



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

PRACA DOKTORSKA

**HYBRYDOWE MATERIAŁY
KOMPOZYTOWE STOSOWANE
NA ELEMENTY MASZYN W BRANŻY
AUTOMOTIVE**

mgr inż. Magdalena Zajdel

Promotor:

prof. dr hab. inż. Mariusz Oleksy

Promotor pomocniczy:

dr inż. Bartłomiej Sobolewski

Rzeszów 2023

*Serdecznie dziękuję Promotorowi Prof. dr hab. inż. Mariuszowi Oleksemu za opiekę naukową,
poświęcony czas oraz całą przekazaną wiedzę podczas naszej wieloletniej współpracy*

*Dziękuję również Promotorowi Pomocniczemu Dr inż. Bartłomiejowi Sobolewskiemu za wszelką
pomoc, zaangażowanie oraz wszystkie cenne wskazówki*

SPIS TREŚCI

| | |
|---|----|
| CEL I ZAKRES PRACY | 9 |
| WYKAZ SKRÓTÓW STOSOWANYCH W PRACY | 13 |
| WPROWADZENIE | 17 |
| I. WSTĘP TEORETYCZNY | 21 |
| I.1. Charakterystyka wybranych materiałów polimerowych stosowanych do otrzymywania elementów maszyn | 21 |
| I.1.1. Właściwości mechaniczne, reologiczne i użytkowe wybranych tworzyw polimerowych, z których są otrzymywane elementy maszyn | 22 |
| I.1.2. Polioksymetylen (POM) | 25 |
| I.1.3. Badania kół zębatach otrzymywanych z polioksymetylenu (POM) | 26 |
| I.1.4. Poliamid (PA) | 29 |
| I.1.5. Poliamid 6 (PA 6) | 30 |
| I.1.6. Poliamid 6.6 (PA 6.6) | 31 |
| I.1.7. Poliamid 4.6 (PA 4.6) | 33 |
| I.1.8. Badania kół zębatach otrzymywanych z poliamidów | 34 |
| I.1.9. Poliftalamid (PPA) | 36 |
| I.1.10. Polieteroeteroketon PEEK | 38 |
| I.1.11. Badania kół zębatach otrzymywanych z polieteroeteroketonu (PEEK) | 39 |
| I.1.12. Wnioski z analizy literatury dotyczącej badań polimerowych kół zębatach | 42 |
| I.2. Metody modyfikacji właściwości mechanicznych wytypowanych tworzyw termoplastycznych stosowanych do otrzymywania kół zębatach | 43 |
| I.2.1. Napelniacze włókniste | 44 |
| I.2.2. Włókno szklane | 45 |
| I.2.3. Włókno węglowe | 46 |
| I.2.4. Badania kół zębatach wykonanych z polimerów modyfikowanych przy pomocy włókien | 47 |
| I.2.5. Środki smarne | 51 |
| I.2.6. Badania kół zębatach w układach z dodatkowym środkiem smarnym | 53 |
| I.2.7. Nanonapelniacze | 56 |
| I.3. Charakterystyka technologii formowania wtryskowego jako główna metoda otrzymywania polimerowych kół zębatach | 61 |
| I.3.1. Czynniki wpływające na parametry wytrzymałościowe oraz użytkowe elementów maszyn wykonanych z materiałów polimerowych | 63 |
| I.3.1.1. Czynniki procesowe | 63 |

| | | |
|----------|---|-----|
| I.3.2 | Czynniki wpływające na wady konstrukcyjne i deformacje kół zębatach otrzymywanych z materiałów polimerowych | 66 |
| I.3.2.1. | Stabilność wymiarowa wyrobu po procesie wtryskiwania | 66 |
| I.3.2.2. | Deformacje wyprasek po procesie wtryskiwania elementów maszyn..... | 68 |
| I.3.3. | Metody otrzymywania polimerowych kół zębatach za pomocą technologii ubytkowych i addytywnych..... | 68 |
| I.4. | Polimerowe przekładnie zębata | 70 |
| I.4.1. | Polimerowe i metalowe walcowe koła zębata | 71 |
| I.4.2 | Trybologiczne uwarunkowania przekładni zębatach..... | 76 |
| I.4.3 | Charakterystyka polimerowych i metalowych przekładni zębatach..... | 79 |
| I.4.4 | Przykłady zastosowań tworzyw sztucznych i kompozytów polimerowych w elementach maszyn z branży motoryzacyjnej | 82 |
| I.5. | Podsumowanie | 85 |
| II. | METODYKA BADAWCZA..... | 87 |
| II.1. | Materiały zastosowane do badań | 87 |
| II.2. | Aparatura i sprzęt laboratoryjny | 88 |
| II.3. | Otrzymywanie kształtek do badań właściwości mechanicznych..... | 89 |
| II.4. | Oznaczenie cech wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania . | 93 |
| II.5. | Oznaczenie udarności wg Charpy'ego z karbem..... | 93 |
| II.6. | Oznaczenie twardości wg Shore D | 93 |
| II.7. | Analiza mikrostruktury wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) | 93 |
| II.8. | Projekt geometrii dwóch kół zębatach..... | 94 |
| II.9. | Symulacja numeryczna procesu wtrysku kół zębatach..... | 96 |
| II.10. | Projekt formy wtryskowej kół zębatach z wymiennym gniazdem formującym | 97 |
| II.11. | Wtrysk kół zębatach..... | 98 |
| II.12. | Pomiar geometrii formy wtryskowej oraz kół zębatach za pomocą skanera optycznego..... | 101 |
| II.13. | Pomiar dokładności geometrycznej wykonany za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40 | 102 |
| II.14. | Stanowisko do badań wytrzymałości trwałościowej kół zębatach | 102 |
| II.15. | Otrzymywanie nowych kompozycji przy pomocy wylączarki ślimakowej ... | 106 |
| III. | ANALIZA I OMÓWIENIE WYNIKÓW PRACY | 109 |
| III.1. | Analiza oznaczenia udarności wg Charpy'ego z karbem | 109 |
| III.2. | Analiza badań cech wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania | 110 |
| III.3. | Analiza oznaczenia twardości wg Shore'a D..... | 113 |

| | | |
|-----------------------------|---|-----|
| III.4. | Analiza mikrostruktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) | 115 |
| III.5. | Import modelu oraz poprawa siatki MES | 118 |
| III.1.6 | . Przeprowadzenie analiz wypełniania gniazd formujących koła zębate..... | 120 |
| III.7. | Analiza modelu formy wtryskowej kół zębatach | 127 |
| III.7.1. | Gniazdo formujące | 128 |
| III.7.2. | Układ wlewowy | 130 |
| III.7.3. | Układ chłodzenia | 131 |
| III.7.4. | Układ wypychaczy | 132 |
| III.8. | Analiza procesu wtrysku kół zębatach z wykorzystaniem opracowanej formy wtryskowej..... | 138 |
| III.9. | Analiza geometrii wkładek formujących oraz wyprasek KZ25 i KZ17..... | 141 |
| III.10. | Analiza dokładności geometrycznej wykonanej za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40 | 153 |
| III.11. | Analiza badań trwałościowych przekładni zębatach..... | 164 |
| III.11.1. | Określenie warunków brzegowych dla przekładni zębatach wykonanych z niemodyfikowanych materiałów PA6 i PA66 oraz badania wytrzymałości trwałościowej dla pozostałych wytypowanych tworzyw | 165 |
| III.11.2. | Określenie wpływu wstępnego docierania korygującego na wytrzymałość trwałościową przekładni | 186 |
| III.11.3. | Testy trwałościowe przekładni z zastosowaniem hybrydowych kompozycji polimerowych | 189 |
| III.12. | Analiza geometrii zębów KZ25 i KZ17 po testach trwałościowych..... | 197 |
| PODSUMOWANIE I WNIOSKI..... | | 203 |
| LITERATURA | | 211 |
| STRESZCZENIE | | 229 |
| ABSTRACT | | 231 |

CEL I ZAKRES PRACY

W ostatnich latach materiały polimerowe znajdują coraz większe zastosowania w licznych gałęziach przemysłu, w tym branży motoryzacyjnej. Ciągły rozwój inżynierii materiałowej i mechanicznej daje możliwości opracowania oraz seryjnej produkcji nowych materiałów kompozytowych, które ściśle odpowiadają na wyspecyfikowane kryteria dotyczące właściwości mechanicznych, bezpieczeństwa użytkowania i kosztów produkcji danego wyrobu. Znaczący wzrost globalnej mobilności ludzi, przekłada się na rygorystyczną kontrolę jakości i diagnostyki wprowadzanych na rynek kompozytowych elementów maszyn. W szczególności dotyczy to wyrobów, które są poddawane dużym obciążeniom oraz szerokim zakresom temperatur pracy.

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było opracowanie i zbadanie kompozytów na podstawie termoplastycznych tworzyw konstrukcyjnych przeznaczonych do otrzymywania kół zębatach formowanych wtryskowo, wykorzystywanych w branży automotive. Szczególnie skupiono się na badaniach doświadczalnych, mających na celu zwiększenie sprawności zaprojektowanej przekładni oraz obniżeniu zużycia kół zębatach wytwarzanych z tworzyw sztucznych o zmodyfikowanym składzie materiałowym.

W ramach zakresu pracy, w pierwszej części sporządzono przegląd literatury naukowo – branżowej. Skupiono się na omówieniu teoretycznych zagadnień oraz podsumowano dotychczasowe wyniki badań przekładni z polimerowych kół zębatach. Przytoczono także innowacyjne przykłady zastosowania elementów kompozytowych w samochodach, które stały się zamiennikami swoich metalowych pierwowzorów. Należy tutaj zwrócić uwagę, jak niewiele jest prac poświęconych zasadom postępowania przy konstrukcji elementów motoryzacyjnych z użyciem materiałów polimerowych, ich kompozytów i nanokompozytów. W rezultacie czego brakuje kryteriów wyboru techniki kształtowania wyrobów z polimerów.

Na podstawie uzyskanej wiedzy, wyselekcjonowano grupy materiałów, które po odpowiednio przeprowadzonej modyfikacji charakteryzowały się dobrymi właściwościami fizykochemicznymi i użytkowymi. Jako osnowę polimerową zastosowano wybrane tworzywa konstrukcyjne spośród grupy poliamidów: poliamid 6 (PA 6), poliamid 6.6 (PA 6.6), poliamid 4.6 (PA 4.6) i poliftalamid (PPA). Do badań wykorzystano także obecne na rynku tworzywa kompozytowe zawierające w swojej strukturze dodatki takie jak włókno szklane (GF) czy politetrafluoroetylen (PTFE). Poprzez użycie technologii wytłaczania mieszającego, wytypowane materiały zmodyfikowano pod kątem właściwości mechanicznych,

z wykorzystaniem wytypowanych napelnaczy (wieloscienne nanorurki węgłowe - CNT) oraz dodatków pomocniczych (środki smarne, kompatybilizator).

W następnej części pracy, przeprowadzono optymalizację składu jakościowego i ilościowego badanych termoplastycznych kompozytów, poprzez określenie ich fizykochemicznych i mechanicznych właściwości. Wynikiem tych badań było wytypowanie ostatecznych kompozytów. Opracowano model pary kół walcowych o zębach prostych oraz konstrukcję przekładni badawczej. Został omówiony proces projektowania formy wtryskowej do otrzymywania kół zębatych, przy zastosowaniu systemów Simens NX 12. W pracy doktorskiej przedstawiono także symulacje komputerowe, prognozujące przebieg wypełnienia materiałem gniazd formy wtryskowej w programie Autodesk Moldflow Insight. W tej części, rozpatrzono szereg symulacji komputerowych, w celu sprawdzenia skuteczności wypełniania gniazd formujących oraz analizy procesu wtryskiwania. Miało to na celu uniknięcie błędów technologicznych detali w rzeczywistych warunkach wtrysku. Powyższe badania poprzedzały wykonanie formy wtryskowej z dwoma wymiennymi gniazdami formującymi przez narzędziownię firmy Splast.

Ostatnia część pracy została poświęcona technologii wtryskiwania polimerowych kół zębatych oraz przeprowadzeniu ich testów trwałościowych na specjalnie skonstruowanym stanowisku badawczym, znajdującym się w Katedrze Konstrukcji Maszyn. Przed ostatecznym wtryskiem polimerowych kół, wykonano eksperymentalne serie tych detali, skupiające się na optymalizacji gniazd formujących oraz sprawdzające poprawność wykonania układów wlewowych. Ostateczne koła zębate użyte do dalszych badań trwałościowych, zostały wyprodukowane przy ściśle określonych parametrach wtrysku. Przeprowadzono kontrolę dokładności wymiarowej wyrobów, za pomocą urządzeń metrologicznych, takich jak współrzędnościowa maszyna pomiarowa i skaner optyczny.

Zrealizowano badania trwałości wytrzymałościowej przekładni z przygotowanych kół zębatych. Program cykli badawczych został opracowany eksperymentalnie. Skupiono się na przetestowaniu wytrzymałości układu przekładni dla różnych kombinacji prędkości oraz zmiennych momentów obrotowych. Zbadano wpływ skurczu wyprasek, poprzez różne ułożenie kół zębatych w badanej przekładni. Przeprowadzono także testy określające wpływ dodatkowego, wstępnego etapu docierania, na pracę i żywotność układu badawczego. Określono warunki brzegowe dla kół zębatych wykonanych materiałów niemodyfikowanych. W trakcie testów rejestrowano prędkość, moment obrotowy, zmianę temperatury oraz wytwarzane ciśnienie akustyczne. Po testach kontrolowano wizualnie powierzchnię boczną kół zębatych, a także wykonano drugą serię pomiarów współrzędnościowych.

Na podstawie wyników badań wytypowano dwa materiały które poddano modyfikacjom materiałowym. W końcowych testach trwałościowych stwierdzono obniżenie temperatury w miejscu styku oraz brak uszkodzeń zębów. Oznacza to, że dla założonych warunków badań spełniły one kryteria pod kątem wytrzymałościowym i trwałościowym. W celu uniknięcia przypadkowości otrzymanych wyników, powtórzono testy dla trzech par kół zębatych. Należy nadmienić, że weryfikacja uzyskanych wyników badań, była ważnym etapem projektu, ponieważ wytypowany kompozyt oraz nabyta podczas badań wiedza, zostaną wykorzystane w przyszłych małoseryjnych produkcjach elementów maszyn automotive.

Uzyskane informacje pozwolą na uzupełnienie bazy danych właściwości użytkowych kompozytów polimerowych stosowanych w elementach maszyn oraz rozszerzą możliwość ich zastosowania w technologii formowania wtryskowego.

WYKAZ SKRÓTÓW STOSOWANYCH W PRACY

| | |
|---|--|
| 42CrMo4 | stal stopowa do hartowania i obróbki cieplnej |
| A | kąt zarysu |
| AISI 8620 | stal niskostopowa niklowo-chromowo-molibdenowa |
| AM | (ang. <i>Additive Manufacturing</i>) produkcja addytywna |
| AMI | Autodesk Moldflow Insight |
| a_w | odległość osi w przekładni |
| c | luz wierzchołkowy |
| c^* | współczynnik luzu wierzchołkowego |
| C45 | stal węglowa niestopowa |
| CAD | (ang. <i>Computer Aided Design</i>) komputerowe wspomaganie pracy |
| CAE | (ang. <i>Computer Aided Engineering</i>) inżynieria wspomagana komputerowo |
| CAGR | (ang. <i>Compound Annual Growth Rate</i>) średnia roczna stopa wzrostu |
| CF | (ang. <i>Carbon Fiber</i>) włókno węglowe |
| CNC | (ang. <i>Computerized Numerical Control</i>) komputerowe sterowanie urządzeniami numerycznymi |
| CNF | (ang. <i>Carbon nanotubes</i>) nanowłókna węglowe |
| CNM | (ang. <i>Carbon nanomaterials</i>) nanonapełniacze węglowe |
| CNT | (ang. <i>carbon nanotubes</i>) nanorurki węglowe |
| CO ₂ | dwutlenek węgla |
| d | średnica podziałowa koła zębatego |
| d_a | średnica wierzchołkowa koła zębatego |
| d_f | średnica podstaw w kole zębatym |
| DSC | (ang. <i>Differential Scanning Calorimetry</i>) skaningowa kalorymetria różnicowa |
| e | szerokość wrębu w kole zębatym |
| EBM | (ang. <i>Electron Beam Melting</i>) druk 3D z zastosowaniem wiązki elektronów |
| EHL | (ang. <i>Elastohydrodynamic lubrication</i>) smarowanie elastohydrodynamiczne |
| EPS | (ang. <i>electric power steering</i>) elektryczny układ wspomagania kierownicy |
| F | obciążenie normalne, działające na granicy styku |
| F_α | odchyłka całkowita zarysu zęba |
| FDM | (ang. <i>Fused Deposition Modeling</i>) modelowanie stopionym materiałem |
| Fe ₂ (SO ₄) ₃ | siarczan żelaza (III) |
| $f_{f\alpha}$ | odchyłka kształtu zarysu zęba |

| | |
|-------------------|---|
| C_α | beczkowanie zarysu zęba |
| $f_{H\alpha}$ | odchyłka położenia zarysu zęba |
| $f_{K\alpha}$ | modyfikacja wierzchołka zęba |
| F_β | odchyłka całkowita linii zęba |
| $f_{f\beta}$ | odchyłka kształtu linii zęba |
| $f_{H\beta}$ | odchyłka położenia linii zęba |
| C_β | beczkowanie linii zęba |
| f_p | pojedyncze odchyłki podziałki |
| F_p | sumaryczne odchyłki podziałki |
| f_{pmax} | maksymalne jednostkowe odchylenie podziałki |
| f_{umax} | największy skok podziałki |
| R_p | wahania podziałki |
| F_r | odchyłki kinematyczne koła (od ruchu obrotowego) |
| $F_{pz/8}$ | odchyłka rozpiętości podziałki dla 8 sąsiednich pomiarów |
| R_s | odchyłki grubości zęba |
| FeS | siarczek żelaza (II) |
| FeSO ₄ | siarczan żelaza (II) |
| GF | (ang. <i>Fiber Glass</i>) włókno szklane |
| GO | (ang. <i>Grafen Oxygen</i>) tlenek grafenu |
| h | całkowita wysokość zęba |
| h_a | wysokość głowy zęba |
| h_f | wysokość stopy zęba |
| j_n | luz międzyzębny, luz normalny |
| j_t | luz obwodowy |
| L | obwód koła podziałowego |
| m | moduł zęba |
| MES | Metoda Elementów Skończonych |
| MoO ₃ | tlenek molibdenu (IV) |
| MoS ₂ | dwusiarczek molibdenu |
| MWCNT | (ang. <i>Multiwalled carbon nanotube</i>) wielościenne nanorurki węglowe |
| n | prędkość obrotowa w przekładni |
| N | moc przekładni |
| ND | (ang. <i>Nanodiamonds</i>) nanodiament |

| | |
|-----------------|---|
| NDA | (<i>ang. Non Disclosure Agreemen</i>) umowa o zachowaniu poufności |
| NVH | (<i>ang. noise, vibration and harshness</i>) analiza określająca poziom hałasu, drgań i szumu |
| p | podziałka koła zębatego |
| PA | poliamid |
| PA 4.6 | poliamid 4.6 |
| PA 6 | poliamid 6 |
| PA 6.6 | poliamid 6.6 |
| PAN | poliakrylonitryl |
| PBT | (<i>ang. Powder Bed Fusion</i>) spiekanie w złożu proszkowym |
| PE | polietylen |
| PEEK | polieteroeteroketon |
| POM | polioksymetylen, acetal |
| POM-C | kopolimer polioksmetylenu, kopolimer acetalu |
| POM-H | homopolimer polioksmetylenu, homopolimer acetalu |
| PP | polipropylen |
| PPA | poliftalamid |
| PTFE | politetrafluoroetylen, teflon |
| Ra | chropowatość |
| RH | (<i>ang. Relative Humidity</i>) dopuszczalna względna wilgotność otoczenia |
| RP | (<i>ang. Rapid Prototyping</i>) szybkie prototypowanie |
| s | grubość zęba |
| s* | współczynnik grubości zęba |
| S45C | stal węglowa |
| SEM | (<i>ang. Scanning Electron Microscopy</i>) skaningowa mikroskopia elektronowa |
| SLA | (<i>ang. Stereolitography</i>) stereolitografia |
| SLS | (<i>ang. Selective Laser Sintering</i>) selektywne spiekanie laserowe |
| SS316 | stal nierdzewna o działaniu hiperalergicznym |
| SWCNT | (<i>ang. Single walled carbon nanotube</i>) jednościenna nanorurka węglowa |
| T | moment obrotowy w przekładni |
| t _{ch} | czas chłodzenia |
| TDS | (<i>Technical Data Sheet</i>), karta danych technicznych |
| t _d | czas docisku |

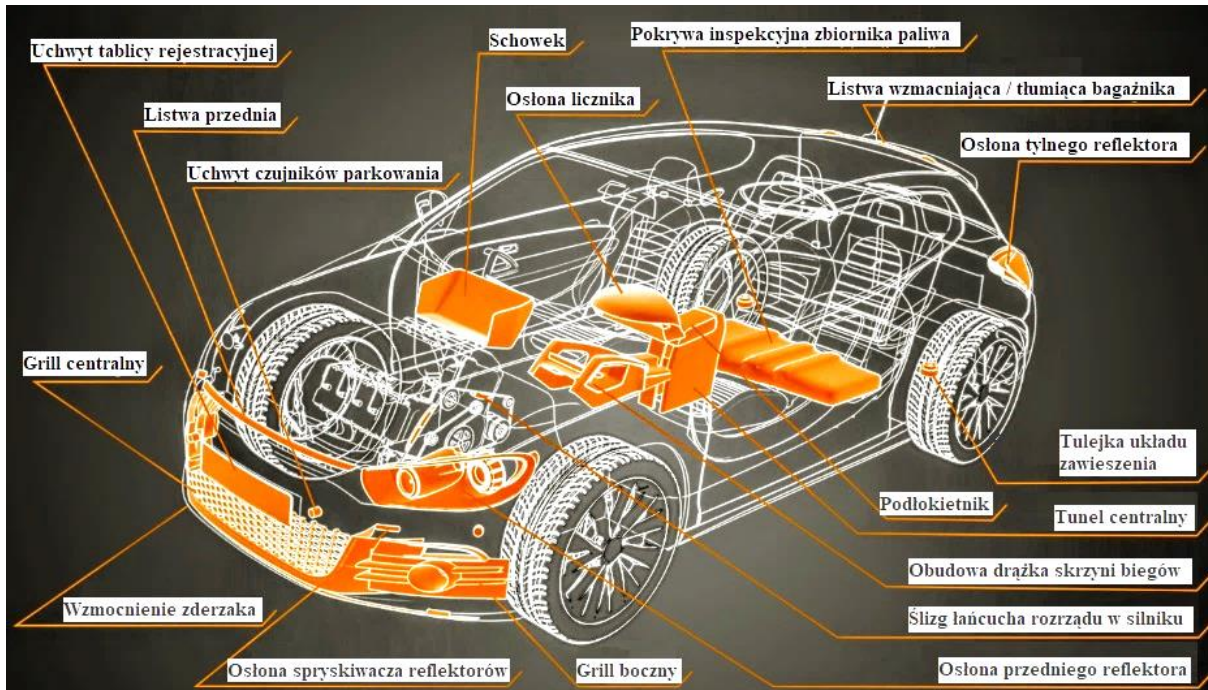
| | |
|----------|---|
| T_g | temperatura zeszklenia |
| T_m | temperatura mięknięcia |
| t_p | czas przerwy |
| t_{pl} | czas plastyfikacji |
| T_t | temperatura topnienia |
| t_w | czas wtrysku |
| u | przełożenie geometryczne przekładni |
| UL-94 | standard palności określający właściwości palne i bezpieczeństwo pożarowe tworzyw sztucznych |
| USD | (ang. <i>United States dollar</i>) dolar amerykański |
| UV | promieniowanie ultrafioletowe |
| V0 | najwyższa klasa palności wg standardu UL-94, określa tworzywa sztuczne o właściwościach trudnoplanych lub samogasnących |
| y | współczynnik wysokości zęba |
| z | liczba zębów |
| η | sprawność mechaniczna przekładni |
| τ | podziałka kąтова koła zębatego |
| ω | prędkość obwodowa |

WPROWADZENIE

Przemysł motoryzacyjny jest jednym z najważniejszych obszarów w międzynarodowym systemie gospodarczym. Jego intensywny rozwój wymusza wdrażanie nowych oraz modyfikację istniejących technologii. Obecnie poszukuje się rozwiązań, które mogą pozwolić na stworzenie innowacyjnych produktów spełniających coraz bardziej wyspecyfikowane wymagania klienta. Globalny raport badawczy Thermoplastic Composites Market 2022 informuje, że w roku 2021 rynek kompozytów osiągnął wartość 16,1 mld USD. Oczekuje się, że do 2027 roku, przy średniej rocznej stopie wzrostu CARG 5,3 % wielkość ta wzrośnie do 19,4 mld USD [47]. Mimo dużego zapotrzebowania materiałów polimerowych i kompozytowych, należy jednocześnie brać pod uwagę rozwiązania skupiające się nad zmniejszeniem kosztów produkcji danego urządzenia, a także troszczące się o środowisko naturalne, w trakcie jego eksploatacji i późniejszej utylizacji.

