

AN ATTEMPT TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION IN PRODUCTION OF PLANETARY GEAR COMPONENTS BASED ON THE CASTING TECHNOLOGY AND RAPID PROTOTYPING TECHNIQUE

Summary

The article presents a proposal for reduced energy consumption level when making semi-finished components of the planetary gear by casting technology. First, an analysis was made of the material volume removed from elements machined by boring from a full block as compared with raw castings. Then the casting technology was developed for different elements, for which tooling was made by the rapid prototyping technique. The result of the work was obtaining a series of prototype castings intended for field testing, and launching the production of the analysed components of the planetary gear.

Key words: foundry; casting model; planetary gear; casting technology; energy consumption

PRÓBA OBNIŻENIA ENERGOCHŁONNOŚCI PRODUKCJI PODZESPOŁÓW PRZEKŁADNI PLANETARNEJ W OPARCIU O TECHNOLOGIĘ ODLEWANIA Z WYKORZYSTANIEM METOD SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA

Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję obniżenia energochłonności wykonania półfabrykatów elementów przekładni planetarnej dzięki zastosowaniu technologii odlewniczej. W pierwszej kolejności dokonano analizy ilości skrawanego materiału dla wytwarzanych elementów w technologii wytaczania z pełnej bryły oraz dla surowych odlewów. Następnie opracowana została technologia odlewania poszczególnych elementów, dla której oprzyrządowanie wykonano przy zastosowaniu metod szybkiego prototypowania. Efektem prowadzonych prac było uzyskanie serii odlewów prototypowych, przeznaczonych do testów eksploatacyjnych oraz uruchomienie produkcji analizowanych podzespołów przekładni planetarnej.

Słowa kluczowe: odlewnictwo; model odlewniczy; przekładnia planetarna; technologia odlewnicza; energochłonność

1. Uwagi wstępne

Do wykonywania podzespołów przeniesienia napędu maszyn i pojazdów, wykonywanych z różnych rodzajów stopów metali, najczęściej wykorzystywane są dwie metody. Pierwszą z nich jest obróbka skrawaniem, gdzie kształt półfabrykatu uzyskuje się poprzez wykrawanie go z bryły. Natomiast drugą metodą jest odlewanie elementów, które następnie poddawane są obróbce wykańczającej. Każda z tych metod posiada swoje wady i zalety natomiast wybór bardziej ekonomicznej metody zależy od czynników charakteryzujących dany detal. Przykładem zastosowania metody odlewania jako alternatywy dla wykrawania z bryły mogą być elementy przekładni planetarnej stosowanej w pojazdach mechanicznych przystosowanych do dużych obciążeń [2, 4, 5].

Podstawowy mechanizm planetarny składa się z trzech typów kół zębatach, które są ze sobą stale zazębione. Koło z uzębieniem zewnętrznym, zwane słonecznym znajduje się w centralnej części przekładni. Wokół koła słonecznego rozmieszczone są koła pośrednie, czyli satelity, których osie obrotu są osadzone w jarzmie (koszyku) i zwykle jest ich od dwóch do pięciu. Z drugiej strony satelity zazębiają się z umieszczonym osiowo względem koła słonecznego, zewnętrznym kołem zębatach o uzębieniu wewnętrznym. Mechanizm planetarny staje się przekładnią umożliwiającą przeniesienie momentu obrotowego w chwili, kiedy zostanie zablokowany jeden z omawianych elementów, co

umożliwia ruch pozostałych dwóch dając jednocześnie odpowiednie przełożenie wynikające ze średnicy kół zębatach. Konsekwencją tego jest możliwość uzyskania trzech podstawowych trybów pracy takiej konstrukcji:

- zablokowane koło słoneczne – obraca się zespół satelitów i koło zewnętrzne,
- zablokowane jarzmo satelitów – obraca się koło słoneczne i koło zewnętrzne,
- zablokowane koło zewnętrzne – obraca się koło słoneczne i zespół satelitów.

Zaletą tego typu przekładni jest ich zwarta konstrukcja, która umożliwia uzyskanie dużo większego przełożenia niż zwykła przekładnia zębata o podobnych gabarytach i jednocześnie pozwala na uzyskanie innego przełożenia w każdym trybie pracy.

