Direct Production Casting (DSPC) czy 3D Printing. Wymienione metody można podzielić na przystosowane do pracy w technice 2D lub 3D, z dodawaniem materiału w sposób punktowy (dyskretny lub ciągły), warstwowy lub powierzchniowy. W tabeli 1 zestawiono zasadnicze zalety i wady technik Rapid Prototyping.

Tabela 1. Główne zalety i wady technik Rapid Prototyping [3]

Table 1. Main advantages and disadvantages of rapid prototyping techniques [3]

ZALETY	WADY
<ul style="list-style-type: none"> <li>- szybkie tworzenie fizycznych wzorców,</li> <li>- stosowane do części o złożonej geometrii (przede wszystkim dla zarysów wewnętrznych),</li> <li>- małe koszty wykonania w porównaniu z innymi metodami (frezowanie, toczenie itd.) przede wszystkim przy małej liczbie sztuk,</li> <li>- możliwość zastosowania różnych metod w obrębie całego łańcucha procesów (Rapid Engineering).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ograniczone wymiary budowanych obiektów,</li> <li>- ograniczona gama materiałów,</li> <li>- części spełniają wymagania mechaniczne tylko w ograniczonym zakresie,</li> <li>- ograniczona dokładność (<math>\pm 0,1</math> mm),</li> <li>- jakość powierzchni uwarunkowana stosowaną techniką wykonania,</li> <li>- często konieczna jest dodatkowa obróbka wyglądająca powierzchnię elementu.</li> </ul>

Techniki Rapid Prototyping są przydatne w tych gałęziach przemysłu, w których istnieje potrzeba tworzenia modeli fizycznych, a więc w: budowie prototypów, wytwarzaniu części i urządzeń, budowie modeli fizycznych, projektowaniu i wytwarzaniu narzędzi oraz projektowaniu i wytwarzaniu wzorców i modeli. Możliwości wykorzystania systemów Rapid Prototyping w odlewnictwie stopów metali przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Możliwości zastosowania systemów Rapid Prototyping w odlewnictwie metali [4]

Fig. 1. Possibility of using Rapid Prototyping systems in metal casting [4]

## ODLEWANIE PRECYZYJNE ZA POMOCĄ METODY WYTAPIANYCH MODELI

Metoda wytapianych modeli jest najstarszą i najbardziej rozpowszechnioną metodą wykonania odlewów precyzyjnych wykorzystywaną do produkcji seryjnej odlewów ze wszystkich tworzyw odlewniczych, a zwłaszcza z materiałów trudnoobrabialnych i stopów żelaza. Wykonanie odlewów według tej metody polega na zastosowaniu modeli oraz form nadających się do jednorazowego użycia. Jednorazowe stosowanie modelu niedzielonego oraz niedzielonej formy odlewniczej to najbardziej charakterystyczne cechy tej metody formowania.

Przebieg procesu technologicznego metodą wytapianych modeli składa się z następujących operacji: wykonanie modelu, tworzenie zestawu modelowego, wytworzenie formy, wytopienie modeli i układu wlewowego, zalewanie formy ciekłym metalem oraz otrzymanie gotowego odlewu.

Na dokładność wymiarową odlewów wykonanych metodą wytapianych modeli wpływa: dokładność wykonania matrycy i jej stan podczas eksploatacji, zmiany wymiarowe matrycy, modeli oraz formy ceramicznej wskutek zmian temperatury, jak też skurcz odlewu. Odchyłki wymiarowe odlewów wykonanych metodą wytapianych modeli odpowiadają 11 i 12 klasie dokładności według ISO. Chropowatość surowej powierzchni odlewu w tej klasie chropowatości odpowiada powierzchni obrobionej skrawaniem - tocznej lub obrabianej wykańczająco, czyli 5 lub 6 klasie dokładności według PN. Średnia wysokość nierówności mieści się w przedziale  $1 \div 10 \mu\text{m}$  [4].