Rosnące zapotrzebowanie na produkcję lekkich i mniej emisyjnych pojazdów napędza popyt na termoplastyczne kompozyty w przemyśle motoryzacyjnym. W wyposażeniu samochodów szeroko stosuje się wyroby z tworzyw sztucznych będących elementami nadwozia, podwozia oraz składowymi podzespołów silnika. Ma to znaczenie szczególnie w przypadku pojazdów elektrycznych, ponieważ przekłada się bezpośrednio na zapewnienie dużego zasięgu pomiędzy ładowaniem baterii [50, 136]. Ponadto surowe międzynarodowe i unijne przepisy, dotyczące redukcji emisji dwutlenku węgla (CO₂) przez samochody, zmusiły branżowych producentów do stosowania kompozytów termoplastycznych w zastosowaniach transportowych [47]. Na rynku automotive znane są przykłady spadku masy poszczególnych elementów wyposażenia samochodu o 70 %. Przykład ten przekłada się na zmniejszenie zużycia paliwa do 9 % [147]. Stosowanie kompozytów polimerowych staje się szczególnie opłacalne dla produkowanych masowo elementów. W tym przypadku wysokie koszty związane z zaprojektowaniem, analizą symulacji procesu wtrysku i wykonaniem narzędzi przetwórczych tj. formy wtryskowej oraz peryferyjnych urządzeń, tworzących linię produkcyjną, rozkładają się na milionowe nakłady wtryskiwanych detali [113, 114]. Zarówno producenci branży przetwórstwa tworzyw sztucznych i motoryzacyjnej muszą być elastyczni w dopasowywaniu się do szybko zmieniających się rozwiązań konsumenckich. Producent granulatów z tworzyw sztucznych Sabc Innovative Plastics, który jest globalnym liderem w dziedzinie zaawansowanych pojazdów i układów napędowych, obecnie zajmuje się opracowywaniem termoplastycznych komponentów, które mogą zastąpić metal w układach napędowych samochodów elektrycznych [152]. Doskonały przykład zastosowania detali technicznych

z tworzyw konstrukcyjnych w wyposażeniu samochodu osobowego, prezentuje firma Splast, której 40 % całkowitej produkcji jest kierowana dla klientów z branży motoryzacyjnej. Na rys. 1 przedstawiono niektóre z produkowanych elementów wyposażenia samochodu osobowego otrzymywanych w firmie Splast [198].



Rys. 1. Przykłady zastosowania materiałów polimerowych i kompozytowych w branży automotive, na podstawie wyrobów produkowanych w firmie Splast [198]

Koła zębate odgrywają jedną z zasadniczych ról w budowie oraz konstrukcji urządzeń i maszyn. Głównym zadaniem przekładni zębatej jest zmiana przenoszonego momentu obrotowego oraz prędkości kątowej między wałem wejściowym, a wyjściowym. Są powszechną popularnością układy składające się z kół zębatach zawdzięczają głównie stałemu przełożeniu, wysokiej sprawności i trwałości elementów. Koła zębate od lat znajdują zastosowanie w napędach o niskich jak i wyspecyfikowanych wymaganiach. W przemyśle przekładnie mogą pracować w warunkach stałej i zmiennej pracy [86].

W ostatnich latach produkcja przemysłowa kół zębatach z tworzyw sztucznych wzrastała, tak intensywnie, że przekroczyła poziom wytwarzania tych elementów z materiałów metalowych [53]. Stało się to możliwe dopiero po spełnieniu szeregu krytycznych wymagań, w szczególności wysoko wyspecyfikowanych wśród branży maszynowej. Wzrost zastosowań polimerowych kół zębatach wiązał się z opracowaniem znacznie większej ilości tworzywowych materiałów kompozytowych, przekraczających łączną sumę metalicznych surowców konstrukcyjnych. Przez kombinację odpowiednio dobranych polimerów

i napełniaczy można ekstremalnie zmienić parametry niemal każdego podstawowego tworzywa sztucznego. Należy jednak pamiętać, że właściwości materiałów polimerowych wyraźnie różnią się od materiałów metalicznych [94, 95, 111, 162]. Obecnie polimerowe przekładnie są powszechnie stosowane zarówno w nieznacznie obciążonych układach napędowych, ale także w wymagających aplikacjach z branży motoryzacyjnej (m.in. elektromechaniczne wspomaganie kierownicy, elementy rozruszników, regulatory siedzeń, elektroniczne sterowanie przepustnicą) [100].

Z analizy literatury światowej wynika, że jest niewiele prac poświęconych zasadom postępowania podczas konstrukcji elementów maszyn automotive, które jako surowce wykorzystują materiały polimerowe, ich kompozyty oraz nanokompozyty. Istniejące normy i zasady projektowania polimerowych kół zębatach są niedostosowane do bardziej wymagających aplikacji. Brakuje również kryteriów, które synergicznie łączą zmienne właściwości kompozytów termoplastycznych z technologią projektowania przekładni zębatach, pracujących w zmiennych i wymagających warunkach. Natomiast rozwój przemysłu wskazuje na coraz większe zapotrzebowanie kompozytowych elementów maszyn, które będą poddawane wysokim obciążeniom i szerokiemu zakresowi temperatury otoczenia. Niniejsza praca jest poświęcona metodyce i analizie otrzymywania złożonych materiałów kompozytowych, pod kątem badania wytrzymałości trwałościowej przekładni o zębatach walcowatych prostych.

Badania prowadzone w obrębie prezentowanej pracy doktorskiej zostały przygotowane w ramach drugiej edycji programu „Doktorat wdrożeniowy” pomiędzy Politechniką Rzeszowską, a firmą Splast Sp. z o.o. w latach 2018 – 2023.

I. WSTĘP TEORETYCZNY

I.1. Charakterystyka wybranych materiałów polimerowych stosowanych do otrzymywania elementów maszyn

W niniejszym rozdziale zostały omówione fizykochemiczne, mechaniczne i użytkowe właściwości polimerów konstrukcyjnych, napełniaczy i dodatków pomocniczych, które są najpowszedniej stosowane do otrzymywania precyzyjnych elementów maszyn. Przywołano najnowsze osiągnięcia z dziedziny przetwórstwa materiałów polimerowych oraz ich kompozytów, które są wykorzystywane np. do produkcji zębatych układów napędowych, znajdujących zastosowanie w branży motoryzacyjnej. Przytoczone przykłady stanowią punkt odniesienia dla przeprowadzonych w części doświadczalnej badań trwałościowych.

Od 60 lat ubiegłego wieku, obserwowany jest intensywny wzrost przetwórstwa tworzyw sztucznych. Pierwsze materiały polimerowe stosowane w swojej niemodyfikowanej formie, znalazły zastosowanie do otrzymywania prostych mechanicznie konstrukcji [18]. Szybko zauważono, że wprowadzenie do struktury polimeru określonego modyfikatora, może w zaplanowany sposób wpłynąć na ostateczną konfigurację jego właściwości. Gwałtowny sukces komercyjny produktów opartych na polimerach wygenerował popyt, który sprawił, że całkowita produkcja tworzyw sztucznych przekroczyła sumaryczną sprzedaż wszystkich metali już na początku lat 80 [139].

Właściwości mechaniczne i użytkowe polimerów, stały się głównym przedmiotem zainteresowania podczas procesu konstruowania wyrobów, ich zastosowania w budowie maszyn oraz późniejszych warunków pracy [112]. Dlatego też nieustannie trwają badania skupiające się nad rozwojem zaawansowanych materiałów i ich procesach wytwarzania. W porównaniu do metali oraz ich stopów, tworzywa sztuczne dają nieograniczoną elastyczność tworzenia kompozytów polimerowych w uwzględnieniu relatywnie niższych kosztów materiałowych i przetwórczych. W związku z tym, tworzywa sztuczne są szeroko rozważane pod kątem zastosowań funkcjonalnych w wielu gałęziach przemysłu, z włączeniem zaawansowanych procesów produkcji dotyczących złożonych i wyspecyfikowanych części automotive [5].

I.1.1. Właściwości mechaniczne, reologiczne i użytkowe wybranych tworzyw polimerowych, z których są otrzymywane elementy maszyn

Polimery to materiały o strukturze złożonej z długich, kowalencyjnie połączonych w łańcuchy atomów. Wśród związków chemicznych charakteryzują się dużym ciężarem cząsteczkowym. W procesie polimeryzacji, w wyniku reakcji chemicznych powtarzalnej cząsteczki monomeru, wytwarzane są liniowe, rozgałęzione lub trójwymiarowe sieci polimerowe [51]. Materiały polimerowe mogą występować w formie naturalnej (tzw. biopolimery) lub syntetycznej (wytwarzane poprzez polimeryzację przemysłową).

Dzięki stosunkowo niskim kosztom produkcji, wysokiej wydajności wytwarzania oraz dobrym właściwościom mechanicznym, polimery zaczęły zastępować niektóre konwencjonalne materiały metaliczne [139]. Już w poprzednich dekadach zaobserwowano, że polimery mogą zachowywać się jak elastyczne ciała stałe lub jak lepkie ciecze. W obu przypadkach ich stan fizykochemiczny zależał od warunków badania, takich jak czas i temperatura pracy.

Istotnym aspektem, często pomijanym w badaniach trybologicznych polimerów jest wpływ parametrów eksperymentalnych na temperaturę kontaktu, na którą polimery są niezwykle wrażliwe [141]. W podstawach mechaniki o danym materiale, przyjmuje się założenia dotyczące właściwości materiałów, dla których jest przeprowadzana analiza. Założenia te wymagają, aby materiał był:

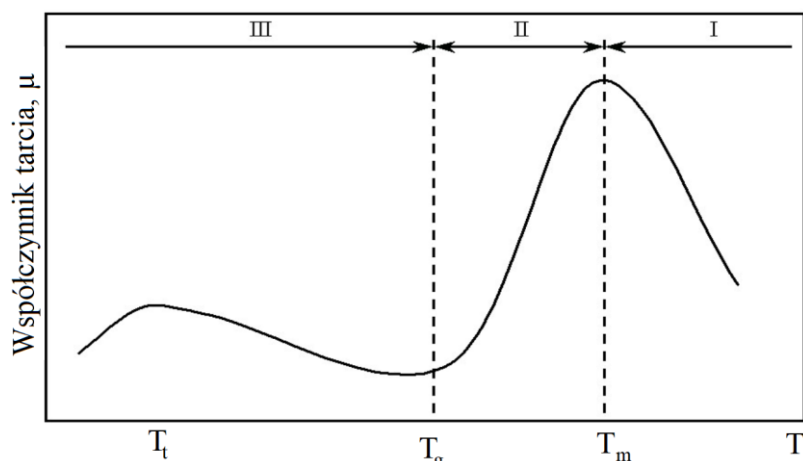
- liniowy – zakłada się liniowość materiałową (odkształcenie wg prawa Hook’*e*) lub zależność między naprężeniem a odkształceniem;
- jednorodny – oznacza, że w strukturze materiału nie ma pustych przestrzeni, dzięki temu jego właściwości są takie same w każdym punkcie (wyróżnia się: amorficzność – struktura polimeru jest chaotyczna lub nie posiada uporządkowanej struktury; krystaliczność – struktura posiada regularny układ strukturalny);
- izotropowy – materiał ma takie same właściwości mechaniczne w dowolnym punkcie swej struktury;
- sprężysty – występujące odkształcenia swobodne są spowodowane obciążeniami zewnętrznymi, które są całkowicie i natychmiastowo odwracalne po usunięciu przyłożonej siły.

Założenia te pozwalają na przeprowadzenie elementarnej analizy naprężeń danego prostego elementu wykonanego z materiału metalowego (np. pręta, belki, zbiornika

ciśnieniowego). Jednak w przypadku tworzyw polimerowych, takie założenia są obarczone dużym ryzykiem błędu z powodu ich dużej zmienności właściwości w zależności od otaczających warunków pracy. Dlatego istotne jest wykonywanie badań elementów wykonanych z polimerów w ich rzeczywistych warunkach użytkowania [20].

Z względu na unikatową strukturę i zachowanie się podczas ogrzewania, istnieje klasyfikacja polimerów z podziałem na termoplastyczne, termoutwardzalne i chemoutwardzalne. Jak wskazuje nazwa, tworzywa termoplastyczne uplastyczniają się pod wpływem temperatury, a po ochłodzeniu odzyskują swoje pierwotne właściwości. Mogą być poddawane recyklingowi. Polimery termoutwardzalne i chemoutwardzalne nie ulegają ponownemu uplastycznieniu. Pod wpływem podwyższonej temperatury lub substancji sieciującej przekształcają się w nietopliwy, usieciowany ostateczny produkt [127].

Jak wyżej wspomniano, jedną z najważniejszych cech mających istotny wpływ na właściwości mechaniczne polimerów jest ich stopień usieciowania. Wynika to w fakt, że sieciowanie bezpośrednio wpływa na ruchliwość łańcuchów polimerów, ponieważ ich zakres ruchu zmniejsza się wraz ze wzrostem ułożenia cząsteczek. Polimery termoplastyczne mogą mieć strukturę amorficzną lub semikrystaliczną. W mikroskali łańcuchy polimerowe, które nie wykazują uporządkowania struktury uważa się za amorficzne. Natomiast polimery semikrystaliczne posiadają dwie fazy: amorficzną i krystaliczną [127]. Materiały semikrystaliczne mają wyższą gęstość niż polimery amorficzne, z powodu ściślejszego upakowania ich długołańcuchowych cząsteczek [11]. Charakteryzują się mniejszym pęczaniem, wyższą twardością, odpornością na tarcie, a także korozję i drastyczne warunki środowiskowe [20]. Zależność współczynników tarcia termoplastycznych polimerów amorficznych i semikrystalicznych można przedstawić przy pomocy charakterystycznej krzywej, dzielącej się na trzy części odpowiadające stanom: wysokoelastycznemu, wymuszonej elastyczności i szklistemu. Jak przedstawiono na rys. 2, w warunkach wysokiej temperatury w stanie wysokoelastycznym (I) siła tarcia rośnie wraz ze spadkiem temperatury, osiągając maksymalną wartość w temperaturze mięknienia (T_m). W obszarze (II) siła tarcia zmniejsza się i w odcinku (III) ponownie przechodzi przez maksimum w temperaturze topnienia (T_i). Na krzywej zależności siły tarcia od temperatury występują dwa punkty szczytowe – główne ekstremum w stanie wysokoelastycznym oraz niskotemperaturowe maksimum w stanie szklistym [14, 106].



Rys. 2. Zależność współczynnika tarcia od temperatury (oznaczenia: T_t – temperatura topnienia; T_g – temperatura zeszklenia; T_m – temperatura mięknięcia) [106]

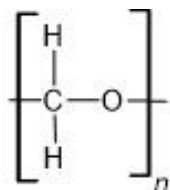
W tworzywach semikrystalicznych pod wpływem wzrostu temperatury obszary amorficzne ulegają szybszemu topieniu. Wynika to z lepkosprężystych właściwości polimerów. Z tego względu tworzywa termoplastyczne o budowie semikrystalicznej są odpowiednie do zastosowań, gdzie występują skoki temperatury, np. w zębatych przekładniach napędowych [51]. Należy wybierać takie tworzywa, których temperatura pracy koła zębatego, będzie wyższa niż temperatura zeszklenia i niższa niż temperatura topnienia danego polimeru. Wynika to z zależności odkształceń w funkcji temperatury i czasu. Jeżeli temperatura użytkowania danego materiału jest bliska jego temperaturze topnienia, obserwuje się spadek stabilności wymiarowej takich wyrobów polimerowych. Należy tutaj nadmienić, że podstawowe własności mechaniczne większości niemodyfikowanych tworzyw sztucznych zmieniają się już w temperaturze pokojowej lub pod wpływem krótkotrwałego obciążenia. Natomiast własności mechaniczne metali praktycznie nie ulegają zmianie, aż do temperatury rekrytalizacji przekraczającej 300 °C [54].

Jednymi z najczęściej stosowanych konstrukcyjnych termoplastów, wykorzystywanych przy otrzymywaniu wysoko precyzyjnych elementów maszyn są: poliacetale (POM), poliamidy (PA) oraz polieteroeteroketon (PEEK).

Materiały termoplastyczne można przetwarzać poprzez zastosowanie licznych technologii takich jak: formowanie wtryskowe [110], wytłaczanie [2], kalandrowanie folii [170] oraz formowanie wtórne (m.in. obróbka skrawaniem [68]). Gotowe półwyroby i wyroby można łatwo ze sobą łączyć poprzez spawanie, zgrzewanie lub klejenie.

I.1.2. Polioksymetylen (POM)

Polioksymetylen (POM) - jest polimerem posiadającym w łańcuchu głównym ugrupowania acetalowe, które przedstawiono na rys. 3. Otrzymuje się go w wyniku polimeryzacji aldehydów [17]. Na rynku jest dostępny w dwóch formach: jako homopolimer (POM-H) oraz kopopolimer (POM-C).



Rys. 3. Wzór strukturalny POM. Opracowanie własne na podstawie [179]

Zaletami polioksymetylenu jest jego duża stabilność wymiarowa w szerokim zakresie temperatur, spowodowana zawartością fazy krystalicznej sięgającej do 98 % [51]. Wysoka energia wiązań oraz stopień krystalizacji, wpływają na nadzwyczajną odporność na zużycie produktów wykonanych z POM w trakcie ich eksploatacji [155]. Materiał wyróżnia się wysoką wytrzymałością na zmęczenie, odpornością na pęcznienie oraz samosmarowością [27]. Posiada niski współczynnik tarcia spowodowany jego strukturą, składającą się z elastycznych liniowych łańcuchów molekularnych [141, 155].

Natomiast jego zasadniczą wadą jest wysoka kruchość, która powoduje, że jest niezbyt dobrym wyborem do zastosowań narażonych na duże obciążenia udarowe [27]. Wybrane właściwości materiału POM zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Charakterystyczne właściwości fizykochemiczne POM [141, 179]

| Parametr | |
|------------------------------|------|
| Gęstość, g/cm ³ | 1,42 |
| Temperatura topnienia, °C | 178 |
| Temperatura zeszklenia, °C | -30 |
| Przewodnictwo cieplne, W/m·K | 0,3 |
| Ciepło właściwe, J/kg·K | 1500 |

POM wykorzystywany jest w procesach przetwórstwa: głównie formowania wtryskowego, wytłaczania, a także prasowania tłoczego. Temperatura przetwórstwa dla POM waha się w zakresie 210 – 230 °C. Powyżej tej temperatury związek ulega rozpadowi na monomery z wydzieleniem gazowego formaldehydu. Materiał jest stosowany do otrzymywania elementów

maszyn o dużych wymaganiach wytrzymałościowych, takich jak składowe napędów, tj. rolki, cięgna, wałki, ślimaki, prowadnice, koła zębate, łożyska ślizgowe oraz wirniki różnego rodzaju pomp. Wykorzystuje się go do produkcji elementów konstrukcyjnych o szerokiej stabilności wymiarowej, tj. uchwytów, korpusów oraz elementów podzespołów samochodowych. Używany jest również przy produkcji elementów urządzeń elektronicznych, artykułów gospodarstwa domowego, a także w sektorze biomedycznym [27].