Spośród wielu zastosowań przekładni planetarnych istnieje możliwość wykorzystania ich jako elementów konstrukcyjnych układu jezdnych pojazdów mechanicznych. Jednym ze stosowanych rozwiązań jest umieszczenie przekładni planetarnej wewnątrz piasty koła, co pozwala wykorzystać mechanizm przekładni do zredukowania wartości momentu obrotowego na wale. Jednocześnie zmniejsza się prędkość obrotowa samego koła, które uzyskuje większy moment obrotowy. Konstrukcje tego typu mechanizmów są bardziej skomplikowane niż modelowy przykład i składają się z wielu współpracujących ze sobą części.

Dla tego typu rozwiązania wybrano trzy elementy składowe mechanizmu, które z powodzeniem można wykonać jako

odlewy. Są to kolejno: korpus przekładni, koło pierścieniowe oraz pokrywa. Do tej pory podzespoły te wytwarzane były poprzez wytaczanie w kolejnych operacjach z pełnego walca. Technologia ta pozwala na otrzymywanie elementów dobrej jakości, bez ukrytych wad materiałowych, jednak mankamentem jest tutaj, w przeliczeniu na jeden element, uzyskiwanie dużej ilości odpadów w postaci wiórów skrawanego materiału oraz znaczne zużycie noży i oprzyrządowania tokarek. Duża ilość skrawanego materiału wynika bezpośrednio z gabarytów wytwarzanych w ten sposób elementów i nie bez znaczenia jest fakt, że w przypadku pierścienia i korpusu należy uzyskać cylindryczny kształt poprzez usunięcie materiału z jego wnętrza.

Stosując alternatywną technologię odlewania, elementy te można wykonać jako półfabrykaty, które po usunięciu stosunkowo niewielkich naddatków technologicznych mogą uzyskać ten sam kształt jak w przypadku wytaczania ich z pełnej bryły [1, 2].

Aby można było porównać ilości skrawanego materiału w obu procesach jako produkt bazowy przyjęto detale na porównywalnym etapie obróbki skrawaniem. Ich kształty odpowiadały zarysowi zewnętrznemu i wewnętrznemu gotowych elementów, ale bez otworów i wykończeń, które wykonywane są w dalszych operacjach (rys. 1). Pozwoliło to na określenie różnicy ilości skrawanego materiału w pierwszej fazie obróbki skrawaniem, której efektem jest uzyskanie kształtu bazowego (tab. 1). Jednocześnie można przyjąć, że do tego etapu należałoby analizować różnice w energochłonności porównywanych technologii. Do obliczeń masy walców, z których można wytoczyć dane detale przyjęto ich minimalne wymiary, gdzie średnice zewnętrzne i wysokości brył były równe średnicy i

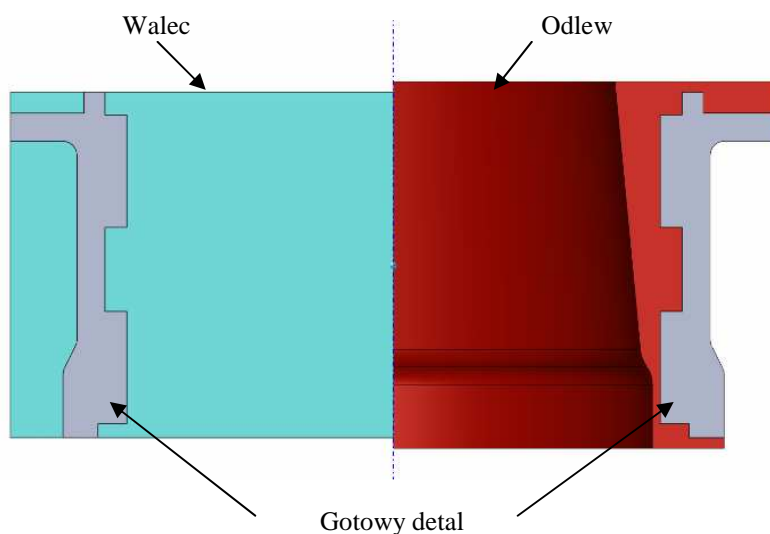
wysokości detalu. Natomiast w przypadku odlewu przyjęto masę surowego odlewu z naddatkami i pochyleniami, bez układów wlewowych i zasilających.