Zastosowanie metody wytapianych modeli pozwala na:

- osiąganie największych dokładności wymiarowych i niskiej chropowatości odlewów spośród wszystkich znanych metod odlewania,
- zastępowanie w bardzo szerokim zakresie drogich odkuwek i kosztownej obróbki skrawaniem znacznie tańszymi odlewami,
- wykonywanie przedmiotów i części, których innymi metodami odlewania, ze względu na złożony kształt, w ogóle nie można otrzymać (np. frezy, wiertła, wirniki turbin itd.)
- wykonywanie przedmiotów i części maszyn o konstrukcji integralnej, które innymi metodami wytwarzania wykonywane są z wielu elementów łączonych w jedną całość.

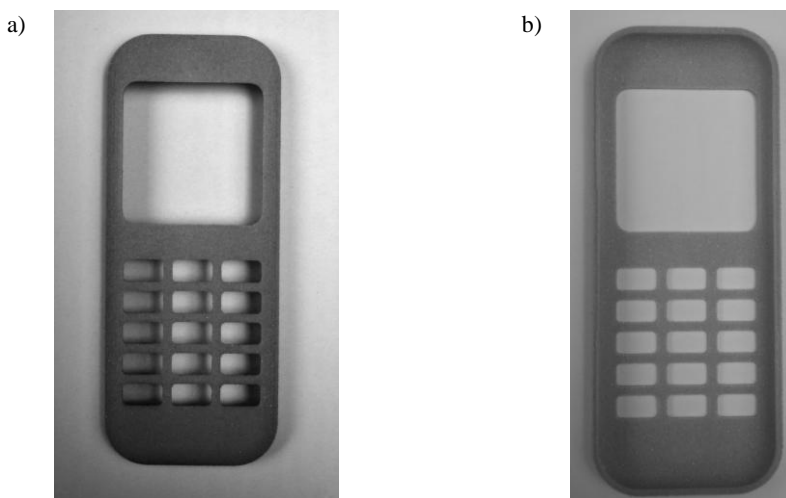
### OPIS BADAŃ

Aby dokonać analizy możliwości zastosowania technik Rapid Prototyping do wytwarzania odlewów metodą wytapianych modeli postanowiono wykonać modele odlewnicze techniką 3DPrinting. Wykonanymi modelami była górna część obudowy do telefonu komórkowego wytworzona przez niemiecką firmę Voxjet w Fiedberg. Przydatność metody Rapid Prototyping do wytworzenia

modeli odlewniczych została określona na podstawie poziomu chropowatości powierzchni modelu i wykonanego odlewu.

### Wykonanie modelu odlewniczego

Modele odlewnicze z polimetakrylanu metylu (rys. 2), wykonane zostały przez firmę FormTech Sp. z o. o techniką 3DPrinting.



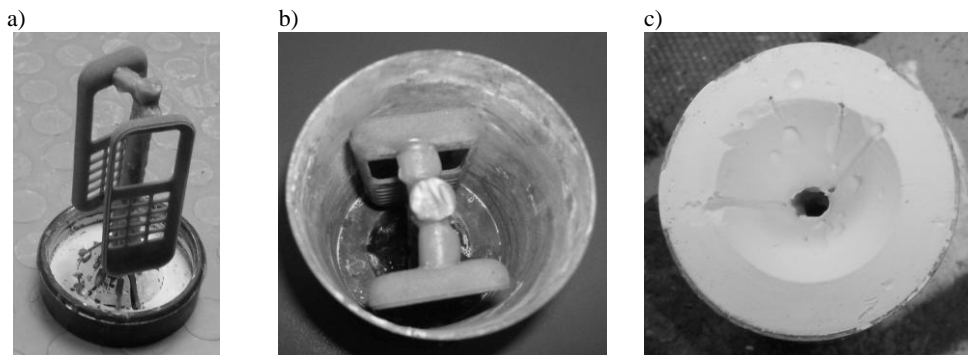
**Rys. 2.** Nieimpregnowany model obudowy do telefonu komórkowego wykonany metodą Rapid Prototyping: a) widok z góry, b) widok z dołu.