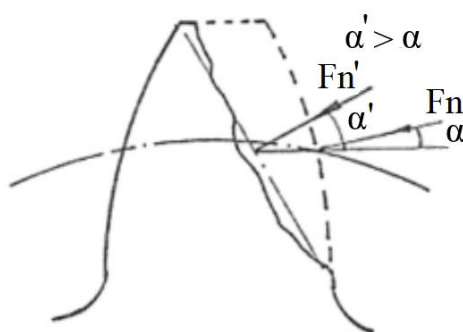
I.1.3. Badania kół zębatach otrzymywanych z polioksymetylenu (POM)

Zespół hinduskich naukowców pod przewodnictwem Prashanta Kumar Singh [144], przeprowadził badania dotyczące wykorzystania polioksymetylenu w przekładniach złożonych z tworzyw sztucznych, wytwarzanych w procesie formowania wtryskowego. Badacze określali szybkość zużycia przekładni oraz jej zachowanie termiczne, w zależności od momentu obrotowego równego: 0,8; 1,2; 1,6; i 2,0 Nm. Testy wykonano dla różnych prędkości obrotowych wynoszących: 600, 800, 1000 i 1200 obr./min. Poddano analizie stan zębów przy wartościach 1,4 Nm i 900 obr./min. Wyniki testów pokazały, że przekładnia wykonana z POM jest w stanie wykonać bezawaryjnie nawet dwa miliony cykli badawczych [144].

Zespół badawczy na czele z Kenem Mao [96], skupił się na określeniu zużycia i wydajności przekładni polioksymetylenowej na podstawie obliczeń oraz badań eksperymentalnych. Do testów zaprojektowano platformę badawczą, zdolną do ciągłego pomiaru zużycia powierzchni kół zębatach pod stałym obciążeniem. Rejestrowano parametry takie jak: moment obrotowy, prędkość obrotową, zużycie materiału w odniesieniu do zmian szerokości zęba w miejscu przyporu, a także liczbę cykli prowadzących do awarii przekładni. Testy przeprowadzono dla elementów wykonanych metodą formowania wtryskowego z materiału POM. Układ składał się z dwóch polimerowych kół zębatach o module 2 i liczbie zębów 20, napędzanych w warunkach suchobieżnych pod kątem przyporu 20°. Testy wykonywano w przy prędkości równej 1000 obr./min. Okres pracy przekładni podzielono na trzy fazy: wstępne docieranie, okres liniowej pracy oraz końcowy etap, w trakcie którego zużycie materiału gwałtownie rośnie. Stwierdzono, że obciążenie krytyczne przekładni powodujące jej przyspieszone zużycie, pojawiało się podczas działania momentu obrotowego równego 8,5 – 9,0 Nm. Przyczyną był wzrost temperatury pracy przekładni osiągającej temperaturę topnienia w punkcie krytycznego obciążenia. Po zużyciu ok. 40 % grubości zębów dochodziło do awarii spowodowanej pełzaniem materiału lub złamaniem zęba. Dla momentów obrotowych powyżej wartości 9,5 Nm następowało gwałtowne zużycie bezpośrednio po

rozpoczęciu testów. Za pomocą kamery termowizyjnej stwierdzono, że temperatura, w której występuje awaria jest bliska temperaturze topnienia acetali i wynosi ok. 175 °C [96].

Podobne badania kół zębatych pozyskanych metodą formowania wtryskowego zostały opublikowane przez zespół W. Li [85]. Naukowcy stwierdzili, że kąt przyporu rośnie proporcjonalnie wraz ze zużyciem profilu zęba, co przedstawiono na rys. 4. Wyniki badań wykazały, że deformacje geometrii wierzchołka i stopy zęba, wpływały na zmianę lokalizacji naprężeń w zazębieniu i zmniejszeniu tarcia podczas pracy przekładni [85].

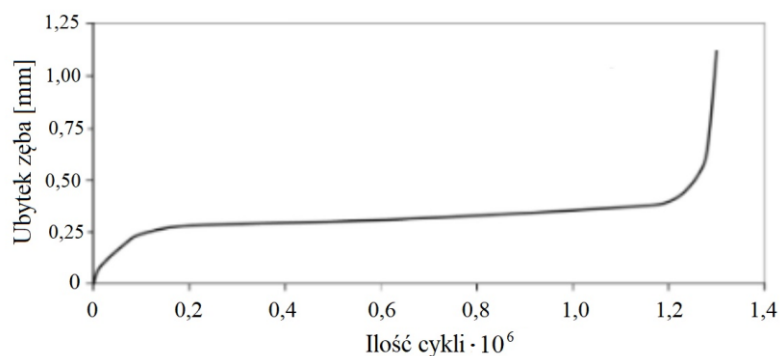


Rys. 4. Typowe zużycie zębów dla kół zębatych wykonanych z POM [85]

Na podstawie kolejnych testów, określono zależność pozwalającą na prognozowanie temperatury powierzchni bocznej zębów. Wykonano testy kół zębatych wykonanych przy pomocy maszyn skrawających. Koła badano w zakresie momentów obrotowych równych od 6 do 9 Nm i przy prędkości obrotowej 1000 obr./min [94]. Stwierdzono, że zużycie zębów koła można podzielić na trzy etapy:

- okres docierania się elementów układu,
- pracę ciągłą,
- końcowy szybki okres zużycia powierzchni bocznej [93].

Ścieranie się materiału na zębach koła może być spowodowane wysokimi obciążeniami oraz pojawiającymi się odkształceniami, które powodują pełzanie zębów, co w następstwie skutkuje powstaniem niewspółosiowości elementów układu przekładni. Poprzez zastosowanie dynamicznych zmian momentów obrotowych i stałej prędkości 1000 obr./min, określono zależność pomiędzy obciążeniem a całkowitą liczbą cykli, prowadzącą do zniszczenia przekładni. Wyniki zużycia kół zębatych w jednostce czasu, określono poprzez ilość usuniętego materiału w przeliczeniu na pojedynczy cykl, przy założonej stałej prędkości 1000 obr./min i momencie obrotowym 7,5 Nm. Jak pokazano na rys. 5 i 6, zużycie przekładni w ostatnim cyklu gwałtownie wzrasta (prawie 33 % grubości zęba), na skutek działania naprężeń zginających, co ostatecznie powoduje zniszczenie zęba [94].



Rys. 5. Wykres zależności ubytków materiału na zębach koła wykonanego z POM w funkcji liczby cykli, w warunkach stałej prędkości pracy 1000 obr./min i momencie obrotowym 7,5 Nm [94]



Rys. 6. Zużycie zębów powstałe na skutek działających obciążeń powodujących topienie się materiału POM [94]

Zauważono, że ubytek masy gwałtownie wzrasta po przekroczeniu ok. $1,2 \cdot 10^6$ cykli pracy. Kolejne badania miały na celu określenie krytycznego momentu obrotowego. Wyniki pokazały, że poniżej 9 Nm, zużycie przekładni jest powolne a jej praca trwa relatywnie długo – ok. 10^7 cykli [94].

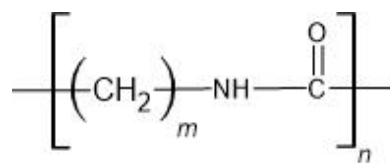
Autorzy zaobserwowali, że przy założonej prędkości 1000 obr./min, szybkość zużycia badanej pary kół zębatych, wykonanych z materiału POM, wynosiła ok. $5,14 \cdot 10^{-15}$ [m³ / N·m]. W odpowiadającym układzie acetal - stal, gdzie koło napędzające było wykonane z polimeru, wynik ten był równy $3,0 \cdot 10^{-15}$ [m³ / N·m] [94]. Ustalono także, że przy stałym momencie obrotowym równym 8,2 Nm oraz prędkości 1000 obr./min, temperatura układu była bliska temperaturze topnienia POM-u (165 °C). Oznacza to, że po przekroczeniu krytycznego obciążenia układu przekładni, koła ulegają awarii z powodu ich termicznego zużycia. Tylko obniżenie nastawczych parametrów wpłynie na żywotność układu napędowego [94].

Evans wraz z zespołem określili mechanizm zużycia przekładni składającej się z dwóch kół o zębach prostych, wykonanych z POM. Udowodnili, że na żywotność kół zębatych POM mają wpływ zanieczyszczenia tego materiału, odrywające się od pracującej powierzchni i następnie ciągnące się w kierunku ruchu ślizgowego po powierzchni bocznej zęba. Naukowcy oszacowali z dokładnością o rząd wielkości, ilość materiału oderwanego z kół zębatych, na podstawie pomiarów profili zębów wykonanych przed i po testach zmęczeniowych [34].

Na podstawie wykonanego przeglądu literaturowego można jednoznacznie stwierdzić, że POM jest najczęściej wybieranym polimerem, z którego są wykonywane wtryskiwane koła zębate. Materiał mimo swych licznych zalet związanych ze stabilnością wymiarową i samosmarnością, nie sprawdza się wysokoobciążonych przekładniach. Przytoczone badania wykazały, że przyczyną gwałtownego wzrostu zużycia był moment obrotowy, osiągający krytyczną wartość, określoną geometrią kształtu przekładni. Wynikało to z faktu, że temperatura powierzchni zęba, zbliżała się do temperatury topnienia POM (ok. 160 °C), czego następstwem były deformacje profilu zęba i zniszczenie przekładni.

I.1.4. Poliamid (PA)

Poliamidy (PA) stanowią główną grupę polimerów stosowanych w tribologicznych zastosowaniach związanych ze zużyciem powierzchni. Są polimerami o dużej masie cząsteczkowej, które w swoich łańcuchach zawierają wiązania amidowe, co przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Ogólny wzór strukturalny PA. Opracowanie własne

Należą do grupy tworzyw semikrystalicznych, w których stopień tej uporządkowanej fazy zależy od warunków przetwórstwa i wynosi od 30 do 50 %. Wraz ze wzrostem krystaliczności zmieniają się ich właściwości mechaniczne, zwiększa się twardość oraz odporność na ścieranie [157]. Badania ich struktury wykazały zależność między wzrostem gęstości liniowych wiązań wodorowych a ilością grup amidowych. Wyższy stopień uporządkowania budowy cząsteczkowej wpływa na ruchliwość segmentową długołańcuchowych alifatycznych grup metylenowych, przyczynia się do poprawy wytrzymałości na rozciąganie oraz wzrostu temperatury topnienia. Poprzez zmianę stosunku grup amidowych do metylenowych zsyntezowano wiele poliamidów o różnych właściwościach mechanicznych i użytkowych [131]. Wśród tej grupy polimerów wyróżnia się m.in.: PA 6 [123], PA 6.6 [132], PA 4.6 [49] oraz polimery zawierające w swojej budowie półaromatyczne i aromatyczne struktury [29].

Właściwości poliamidów są w szczególności zależne od stosunku liczby grup amidowych do metylenowych. Wzrost grup amidowych przekłada się na wyższą temperaturę topnienia, twardość, sztywność i polarność. Poliamidy rozpuszczają się w rozpuszczalnikach polarnych (np. silnych kwasach), zasadach i w wodzie o temp. powyżej 150 °C, która w tych warunkach

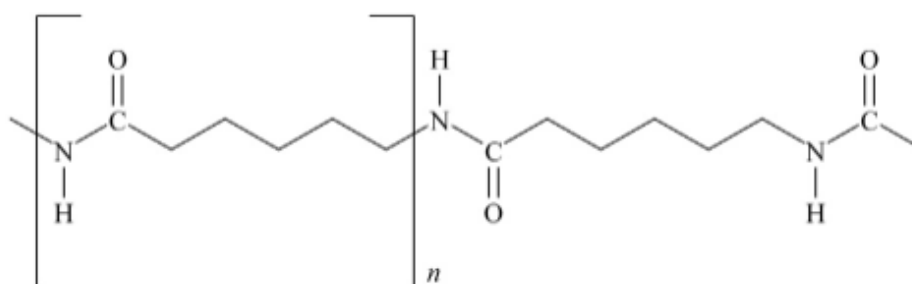
może powodować hydrolizę wiązań amidowych polimeru. Są odporne na rozpuszczalniki, oleje, benzen, naftę i słabe roztwory zasad. Charakteryzują się chłonnością wilgoci, która działa na nie jak plastifikator i ma znaczący wpływ na ich właściwości. W stanie suchym poliamidy są twarde i czasem kruche, natomiast po kondycjonowaniu w warunkach atmosferycznych wzrastają ich odkształcenie i odporność na ścieranie [157]. Z tego powodu w kartkach charakterystyki tworzywa, podane są właściwości w stanie suchym oraz kondycjonowanym w stanie równowagi 50 % wilgotności względnej (RH, *ang. Relative Humidity*) i w temperaturze 23 °C [99].

Poliamidy i ich kompozyty są szeroko przetwarzane w technologiach przetwórstwa tworzyw sztucznych takich jak: wtrysk, wytłaczanie, odlewnictwo czy formowanie (przędzenie) włókien. Przetwórstwo wtryskowe i wytłaczanie wymagają wcześniejszego pozbycia się wilgoci z tworzywa do poziomu poniżej 0,15 %. Zawartość wilgoci wpływa na wystąpienie trudności podczas procesu technologicznego w postaci pienienia się uplastycznionego tworzywa oraz obniżenie właściwości mechanicznych i użytkowych produktu. Uplastycznione poliamidy mają niską lepkość, która pozwala na wypełnienie form o skomplikowanych gniazdach z długimi drogami płynięcia. Skurcz przetwórczy klasuje się na poziomie 1,0 – 2,5 % [157].

Spośród poliamidów największe znaczenie przemysłowe w produkcji elementów maszyn mają PA 6 i PA 6.6. Oba polimery są do siebie bardzo podobne, ale monomer, z którego wykonywany jest PA 6 jest surowcem tańszym i łatwiej dostępnym niż składniki z jakich wykonywany jest PA 6.6.

I.1.5. Poliamid 6 (PA 6)

Poliamid 6 (PA 6) jest produktem reakcji polikondensacji lub polimeryzacji anionowej ϵ -kapolaktamu, związanej z otwarciem jego pierścienia [157]. Jest białawym, półkryształicznym polimerem termoplastycznym, a jego strukturę przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Wzór strukturalny poliamidu 6. Opracowanie własne na podstawie [176]

Wyróżnia się wyjątkowymi właściwościami mechanicznymi, sztywnością i odpornością na zużycie mechaniczne [134]. Jest odporny na oleje i benzynę. Jest materiałem samogasnącym lub trudnopalnym o oznaczeniu V0 wg normy palności UL-94. Do jego wad można zaliczyć wysoki współczynnik absorpcji wody (w stanie równowagi ok. 8 %). Wykazuje także słabą odporność chemiczną na silne kwasy i zasady [99]. Niektóre z jego właściwości fizykochemicznych zestawiono w tab. 2.

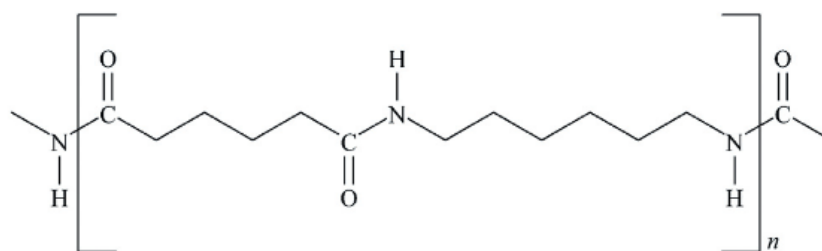
Tab. 2. Charakterystyczne właściwości fizykochemiczne PA 6 [176]

| Parametr | |
|---------------------------------|---------------|
| Krystaliczność, % | 26 - 50 |
| Gęstość, g/cm ³ | 1,06 - 1,16 |
| Temperatura topnienia, °C | 220 - 260 |
| Temperatura zeszklenia, °C | 50 - 75 |
| Przewodnictwo cieplne, W/m·K | 0,1968 - 0,23 |
| Ciepło właściwe, J/kg·K | 1,400 |
| Absorpcja wilgoci 23°C/50%RH, % | 2,0 - 3,3 |
| Skurcz, % | 0,87 - 1,4 |

Polimer ten znalazł zastosowanie w kołach zębatych, przekładniach, złączach i łożyskach ślizgowych. W przemyśle samochodowym jest wykorzystywany do produkcji części konstrukcyjnych przenoszących obciążenia.

I.1.6. Poliamid 6.6 (PA 6.6)

Poliamid 6.6 (PA 6.6) jest produktem dwuetapowej reakcji polikondensacji kwasu adypionowego z heksametylenodiaminą [157]. Jego budowę strukturalną przedstawia rys. 9.



Rys. 9. Wzór strukturalny poliamidu 6.6. Opracowanie własne na podstawie [177]

W swojej niemodyfikowanej wersji, w warunkach zmiennych temperatur, cechuje się dużym skurczem przetwórczym. Ma niski współczynnik tarcia oraz wysoką wytrzymałość mechaniczną [27]. Charakteryzuje się odpornością na ciepło w warunkach długotrwałej pracy ciągłej w zakresie od 80 do 150 °C [99]. PA 6.6 jest tworzywem o znacznie większej wytrzymałości mechanicznej i odporności chemicznej w porównaniu z niemodyfikowanym PA 6. Podwyższona wytrzymałość fizykomechaniczna tego tworzywa sprawia, że charakteryzuje się on niższą zdolnością do tłumienia drgań i niższą udarnością. Niektóre z jego właściwości fizykochemicznych przedstawiono w tab. 3. Kompozyty PA 6.6 napełnione włóknem szklanym, cechują się większą wytrzymałością mechaniczną, stabilnością wymiarową, sztywnością a także wyższą odpornością na pęcznienie w porównaniu do modyfikowanych w analogicznym udziale PA 6 [148, 173].

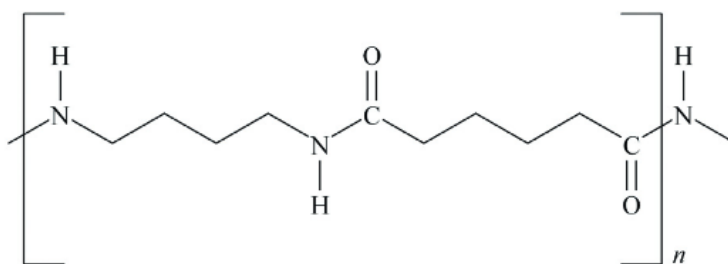
Tab. 3. Charakterystyczne właściwości użytkowe PA 6.6 [177]

| | |
|---------------------------------|-------------|
| Parametr | |
| Krystaliczność, % | 32 - 65 |
| Gęstość, g/cm ³ | 1,05 - 1,14 |
| Temperatura topnienia, °C | 257 - 270 |
| Temperatura zeszklenia, °C | 60 - 70 |
| Przewodnictwo cieplne, W/m·K | 0,23 - 0,25 |
| Ciepło właściwe, J/kg·K | 1,700 |
| Absorpcja wilgoci 23°C/50%RH, % | 2,3 - 3,4 |
| Skurcz, % | 0,95 - 1,6 |

PA 6.6 znalazł zastosowanie przy produkcji poduszek powietrznych, pasów napędowych, elementów łożysk oraz kół zębatych [99].

I.1.7. Poliamid 4.6 (PA 4.6)

Poliamid 4.6 otrzymuje się w wyniku reakcji polikondensacji 1,4-diaminobutanu z kwasem adypinowym. Dzięki swej symetrycznej budowie, w porównaniu do PA 6 lub PA 6.6 charakteryzuje się znacznie wyższą stabilnością termiczną oraz temperaturą topnienia fazy krystalicznej (ok. 295 °C) [99]. Jego budowę strukturalną przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Wzór strukturalny poliamidu 4.6. Opracowanie własne na podstawie [175]

W porównaniu do innych poliamidów, charakteryzuje się wysokim modułem sprężystości, udarnością, odpornością na pełzanie i wytrzymałością zmęczeniową [157]. Mimo tego, że absorpcja wilgoci PA 4.6 jest na podobnym poziomie co w przypadku PA 6.6, w porównaniu z nim cechuje go mniejsza stabilność wymiarowa [99]. Niektóre z jego właściwości fizykochemicznych przedstawiono w tab. 4.

Tab. 4. Charakterystyczne właściwości fizykochemiczne PA 4.6 [175]

| Parametr | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| Krystaliczność, % | 25 - 70 |
| Gęstość, g/cm ³ | 1,17 - 1,18 |
| Temperatura topnienia, °C | 290 - 295 |
| Temperatura zeszklenia, °C | 43 - 80 |
| Przewodnictwo cieplne, W/m·K | 0,252 (w stanie uplastycznionym) |
| Ciepło właściwe, J/kg·K | 2,800 (w stanie uplastycznionym) |
| Absorpcja wilgoci 23°C/50%RH, % | 2,6 - 3,7 |
| Skurcz, % | 0,3 - 2,0 |

PA 4.6 znajduje zastosowanie w elementach układów napędowych, chłodnicach powietrza, przekładniach elektrycznego systemu wspomaganie układu kierowniczego EPS (*ang. electric power steering*), czujnikach zlokalizowanych w silniku, napinaczach łańcuchów rozrządu, mikroprzełącznikach, komponentach silnikowych i wielu innych specjalistycznych urządzeniach konsumenckich (np. zawory odmulające szybkiego działania) [99, 196].