Recykling wiórów powstałych w procesach obróbki skrawaniem jest skomplikowany i energochłonny. Wióry wymagają odolejenia, a następnie brykietowania, aby można je było przetopić.

2. Opracowanie technologii

W przypadku wykonywania odlewów, konieczność ich zasilania wynika ze skurczu metalu podczas przejścia ze stanu ciekłego w stan stały, przy czym dodatkowym utrudnieniem jest powstawanie węzłów cieplnych w odlewach. Stosunek masy samego odlewu do jego masy wraz z układem wlewowym i zasilającym daje uzysk procentowy i określa ile ciekłego stopu należy przygotować, aby otrzymać jeden odlew. Po odcięciu tych układów od odlewu stanowią one dobrej jakości złom obiegowy stosowany w kolejnych wytopach [7-10].

Energochłonność procesów odlewniczych jest dość złożonym problemem ze względu na dużą liczbę czynników, jakie mają na nią wpływ. Do najbardziej energochłonnego procesu należy topienie metali, przy czym należy zwrócić uwagę, że oprócz rodzaju wytapianych stopów, typu i pojemności danego pieca, wpływ na zużycie energii ma również jego stan techniczny. Kolejnym zagadnieniem jest proces przygotowywania form odlewniczych, który może być bardzo zróżnicowany pod względem technologicznym, jak i energetycznym. Praktycznie każda odlewnia posiada inne rozwiązanie linii technologicznych, a sprawność i wydajność poszczególnych urządzeń może się znacznie różnić między sobą.



Rys. 1. Porównanie ilości skrawanego materiału dla technologii obróbki skrawaniem i odlewania (Źródło: opracowanie własne)
Fig. 1. Comparison of material volume removed during machining and casting (Source: own work)

Tab. 1. Zestawienie wagowe materiału w porównywanych technologiach dla jednego kompletu półfabrykatów
Table 1. Balance sheet of material weight in comparable technologies for one set of semi-finished products

	Szacunkowa masa materiału obliczona w kg						Suma odpadów w postaci wiórów
	Koło pierścieniowe		Korpus		Pokrywa		
Wytoczony detal	5,988		11,126		1,507		
	Wyjściowy	Wióry	Wyjściowy	Wióry	Wyjściowy	Wióry	
Walec	28,941	22,953	53,586	42,460	6,464	4,957	70,370
Odlew	10,941	4,953	14,724	3,598	1,724	0,217	8,768

(Źródło: opracowanie własne) (Source: own work)