**Fig. 2.** Not impregnated model of the mobile phone produced with Rapid Prototyping: a) top view, b) bottom view.

### Wykonanie formy

Ze względu na to, że modele odlewnicze wykonane metodą Rapid Prototyping charakteryzowały się dużą porowatością, a wykonane próby wykazywały dużą chłonność wody przez materiał modeli, nasycono je mieszkanką woskową firmy Kerr. Nasylenie dokonano przez zanurzenie modeli w roztopionym wosku i wygrzaniu ich w suszarce laboratoryjnej w temperaturze  $70 \pm 5^\circ\text{C}$ .

Przygotowanie zestawu modelowego (modele wraz z układem wlewowym) polegało na połączeniu modeli z woskowym modelem wlewu głównego w podstawie z gumy silikonowej, w której odwzorowany został zbiornik wlewowy. Na gotowy zestaw modelowy wraz z podstawką nałożona została tuleja ze stali kwasoodpornej o wymiarach: wysokość – 120mm, średnica – 75mm, którą wypełniono masą gipsową - mieszaniną odlewniczego gipsu formierskiego i wody demineralizowanej (rys. 3).



**Rys. 3.** a) modele połączone z układem wlewowym, b) gotowy zestaw modelowy wraz z tuleją, c) gotowa forma gipsowa.

**Fig. 3.** a) models combined with the infusion system, b) complete model set with a sleeve, c) complete gypsum mould

Proporcje udziałów odlewniczego gipsu formierskiego i wody demineralizowanej wynosiły 40ml na 100g gipsu. Przed wymieszaniem składników woda destylowana została odgazowana w urządzeniu próżniowym, a następnie odgazowano gotową masę ceramiczną.

### Zalewanie formy

Zastosowanie metody wytapianych modeli do wykonania odlewów wymaga usunięcia modeli i modelu układu wlewowego bez rozkładania formy. Wykonaną formę gipsową umieszczono w suszarce laboratoryjnej na okres 2 godzin w temperaturze  $120\pm 2^{\circ}\text{C}$ , a następnie formę umieszczono w piecu komorowym Nabertherm na okres 12 godzin. W tym czasie nastąpił proces zgazowania modeli i wyżarzanie formy. Cykl wyżarzania formy gipsowej przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Cykl wyżarzania formy gipsowej [7]

Table 2. Plaster mould annealing cycle [7]

Czas wyżarzania [h]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
4 godziny	$180^{\circ}\text{C}$ – forma gipsowa wkładana do rozgrzanego pieca
4 godziny	Przyrost temperatury od $180^{\circ}\text{C}$ do $720^{\circ}\text{C}$
3 godziny	$720^{\circ}\text{C}$
1 godzina	Schłodzenie do $550\pm 650^{\circ}\text{C}$ i przetrzymywanie do momentu odlewania

W końcowym etapie wyżarzania formy (okres chłodzenia formy) przygotowano ciekły metal (stop cynku ZnAl4Cu1). Przed wprowadzeniem metalu do formy temperatura stopu wynosiła  $450^{\circ}\text{C}$ . W celu prawidłowego wypełnienia formy wykorzystany został piec indukcyjny z wirówką zapewniającą odlewania pod ciśnieniem odśrodkowym (rys. 4). Rysunek 5 przedstawia wykonane odlewy.



**Rys. 4.** a) piec indukcyjny F. IliGiacetti w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Poznańskiej b) zamocowana tuleja na tygiel pieca indukcyjnego

**Fig. 4.** a) induction furnace F. IliGiacetti in the Department of Foundry, Poznan University of Technology b) attached sleeve on the crucible of the induction furnace



**Rys. 5.** Wykonane odlewy ze stopu cynku ZnAl4Cu1

**Fig. 5.** Casts made of zinc alloy ZnAl4Cu1

## OCENA ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII RAPID PROTOTYPING DO WYTWARZANIA ODLEWÓW METALOWYCH

Analizę metrologiczną wykonanych modeli oraz odlewów przeprowadzono na podstawie pomiarów na optycznym skanerze współrzędnościowym ATOS II firmy GOM oraz na profilometrze Perthometer S8P z głowicą FRW-750 firmy PERTHEN znajdujących się na wyposażeniu Zakładu Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej.