I.1.8. Badania kół zębatych otrzymywanych z poliamidów

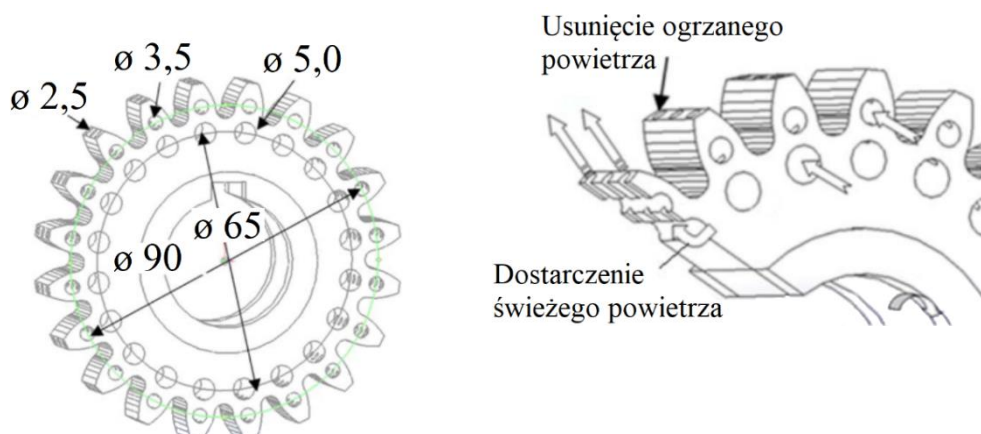
Naukowcy Senthilvelan oraz Gnanamoorthy przeprowadzili badania nad przekładnią składającą się z koła zębatego z niemodyfikowanego PA 6.6, współpracującego z kołem ze stali nierdzewnej SS316. Testy zostały wykonane przy prędkości 1000 obr./min i w zakresie momentu obrotowego od 1,5 do 3,0 Nm, który odpowiadał naprężeniu zginającemu od 15 do 30 MPa. Zakończenie testów zachodziło w przypadku wykonania $5 \cdot 10^6$ cykli lub na skutek uszkodzenia elementów układu. Dla polimerowego koła osiągnięcie naprężenia zginającego równego 15 MPa, powodowało dużą liczbę pęknięć powierzchniowych, zlokalizowanych w połowie wysokości zęba. Wynikało to z niskiego przewodnictwa cieplnego nienapełnionego tworzywa, które było przyczyną powstania lokalnych deformacji powstających podczas toczenia się zębów w warunkach niesmarowanych. Zaobserwowano pęknięcia u podstawy zębów PA 6.6 przy naprężeniu zginającym równym 20 MPa. Uszkodzone powierzchnie zębów obserwowano przy pomocy optycznego i skaningowego mikroskopu elektronowego. Ustalono, że uszkodzenie zęba prowadziło do powiększenia szczeliny pomiędzy współpracującymi elementami i w dalszym etapie powodowało wzrost wibracji i hałasu generowanego przez przekładnię [138].

Grupa naukowców na czele z Shashank Singh, skupiła się w swoich badaniach na przekładni wykonanej z dwóch bliźniaczych poliamidowych kół zębatych. Przy pomocy formowania wtryskowego otrzymano koła z PA 6.6 i następnie poddano je badaniom zmęczeniowym. Testy przeprowadzono w warunkach stałej prędkości obrotowej wynoszącej 1200 obr./min i przy różnych momentach obrotowych, mieszczących się w zakresie 1,0 - 1,4 Nm. Eksperymentalnie ustalono, że osiągnięcie przez układ momentu obrotowego równego 1,2 Nm, powodowało znaczne zużycie powierzchni bocznej napędzanego koła zębatego [145].

Kolejny zespół naukowców badał parę kół zębatych otrzymanych z PA 6.6 o module równym 2 i liczbie zębów 30 oraz kącie przyporu 20° . Przekładnia pracowała przy prędkości 1000 obr./min i momencie obrotowym 5 – 20 Nm. Okazało się, że dla momentów powyżej 10 Nm, można podzielić zużycie bocznej powierzchni zęba na trzy fazy: początkową fazę docierania, fazę liniową i końcową fazę, w której następuje uszkodzenie zęba. Pierwszy, krótki okres docierania charakteryzował się stosunkowo dużą wielkością zużycia. W drugiej fazie, nie obserwowano znacznych zmian na powierzchni bocznej zębów. W końcowej fazie obserwowano znaczny wzrost wskaźnika zużycia powierzchni zębów. Wynikało to z pojawiających się efektów termicznych się oraz deformacji początkowego zarysu zęba. Ostatecznie doszło do złamania na wysokości średnicy podziałowej zęba. Dla momentów

poniżej 10 Nm zarejestrowano tylko zużycie rozruchowe i progresywne. Przy niskich obciążeniach, zużycie było nieznaczne i prawie liniowe. Po wykonaniu $1,2 \cdot 10^7$ cykli testy przekładni zakończono, nawet jeżeli przekładnia nie uległa uszkodzeniu. Stwierdzono, że charakterystyka tarcia i zużycia przekładni z PA 6.6 jest całkowicie inna w porównaniu z opisywanymi wcześniej w rozdziale 1.1.2 przekładniami wykonanymi z POM. Awarie przekładni PA 6.6 były następstwem pęknięcia zęba głównie u podstawy stopy lub w okolicy średnicy podziałowej, a nie zużycia ściernego powierzchni bocznej jak w przypadku POM [95].

Naukowiec Hayrettin Duzcukoglu [32] porównywał uszkodzenia powierzchni przekładni, będące skutkiem ciepła nagromadzonego w korpusie zęba. Do testów przygotowano koła zębate wykonane metodą skrawania CNC (*ang. Computerized Numerical Control*). Element napędzający został wykonany ze stali typu AISI 8620, a koło napędzane z PA 6 (moduł 4,5 mm; liczba zębów 20). Badacze porównywali rozpraszanie wytworzonego ciepła w polimerze, w dwóch układach o standardowym profilu zębów oraz w układzie z kołem zębatym, posiadającym nawiercone otwory w korpusie (rys. 11).



Rys. 11. Koło zębate z nawierconymi otworami pozwalającymi na skuteczniejsze chłodzenie podczas eksploatacji przekładni [32]

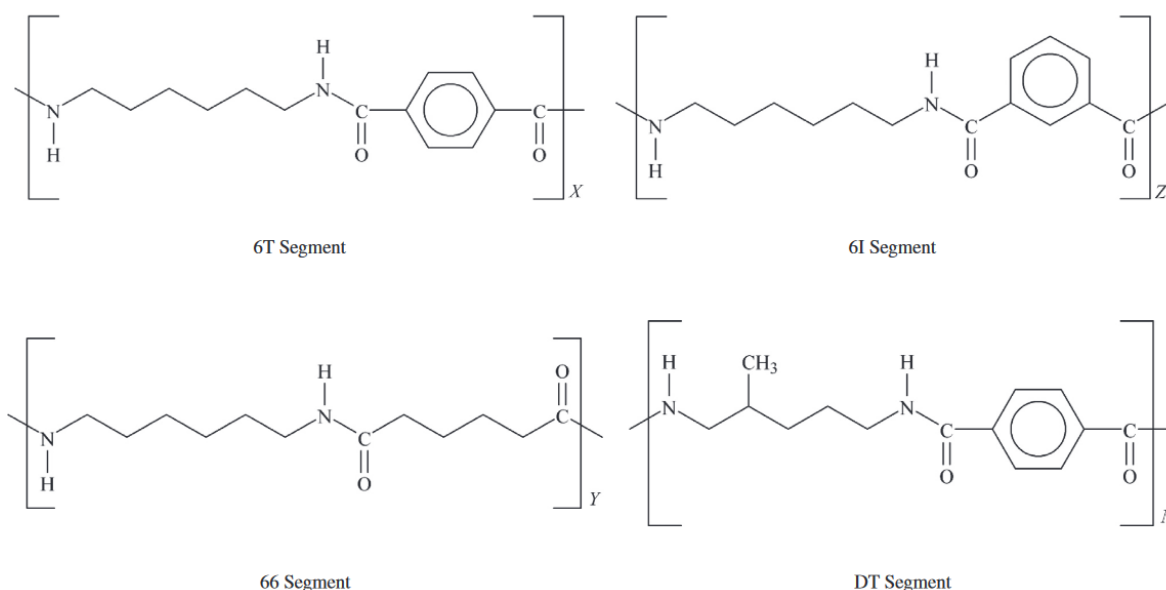
Przebieg testu rozpoczął się od wstępnie napędzonego układu, w celu wygładzenia powierzchni zębów. Następnie zwiększono obciążenie w zakresie od 6,12 do 23,3 Nm, z zachowaniem stałej prędkości obrotowej 1750 obr./min. Zakończenie testu następowało w wyniku uszkodzenia zęba lub po przekroczeniu $14,2 \cdot 10^5$ cykli. Podczas pracy koła PA 6 z dodatkowymi otworami nastąpiła zmiana rozpraszania ciepła. Wynikało to z tego, że podczas stałej prędkości obrotowej układu, wewnątrz otworów tworzył się wirowy ruch powietrza. Wykazano, że nawiercone otwory spowodowały zmniejszenie temperatury powierzchni zębów PA 6, a co za tym idzie zwiększyły odporność zmęczeniową materiału. W kołach zębatych bez wyciętych otworów chłodzących, nastąpiła uboższa wymiana ciepła do

otoczenia. W tym przypadku właściwości mechaniczne zostały pogorszone na skutek degradacji materiału. Zjawisko to nasilało się proporcjonalnie do wzrostu temperatury będącej pochodną prędkości obrotowej. Rejestracja temperatury ujawniła, że w przypadku standardowych kół zębatych, epicentrum temperatury mieściło się w okolicy średnicy podziału zęba. Dla wysokich obciążeń obu układów, po przekroczeniu temperatury zeszklenia materiały zostały zdegradowane i straciły swoje właściwości mechaniczne. Zęby uległy złamaniu lub stopieniu, co spowodowało wygięcie ich profili i trwałe uszkodzenia. Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (*ang. Scanning Electron Microscopy*) obserwowano ich zdeformowaną strukturę powierzchni i zmierzono głębokość zużycia wierzchniej warstwy zębów. Stwierdzono znacznie większą liczbę powierzchniowych pęknięć na standardowym kole zębatym [32].

Podsumowując, głównymi przyczynami mechanicznego niszczenia zębów PA, są zużycia zmęczeniowo - ściernie oraz pełzanie materiału, na skutek wzrostu temperatury współpracującej powierzchni. Z tego powodu należy ściśle kontrolować oraz odprowadzać z układu kumulujące się ciepło. Problem ten wynika z mniejszej przewodności cieplnej materiałów polimerowych w odniesieniu do metali. Mechanizmy uszkodzeń jednorodnych przekładni polimer / polimer nie są jeszcze jasne, chociaż w inżynierii są one częściej spotykane niż w układach polimer / metal.

I.1.9. Poliftalamid (PPA)

Poliftalamidy należą do grupy poliamidów, wyróżniających się obecnością pierścieni aromatycznych swojej strukturze. Są syntezowane w wyniku reakcji pomiędzy kwasami aromatycznymi (tereftalowym lub izoftalowym) i diaminami alifatycznymi [30]. Strukturalny łańcuch poliftalamidu (PPA) jest zbudowany z czterech powtarzających się jednostek, które zostały pokazane na rys. 12. Jeżeli struktura PPA będzie zawierała przeważającą liczbę segmentów PA 6T, to takie tworzywo będzie miało charakter półkryształiczny. Natomiast jeżeli PPA zostało oparte na PA 6I, to zachowa cechy amorfizmu [99]. W kompozytach najczęściej spotykane jest semikryształiczne PPA, ponieważ zachowuje swoje właściwości mechaniczne w temperaturze zeszklenia ok. 130 °C, co jest nieosiągalne dla odmiany amorficznej [29].



Rys. 12. Wzory strukturalne jednostek powtarzających się w polifitalamidach PPA [99]

W porównaniu do standardowych alifatycznych polimerów poliamidowych, polifitalamidy wyróżniają się lepszymi właściwościami chemicznymi i termicznymi (wyższą temperaturą topnienia i zeszklenia). W porównaniu z poliamidami liniowymi, PPA ma stosunkowo niską absorpcję wilgoci [99]. Niektóre z jego właściwości fizykochemicznych przedstawiono w poniższej tab. 5.

Tab. 5. Charakterystyczne właściwości fizykochemiczne PPA [180]

| Parametr | |
|---------------------------------|-------------|
| Krystaliczność, % | 33 - 45 |
| Gęstość, g/cm ³ | 1,18 - 1,19 |
| Temperatura topnienia, °C | 294 - 335 |
| Temperatura zeszklenia, °C | 121 - 138 |
| Przewodnictwo cieplne, W/m·K | 0,289 |
| Ciepło właściwe, J/kg·K | 1,5 - 2,4 |
| Absorpcja wilgoci 23°C/50%RH, % | 0,1 - 0,3 |
| Skurcz, % | 0,18 - 1,0 |

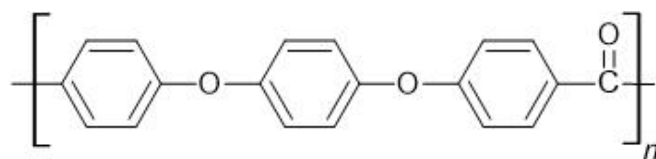
PPA znalazł zastosowanie w branży motoryzacyjnej, przy produkcji układów paliwowych [99]. Wykorzystywany jest także jako surowiec do otrzymywania obciążonych konstrukcyjnie osłon, wsporników układów napędowych, elementów podwozia i nadwozia, pomp, zaworów, siłowników, a także wyposażenia gospodarstwa domowego [140].

W literaturze nie ma wzmianek dotyczących zastosowania PPA jako surowca do budowy przekładni. Natomiast z uwagi na liczne zalety omawianej grupy, w swojej pracy

zdecydowałam się na wykorzystanie tego materiału, co zostanie szerzej omówione w części doświadczalnej.

I.1.10. Polieteroeteroketon PEEK

Polieteroeteroketon (PEEK) należy do rodziny polimerów poliaryloeteroketonowych (PAEK). Jest aromatycznym, półkrystalicznym termoplastem, składającym się z powtarzalnych jednostek poliaryloeteronu, co pokazano na rys. 13 [133, 181].



Rys. 13. Wzór polieteroeteroketonu (PEEK). Opracowanie własne na podstawie [178]

Należy do wysokowydajnych tworzyw termoplastycznych oferujących stabilność wymiarową w wysokich temperaturach (w warunkach ciągłej pracy do 250 °C, a dla krótkotrwałej do 300 °C) [200]. PEEK standardowo wykazuje krystaliczność w zakresie 20 – 40 %. Po zastosowaniu odpowiedniego modyfikatora, udział fazy krystalicznej może wzrosnąć do 50 – 60 % [117]. Omawiany materiał zachowuje doskonale właściwości mechaniczne w warunkach statycznych i dynamicznych. PEEK wykazuje odporność zmęczeniową w temperaturze pracy równej 120 °C. Posiada wyjątkową odporność na promieniowanie UV, gamma oraz rentgenowskie [1, 16]. Jego wybrane właściwości fizykochemiczne zostały przedstawione w tab. 6.

Jego innymi kluczowymi właściwościami jest odporność na smary, paliwa i powszechnie stosowane rozpuszczalniki chemiczne (z wyjątkiem silnych kwasów protonujących). Nie absorbuje wilgoci i jest materiałem niepalnym, osiągającym najwyższą klasę V0 w teście UL-94. Podczas palenia wydziela niewielką ilość dymu i innych toksycznych substancji [147]. Zaletą tego polimeru jest jego obojętność względem produktów spożywczych, dlatego został dopuszczony do kontaktu z tymi artykułami.

Tab. 6. Charakterystyczne właściwości fizykochemiczne PEEK [178, 181]

| | |
|------------------------------|-------------|
| Parametr | |
| Gęstość, g/cm ³ | 1,26 - 1,40 |
| Temperatura topnienia, °C | 334-350 |
| Temperatura zeszklenia, °C | 143 |
| Przewodnictwo cieplne, W/m·K | 0,25 |
| Ciepło właściwe, J/kg·K | 2160 |

Do wad PEEK zalicza się stosunkowo wysoka cena oraz skomplikowany proces wtryskowy, wymagający użycia wtryskarek mogących osiągać temperaturę cylindra równą 400 °C. Chłodzenie formy wtryskowej wymaga obecności specjalistycznych termostatów, które zapewniają stałą temperaturę w zakresie 170 – 200 °C. Jest to niezwykle istotne, ponieważ każda niezgodność parametrów może zmienić pożądaną semikrystaliczną strukturę PEEK i prowadzić do negatywnych zmian w jego właściwościach [200]. Z tego względu obecnie PEEK najczęściej stosuje się w branży druku 3D.

PEEK wykorzystuje się do otrzymywania pierścieni uszczelniających, podkładek oporowych, kół zębatych, tulei i łożysk. Detale te są używane w aplikacjach, narażonych na wysoką temperaturę, ciśnienie oraz agresywne chemikalia sprzyjające korozji [16, 117]. Przekładnie PEEK zastępują metalowe układy napędowe, umiejscowione w silnikach samochodowych, wykazując redukcję hałasu do 50 %. Wymiana elementów stali na PEEK, wpływa na obniżenie masy, co przekłada się na większą wydajność i mniejsze zużycie energii układu motoryzacyjnego [117].

PEEK jest także szeroko wykorzystywany w medycynie, dzięki czemu stał się skutecznym komponentem do wykonywania implantów ortopedycznych, stomatologicznych, kręgosłupa i czaszki [44, 91].

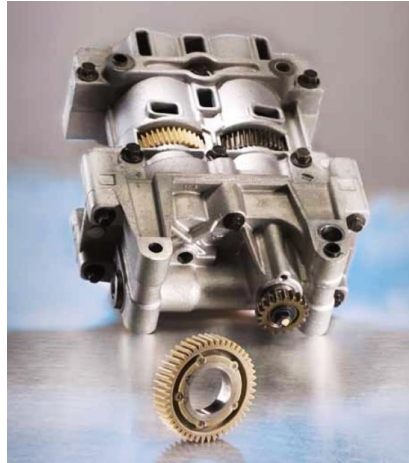
I.1.11. Badania kół zębatych otrzymywanych z polieteroeteroketonu (PEEK)

Hoskins i jego zespół [60] przeprowadzili testy przekładni, składającej się z koła napędowego ze stali typu C45 i koła napędzanego z polimeru PEEK. Testy trwałości układu napędowego były przeprowadzone w typowym zamkniętym obiegu mocy. W serii eksperymentów wytrzymałościowych prędkość obrotowa została ustalona na 1000 obr./min, natomiast moment obrotowy zmieniano w zakresie od 5 do 50 Nm. W suchobieżnych warunkach, gdzie moment obrotowy wynosił 15 Nm, zęby przekładni PEEK wykazały poważne uszkodzenia po wykonaniu $5,0 \cdot 10^4$ cykli. Zauważono, że już po wykonaniu 1000 cykli, widoczne były niewielkie zadrapania końcówek zębów PEEK. Po liczbie cykli równej

$3,0 \cdot 10^4$ zauważalne były uszkodzenia termiczne, charakteryzujące się utlenionym kolorem polimeru i pęknięciami na bocznej powierzchni zębów. Nabyte wady lokalizowały się głównie między średnicą toczną a stopą zęba. W dalszym etapie testu obserwowano postępujące uszkodzenia termiczne tych obszarów. Akumulacja ciepła doprowadziła do topienia się tworzywa. Ze względu na dużą prędkość poślizgu oraz dodatkowy moment histerezy, zjawisko to nastąpiło głównie w obszarze narażonym na największe obciążenia związane z tarciem powierzchni. Test został zakończony, kiedy pojawiły się pęknięcia między stopą zęba, a średnicą podziału ($5 \cdot 10^4$ cykli, 15 Nm). Aby zbadać większe obciążenia mocy i zniwelować tarcie między kołami, zastosowano modyfikację związaną z dodatkiem oleju stosowanego w lotnictwie.

W wariacie testu z występującym smarowaniem zewnętrznym, po osiągnięciu $1 \cdot 10^4$ cykli (15 Nm), koło zębate z PEEK wykazało niewielkie wżery pomiędzy średnicą podziału a wierzchołkiem zęba. Nie obserwowano śladów uszkodzeń termicznych. Modyfikacja badanego układu napędowego, o dodatkowe zewnętrzne smarowanie, zmieniła rodzaje awarii przekładni PEEK. W warunkach od 5 do 20 Nm obserwowano powstawanie wżerów na powierzchni bocznej zęba ($5 \cdot 10^4$ cykli). Natomiast złamanie zęba w rejonie jego stopy, następowało po przekroczeniu momentu obrotowego 30 Nm [60]. Podobny przebieg badań dla wykonanej przekładni wykonanej z mieszanych kół zębatych PEEK/stal przedstawiono w publikacji [89].

Firma Metaldyne inwestuje w badania skupiające się nad poszerzeniem ich autorskiej serii modułowych wałów wyrównowazających z tworzywa PEEK (nazwa handlowa Victrex), które zastąpiły metalowe koła zębate (rys. 14). Przedsiębiorstwo produkuje swoje wyroby dla silników benzynowych i napędowych, dla producentów samochodów takich jak Hyundai, Mitsubishi, Chryster i Nissan.



Rys. 14. Moduły wałków wyważających Metaldyne, wyposażone w koła zębate z polimeru PEEK [147]

Przeprowadzone przez nich testy laboratoryjne odbywające się w Centrum Technologii Stosowanej w Wielkiej Brytanii, pozwoliły na wykonanie charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej wałów w warunkach prędkości obrotowej do 6000 obr./min i momencie obrotowym do 40 Nm. Wymiana stalowego elementu wału zaowocowała jego 80 - procentową redukcją bezwładności oraz 70 - procentową utratą masy. Przełożyło się to na zmniejszenie zużycia energii w zakresie od 3 do 9 %. Zmiana wpłynęła także na zmniejszenie hałasu, wibracji i innych uciążliwych efektów, pojawiających się podczas pracy wału wyważającego (NVH, *ang. noise, vibration and harshness*). Udało się zredukować poziom hałasu o 3 dB. Modyfikacja modułu wału wyważającego, pomogła zniwelować drgania, które są nieodłącznym elementem pracy czterocylindrowego silnika, pracującego w temperaturze dochodzącej do ok. 155 °C [147].