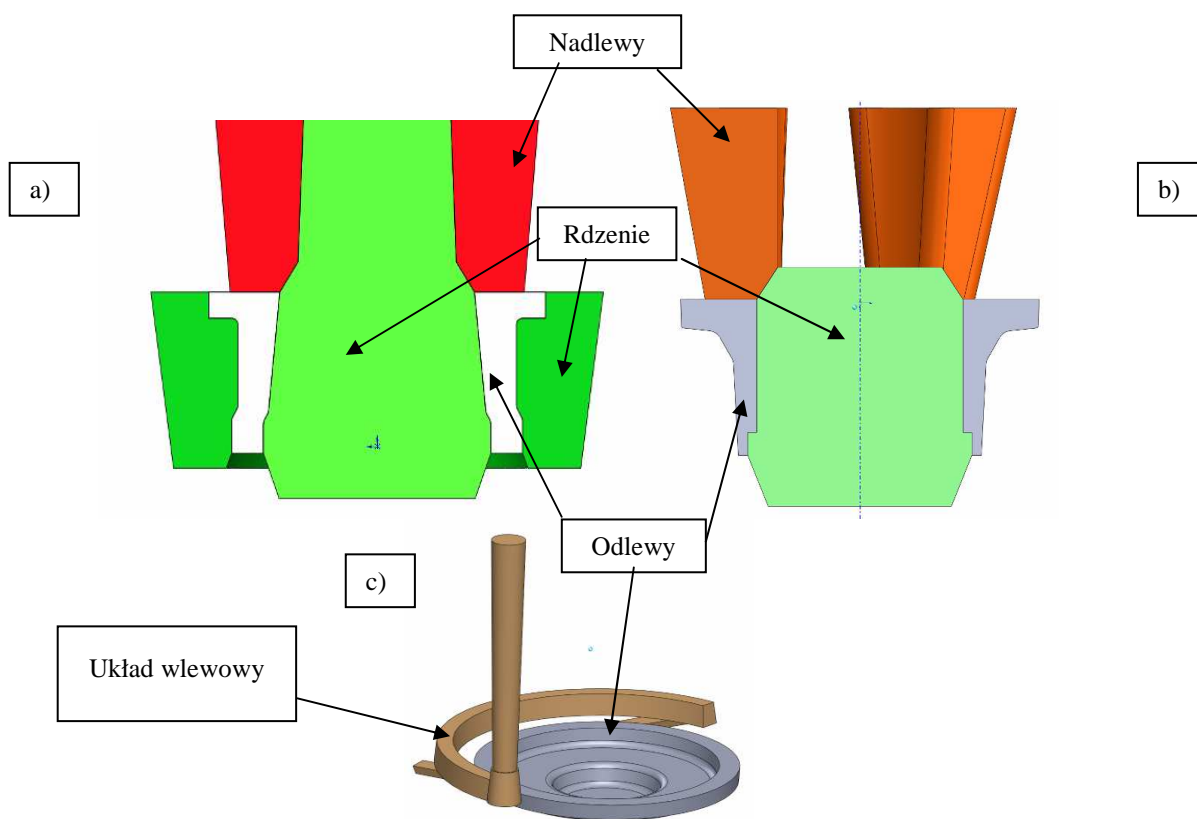
Dodatkowo, czynnikiem wpływającym na rozwiązanie procesu formowania jest wielkość serii odlewów. Trudno więc przyjąć, że energochłonność odlania kilku sztuk będzie taka sama jak w przypadku dużej serii odlewów, co jest uwarunkowane kosztami oprzyrządowania oraz przezbrajania maszyn. W celu określenia energochłonności wytwarzania odlewów ze stopów żelaza, na podstawie statystycznych danych zużycia energii elektrycznej oraz ilości przetopionego metalu i uzyskiwanych odlewów produkowanych w odlewni, podjęto próbę określenia ilości kilowatogodzin przypadających na 1 kilogram uzyskiwanych odlewów. W pierwszym etapie oszacowano zużycie energii elektrycznej potrzebnej do topienia stopów odlewniczych. Dla pieca indukcyjnego Radyne o pojemności 300 kg z generatorem 2000TR3, uśredniono zużycie energii elektrycznej oraz ilości przetopionego metalu z ośmiu kolejnych wytopów przeprowadzonych w ciągu jednego dnia. Z szacunkowych obliczeń wynika, że do samego przetopienia stopów żelaza zużyte zostało około 0,85 kWh na jeden kilogram stopionego metalu. Dane te ze względu na sposób rejestracji pracy pieca oraz metodę obliczeniową obarczone są dużym błędem. Natomiast jak wynika ze statystyk prowadzonych przez odlewnię, której profil produkcyjny jest dość zróżnicowany. Średnie zużycie energii elektrycznej całego zakładu w przeliczeniu na kilogram przetapianych stopów żelaza wynosi około 3 kWh na kilogram odlewu. Jednocześnie w zależności od produkowanego asortymentu w danym okresie rozliczeniowym, dla gotowych odlewów

po odliczeniu ciężaru metalu z układów wlewowych oraz zasilających i odlewów brakowych. Całociowa wartość zużycia energii elektrycznej może osiągnąć poziom 10 kWh na kilogram wyprodukowanego odlewu.

Prace prowadzone w Instytucie Odlewnictwa miały na celu uzyskanie kilku sztuk prototypowych odlewów półfabrykatów elementów przekładni planetarnej przeznaczonych do prób eksploatacyjnych. Do realizacji założonych celów wykorzystane zostały metody szybkiego prototypowania.