Ocenę odwzorowania wymiarów przeprowadzono na podstawie porównania modelu wykonanego w technologii Rapid Prototyping do odlewu. W tym celu przekształcono powierzchnie modelu oraz odlewu do postaci cyfrowej wykorzystując współrzędnościowy skaner optyczny ATOS II (rys. 6). Staranne skanowanie badanych powierzchni pozwoliło na zebranie chmury punktów reprezentującej mierzony element. Punkty te połączono odcinkami w celu uzyskania siatki trójkątów, co w rezultacie doprowadziło do uzyskania modelu powierzchniowego [5]. Porównano wymiary modelu RP z odlewem. Podczas projektowania modelu RP uwzględniono poprawkę wynikającą z liniowego skurczu odlewniczego stopu cynku, który wynosi 1,2%. Analiza wymiarów odlewu potwierdziła słuszność

zastosowania owego współczynnika korekcji, gdyż otrzymane wymiary odlewu odpowiadały założeniom konstrukcyjnym zawartym w dokumentacji technicznej wyrobu.



**Rys. 6.** Współrzędnościowy skaner optyczny Atos II [6]

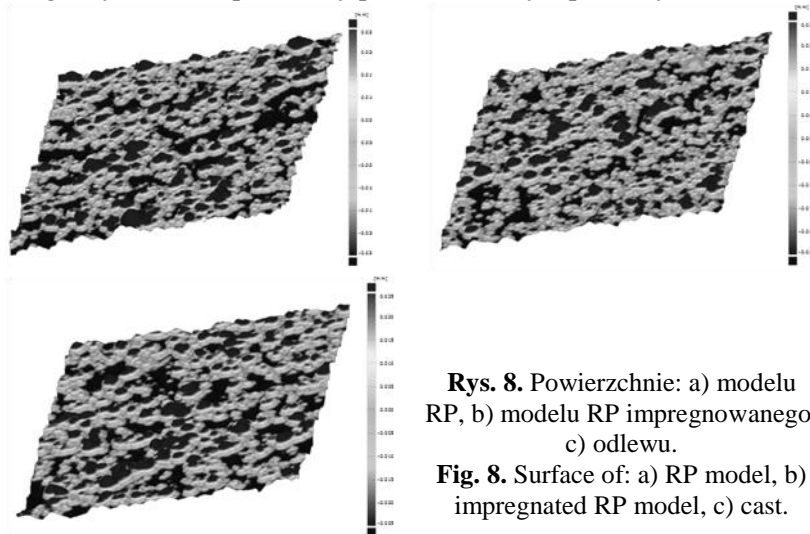
**Fig. 6.** Optical measuring scanner Atos II [6]



**Rys. 7.** Lokalizacja obszaru próbkowania powierzchni

**Fig. 7.** Sampling area on element surface

Porównano ponadto parametry powierzchni modelu RP, zaimpregnowanego modelu RP oraz odlewu. Pomiar powierzchni wykonano na profilometrze Perthometer S8P na obszarze próbkowania o wymiarach 2,4x2,5mm (rys. 7), zgodnie z normą ISO 4288, który odpowiada liczbie punktów w osi X – 247, w osi Y – 251. Promień zaokrąglenia igły wynosił 10 $\mu$ m. Elementem odniesienia, względem którego wyznaczano parametry powierzchni była płaszczyzna średnia.