Słoweńscy naukowcy [194] testowali przekładnię składającą się z koła napędowego ze stali 42CrMo4 (o chropowatości $R_a = 0,761 \mu\text{m}$) i koła napędzanego z polimeru PEEK. Za pomocą maszyny współrzędnościowej Wenzel LH 54 3D, zmierzono odchylenia otrzymanych kół od wzorcowego modelu. Oba koła zębate zostały zaklasyfikowane do 10 klasy jakości zgodnie z ISO 1328 [63]. Testy przekładni zostały wykonywane bez dodatkowego smarowania, przy założonej stałej prędkości 1600 obr./min i zmiennym momencie hamującym wynoszącym 0,8; 1,0 i 1,2 Nm. Oba koła zostały poddane symulacji numerycznej, za pomocą której określono naprężenia graniczne oraz naciski kontaktowe występujące w obciążonych detalach. Wyznaczono także rzeczywiste współczynniki kąta przyporu, które okazały się większe od wartości teoretycznych, co było spowodowane silnym ugięciem polimerowych zębów. Na podstawie eksperymentalnych badań określono, że w warunkach obciążenia równego

1,2 Nm, 90 % testowanych przekładni, uległo awarii po wykonaniu $4,62 \cdot 10^6$ cykli. Przy niższym momencie obrotowym 1,0 Nm granica tego samego wskaźnika żywotności par kół zębatych wynosiła $8,22 \cdot 10^6$ cykli. Natomiast najniższe obciążenie testowane na tym układzie spowodowało uszkodzenie przekładni po przepracowaniu $11,86 \cdot 10^6$ cykli. W każdym z przypadków, bezpośrednią przyczyną awarii było zużycie polimerowego koła PEEK, które pękało z powodu zmniejszonej grubości i zwiększonego naprężenia w okolicy stopy zęba [194]. Podczas trwania testów mierzono temperaturę powierzchni zębów, która w trakcie stabilnej pracy wynosiła ok. 45 – 55 °C. W porównaniu z układem przekładni, pracującym w identycznych warunkach, ale składającym się z dwóch polimerowych kół zębatych, zarejestrowano znacznie niższe temperatury. Wynikało to z wyższej przewodności cieplnej stali w porównaniu z polimerem, dzięki czemu wytworzone ciepło mogło zostać szybciej odprowadzone do otoczenia [194].

W porównaniu do wcześniej opisanych tworzyw POM i PA, materiał PEEK charakteryzuje się znacznie lepszymi parametrami wytrzymałościowymi i dużą odpornością termiczną. Jednak koszt jednostkowy surowca PEEK oraz wysokie wymagania przetwórcze często eliminują to tworzywo w dalszych zastosowaniach.

I.1.12. Wnioski z analizy literatury dotyczącej badań polimerowych kół zębatych

Analizując literaturę naukową jednoznacznie stwierdzono, że największa ilość opublikowanych artykułów skupia się nad testami przekładni polimerowych wykonanych z materiału POM. Wynika to z licznych zalet tego tworzywa, jakimi są dobre właściwości mechaniczne, stabilność wymiarowa, samosmarowność oraz stosunkowo niska cena tego polimeru. Jednak POM posiada zasadniczą wadę, tj. niską odporność termiczną, co eliminuje jego wykorzystanie w wysoko obciążonych przekładaniach zębatych. Przytoczone w niniejszej pracy publikacje wskazują, że już w warunkach prędkości ok. 1000 obr./min oraz momencie obrotowym 6 – 9 Nm, dochodziło do licznych awarii przekładni. Wynikało to rosnącej temperatury pracującej powierzchni kół zębatych, która zbliżała się do temperatury topienia tego materiału (ok. 160 °C). Temperatura ta jest parametrem fizykochemicznym, mało podatnym na modyfikację fizyczną. Na tej podstawie zdecydowano się na wyeliminowanie polimeru POM w badaniach podjętych w badawczej części tej pracy.

Kolejną grupą tworzyw szeroko wykorzystywanych w przemyśle maszynowym są poliamidy. Zalety przemawiające za wykorzystaniem ich w zastosowaniach trybologicznych to dobre właściwości mechaniczne, zmęczeniowe a także parametry fizykochemiczne, które

pozwalają na stosowanie PA w wysokich temperaturach. Z przytoczonych pozycji literaturowych wynika, że wybrane nienapełnione poliamidy były w stanie pracować przy podobnych obciążeniach (1000 obr./min; 10 Nm) jak materiał POM. Jednak w odróżnieniu od polioksymetylenów, temperatura topnienia PA mieści się w szerokim zakresie od 220 do 295 °C, a w przypadku PPA sięga do 335 °C. Daje to możliwość opracowywania nowych kompozytów tych materiałów, które pozwolą na zastosowanie ich w obciążonych przekładniach zębatych. Natomiast niepożądane właściwości charakterystyczne dla tej grupy tworzyw, takie jak duża absorpcja wody oraz stosunkowo wysoki współczynnik tarcia, są podatne na modyfikację na skutek odpowiednio dobranych napełniaczy i środków specjalnych.

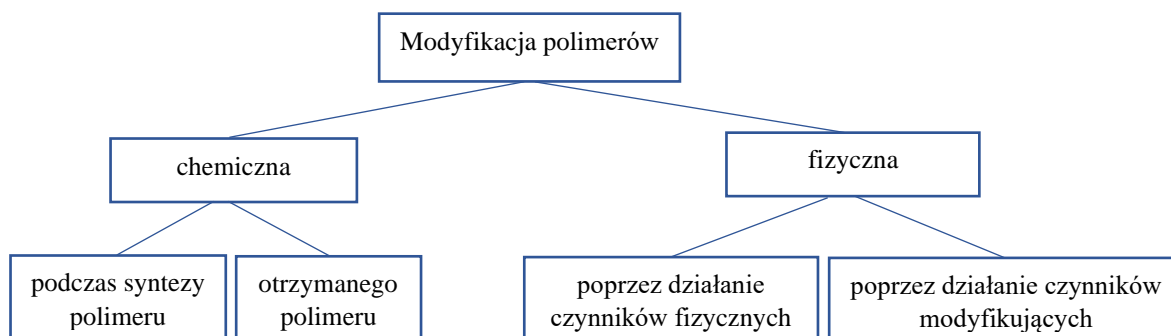
Na podstawie analizy wykonanego przeglądu literaturowego stwierdzono, że jest niewystarczająco dużo prac poświęconych testom eksperymentalnym przekładni kół zębatych z użyciem materiałów poliamidowych, ich kompozytów i nanokompozytów. Natomiast w wielu publikacjach można napotkać na inne metody badania odporności powierzchni na zużycie [97]. Wynika to z faktu, że mogą one dać wstępny pogląd na właściwości materiałów, przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów koniecznych do przeprowadzenia badań przekładni zębatej. Dzieje się tak ponieważ rozwój przemysłu wskazuje na coraz większe zapotrzebowanie kompozytowych elementów maszyn, które będą odporne na wysokie obciążenia i szeroki zakres temperatury otoczenia.

W literaturze można znaleźć dużo informacji na temat stosowania materiału PEEK, który charakteryzuje się najlepszymi właściwościami mechanicznymi, sposób grup omawianych w niniejszych rozdziałach. Jednak koszt rynkowy tego materiału, a przede wszystkim potrzeba zastosowania specjalnych wtryskarek, termostatów i innych urządzeń peryferyjnych, pracujących w wyższych zakresach temperatur zdecydowała o wykluczeniu tego tworzywa w dalszych badaniach. Należy podkreślić, że opracowanie nowych napędów jest zawsze uzależnione od ograniczeń czasowych i finansowych, do których jest dostosowana metodyka projektowanych przekładni.

I.2. Metody modyfikacji właściwości mechanicznych wytypowanych tworzyw termoplastycznych stosowanych do otrzymywania kół zębatych

W obecnym czasie, polimerowe przekładnie zębate nie spełniają wszystkich kryteriów wytrzymałościowych i zmęczeniowych, nałożonych na wysokoobciążone metalowe układy napędowe. Aby poprawić właściwości polimeru, stosuje się różnego typu napełniacze i inne

środki specjalistyczne. Jak przedstawiono na rys. 15, takie dodatki są wprowadzone do tworzyw sztucznych w procesie syntezy chemicznej lub na etapie ich fizycznego przetwórstwa. Pełnią one różne role, m.in.: wpływają na zmianę właściwości reologicznych, mechanicznych, trybologicznych i użytkowych polimerów [158].



Rys. 15. Rodzaje napełniaczy służących do modyfikacji polimerów [115]

Modyfikacja chemiczna tworzyw termoplastycznych opiera się na reakcji chemicznej, pozwalającej na zmianę składu chemicznego i właściwości polimeru. Proces ten może wystąpić np. w wyniku cyklizacji wewnątrzcząsteczkowej, podczas reakcji szczywania, utlenienia lub redukcji.

Natomiast, modyfikacja fizyczna tworzyw termoplastycznych polega na zmianie właściwości fizykochemicznych polimeru, poprzez wprowadzenie dodatkowych składników. Dzieje się tak, w wyniku wprowadzenia do układu modyfikatora, poprzez wykorzystanie czynników fizycznych takich jak energia cieplna, tarcie lub ultradźwięki. Dodatki poprawiające właściwości polimerów wykorzystywanych w przekładniach zębatych to głównie napełniacze włókniste, nanonapełniacze i środki smarne. Wprowadzanie zmian właściwości polimeru na drodze modyfikacji fizycznej jest procesem ekonomicznym, w porównaniu z kosztami wynikającymi z przeprowadzenia syntezy chemicznej [106].

I.2.1. Napełniacze włókniste

Wzmocnienie tworzyw sztucznych napełniaczami włóknistymi znacząco zwiększa ich wytrzymałość. Włókno szklane, aramidowe i węglowe są najczęściej preferowane jako wzmocnienie osnowy polimerowej w kompozytach. Są to napełniacze, które mają wysoki stosunek wytrzymałości do masy [130, 140]. Najistotniejszymi cechami stanowiącymi o wytrzymałości kompozytu napełnionego włóknem jest jego typ, ułamek objętościowy oraz jego orientacja w matrycy polimerowej. Procentowy udział włókien jest czynnikiem determinującym właściwości mechaniczne kompozytu. Z dostępnych na rynku tworzyw,

najpopularniejszy udział włókien waha się między 10, a 30 % obj., a maksymalna zawartość sięga do ok. 50 % obj. [157, 165]. Takie wzmocnienie stosuje się w celu podniesienia niskiego modułu sprężystości, właściwości termicznych i mechanicznych polimerów termoplastycznych. Zgodnie z literaturą, zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie w kompozytach wzmocnionych włóknami jest spowodowane głównie siłami międzyfazowymi, pomiędzy osnową a wprowadzonym napełniaczem. Natomiast za poprawę udarności odpowiadają mechanizmy wyrywania włókien z osnowy i ich odkształcenia powstające podczas uderzenia [188]. Ostateczna wytrzymałość i właściwości mechaniczne kompozytu są różne w zależności od kierunku ułożenia włókien. Jednak obserwuje się największą wytrzymałość kompozytu, kiedy orientacja ich ułożenia jest równoległa do przyłożonej siły [6].

Formowanie wtryskowe tworzyw termoplastycznych wzmocnianych krótkimi włóknami stanowi jeden z rodzajów kompozytów, w których kontrolowana jest koncentracja włókien wzmocniających, a nie dokładnie ich wymiary czy orientacja. Jeżeli kompozyt ma w pełni wykorzystać wytrzymałość materiału wzmocniającego, zbrojenie musi być w stanie przyjąć obciążenia bliskie granicy wytrzymałości. W przeciwnym razie kompozyt ulegnie zniszczeniu przy obciążeniu, które jest mniejsze od teoretycznych naprężeń, jakie włókna mogłyby wytrzymać. Dzieje się tak kiedy połączenie między napełniaczem a matrycą jest zbyt słabe, a pod wpływem przyłożonej siły włókna zostają wyrwane z matrycy [42]. Cięte włókna muszą mieć wystarczającą długość w celu efektywnego przenoszenia obciążenia i zahamowania wzrostu pęknięć, w przypadku konstrukcji wykonanej z kruchych matryc polimerowych [130]. Wadą materiałów wzmocnianych krótkim włóknem jest to, że podczas wtryskiwania, siły ścinające sprzyjają skracaniu długości tego napełniacza, co prowadzi do obniżenia końcowej wytrzymałości kompozytu.

I.2.2. Włókno szklane

Najczęściej wykorzystywane w technologii przetwórstwa tworzyw sztucznych włókno szklane (GF, *ang. glass fiber*) typu E, produkowane jest poprzez przedzenie mało alkalicznego stopu szkła zawierającego ditlenek krzemu, tritlenek glinu, tlenek magnezu, tritlenek boru i inne tlenki metali oraz fluoru [51]. Typ E chociaż charakteryzuje się niskim przewodnictwem i dobrą wytrzymałością na rozciąganie oraz ściskanie, ma także niską wytrzymałość zmęczeniową. Stwierdzono, że właściwości wytrzymałościowe typu E rosną wraz ze spadkiem średnicy włókien. Dla najczęściej spotykanego w przemyśle włókna o średnicy 10 μm parametr ten wynosi 1000 – 1400 MPa, wydłużenie przy zerwaniu jest równe ok. 1,5 – 3,5 %, natomiast

moduł Younga – 77 GPa [35]. Do zastosowań, w których wymagana jest jeszcze wyższa wytrzymałość na rozciąganie i zmęczenie spotyka się równolegle typy R i S (krzemiany magnezowo – glinowe) [140]. Do cech charakterystycznych włókna szklanego należy doskonała izolacja termiczna i elektryczna oraz odporność chemiczna [182]. Jego wadą jest problematyczna utylizacja po okresie użytkowania [130] oraz problemy z adhezją do niektórych matryc polimerowych. Aby zwiększyć przyczepność powierzchni włókna szklanego do niekompatybilnej matrycy polimerowej, pokrywa się je preparatami chemicznie czynnymi - silanami [160, 161]. Innym sposobem na zwiększenie adhezji między włóknem szklanym a osnową polimerową jest wprowadzenie do kompozycji polarnej grupy funkcyjnej przy pomocy np. bezwodnika maleinowego [119]. Prowadzi to do zwiększenia energii powierzchniowej polimeru, zapewniając poprawę jego właściwości międzyfazowych i mechanicznych [183].

Włókno szklane będące fazą wzmacniającą w kompozytach, można podzielić na dwie główne kategorie: włókna krótkie i długie (inaczej ciągłe) [159, 182]. Materiały wzmacniane włóknami ciągłymi i tkanymi często tworzą strukturę warstwową lub laminowaną [139]. Zastosowanie krótkiego włókna ma pewne ograniczenia w porównaniu z kompozytami wzmacnianymi długimi włóknami. Wynika to z właściwości mechanicznych, które zależą od długości i orientacji włókien w produkcie końcowym [6]. Zarówno włókna krótkie jak i długie są zwykle stosowane w operacjach wytłaczania lub formowania wtryskowego [139].

I.2.3. Włókno węglowe

Innym popularnym wzmocnieniem stosowanym w wysokosprawnych kompozytach polimerowych jest włókno węglowe (CF, *ang. carbon fiber*). Jest ono wytwarzane w wyniku kosztownej i skomplikowanej suchej destylacji poliakrylonitrylu (PAN) [7]. Kompozyty polimerowe wzmacniane włóknem węglowym mają wiele wymagających zastosowań, są wykorzystywane m.in. jako komponenty do łopat śmigłowców, części silników i satelitów. Wpływ na to ma dobry stosunek niskiej masy do wytrzymałości, twardości oraz przejrzystości dla promieniowania rentgenowskiego. Jak przedstawiono w tab. 7, włókna węglowe mają znacznie wyższy moduł Younga w porównaniu do wzmocnienia szklanego. Ich zastosowanie znacznie poprawia sztywność kompozytu [6, 73]. W odniesieniu do właściwości trybologicznych włókien szklanych, wzmocnienie węglowe charakteryzuje się wyższą odpornością na ścieranie oraz zużycie powierzchniowe [140]. Natomiast ze względu na wysoki koszt wytwarzania, stosowanie w kompozytach tylko węglowych wzmocnień często staje się

nieopłacalne [73, 191]. Cena tego napełniacza na rynku handlowym jest ok. 10 – 15 razy wyższa w porównaniu do znacznie łatwiej dostępnego włókna szklanego.

Tab. 7. Właściwości fizykomechaniczne włókna szklanego i węglowego. Opracowano na podstawie [6]

| Parametr | Jednostka | GF | CF |
|-----------------------------|-------------------|--------------|-------------|
| Gęstość | kg/m ³ | 1250 – 2500 | 1500 - 2100 |
| Wytrzymałość na rozciąganie | GPa | 0,483 - 4,58 | 0,6 - 3,9 |
| Moduł Younga | GPa | 35 – 86 | 37 - 784 |
| Odształcenie | % | 1,2 - 5,0 | 0,5- 1,8 |

I.2.4. Badania kół zębatach wykonanych z polimerów modyfikowanych przy pomocy włókien

Literatura naukowa opisuje liczne badania, poświęcone modyfikacjom polimerowej matrycy kół zębatach w wyniku dodania do niej włókien szklanych oraz węglowych. Pozycja [77] skupia się na omówieniu właściwości mechanicznych i zmęczeniowych przekładni ślimakowej wykonanej z modyfikowanego PA 6.6. Polimer ten wzmocniono włóknem szklanym w ilości 25 i 50 % wag. Badania zrealizowano w celu zmiany materiału, z którego jest wykonany element sterowania wspomaganie kierownicy w samochodach osobowych. Zgodnie z założeniami materiał musiał charakteryzować się dokładnością wymiarową, odpornością na zużycie, twardością, niską wartością wydzielanego hałasu i niewielkimi drganiami. Na podstawie badań stwierdzono, że średnia wartość naprężeń zginających części zębów dla materiału z zawartością 25 % GF wyniosła ok. 90 MPa. Opracowano także system pomiaru luzu i oceniono, że koła zębata ze wzmocnieniem z włókna szklanego (25 oraz 50 % wag.) wykazują wzrost luzów międzyzębnych po wykonaniu 20 tys. cykli. Po przekroczeniu 90 tys. cykli obserwowano wzrost ubytków o 11 ° dla materiału z 25 % GF. W tych samych warunkach badania, kąt dla materiału z 50 % GF zmienił się o ok. 6, 5 °. Wyniki zestawiono z kołami wykonanymi z żywicy o dużej lepkości, które wykazywały gwałtowny skok luzów już po ok. 1000 cykli. W tym przypadku stwierdzono pęknięcia na profilach zębów po ukończeniu 50 tys. cykli [77].

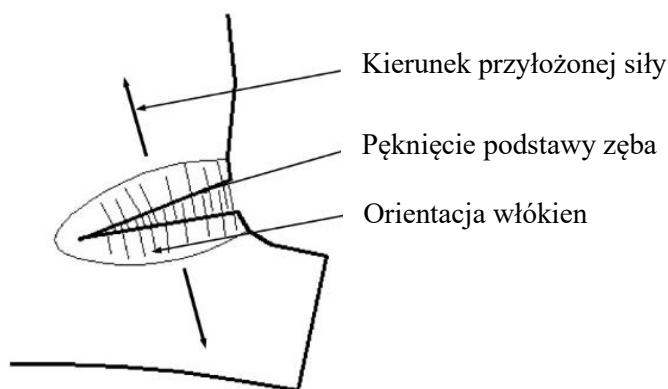
Para naukowców Senthilvelan oraz Gnanamoorthy, przeprowadziła analizę wydzielania hałasu podczas pracy kół wykonanych z PA 6.6 modyfikowanych włóknem szklanym lub węglowym w ilości 20 %. Testowane koła zostały zaprojektowane do współpracy z przekładnią ze stali nierdzewnej SS316. Badanie wykazało, że wzmocnione koła zębata PA 6.6 wytwarzają więcej hałasu niż niewzmocnione. Poziom natężenia dźwięku przekładni mierzono za pomocą

miernika dźwięku przymocowanego ok 50 mm od testowanej przekładni. Testy zostały przeprowadzone przy prędkości 1000 obr./min i w zakresie momentu obrotowego od 1,5 do 3 Nm, który odpowiada naprężeniu zginającemu od 15 do 30 MPa. Zakończenie testów nastąpiło w momencie uszkodzenia przekładni lub po ukończeniu przez nią 5 milionów cykli. Stwierdzono, że w włókna szklane i węglowe były zorientowane w kierunku prostopadłym względem przyłożonej siły. Obecność takiego ułożenia włókien opóźniła tempo narastania powierzchniowych pęknięć. Z uwagi na kruchy charakter włókien, ich równoległy kierunek ułożenia mogłyby przyspieszyć ścieranie współpracujących powierzchni zębów. Powodowałyby to przedostawanie się odłamków włókien do układu i zwiększenie zużycia przekładni. Na podstawie obserwacji kruchych przełomów stwierdzono, że włókno szklane wykazało znacznie większą adhezję do matrycy poliamidu 6.6 w porównaniu w włóknem węglowym [138]. Temperatura powierzchni wzmocnionych kół zębatych była niższa odpowiednio o około 5 i 15 °, w stosunku do nienapełnionego polimeru. Wynika to z większego przewodnictwa cieplnego wzmocnionych materiałów, które powoduje wydajniejsze odprowadzanie ciepła z układu napędowego. Koła testowane w warunkach coraz wyższych naprężeń zginających cechowały się wzrostem zużycia zębów. Prowadziło to do zwiększenia się luzu międzyzębnego, pomiędzy współpracującymi elementami i spowodowało wzrost wibracji oraz hałasu. Jednoznacznie stwierdzono, że wzmocnienie włóknem szklanym i węglowym matrycy polimerowej spowodowało wzrost wytrzymałości, odporności na ścieranie i przewodnictwa cieplnego testowanej przekładni [138].