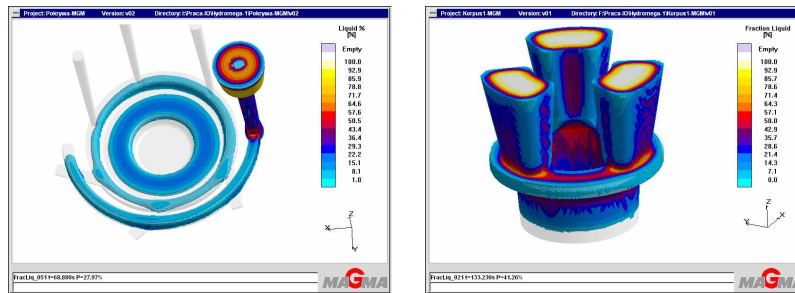
Do wykonania części przekładni wybrano technologię formy piaskowej, którą można podzielić na następujące etapy:

- opracowanie trójwymiarowej technologii odlewniczej (rys. 2) przy zastosowaniu wspomaganie komputerowego (edytory graficzne, symulacje komputerowe w programie MAGMA Soft) (rys. 3),
- opracowanie modeli wirtualnych i dokumentacji oprzyrządowania odlewniczego (rys. 4),
- wykonanie modeli odlewniczych (płyta modelowa lub klasyczny model odlewniczy) (rys. 5),
- wykonanie form na podstawie modeli odlewniczych (rys. 6),
- wytop dobranego stopu odlewniczego,
- zalewanie form,
- studzenie i wybicie form odlewniczych,
- oczyszczanie odlewów, odcięcie układów wlewowych i zasilających.



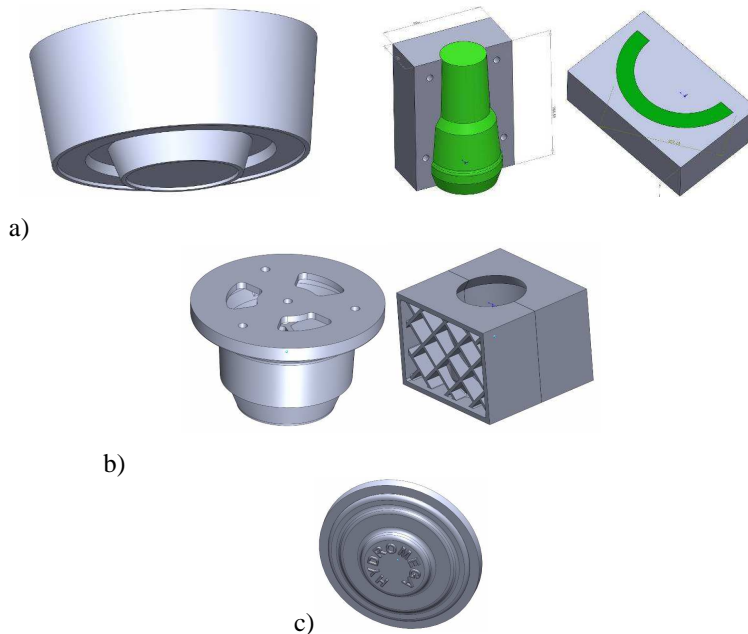
(Źródło: opracowanie własne)
(Source: own work)

Rys. 2. Technologia odlewnicza dla kolejnych elementów przekładni: a) koło pierścieniowe, b) korpus, c) pokrywa
Fig. 2. Casting technology for the successive transmission gear components: a) annular wheel, b) housing, c) cover



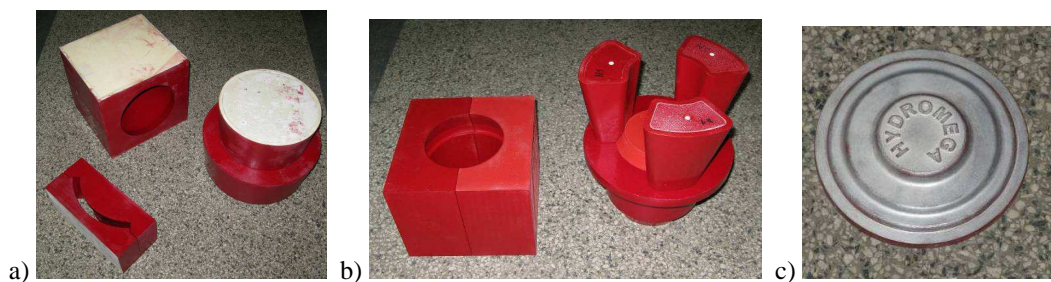
(Źródło: opracowanie własne / Source: own work)