**Rys. 8.** Powierzchnie: a) modelu RP, b) modelu RP impregnowanego, c) odlewu.

**Fig. 8.** Surface of: a) RP model, b) impregnated RP model, c) cast.

Na rys. 8 przedstawiono zmierzone powierzchnie. Wyznaczono następujące parametry 3D powierzchni [7]:

- Sa – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni
- Sq – średnie kwadratowe odchylenie rzędnych powierzchni
- Sp – wysokość największego wzniesienia powierzchni
- Sv – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni
- St – całkowita wysokość nierówności
- Ssk – współczynnik asymetrii powierzchni

Tabela 3. Wyznaczone parametry zmierzonych powierzchni

Table 3. Estimated parameters of measured surfaces

	model RP	model RP + impregnat	odlew
Sa	20,68 $\mu$ m	17,8 $\mu$ m	19,93 $\mu$ m
Sq	26,13 $\mu$ m	22,48 $\mu$ m	25,1 $\mu$ m
Sp	120,13 $\mu$ m	75,4 $\mu$ m	85,24 $\mu$ m
Sv	94,73 $\mu$ m	82,06 $\mu$ m	105,11 $\mu$ m
St	214,86 $\mu$ m	157,45 $\mu$ m	190,34 $\mu$ m
Ssk	0,02	0,02	-0,18

Wyznaczone charakterystyki badanych powierzchni różnią się nieznacznie. Jednakże model impregnowany ma widocznie zmniejszone nierówności powierzchni poprzez wprowadzenie impregnatu, który wypełnia wgłębienia zmniejszając ich rozmiar, co obrazuje różnica w wartościach parametru St. Natomiast średnie kwadratowe (Sq) oraz średnie arytmetyczne (Sa) odchylenie rzędnych powierzchni przyjmują wartości zbliżone dla wszystkich badanych elementów, asymetria rozkładu rzędnych powierzchni oscyluje wokół zera czyli rozkład rzędnych nie wykazuje asymetrii. Można zatem stwierdzić, że parametry powierzchni modelu RP w stopniu dobrym odwzorowane są na powierzchni odlewu.

## PODSUMOWANIE

Technologia Rapid Prototyping znajduje coraz szersze zastosowanie w przemyśle. Wykorzystanie jej do przygotowania modeli odlewniczych umożliwia uzyskanie zarówno form o prostych jak i bardzo skomplikowanych kształtach. Modele RP stosowane w metodzie wytapianych modeli pozwalają na uzyskiwanie odlewów o dowolnie skomplikowanych kształtach. Analiza parametrów powierzchni modelu RP oraz odlewu wykazała, że technologia ta z powodzeniem może być stosowana.

## PIŚMIENNICTWO

1. Ocoń K. E: Rapid Prototyping w procesach odlewniczych. Cz. I i II. Prace Instytutu Odlewnictwa, Kraków, 1997.



2. Karwiński A., Pysz S.: Techniki szybkiego prototypowania w odlewnictwie. Sprawy Nauki, 2008/8-9 (134).
3. Chlebus E.: Innowacyjne technologie rapidprototyping- rapidtooling w rozwoju produktu. Wrocław, Oficyna Wykładowa politechniki Wrocławskiej, 2003.
4. Szreniawski J.: Techniki wytwarzania. Odlewnictwo. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
5. Oczóś K. E., Cena I.: RAPID INSPECTION – metody pomiarowo-kontrolne adekwatne do rapid-technologii. „Mechanik” 3/2008 pp. 165 – 176.
6. Strona internetowa: [www.gom.com](http://www.gom.com)
7. Oczóś K. E., Liubimov V.: Rozważania nad istotnością parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. „Mechanik” 3/2008 pp. 129 – 136.

## THE USE OF RAPID PROTOTYPING TECHNIQUES TO THE PRODUCTION OF METAL PARTS

### Summary

The metal-processing plant often meet costumers asking about the possibility of one piece production or manufacture of a short series. One of the solution is to apply rapid prototyping techniques to produce cast models. The aim of this paper is to present opportunity of implementation cast models produced with Rapid Prototyping in precision casting. Research concerns the implementation of test castings from zinc alloy melted by models with models made with Rapid Prototyping technique and the quality of the casting obtained on the basis of surface roughness.

**Keywords:** precision casting, Rapid Prototyping, .casting quality, surface roughness.