Dwóch naukowców Jeng i Chen, prowadziło badania wpływu orientacji włókien węglowych na morfologię uszkodzenia formowanego wtryskowo kompozytu PEEK. Wykonano wtrysk kształtek w dwóch zmiennych temperaturach formy tj. 120 i 180 °C. Temperatura stopu w obu wariantach była równa około 400 °C. Przeprowadzono trzypunktowy test określający wytrzymałość na zginanie wg normy ASTM 790. Zaobserwowano, że mechanizm pękania, pojawiający się na skutek zginania, rozpoczyna się blisko łączenia granicy faz włókno / matryca oraz na końcach włókien. Wraz ze wzrostem obciążenia dochodziło do coraz większej ilości wyciągniętych włókien. Zaobserwowano również, że podniesienie temperatury formy wpłynęło na ilość fazy krystalicznej polimeru. Przełożyło się to na wzrost wytrzymałości na zginanie oraz nieoczekiwane obniżenie modułu sprężystości z 24,1 GPa (400/180) na 21,9 GPa (400/120). Było to niespodziewanym wynikiem, ponieważ oczekiwano na wzrost modułu sprężystości. Zmiana ta wynikała prawdopodobnie z wyższej orientacji włókien w wariantcie 400/120. Badanie skaningowej kalorymetrii różnicowej DSC wykazało, że w próbce 400/120 nastąpiła rekrytalizacja struktury kompozytu. W przypadku wariantu

400/180 nie zaobserwowano śladów rekrytalizacji. Świadczyło to o tym, że krystalizacja warstwy skórnej w temp. 180 °C zakończyła się wraz z 30-sekundowym chłodzeniem wypraski w gnieździe formy wtryskowej. Stopień krystalizacji dla warunków 400/180 wynosił 28 %, a dla 400/120 był równy 24 %. Stwierdzono, że ostatnia wartość uzyskana w niższej temperaturze formy została zawyżona prawdopodobnie z uwagi na późniejszą rekrytalizację próbek [66].

Senthilbelan wraz z grupą badawczą [137] stwierdzili, że 20 % dodatek włókna szklanego lub węglowego do PA 6.6, wpływa na zmniejszenie ilości pęknięć i innych poważnych deformacji, które są głównymi przyczynami awarii przekładni wykonanej z nienapełnionego poliamidu. Wykonano testy pary kół zębatych przy stałej prędkości 1000 obr./min i zmiennych momentach obrotowych w zakresie od 1,5 do 3 Nm. Ustalono, że skład materiałów i zastosowane obciążenie decydują o rodzaju mechanizmu zniszczenia. Orientacja włókien w wzmocnionych kołach zębatych była prostopadła do kierunku obciążenia, co przyczyniło się do zahamowania inicjacji pęknięć w obszarze zęba. Obecność włókien w kompozytach opóźniła czas awarii przekładni z powodu mostkowania pęknięć, co pokazano na rys. 16 [137].



Rys. 16. Pęknięcie zęba u podstawy w kole zębatym otrzymanym z PA 6.6, które zostało poddane próbom obciążeniowym. Opracowano na podstawie [137]

Zwrócono uwagę, że niska wytrzymałość międzyfazowa pomiędzy wzmocnieniem a osnową polimerową, spowodowała wzmożoną ilość wyrwanych włókien. Mimo to modyfikowane przekładnie wykazały dłuższą żywotność, w porównaniu z niewzmocnionymi kołami, ze względu na lepszą wytrzymałość mechaniczną. Stwierdzono, że interakcje między włóknami a osnową obejmowały koncentrację naprężeń oraz zmniejszenie ilości lokalnych pęknięć w kompozycie. Stwierdzono, że kompatybilność międzyfazowa włóknistej matrycy, decyduje o wytrzymałości zębów i ich odporności na zużycie. Modyfikacja włóknem węglowym matrycy PA 6.6 poprawiła jej odporność termiczną. W warunkach testowych,

w kompozycie z dodatkiem włókna węglowego nie zauważono deformacji kształtu zęba i warstwy stopionego materiału. Koła zębate wzmocnione włóknem szklanym wykazywały przy wyższych prędkościach zużycie w obszarze boków zębów. Stwierdzono, że lokalizacja przewężki i geometria zęba ma znaczny wpływ na orientację włókien. Równoległe ułożenie wzmocnienia w stosunku do kierunku ślizgu zapewnia niską odporność na zużycie testowanej przekładni [137].

Kolejna grupa naukowców [81] skupiła się na zbadaniu mechanizmu zużycia zęba w obecności smaru zewnętrznego. W tym teście zbadano także wpływ modyfikacji włókna węglowego na zużycie kół z materiału PEEK. Wykonano trzy kompozycje oparte na tworzywie PEEK z dodatkiem 15 % obj. różnych włókien węglowych typu PAN. Właściwości mechaniczne wzmocnienia różniły się między sobą wytrzymałością na rozciąganie i modułem sprężystości. Każde z przygotowanych polimerowych kół zębatych zestawiono z ich stalowym odpowiednikiem wykonanym z materiału S45C. Każdą z przekładni testowano w jednakowym teście zmęczeniowym przy naprężeniu zginającym 26 MPa, momencie obrotowym 2 Nm i prędkościach 200 obr./min. Wśród dwóch z trzech układów napędowych badanie wykazało, że głębokość zużycia zęba w kole polimerowym była niewielka i zależała od rodzaju zastosowanego włókna. W trakcie testów zauważono, że głębokość zużycia zęba jednej przekładni różni się od pozostałych. Wynikało to z rosnącej lepkości smaru, do którego podczas badań przemieściły się odłamki włókien węglowych. Aby potwierdzić tą tezę, wykonano test przekładni składającej się z nienapełnionego PEEK. Stwierdzono, że taki układ napędowy pracujący z zanieczyszczonym zewnętrznym smarem, znacznie szybciej ulega wyraźnemu zużyciu. Natomiast w teście ze świeżym smarem, ślady zużycia były znikome. Włókno CF, którego odłamki przemieściły się do smaru, miało znacznie wyższą temperaturę przetwórstwa, a jego struktura zawierała mniejszą ilość grup karboksylowych i hydroksylowych. Dało to powód do przypuszczenia, że jest mniej kompatybilne z matrycą PEEK, co przełożyło się na wyższe właściwości ścierne i większą chropowatość powierzchni bocznej kół zębatych. Na podstawie wyników badań stwierdzono, także że chropowatość powierzchni bocznej ma znaczny wpływ na szybkość zużycia przekładni [81].

Na podstawie przeglądu literaturowego stwierdzono, że wprowadzenie do osnowy polimerowej włóknistego wzmocnienia w znaczny sposób wpłynęło na wytrzymałość przekładni. Zgodnie z przytoczonymi informacjami, w przypadku modyfikowanych kół zębatych poprawie uległy właściwości wytrzymałościowe i przewodnictwo cieplne stosowanego materiału. Jak zauważono niezwykle ważnymi czynnikami są rodzaj stosowanego wzmocnienia, parametry procesu wtrysku kół zębatych oraz konstrukcja gniazda formy

wtryskowej. Nieodpowiedni dobór, może spowodować złą kompatybilizację włókien z osnową polimerową oraz zaburzyć ich pożądaną orientację w detalu. Wpływa to na skrócenie czasu eksploatacji oraz występowanie niespodziewanych awarii polimerowej przekładni zębatej.

I.2.5. Środki smarne

W układach mechanicznych tarcie i spowodowane tym zużycie elementów jest przyczyną awarii silników, przekładni i łożysk [7]. Powoduje to znaczną część strat energii i zwiększa erozję w systemach mechanicznych [82]. Jednym z rozwiązań wydłużenia czasu eksploatacji polimerowej przekładni zębatej jest zmniejszenie przyczepności pracujących względem siebie powierzchni poprzez wprowadzenie środka smarnego do współpracującego układu [12]. Samo smarowanie jest skutecznym sposobem na zmniejszenie tarcia poprzez wprowadzenie pomiędzy stykającymi się w ruchu względnym powierzchniami, filmu smarnego o niskiej wytrzymałości na ścinanie. Oprócz zmniejszenia tarcia oraz zużycia elementów, środki smarne mogą pomagać w odprowadzaniu ciepła z układu, spowolnieniu korozji a także amortyzacji kontaktu między elementami [108]. W technologii formowania wtryskowego środki smarne znajdują zastosowanie przy rozwiązaniu problemów związanych z odformowaniem wypraski lub słabym przepływem tworzywa w kanałach dolotowych i gnieździe formy wtryskowej. Smar wprowadza się do procesu przetwórczego w celu poprawy przepływu, a tym samym zmniejszenia lepkości uplastycznionego polimeru. Związki smarne mogą umożliwić wtryskiwanie polimerów przy obniżonej temperaturze stopu, co przekłada się na zmniejszenie kosztów produkcji [92].

Wyróżnia się dwa rodzaje środków smarujących w zależności od ich rozpuszczalności w matrycy polimerowej: smary wewnętrzne i zewnętrzne. Smary wewnętrzne są to substancje polarne, które rozpuszczają się w uplastycznionym polimerze, redukując tarcie pomiędzy makrocząsteczkami, co przekłada się na obniżenie lepkości polimeru [164]. Do tej grupy smarów należą m.in. dwusiarczek molibdenu (MoS_2) [13], politetrafluoroetylen (PTFE) [38] i grafit [101]. Czasami zewnętrzne smary stałe mogą obniżyć właściwości mechaniczne kompozytów. Dlatego najlepsze efekty synergiczne uzyskuje się zwykle pomiędzy smarami stałymi, które są przydatne do poprawy właściwości trybologicznych kompozytów polimerowych, ze środkami wzmacniającymi takimi jak włókna lub nanocząsteczki. W takim przypadku smary stałe mogą ułatwiać tworzenie się filmów transferowych, podczas gdy środki wzmacniające zwiększają odporność kompozytów na odkształcenia i wytrzymałość mechaniczną. Polimerowe przekładnie zębate mające w swym składzie smar wewnętrzny, są

często stosowane w sytuacjach, w których nie jest dozwolone wykorzystanie zewnętrznego smarowania, np. w maszynach do przetwarzania żywności oraz w urządzeniach biurowych (np. drukarkach) [59, 186].

W niektórych aplikacjach, w których są stosowane metaliczne lub polimerowe przekładnie zębate niedopuszczalne jest stosowanie płynnych smarów jako medium zmniejszającego tarcie. W takim przypadku jedynym wyborem jest zastosowanie kompozytów polimerowych, które zawierają wewnętrzne środki smarne. Ma to miejsce w przypadku przekładni pracujących w:

- ekstremalnych temperaturach, w których zachodzi krzepnięcie lub odparowanie płynnych smarów;
- kosmosie, gdzie występują niskie ciśnienia lub próżnia, co grozi odparowaniem oleju lub płynnego smaru;
- branżach, które wykluczają zagrożenie zanieczyszczenia olejem jak przemysł tekstylny, papierniczy, farmaceutyczny, lakiernie, przetwórstwo i pakowanie żywności, a także napojów;
- miejscach, gdzie smarowanie musiałoby być powtarzane bardzo często, co znacznie pogorszyłoby wydajność takiego układu z powodu licznych zatrzymań i uruchomień produkcji;
- urządzeniach trudnodostępnych, zainstalowanych w środowisku chemicznie niebezpiecznym, ściernym, korozyjnym lub narażonym na promieniowanie jądrowe;
- zastosowaniach, gdzie trybokomponent musi być bezobsługowy np. w sprzęcie AGD, zabawkach i wielu innych urządzeniach [117].

Drugą grupą są smary zewnętrzne, które są substancjami niepolarnymi lub słabo polarnymi, w związku z tym nie rozpuszczają się w uplastycznionym polimerze. Stosowane są jako cienka warstwa na metalowej powierzchni elementów formujących z powodu ich dobrej przyczepności do polimerów. Pozwala to na łatwiejsze odformowanie wypraski z gniazda formy [92, 164]. Do tego celu służą m.in. aerozole zawierające w swym składzie m.in. olej metylosilikonowy [199]. W przekładniach zębatych funkcją smaru zewnętrznego jest zmniejszenie tarcia i zużycia kół zębatych. W tym zastosowaniu środek smarny działa także jako chłodziwo odprowadzające temperaturę z układu [26]. Ważne jest, aby tego typu smar silnie przylegał do współpracujących powierzchni, w przeciwnym razie będzie łatwo ścieralny i skróci eksploatację pracującego układu [12].

Suchobieżne przekładnie polimerowe są ograniczone zarówno pod względem obciążenia i prędkości. Generowana podczas eksploatacji przekładni wysoka temperatura prowadzi do szybszego zużycia, a nawet stopienia zębów stosowanych kół. Rozwój materiałów

polimerowych zawierających wewnętrzny środek smalny lub zastosowanie zewnętrznych lubrykantów w układach zębatych spowodowało, że przekładnie polimerowe zaczęły pełnić rolę przekaźników mocy w coraz większej ilości zastosowań [59].

I.2.6. Badania kół zębatych w układach z dodatkowym środkiem smarnym

Jednym z najważniejszych dodatków poprawiających własności ślizgowe polimerów jest dwusiarczek molibdenu (MoS_2). Ma postać ciemnoniebieskiej lub czarnej substancji stałej, która jest śliska i tłusta w dotyku. Związek ten ma sześciokątną warstwową strukturę, a jego uziarnienie mieści się w zakresie 1 – 100 μm . Efekt poślizgowy wynika z jego blaszkowatej i krystalicznej budowy. W przypadku wystąpienia poślizgu warstwy krystaliczne MoS_2 ulegają łatwemu przesunięciu i orientują się równolegle do kierunku ruchu względnego, co zapewnia efekt smarujący [43, 82].

Jego wpływ na właściwości fizyko-mechaniczne i trybologiczne względem PA 6.6 barwionego sadzą (1 % wag.) przedstawiono w publikacji [12]. Do oceny właściwości ściernotarciowych kompozytów zastosowano test pin-on-disk. W badaniu tym, nieruchomy trzpień jest dociskany z odpowiednią siłą w stosunku do obracającej się z określoną prędkością tarczy. Podczas testu monitorowane jest tarcie, zużycie powierzchni i temperatura w punkcie styku. W przytoczonej pozycji literaturowej, do oceny właściwości ściernotarciowych kompozytów zastosowano krążek ze stali hartowanej, o chropowatości powierzchni 25 μm i twardości 62 HRC. Test pin-on-disk był wykonywany przy prędkościach 5, 7 i 9 m/s, i obciążeniach równych kolejno 50, 100 i 150 N. Odcinek badania wynosił od 1000 do 2000 m. MoS_2 utleniał się podczas ślizgania na granicy styku dwóch współpracujących powierzchni i prawdopodobnie przekształcał się w związki chemiczne takie jak MoO_3 , FeS , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Substancje te mogły zwiększać adhezję między filmem transferowym a powierzchnią współpracującą. Stwierdzono, że dodatek dwusiarczku molibdenu w zakresie od 0,5 do 3,0 % wag. do PA 6.6, wpłynął na parametry mechaniczne takie jak: udarność, wytrzymałość na rozciąganie, odkształcenie przy zerwaniu oraz moduł sprężystości Younga. Wartości te rosły liniowo wraz ze wzrostem zawartości MoS_2 w kompozycie. Zdolność MoS_2 do tworzenia się cienkiej i jednolitej warstwy transferowej na powierzchni próbek, przyczyniła się do zwiększenia odporności na zużycie kompozytów PA 6.6. Zauważono także zmniejszenie absorpcji wody z 2,70 % (0,5 % MoS_2) do 2,15 % (3,0 % MoS_2) [12].

Kolejnym spośród środków smarnych jest politetrafluoroetylen (PTFE, teflon). Jest to materiał, który może być stosowany jako podstawowy surowiec danego elementu lub jako

dodatek smarny. Materiał ten jest stosowany w środowisku, gdzie nie jest możliwe konwencjonalne, zewnętrzne smarowanie. PTFE posiada niewielki współczynnik tarcia, małą odporność na zużycie oraz niską twardość. Ma wysoką temperaturę topnienia i jest obojętny chemicznie. Jego mechanizm zmniejszenia tarcia polega na tworzeniu się na powierzchni odpowiednika filmu transferowego [41]. Badania wykazały, że zastosowanie tego materiału jako pojedynczego surowca nie jest pożądane, ponieważ w takim rozwiązaniu materiał ten łatwo przenosi się na powierzchnie z którymi się styka. Jego niskie tarcie jest spowodowane międzywarstwowym ścinaniem struktury, a nie słabą przyczepnością do przeciwległej powierzchni. Przyczynia się to do podstawiania pęknięć podpowierzchniowych na wyrobie PTFE, co skutkuje wysokimi wskaźnikami zużycia ($K \sim 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) przy przekroczeniu prędkości powyżej $\sim 10 \text{ mm/s}$. Wykazano, że wprowadzenie co najmniej 20 % wag. innego składnika do kompozytu z PTFE, powoduje stukrotne zmniejszenie szybkości zużycia [185]. W zastosowaniu jako środek smarny ma wyjątkowo niską energię powierzchniową, a jego film transferowy ma słabą przyczepność do powierzchni ciernej [36]. Naukowcy stwierdzili, że dodatek proszku PTFE do matrycy poliamidowej wpłynął na redukcję zużycia ślizgowego w teście pin-on-disc [10]. Do podobnych wniosków doszedł zespół badający kompozyty POM z dodatkiem 5 % mas. PTFE. Wyniki badań wskazywały, że zarówno współczynnik tarcia jak i jednostkowa szybkość zużycia powierzchni kompozytu, zmniejszyły się wraz z dodatkiem PTFE. Porównano także wpływ kierunku ułożenia włókien PTFE na parametry tarcia i zużycia powierzchni. Wykazano, że orientacja włókien PTFE w układzie równoległym do kierunku ślizgania zaprocentowała lepszymi właściwościami tribologicznymi próbki, co było związane z łatwiejszym tworzeniem się filmu transferowego na jej powierzchni ślizgowej [193].

Berer z zespołem [15] badali wpływ stosowania smaru na pojawiające się na powierzchni polimerowych rolek wżery o średnicy 5,9 mm. Wykonano dwa testy zmęczeniowe układu rolek PEEK toczących się bez i z dodatkiem smaru. Zastosowano smary syntetyczne na bazie soli litowych i wyższych kwasów tłuszczowych. Zaobserwowano, że wżery na rolkach PEEK były intensyfikowane przez smarowanie. Autorzy przeprowadzili analizę chemiczną przy pomocy spektroskopii Ramana i nie stwierdzili wpływu smaru na właściwości PEEK. Potwierdziło to fakt, że PEEK jest polimerem odpornym na prawie wszystkie typowe środki chemiczne. Na podstawie szczegółowej analizy mikroskopowej stwierdzono, że na powierzchni formowanych wtryskowo rolek występowały wstępne pęknięcia, które rozrastały się na skutek wywieranego przez smar ciśnienia. Dzięki dostosowaniu procesu formowania wtryskowego jakość powierzchni rolek PEEK została poprawiona, a trwałość rolek wzrosła 2 – 3 krotnie [15].

Zespół naukowców na czele z Song, w swoich testach porównywał zewnętrznie smarowane przekładnie zębate w kombinacjach PEEK/stal i stal/stal. Zwracano szczególną uwagę na grubość filmu oleju i ciśnienie pomiędzy kołami przekładni. Odnotowano, że grubość warstwy oleju była większa w przypadku układu polimer/stal. Również maksymalne ciśnienie strumienia oleju było niższe w przypadku przekładni polimer/stal. Autorzy zbadali różne formy elastohydrodynamicznego smarowania (EHL, *ang. Elastohydrodynamic lubrication*). Określono roboczy współczynnik tarcia oraz zbadano wpływ geometrii zębów na zużycie przekładni [26].

W publikacji [38] naukowcy zestawili wyniki tarcia i zużycia powierzchni kompozytów PA 6 i PA 6.6 z dodatkiem 20 % wag. PTFE. Niemodyfikowany PA 6 w trakcie 24 - godzinnego testu ring-on-disc charakteryzował się liniowym spadkiem szybkości właściwego zużycia od wartości $33,04 \cdot 10^{-6}$ do $0,78 \cdot 10^{-6}$. Dla próbek PA 6.6 w ciągu 4 godzin, wartość ta zmniejszyła się od $21,36 \cdot 10^{-6}$ do $0,85 \cdot 10^{-6}$. Stwierdzono, że dodatek 20 % wag. PTFE do PA 6 zmniejszył szybkość zużycia powierzchni o 30 % w porównaniu z czystym PA 6. Natomiast udział 20 % wag. PTFE w PA 6.6 zmniejszał szybkość zużycia właściwego o 10 % w stosunku do czystego polimeru. Kolejno wykonano analogiczny test z zastosowaniem zewnętrznego smaru, dla nienapełnionych poliamidów. Zaobserwowano, że typowy mechanizm zużycia zależał od zastosowanych parametrów obciążenia i samego składu materiału. Efekt samosmarowania PTFE wykazywał mniejszy wpływ w warunkach tarcia granicznego, w porównaniu z zewnętrznym środkiem smarnym. Wynikało to z dominującego efektu warstwy smaru wprowadzonej między elementy cierne. Stwierdzono, że rosnąca zawartość PTFE powodowała obniżenie wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie. Odporność na zużycie wzrastała wraz ze wzrostem zawartości PTFE w kompozycie. Minimalną zawartością PTFE, która pozwalała na zaobserwowanie spadku zużycia powierzchni było 7,5 % wag. w kompozycie z PA 6 [38].

Z analizy literatury jednoznacznie wynika, że wprowadzenie środka smarnego do kompozytu powoduje zmniejszenie zużycia powierzchni narażonej na tarcie oraz wydłużenie czasu eksploatacji przekładni zębatej wykonanej z modyfikowanych polimerów termoplastycznych. Jednak jego niekontrolowany dodatek może wpłynąć na pogorszenie właściwości mechanicznych końcowego kompozytu.