Rys. 3. Przykładowe sekwencje symulacji krzepnięcia odlewów pokrywy i korpusu w programie MAGMA Soft
 Fig. 3. Example of the solidification sequence simulated in MAGMA Soft programme for the cast cover and housing



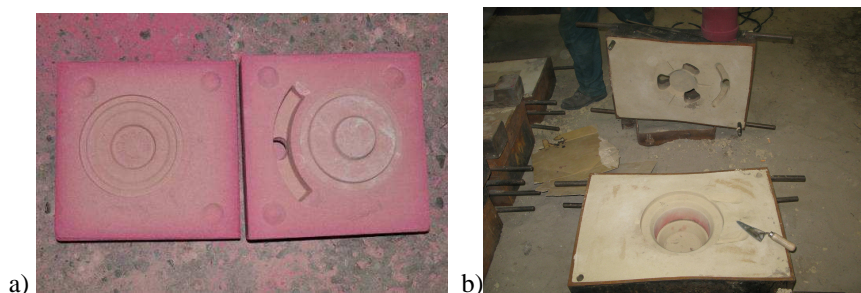
(Źródło: opracowanie własne / Source: own work)

Rys. 4. Zaprojektowane oprzyrządowania odlewnicze dla poszczególnych detali: a) koło pierścieniowe, b) korpus, c) pokrywa
 Fig. 4. Foundry tooling designed for specific details: a) annular ring, b) housing, c) cover



(Źródło: opracowanie własne / Source: own work)

Rys. 5. Modele odlewnicze: a) koło pierścieniowe, b) korpus, c) pokrywa
 Fig. 5. Foundry patterns: a) annular ring, b) housing, c) cover



(Źródło: opracowanie własne / Source: own work)

Rys. 6. Formy odlewnicze: a) pokrywa, b) korpus
 Fig. 6. Casting moulds: a) cover, b) housing

Podstawą do opracowania technologii odlewania danego detalu jest jego kształt, czyli gabaryty i stopień skomplikowania oraz materiał, z którego ma być wykonany. W pierwszej kolejności na podstawie dostarczonej dokumentacji wykonano komputerowe modele 3D poszczególnych detali, uwzględniające niezbędne naddatki technologiczne oraz pochylenia. Ze względu na występowanie zjawiska skurczu liniowego modele zostały powiększone o jego wartość, dla żeliwa przyjęto 1%, a dla staliwa 2%. Następnie dobrano do nich układy wlewowe i zasilające, które gwarantują uzyskanie dobrego odlewu. Wykonano symulację zalewania i krzepnięcia w programie MAGMA Soft. Tak przygotowana dokumentacja posłużyła do opracowania technologii wykonania form odlewniczych, w skład której wchodziły poszczególne modele odlewnicze, rdzennice i modele układu zasilania. Zaprojektowano również łączenie poszczególnych części oprzyrządowania przez zastosowanie kołków centrujących, gwarantujących ich poprawne złożenie [3, 5].

Modele odlewnicze zostały wykonane w technologii 3D Printing, czyli drukowania trójwymiarowego na warstwach proszku. Zastosowanie metod szybkiego prototypowania pozwala na uzyskanie modelu rzeczywistego bezpośrednio z plików 3D opracowanej dokumentacji. Aby zminimalizować ilość materiałów wykorzystywanych przez drukarkę 3D modele były drukowane w postaci skorup, w celu zwiększenia ich wytrzymałości zastosowano wewnętrzną konstrukcję żebrową. Uzyskane w ten sposób modele w pierwszej kolejności były utwardzane poprzez nasączenie żywicą epoksydową. Puste obszary wewnątrz modeli zostały uzupełnione przy zastosowaniu środków wypełniających, jednocześnie umieszczono w nich okucia umożliwiające wyjmowanie modeli z formy. Ostatnią czynnością było pokrycie modeli warstwą farby ochronnej [6].