I.2.7. Nanonapełniacze

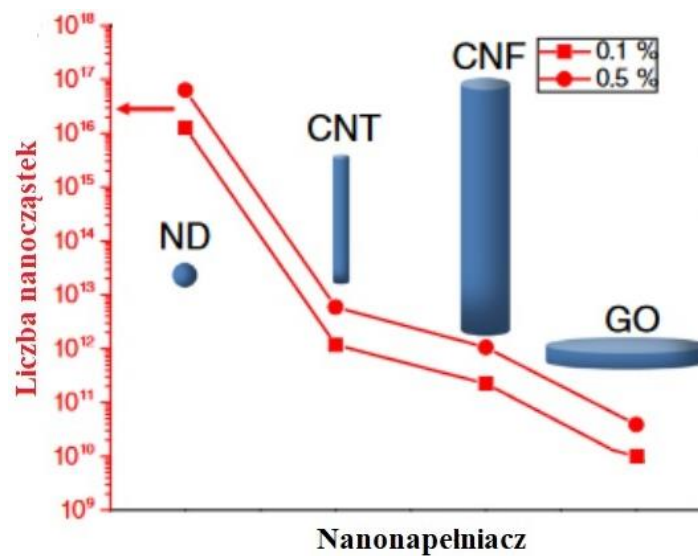
Nanonapełniacze, to dodatki kompozytowe, których co najmniej jeden wymiar mieści się w skali nano (10^{-9} m) [25]. Pomimo niewielkich rozmiarów wykazano, że ta grupa modyfikatorów, w zależności od zastosowanego stężenia, może znacząco wpłynąć na właściwości materiałów [7]. Rozmiar nanomateriału, ma duży wpływ na właściwości kompozytu, natomiast sama wielkość jego cząstek odpowiada za dyspersję w matrycy i rodzaj połączenia z polimerem [72]. Jest to niezwykle ważne, ponieważ jednorodna homogenizacja nanonapełniacza w osnowie polimerowej, przekłada się na stałe właściwości w całej masie kompozytu. Wynika to z tworzenia się dużej powierzchni międzyfazowej polimeru z nanonapełniaczem, która może prowadzić do powstania fizycznej trójwymiarowej fazy sieciowej kompozytu [72]. Zaletą nanonapełniaczy jest to, że dzięki wprowadzeniu do kompozytu ich niewielkiej ilości, zostaje zachowana stała gęstość materiału kompozytowego w odniesieniu do niemodyfikowanego polimeru [7]. Wraz z osnową polimerową, nanonapełniacze są dobierane tak, aby spełnić wymagania stawiane docelowemu wyrobowi [41]. Należy jednak pamiętać, że im większy stopień rozdrobnienia cząstek modyfikatora, tym wyższa jego cena, co przekłada się także na ostateczny koszt wytworzenia danego elementu.

Nanonapełniacze można sklasyfikować ze względu na charakter chemiczny, rodzaj struktury lub kształt cząsteczki. Jedną z grup tych materiałów, stosowanych do m.in. otrzymywania elementów konstrukcyjnych w branży motoryzacyjnej, są nanonapełniacze węglowe. Ze względu na kształt cząstek, do tej grupy zaliczyć można nanododatki:

- jednowymiarowe lub cylindryczne (np. nanorurki węglowe (CNT, *ang. Carbon nanotubes*) lub nanowłókna węglowe (CNF, *ang. Carbon nanotubes*);
- dwuwymiarowe (2D) (np. tlenek grafenu (GO, *ang. Grafen Oxygen*);
- sferyczne (3D) (np. nanodiamant (ND, *ang. Nanodiamonds*)) [8].

Mały rozmiar przestrzennej cząstki 3D przekłada się na większą liczbę nanocząsteczek w matrycy, w porównaniu z nanonapełniaczami 1D lub 2D, które mają co najmniej jeden wymiar niemieszczący się już w skali nanometrycznej. Na rys. 17 przedstawiono liczbę cząstek nanonapełniacza w osnowie polimerowej, która zależy ściśle od jego wymiarów i kształtu.

Wśród nanoczątek o porównywalnej wielkości, ale różnych kształtach, nanonapełniacze sferyczne (3D) maksymalizują powierzchnię styku w stosunku do jednostki objętości nanocząsteczki. Skutkuje to tym, że nanocząstki 3D mają najsilniejszy wpływ na właściwości polimeru [8, 103].



Rys. 17. Liczba cząstek nanonapełniacza w osnowie polimerowej, przy zawartości 0,1 i 0,5 % mas. i uwzględnieniu jego różnych wymiarów i kształtów (ND – nanodiamenty węglowe, CNT – nanorurki węglowe, CNF – nanowłókno węglowe, GO – tlenek grafenu) [103]

Zdolność nanonapełniaczy węglowych do poprawiania szerokiej gamy własności matrycy, skłoniła naukowców do przeprowadzania badań pod kątem ich wpływu na zachowanie polimerów i wytworzonych nanokompozytów. Do grupy nanonapełniaczy węglowych (CNM, *ang. Carbon nanomaterials*) zaliczany jest grafen, nanorurki węglowe, nanocząstki diamentu oraz fulereny. Charakteryzują się one wyższym stosunkiem powierzchni do objętości, dzięki czemu wykazują doskonałe wiązania międzycząsteczkowe z matrycą polimerową. Przekłada się to na znaczącą poprawę właściwości użytkowych modyfikowanych matryc polimerowych [71, 108, 165].

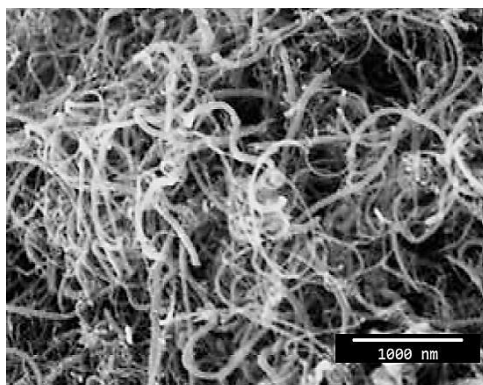
Grafen posiada wysoką wytrzymałość mechaniczną (1600 GPa), powierzchnię właściwą ($2600 \text{ m}^2/\text{g}$) oraz ruchliwość elektronów ($15000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$). Ten nanododatek oraz jego pochodne, są preferowane w modyfikacji tworzyw, ze względu na wysoką powierzchnię właściwą grafenu oraz jego silną chemiczną interakcje z polimerem [165].

Naukowcy w swych pracach stwierdzili, że wprowadzenie nanopłytek grafenu do matrycy polimerowej poprawiło jej przewodnictwo cieplne oraz elektryczne [76]. W badaniach kompozytów PEEK z dodatkiem nanopłytek grafenowych wykazano znaczną poprawę modułu Younga (o 25 %), wytrzymałości na rozciąganie (o 34 %) i wydłużenia przy zerwaniu (o 37 %) [184]. Do wad nanostruktur węglowych można zaliczyć to, że z powodu ich dużej energii powierzchniowej mają tendencję do aglomeracji. Z tej przyczyny, w celu osiągnięcia stabilnej

i jednorodnej dyspersji w matrycy, stosuje się m.in. nanostruktury funkcjonalizowane [108, 154].

Synergiczny efekt połączenia hybrydowego środka smarnego MoS₂ z nanonapełniaczami węglowymi może mieć wpływ na wzmocnienie poprawy właściwości trybologicznych i reologicznych końcowego kompozytu. Dzieje się tak ponieważ CNM mogą zwiększyć stabilność dyspersji cząstek dwusiarczku molibdenu. Song z zespołem udowodnili, że obecność tlenku grafenu wpływa na stabilność jednorodnej dyspersji MoS₂ w kompozycie, którego osnową polimerową jest PEEK [151]. Powierzchnia nanonapełniacza węglowego jest silnie pokryta cząsteczkami MoS₂, co zapobiega aglomeracjom mineralnego środka smarnego. Ma to znaczący wpływ na zmniejszenie parametrów tarcia i zużycia testowanych próbek [17].

Na szczególną uwagę zasługują nanorurki węglowe (CNT, *ang. Carbon nanotube*), których znaczny stosunek długości do średnicy oraz duża elastyczność, przyczyniły się do zastosowania ich jako smary stałe lub nanododatki środków smarnych, używane w celu poprawy własności tribologicznych kompozytów [7]. Nanorurki węglowe mają postać bezszwowych pustych rurek składających się ze zwiniętych arkuszy grafenu, co przedstawiono na rys. 18. Pojedynczy arkusz tworzy jednościenne nanorurkę węglową (SWCNT, *ang. Single walled carbon nanotube*), podczas gdy wiele koncentrycznych zwiniętych arkuszy tworzy wielościenne nanorurki węglowe (MWCNT, *ang. Multiwalled carbon nanotube*). Wewnętrzna średnica nanorurek SWCNT może dochodzić do 0,4 nm, natomiast zewnętrzna osiągać może do 100 nm. Przy pomocy transmisyjnego mikroskopu elektronowego eksperymentalnie stwierdzono, że wartość modułu sprężystości CNT, może wynosić do 1,8 TPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie do 110 GPa. Ich przewodność elektryczna dochodzi do 10⁶ S/m, a cieplna do 3000 W/m·K [153]. Te właściwości wraz z unikalną geometrią nanorurek węglowych, czynią z nich idealne nanowzmocnienie dla kompozytów polimerowych [104].



Rys. 18. Wielościenne nanorurki węglowe. Zdjęcie wykonane przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego [195]

Naukowcy w swych badaniach opisują, że dodatek CNT podczas procesu wtrysku mieszaniny polipropylenu (PP) i polietylenu (PE), spowodował wzrost przewodnictwa cieplnego w równoległym i prostopadłym kierunku, w odniesieniu do przepływu uplastycznionego polimeru. Natomiast nie zaobserwowano zmian tej właściwości w kierunku grubości wypraski. Wskazywało to na duży potencjał wykorzystania struktur CNT o zmiennej strukturze wielowarstwowej w aplikacjach elektronicznych [187].

Interesujące badania nad dodatkiem różnego stężenia CNT do osnowy PEEK przeprowadził Nie [107]. Nanokompozyty z dodatkiem CNT w ilości od 1 do 5 % przygotowano w procesie wytaczania. Stwierdzono, że włączenie CNT do polimeru prowadzi do znacznej poprawy twardości kompozytu. W porównaniu do czystego PEEK, tarcie względem powierzchni stali uległo zmniejszeniu do poziomu 0,15 – 0,45. Mogło to być spowodowane smarowalnością CNT lub efektem toczenia się nanorurek w strefie styku [107].

W kolejnej pracy przygotowano kompozyt PA 6 zawierający 1 % wag. wielościennych nanorurek węglowych (średnica 50 – 80 nm; długość 5 – 20 μm). Wprowadzenie do matrycy CNT spowodowało wzrost wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do niemodyfikowanego PA 6 z 62,6 do 72,2 MPa. Natomiast odkształcenie nieznacznie spadło z 162 % (PA 6) do 118 % (kompozyt PA 6-CNT). Było to spowodowane tym, że wprowadzenie CNT do struktury kompozytu wpłynęło na ograniczenie ruchu łańcuchów poliamidu. Dodatek CNT zmniejszył absorpcję wody z 1,35 do 0,98 %. Wynikało to z faktu, że poziom krystalizacji kompozytu wzrósł, przez co woda w mniejszym stopniu dyfundowała w głąb polimerowej matrycy. Określono zmienność współczynnika tarcia PA 6 w warunkach suchych i ze smarowaniem wodnym. W obu warunkach pracy kompozyt PA 6 charakteryzował się niższym tarcie. W warunkach suchych dla czystego PA 6 współczynnik tarcia wynosił od 0,35 do 0,65 (przy sile 20 – 50 N). Natomiast w przypadku kompozytu zakres ten wynosił od 0,25 do 0,6.

Z powyższych wyników można wnioskować, że CNT były skutecznym wzmocnieniem dla PA 6 [102].

Nanocząstki diamentów (ND, *ang. Nanodiamonds*) charakteryzują się kulistym kształtem o średnicy ok. 5 nm. Ich wysoka reaktywność względem grup zawierających tlen (takich jak karboksylowa, hydroksylowa, ketonowa lub eterowa), ułatwia ich przyłączenie do powierzchni ND. Ta właściwość nie występuje w przypadku innych nanonapełniaczy takich jak CNT czy grafen. Pozwana ona na elastyczną funkcjonalizację powierzchni przy użyciu różnych modyfikatorów, które będą później łączyć się z docelowym polimerem za pomocą silnych wiązań chemicznych. Ponadto ND mają wysoką wytrzymałość mechaniczną, twardość (60 – 140 GPa), wysoką przewodność cieplną (do 2200W/m·K) i odporność na ścieranie. Są dobrze znane ze swoich doskonałych właściwości samosmarujących i biokompatybilności [70].

W publikacji [71] grupa naukowców przeprowadziła badania modyfikacji PA 6 za pomocą dwóch typów nanodiamentów, wyposażonych w grupę karboksylową lub diaminową. Właściwości ścierne próbek testowano przy pomocy trybometru, zgodnie z normą ASTM G99. Do badania wykorzystano tarczę oporową ze stali nierdzewnej o twardości 64 HRC i chropowatości 0,4 μm . Parametry ślizgu to: obciążenie 20, 40 i 80 N, prędkość 0,26 m/s, odległość 2000 m. Przy dodatku 1 % wag. ND z grupą karboksylową, właściwy wskaźnik zużycia zmniejszył się z $9,7 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ dla czystego PA 6, do $6,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Dozowanie 0,25 % wag. tego rodzaju nanodiamentów spowodowało wzrost modułu Younga i wytrzymałości na rozciąganie. Na skutek oderwanych cząsteczek ND zmniejszyła się powierzchnia styku między metalem a badanymi próbkami. Udowodniono jednak, że aminofunkcjonalizowane nanodiamenty w jeszcze lepszym stopniu poprawiły wyżej omówione właściwości. W tym przypadku warstwa transferowa na powierzchni styku współpracujących materiałów charakteryzowała się mniejszą ziarnistością. Prowadziło to do wydajniejszego odprowadzenia ciepła z kompozytu [71].

Inną grupą nanonapełniaczy węglowych, które mają zastosowanie w elementach maszyn są fulereny. Najpopularniejszy z nich fullerene C60, jest monodispersyjnym nanonapełniaczem. Tworzy pustą w środku bryłę, składającą się z 60 atomów węgla skupionych w naprzemiennie ułożone sześć- i pięciokąty. Fulereny mają własności nadprzewodzące i półprzewodnikowe. Rosyjscy naukowcy Pikhurov i Zuev [121] zbadali kompozyty poliamidu PA 6, pod kątem wpływu fulerenu C60 (o czystości 99,9 %) i sadzy fulerenu (zawierającej ok. 10,5 % fulerenu) w zakresie od 0,01 do 1,00 % wag. Zastosowana sadza fulerenu to ultradispersyjny węgiel o średnicy cząstek 0,5 – 2,0 μm . Obrane kompozycje przygotowano w wyniku polimeryzacji *in situ* oraz poprzez wytłaczanie mieszające. Badania poślizgu materiałów

wykonano przy pomocy stalowego krążka o twardości 58 HRC i chropowatości 0,11 μm . Stwierdzono, że w okresie docierania na powierzchni polimerów tworzą się nierówności, które zanikają w kolejnym etapie testu. Prowadziło to do obniżenia wartości współczynnika tarcia. Było to typowe zachowanie się charakterystyki tarcia dla materiałów polimerowych. Przygotowany na wylączarce ślimakowej, kompozyt PA 6 z dodatkiem 0,01 % wag. fulerenu, miał wyższy współczynnik tarcia niż jego odpowiednik otrzymany w wyniku polimeryzacji in situ. Mogło to wynikać z niższego modułu Younga w kompozycie przygotowanym poprzez fizyczną drogę modyfikacji. Najniższy współczynnik tarcia obserwowano dla kompozytu zawierającego 1 % wag. C60. Według naukowców przyczyną poprawy właściwości tribologicznych, był wzrost fazy krystalicznej w kompozycie wynikający z dodatku fulerenu [121].

Podsumowując, zastosowanie nanonapełniaczy w nanokompozytach może w znaczący sposób wpłynąć na poprawę końcowych właściwości mechanicznych takich jak wytrzymałość na rozciąganie i twardość, a także zmniejszyć zużycie powierzchniowe oraz wydłużyć czas eksploatacji końcowego wyrobu. Na podstawie powyższych przykładów można stwierdzić, że nanonapełniacze węglowe mogą pełnić rolę wielofunkcyjnego dodatku do materiału polimerowego. Dodatek pojedynczego nanonapełniacza może wielotorowo wpłynąć na parametry polimeru, przez co jednocześnie zmienić jego właściwości samosmarujące, przewodnictwo cieplne oraz wzmocnienie matrycy polimerowej pod kątem wytrzymałości mechanicznej.

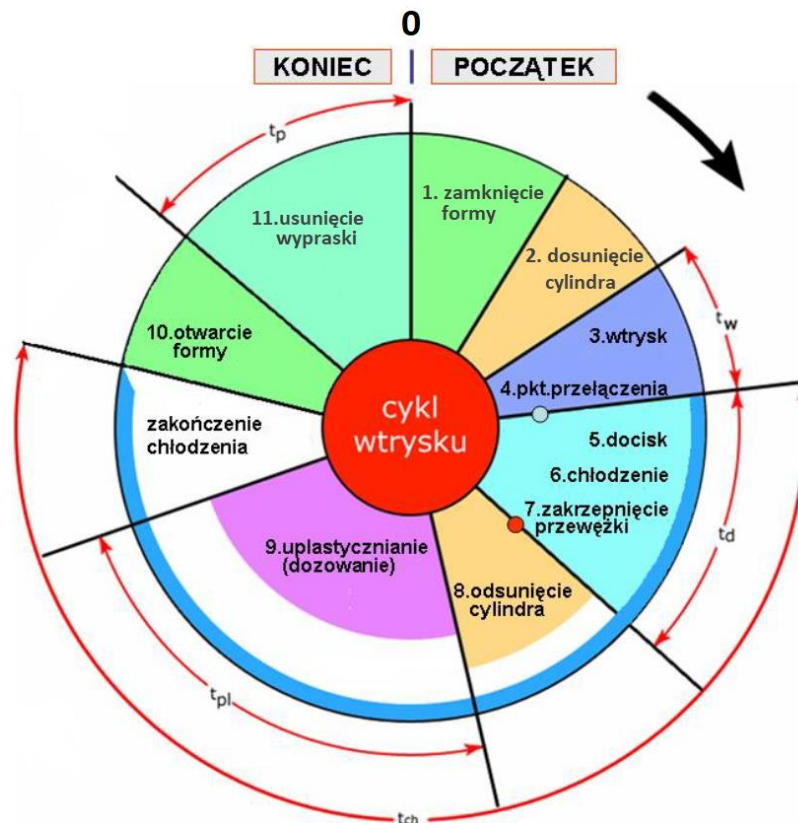
I.3. Charakterystyka technologii formowania wtryskowego jako główna metoda otrzymywania polimerowych kół zębatych

Formowanie wtryskowe tworzyw sztucznych jest jedną z najpopularniejszych metod przetwórstwa termoplastycznych materiałów polimerowych. Za pomocą tej technologii produkowane jest ok. 33 % wszystkich wyrobów polimerowych. Szerokie rozpowszechnienie grupy termoplastów przełożyło się na znaczny wzrost znaczenia branży przetwórstwa tworzyw sztucznych w gospodarce. Największymi zaletami tej wieloseryjnej technologii są wysoka powtarzalność parametrów wyprasek, rozumiana pod kątem cech geometrycznych oraz właściwości mechanicznych [46, 116]. Z tego względu, technologię formowania wtryskowego stosuje się m.in. podczas produkcji konstrukcyjnych części samochodów, a także innych elementów cechujących się wysoką jakością wykonania [150].

Wtryskiwanie polega na stopieniu tworzywa do jego temperatury topnienia w układzie uplastyczniającym, a następnie za pomocą wywieranego ciśnienia umieszczeniu go w gnieździe formującym. Proces ten umożliwiają urządzenia zwane wtryskarkami [24].

Technologia formowania wtryskowego jest procesem cyklicznym, co oznacza, że następują po sobie fazy, zamykające się w pełen cykl przetwórczy, co zostało przedstawione na rys. 19:

- faza zamknięcia formy (z określoną siłą zwarcia część ruchoma formy wtryskowej zostaje ściśle dosunięta do części nieruchomej);
- dojazd układu uplastyczniającego do tulei wtryskowej;
- faza wtrysku (faza szybkiego wypełnienia gniazda formy wtryskowej w 95 – 98 % objętości, przy pomocy ciśnienia wytworzonego w wyniku ruchu tłokowego ślimaka, faza ta kończy się tzw. punktem przełączenia);
- faza docisku (jest to uzupełnienie strat w objętości tworzywa, wynikającego ze skurczu objętościowego wypraski, spowodowanego chłodzeniem materiału; faza kończy się w momencie zastygnięcia drogi przepływu, tzw. przewężki);
- faza chłodzenia (rozpoczyna się w trakcie fazy docisku a kończy, kiedy temperatura wypraski osiągnie wartość, w której jest możliwe jej usunięcie z gniazda formy wtryskowej);
- faza dozowania (materiał w postaci granulatu jest podawany z leja zasypowego do ogrzewanego cylindra, tam uplastycznia się do zadanej temperatury i zostaje przemieszczony przed czoło ślimaka w wyniku jego ruchu obrotowego);
- faza otwarcia formy (zestalona wypraska zostaje usunięta z formy) [24, 126].



Rys. 19. Zestawienie czasów trwania poszczególnych etapów cyklu wtryskiwania (t_w – czas wtrysku; t_d – czas docisku; t_{pl} – czas plastyfikacji; t_{ch} – czas chłodzenia; t_p – czas przerwy) [167]

I.3.1. Czynniki wpływające na parametry wytrzymałościowe oraz użytkowe elementów maszyn wykonanych z materiałów polimerowych

Na ostateczne właściwości wizualne, mechaniczne i użytkowe wyrobu wykonanego przy pomocy formowania wtryskowego odpowiadają liczne zależności, które ogólnie dzielą się na czynniki materiałowe, procesowe i konstrukcyjne. Czynniki materiałowe zależą ściśle od danego tworzywa i dla wybranych polimerów zostały omówione w rozdziale pierwszym. Czynniki procesowe zależą od paramentów procesu wtrysku. Natomiast konstrukcyjne od projektu formy wtryskowej i detalu.

I.3.1.1. Czynniki procesowe

Istnieje ścisła grupa parametrów, której nieprzestrzeganie prowadzi do pogorszenia jakości wypraski [172]. Do tych czynników należy temperatura stopu i formy, ciśnienie i prędkość wtrysku, ciśnienie i czas docisku, czas plastyfikacji oraz czas chłodzenia.

Temperatura stopu tworzywa podczas fazy wtrysku, jest jednym z kluczowych parametrów dla formowanych wyrobów. Niższa temperatura może spowodować gorszą płynność materiału.