3. Wykonanie na drodze odlewniczej części przekładni

Jako materiał na rdzenie oraz formy odlewnicze pokrywy zastosowano samoutwardzalną masę formierską na bazie piasku kwarcowego i żywicy furanowej pełniącej rolę spoiwa. W przypadku odlewów korpusów oraz pierścieni jako materiał formy zastosowano klasyczną masę bentonitową, natomiast rdzenie były wykonane z masy na żywicy furanowej.

Formy na pokrywy zostały wykonane w dwóch połówkach, po jednej pokrywie na każdą z nich. W pierwszej kolejności modele układano na płycie podmodelowej, na której kładziono ramkę, a następnie wypełniano ją masą formierską i zagęszczano, wykonując w ten sposób dolną połówkę formy. Następnie obracano całości i po zdjęciu płyty podmodelowej, w taki sam sposób jak poprzednio, wykonano górną połówkę formy. Po wyciągnięciu modeli i docięciu układów wlewowych połówki form zostały złożone przy zastosowaniu kleju formierskiego. Klejenie form miało na celu uniemożliwienie

wypłynięcie ciekłego metalu po podziale formy podczas zalewania. Jako materiał na odlewy dobrano żeliwo szare GJL200.

Wykonanie form na odlewy korpusów oraz pierścieni wymagało zastosowania rdzeni wewnętrznych oraz w przypadku pierścieni zewnętrznych ruchomych części formy, ich kształty zostały odtworzone w rdzennicach z masy z żywicą furanową. Natomiast wnętrza form zostały odtworzone przez modele posiadające odpowiednie znaki rdzeniowe. Formy na korpusy oraz pierścienie zostały wykonane z masy bentonitowej. W górnej części formy znajdowały się nadlewy, których kształt odtwarzany był przez ich modele łączące się z modelem odlewu przy pomocy kołków centrujących. Zastosowanie nadlewów miało na celu wyprowadzenie węzłów cieplnych poza obszar odlewów oraz zasilenie ich ciekłym stopem w czasie krzepnięcia.

W celu złożenia form i przygotowania ich do zalewania, najpierw do dolnej części formy wstawiano rdzenie, a następnie zamykano formę jej górną częścią i odpowiednio obciążono. Jako materiał do wykonania odlewów korpusów wytypowano staliwo GS-25CrMo4 (DIN 17205), natomiast do odlania pierścieni dobrano staliwo L40HM (PN-88/H83160).

Na potrzebę wykonania odlewów elementów przekładni planetarnej zostały przeprowadzone wytopy w piecach indukcyjnych średniej częstotliwości. Kolejno topiono trzy różne tworzywa odlewnicze, które były dobrane do odpowiednich typów odlewów. Poszczególne stopy i dobrane do nich temperatury zalewania odlewów zestawiono w tab. 2.

Po zalaniu i ostygnięciu form, odlewy zostały wybite i oczyszczone, a następnie odcięto od nich układy wlewowe i zasilające. Przykład takiego odlewu pokazano na rys. 7. Odlewy zostały poddane ocenie pod kątem występowania ewentualnych wad odlewniczych jak również przeprowadzono na nich kontrolę wymiarową. Wyniki kontroli wykazały, że odlewy charakteryzują się dobrą jakością powierzchni i nie występują w nich istotne wady, a ich wymiary są zgodne z oczekiwaniami. Tak przygotowane prototypowe odlewy elementów przekładni planetarnej przekazano do dalszej obróbki mechanicznej. Na podstawie uzyskanej serii informacyjnej możliwe było uruchomienie produkcji omawianych odlewów.



(Źródło: opracowanie własne / Source: own work)

Rys. 7. Odlew pokrywy przekładni planetarnej
Fig. 7. Cast of planetary gear cover

Tab. 2. Rodzaje stopów i temperatura zalewania dla poszczególnych odlewów
Table 2. Types of alloys and pouring temperature for different castings

Odlew	Materiał	Norma	Temperatura zalewania °C
Pokrywa	Żeliwo - GJL200	-	1380
Korpus	Staliwo - GS-25CrMo4	(DIN 17205)	1570
Pierścień	Staliwo - L40HM	(PN-88/H83160)	1550

(Źródło: opracowanie własne) (Source: own work)

4. Podsumowanie

Technologia odlewania półfabrykatów elementów przedkładni planetarnej stanowi mocną konkurencję dla technologii wytaczania ich z pełnej bryły materiału. Jak wynika z zestawienia ilości materiału skrawanego w trakcie obróbki mechanicznej (tab. 1), wykorzystanie odlewów pozwala na znaczną redukcję ilości wytwarzanych wiórów podczas obróbki detali oraz skraca czas tych operacji. Różnica skrawanego materiału dla jednego kompletu przekracza 60 kg, wartość ta nabiera znaczenia w przypadku produkcji seryjnej tych elementów gdzie należałoby przeliczać ją w tonach. Oprócz mniejszej ilości odpadów powstałych podczas skrawania materiału istotnie skraca się czas wykonywania poszczególnych operacji.

Energochłonność procesów wytwarzania powinno się również rozpatrywać pod kątem recyklingu stosowanych materiałów. W przypadku odlewów sporą część nadatku materiałowego stanowi złom obiegowy pochodzący z układów wlewowych i zasilających, który łatwo można ponownie wykorzystać w obrębie tego samego zakładu, czego nie można powiedzieć o wiórach powstałych w procesie obróbki skrawaniem.

Zużycie energii elektrycznej potrzebnej do wytwarzania odlewów w dużym stopniu zależy od ich indywidualnych cech oraz wyposażenia danej odlewni. Jej obniżenie możliwe jest dzięki optymalizacji technologii wytwarzania odlewów w taki sposób, aby nadatki technologiczne były sprowadzane do niezbędnego minimum. Jednocześnie istotnym czynnikiem jest typ i stan techniczny urządzeń stosowanych w linii produkcyjnej.

Ostatecznie obniżenie energochłonności znajduje swoje odzwierciedlenie w cenie produktu końcowego, obniżenie

kosztów produkcji przy jednoczesnym zachowaniu dobrej jakości podnosi konkurencyjność firm na rynku. Obecnie nowoczesne odlewnictwo zwraca coraz większą uwagę na problem energochłonności procesów produkcyjnych, a obniżanie zużycia energii pozwoli w przyszłości uzyskać jeszcze lepsze wyniki ekonomiczne.

5. Bibliografia

- [1] Bubicz M.: Raport: Szybkie prototypowanie. Cz. I – przegląd dostępnych rozwiązań. *Maszyny, materiały, zastosowania. / Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie*, 2008, 6(09): 14-21.
- [2] Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S.: *Rapid Prototyping. Principles and Applications*, World Scientific, Singapore, 2004.
- [3] Dybała B.: *Technologie szybkiego prototypowania i wytwarzania*, W: Raport. *Rapid Prototyping & Reverse Engineering*, 2010.
- [4] Sobaś A.: *Od idei do produktu, czyli rapid prototyping*. Warsztat, 2010.
- [5] Gustafson R.: *Rapid Prototyping: a tool for casting design and verification*. *Mod. Casting*, 1999, Vol. 89, nr 3: 44-47.
- [6] Krokosz J., Młodnicki S., Gil A., Karwiński A., Pabiś R., Cwiklak R.: *Ocena możliwości wykorzystania technik szybkiego prototypowania w odlewnictwie oraz opracowanie założeń i wykonanie serii modeli i odlewów artystycznych*. *Odlewnictwo współczesne – Polska i świat*, 2010, nr 1: 3-13.
- [7] Ruszaj A.: *Niekonwencjonalne metody wytwarzania elementów maszyn i narzędzi*. Kraków: Wydawca IOS w Krakowie, 1999: 288, 299.
- [8] Oczó K.E.: *Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów*. *Mechanik*, 2008, nr 4, s. 256.
- [9] Oczó K.E.: *Zastosowanie techniki Rapid Tooling do kontroli jakości wytwarzanych części samochodowych*. *Mechanik*, 2008, nr 12: 1022-1028.
- [10] Oczó K.E.: *Rozwój kształtowania przyrostowego wyrobów*. *Mechanik*, 2007, nr 2: 65.