Efektem tego są niedolane fragmenty i widoczne linie łączenia, pogarszające walory estetyczne, a także końcowe właściwości mechaniczne wypraski. Stop polimeru o zbyt wysokiej temperaturze, powoduje powierzchniowe uwidocznienie włókna, zmianę koloru oraz degradację materiału. Podniesienie temperatury w granicach dopuszczalnych przez producenta, powoduje obniżenie lepkości materiału, co jest korzystnym zjawiskiem dla wypełnienia gniazda formy [172].

Ciśnienie wtrysku odnosi się do nacisku na czole ślimaka, ma na celu wypchnięcie stopu do gniazda formy i zagęszczenie w nim materiału. Zbyt duże ciśnienie wtrysku powoduje powstawanie wypływek, zbyt małe jest przyczyną niedolewów. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga rosną liniowo wraz ze wzrostem ciśnienia wtrysku [172].

Wtrysk tworzywa powinien być wykonany z możliwie najwyższą prędkością. Zapewnia to lepszą jakość powierzchni, mniejsze linie łączenia oraz zwiększenie możliwości docisku przy końcu drogi płynięcia [125]. Zbyt duża prędkość wtrysku powoduje wzrost naprężeń ścinających oraz tarcia, co skutkuje wydzielaniem się większej ilości ciepła. Może to powodować przypalenia detalu na końcu drogi płynięcia materiału. W przypadku tworzyw z dodatkiem włókien, zbyt duże naprężenia ścinające powodują ich łamanie się i utratę wzmacniających właściwości mechanicznych. Wraz ze wzrostem prędkości stopu skraca się czas napełnienia, zwiększa się wskaźnik szybkości płynięcia, a zmniejsza lepkość. Natomiast zastosowanie zbyt małej prędkości powoduje zwiększenie lepkości stopu, co przekłada się na przymus stosowania wyższych ciśnień wtrysku [172]. Szybki wtrysk wymaga zastosowania odpowiednich odpowietrzeń w gnieździe formy. Brak lub zbyt małe odpowietrzenia objawiają się przypaleniami, na skutek działania sprężonego powietrza. Sama głębokość odpowietrzeń zależy m.in. od współczynnika szybkości płynięcia tworzywa. Podczas etapu czasu docisku wypraska schładzana jest do stanu kurczliwego. Faza ta ma duże znaczenie w sprawie poprawy gęstości próbki, zmniejszenia skurczu i innych defektów powierzchni. W przypadku tworzyw semikrystalicznych, w których występuje względnie duży skurcz, stosuje się długi docisk o wartościach w zakresie ok. 50 – 100 MPa. Natomiast dla materiałów amorficznych jest to ciśnienie w zakresie 25 – 50 MPa. Dla obu przypadków czas docisku wyznacza się metodą wagową lub z wykresu ciśnienia w formie [172].

Czas chłodzenia rośnie proporcjonalnie do kwadratu grubości ścianki wyrobu, a maleje wraz ze wzrostem temperatury odformowanej wypraski. Minimalny czas chłodzenia zależy od efektywnej dyfuzyjności termicznej tworzywa. W przypadku termoplastów amorficznych wymagane jest schłodzenie detalu poniżej temperatury zeszklenia. Wypraski tworzyw

semikrystalicznych mogą być odformowane w wysokich temperaturach, ponieważ nie ma to wpływu na ich parametry mechaniczne [125].

Temperatura formy dla tworzyw semikrystalicznych musi być wyższa od temperatury zeszklenia (T_g). Jej zbyt niska wartość uniemożliwia odpowiednią krystalizację, co wpływa na obniżenie mechanicznych właściwości wypraski. W przypadku tworzyw amorficznych może wystąpić zamrożenie naprężeń wewnątrz detalu, co w dalszej eksploatacji będzie objawiało się jego przyspieszoną korozją naprężeniową. Wyższa temperatura formy poprawia płynięcie uplastycznionego tworzywa w gnieździe i skraca czas całkowitego cyklu, ale niestety zwiększa skurcz. Wyższe temperatury formy wymagają zmian w konstrukcji wyrobu. Stosuje się odpowiednie kąty zbieżności ułatwiające odformowanie detali. Dotyczy to w szczególności wyrobów uźebrowanych (amorficzne ok. $1,5 - 3,0^\circ$, semikrystaliczne ok. $0,5 - 3,0^\circ$).

Czas dozowania zależy od geometrii i profilu temperaturowego ślimaka, jego prędkości obrotowej i przeciwcisnienia, a także dawki tworzywa każdorazowo wtryskiwanej do gniazda formy. Wyższe obroty ślimaka przekładają się na krótszy czas pobierania tworzywa, ale równocześnie wpływają na wzrost negatywnych naprężeń ścinających działających na uplastyczniony polimer. Przeciwcisnienie, czyli inaczej ciśnienie spiętrzania ma na celu pełne odpowietrzenie uplastycznionego tworzywa.

Doza wtryskowa zależy od rodzaju tworzywa i średnicy ślimaka (D), dla amorficznych stosuje się wartość ok. $1 - 3 D$ dla semikrystalicznych ok. $1 - 2 D$. Zbyt duża doza może przyczynić się do wystąpienia w wyprasce zjawiska dekompresji gazów [125].

Punkt przełączenia wtrysku na docisk, ustala się metodą niedolewów. Przy początkowym braku ciśnienia docisku, przesuwa się punkt przełączenia faz i zwiększa stopniowo dozę materiału aż do ok. $95 - 98\%$ wypełnienia. Taki proces pozwala na sprawdzenie czy gniazdo wypełnia się równomiernie oraz wskazuje miejsca, w którym występują linie łączenia i pułapki powietrza.

W publikacjach naukowych zostały opisane konsekwencje wynikające z luźnego stosowania się do wytycznych przetwórstwa, które znacznie pogarszają właściwości formowanych wtryskowo wyrobów. Grupa badaczy na czele z Hasl [56], zbadała nośność kół zębatych formowanych wtryskowo z POM w warunkach smarowania olejem. Zaobserwowali uszkodzenia zęba kół zębatych, z powodu występujących jam powietrznych. Stwierdzono, że brak świadomości wpływu parametrów formowania wtryskowego na ukryte wady kół zębatych poważnie ograniczają wielkoseryjną produkcję przekładni polimerowych. W celu eliminacji wadliwych kół do badań, zastosowano rentgenowską tomografię komputerową. Występujące jamy powietrzna obniżały trwałość zmęczeniową zębów, co potwierdziły przeprowadzane testy

zmęczeniowe przekładni [56]. Zehua Lu mierząc się z tym samym problemem stwierdziła, że trwałość zmęczeniowa powierzchni bocznej zęba POM jest znacznie zaburzona przez występujące jamy powietrzne powstające podczas wtrysku. W swoich badaniach stwierdziła, że niewielkie jamy powietrzne usytuowane poniżej stopy zęba nie wpływają na jego nośność, jednak ryzyko to gwałtownie wzrasta wraz z rozmiarem tych pustych przestrzeni. Wynika z tego, że proces formowania wtryskowego powinien być dokładnie kontrolowany, aby uniknąć ryzyku wcześniejszej awarii przekładni [90].

I.3.2 Czynniki wpływające na wady konstrukcyjne i deformacje kół zębatych otrzymywanych z materiałów polimerowych

Technologia wtrysku ma wiele zalet, które pozwalają na jej zastosowanie do otrzymywania precyzyjnych detali w produkcji seryjnej. Wadą tej technologii jest to, że detale kurczą się w trakcie chłodzenia, w gnieździe formy wtryskowej (skurcz pierwotny) oraz już po ich usunięciu (skurcz wtórny). Jest to podstawowa cecha polimerów termoplastycznych, która w celu zmniejszenia odchyłek geometrycznych wymusza kontrolę odpowiednich parametrów procesu wtrysku [150].

I.3.2.1. Stabilność wymiarowa wyrobu po procesie wtryskiwania

Skurcz przetwórczy jest skutkiem zmian objętości i kształtu detalu, które zachodzą w trakcie jego chłodzenia. Skurcz definiuje się jako różnicę wyrażoną w procentach, między wymiarami gniazda formy a rzeczywistym wyrobem. Badanie skurczu wyprasek przeprowadza się najczęściej od 16 do 24 godzin po zakończeniu cyklu przetwórczego, podczas którego zachodzi skurcz pierwotny. W zależności od warunków przechowywania, wymiary wyprasek mogą ulegać zmianom do ok. 1000 godzin po zakończeniu wtrysku. W tym czasie mówi się o skurczu wtórnym. Ma on miejsce w szczególności dla materiałów semikrystalicznych, których temperatura zeszklenia jest niższa od temperatury roboczej detalu. W tym przypadku skurcz jest spowodowany powolnym zmniejszaniem się objętości materiału polimerowego, już po usunięciu detalu z formy wtryskowej. Wynika to z właściwości rozszerzalności cieplnej termoplastów [78, 190].

Skurcz i deformacje zależą od właściwości termicznych materiału polimerowego, jego ściśliwości, geometrii wypraski, a także konstrukcji formy wtryskowej. Parametry przetwórstwa takie jak temperatura, ciśnienie i czas, odgrywają istotną rolę w nadzorowaniu skurczu. Obejmują one odpowiednio kontrolę: temperatury stopu oraz formy, ciśnienia

i prędkości wtrysku, ciśnienia docisku, czasu i temperatury chłodzenia formy [150]. Do opisu zależności zjawisk zachodzących podczas skurczu wykorzystuje się wykresy zależności między ciśnieniem, objętością a temperaturą [79].

Struktura polimerów wpływa na zmianę objętości właściwej materiału podczas przechodzenia ze stanu uplastycznionego do stałego. Jest to konsekwencja właściwości rozszerzalności cieplnej polimerów [78]. Objętość materiału wzrasta na skutek działania wysokiej temperatury i ciśnienia podczas etapu jego uplastyczniania. Takie tworzywo, podczas fazy wtrysku, jest w dalszym ciągu poddawane działaniu ciśnienia i temperatury, które powodują zmniejszenie objętości i powstawanie naprężeń w materiale. W fazie docisku, w warunkach izobarycznego ochładzania, tworzywo nadal się kurczy. Na etapie chłodzenia, materiał nierównomiernie zmniejsza swoją objętość, powodując niejednokrotnie niejednorodny spadek ciśnienia w gnieździe formy [79]. Powstały skurcz termiczny powoduje zanik ciśnienia stopu i przyczynia się do uwolnienia związanych z nim naprężeń ściskających. W niektórych obszarach skurcz tworzywa jest ograniczony poprzez żebra i ściany boczne. W tych miejscach powstają naprężenia rozciągające, które częściowo równoważą naprężenia ściskające. W takim przypadku występuje skurcz objętościowy i liniowy, a oba z nich są ściśle zależne od temperatury i ciśnienia stopu w gnieździe formy wtryskowej. Ma to wpływ na nierównomierny skurcz wypraski na całej powierzchni, a końcowe wymiary detalu różnią się w zależności od grubości ścianki w wyrobie. Zastosowanie napełniaczy wpływa na zmianę wielkości skurczu w niemodyfikowanym polimerze termoplastycznym [52, 75]. Parametry temperatury i czasu oddziałują nie tylko na skurcz, ale także decydują o końcowej cenie produktu. Element produkowany w górnej granicy temperatury przetwórstwa wymaga wydłużenia czasu lub zwiększenia szybkości chłodzenia, aby ciepło z gniazda formy zostało odebrane do cieczy chłodzącej. Zwiększenie czasu chłodzenia przekłada się na całkowity czas cyklu, a to na zmniejszenie liczby produktów w jednostce czasu i końcowe podniesienie kosztu wyrobu [57, 150].

W celu uzyskania zadowalającej jakości kół zębatych, należy odpowiednio dobrać materiał, konstrukcję formy oraz parametry procesu. Klasa polimerowych kół zębatych, które otrzymuje się w regularnej produkcji wtrysku, mieści się w przedziale od Q10 do Q12 według normy ISO 1328 [62, 63]. Wyższe dokładności na poziomie Q8, są możliwe do uzyskania jedynie w specjalnie kontrolowanych warunkach procesu. Jedną z przyczyn powodujących różnice między rzeczywistym kształtem koła zębatego a zarysem zęba, jest nierównomierny skurcz w obrębie wyrobu. Na przykład skurcz materiału przy wierzchołku zęba jest mniejszy niż w obszarze jego stopy. Jego wielkość zależy głównie od samego tworzywa oraz parametrów

procesu. W tym miejscu należy zwrócić szczególną uwagę na doprowadzenie kanałów wtryskowych do wypraski. Ich wadliwa konstrukcja może wpłynąć na nierównomierne płynięcie tworzywa w gnieździe formy, co przyczynia się do miejscowej koncentracji naprężeń. Aby zapewnić wymaganą jakość przekładni, geometria formy i parametry procesu są dobierane w serii testów eksperymentalnych [168].

I.3.2.2. Deformacje wyprasek po procesie wtryskiwania elementów maszyn

Zjawisko deformacji i wypaczenia zachodzi, kiedy wypraska w sposób niekontrolowany odkształca się w porównaniu do uzgodnionego wzorca. Wady te są wynikiem nierównomiernego skurczu polimeru, wynikającego z różnicy temperatur w detalu podczas jego chłodzenia w gnieździe formy wtryskowej [3, 166]. Niekontrolowane skracanie czasu cyklu, poprzez obniżenie temperatury formy ma bezpośredni wpływ na strukturę i własności fizyczne wypraski. Niska przewodność cieplna tworzyw sztucznych ($0,15 - 0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) utrudnia równomierne ochładzanie się wypraski w całej jej objętości. Skutkuje to występowaniem naprężeń zginających w wyprasce i w efekcie powstaniem deformacji i paczenia się detali. Zjawisko to jest szczególnie widoczne dla tworzyw semikrystalicznych (m.in. PA), często używanych do produkcji elementów maszyn [61]. W przypadku tworzyw niemodyfikowanych, skurcz i deformacje zależą od różnicy grubości ścian elementów wypraski oraz powierzchni temperatury formy. Natomiast dla tworzyw napełnionych włóknem szklanym, główną przyczyną deformacji jest różnica ułożenia włókien względem kierunku przepływu.

Gorsza precyzja wykonania kół zębatych wpływa na stabilność i żywotność przekładni, powoduje drgania i nasila wydzielany podczas pracy hałas oraz przyspiesza zużycie ściernie i zmęczeniowe zębów [168]. Aby przeciwdziałać deformacjom konstrukcji, można monitorować formę przy pomocy czujników temperatury i ciśnienia, zainstalowanych bezpośrednio w gnieździe wtryskowym [3].

I.3.3. Metody otrzymywania polimerowych kół zębatych za pomocą technologii ubytkowych i addytywnych

Tradycyjna technologia otrzymywania wyrobów kompozytowych z polimerów obejmuje głównie formowanie wtryskowe. Jednak znane są inne metody produkcji, które także są wysoce powtarzalne i umożliwiają kontrolę procesu technologicznego. Są to technologie ubytkowe lub addytywne.

W przypadku technologii obróbki skrawaniem, najczęściej stosuje się otrzymywanie kół zębatych poprzez obróbkę obwiedniową frezami modułowymi na obrabiarkach CNC [48]. Technologia jest stosowana w produkcjach małoseryjnych oraz w przypadku kół zębatych o nietypowej geometrii, która znacznie utrudnia zaprojektowanie formy wtryskowej [9]. Polimery przetwarzane tą metodą, powinny charakteryzować się dobrą obrabialnością. Podczas procesu technologicznego pojawiają się problemy związane z ich plastycznością, niskim modułem Younga i przewodnością cieplną. Występujące podczas obróbki naciski powierzchniowe i wytwarzająca się energia cieplna, mogą powodować odkształcenia, pogorszenie jakości powierzchni obrabialnej i zakłócenie tolerancji wymiarowych wypraski [48].

Produkcja addytywna (AM, *ang. Additive manufacturing*) jest zamiennie określana technologią szybkiego prototypowania (RP, *ang. Rapid Prototyping*) lub drukowania 3D [163, 174]. Metoda zalecana jest do otrzymywania prototypów oraz pojedynczych lub małoseryjnych produkcji kół zębatych. Wśród technik druku 3D, wyróżnia się metody pozwalające na wykorzystanie tworzyw polimerowych [192], są to:

- spiekanie w złożu proszkowym (PBF, *ang. Powder Bed Fusion*) wykorzystujące laser (SLS, *ang. Selective Laser Sintering*) lub wiązkę elektronów (EBM, *ang. Electron Beam Melting*), które są źródłem zasilania do topienia proszków materiałów [122];
- technika druku uplastycznionym materiałem (FDM, *ang. Fused Deposition Modeling*), który jest formowany przez głowicę drukującą i układany warstwa po warstwie zgodnie z założonym modelem [105];
- technologia stereolitografii (SLA, *ang. Stereolithography*), gdzie tworzywo jest utwardzane przy pomocy wiązki lasera ultrafioletowego [156];
- wysoce precyzyjna technologia Polyjet, bazująca na utwardzaniu płynnej żywicy przy pomocy światła ultrafioletowego [118].

Technologie 3D pozwalają uniknąć marnotrawstwa i osiągnąć wysoką dokładność kształtowo – wymiarową. Za pomocą tej technologii można uzyskać wyrób o złożonej geometrii. Jednak wydajność tej metody jest bardzo niska, a drukowanie powierzchni swobodnych i ostrych krawędzi sprawia liczne problemy. Technologia druku trójwymiarowego może przetwarzać tylko niektóre termoplastyczne materiały polimerowe, a wiele spośród nich, ma trudność z osiągnięciem maksymalnej wytrzymałości mechanicznej [174]. W porównaniu do technologii formowania wtryskowego, wytworzone detale odznaczają się spadkiem parametrów wytrzymałościowych oraz mniejszą dokładnością wymiarową [142].

Wytrzymałość części drukowanych metodą FDM w dużym stopniu zależy od parametrów drukowania i jakości spoiny między warstwową. Pogorszona wytrzymałość jest związana z niewystarczającą siłą wiązania między warstwami [120].

I.4. Polimerowe przekładnie zębate

W dzisiejszych czasach stale rośnie zapotrzebowanie na materiały polimerowe, a jednym z ich zastosowań jest produkcja polimerowych przekładni zębatych. Podstawowym zadaniem koła zębatego, będącego częścią przekładni, jest przenoszenie ruchu ze stałym przełożeniem. Najpopularniejszymi kołami są te o ewolwentowym zarysie boku zęba. Głównymi parametrami, które charakteryzują przekładnię walcową są: prędkość obrotowa n , przenoszony moment T , przełożenie u , moc N , odległość osi a_w , wymiary oraz masa kół zębatych, a także sprawność mechaniczna przekładni η [128, 129].

Dokładny opis termomechanicznego zachowania się przekładni polimerowej jest bardzo problematyczny ze względu na przejściowy charakter procesu, spowodowany temperaturowym zachowaniem się tej grupy materiałów. Jak wykazano w wielu pracach, materiały te mają nieliniowe zachowanie mechaniczne względem zmiennej temperatury [74]. Ta cecha wraz z istotnymi odchyleniami geometrii, prowadzi do znacznych różnic w porównaniu z oczekiwaną teoretyczną kinematyką zazębienia polimerowych kół zębatych. Może to skutkować zwiększonymi obciążeniami styku powierzchni bocznej kół zębatych. Prowadzi to do wzrostu wydzielanego ciepła, zwiększonego tarcia i ostatecznie szybszej awarii przekładni [23].

Obecnie konstrukcja przekładni polimerowych jest oparta głównie na wytycznych VDI 2736 [169]. Niniejsze wytyczne zostały oparte na normach przeznaczonych do projektowania metalowych kół zębatych ISO 6336 [64] i DIN 3990 [28]. Chociaż normy VDI są nieocenioną pomocą podczas projektowania polimerowych kół zębatych, opierają się głównie na tych samych założeniach, co standardy metalowych przekładni zębatych. To znacznie upraszcza złożony charakter zachowania się tworzyw termoplastycznych. W normie VDI uwzględniono, że jedną z kluczowych różnic pomiędzy polimerami, a metalowymi kołami zębatymi jest wpływ temperatury materiału na oczekiwaną żywotność przekładni polimerowej [23]. Jak zauważyli Pogačnik z zespołem, wytyczne dostarczają empirycznego modelu temperatury, który w niektórych przypadkach różni się z przewidywanymi prognozami [124]. Praktycznie wszystkie istniejące modele temperaturowe dla przekładni polimerowych uwzględniają nagrzewanie tarciove jako główny czynnik wzrostu

temperatury podczas pracy układu. Większość z nich również bierze pod uwagę lepko-sprężyste zmiany właściwości polimeru [98]. Te nieliniowo zachowujące się właściwości polimeru mogą mieć znaczący wpływ na sumaryczne wytwarzanie ciepła podczas pracy przekładni [23].

I.4.1. Polimerowe i metalowe walcowe koła zębate

Koła zębate są jednym z najważniejszych rozwiązań w dziedzinie inżynierii mechanicznej, gdzie pełnią rolę przenoszenia mocy w mechanizmach napędowych. Zespół kół zębatach ząbiających się wzajemnie, odpowiadających za jednoczesną zmianę prędkości obrotowej ω i momentu obrotowego T , tworzy przekładnię zębatą [149]. W takim układzie koło do którego jest przyłożony napęd, określa się napędzającym (czynnym), natomiast drugie jest zwyczajowo nazwane kołem napędzanym (biernym). Jeżeli koło napędzane obraca się z mniejszą prędkością obrotową n_2 , w porównaniu do elementu napędzającego n_1 , to taki układ nazywa się reduktorem ($n_1 > n_2$). Jako przykłady zastosowania można tu wymienić: młyny, kruszarki, suwnice. Jeżeli ta zależność jest odwrotna, a przekładnia zwiększa prędkość obrotową to jest to multiplikator ($n_1 < n_2$). Znajduje on zastosowanie w układach napędowych urządzeń takich jak: nadbiegi w skrzyni biegów samochodów, wirówkach odśrodkowych, wiertarkach elektrycznych [58, 146].

Głównym zadaniem koła zębatego jest przenoszenie bez poślizgu ruchu obrotowego lub posuwistego. Dzieje się to za pomocą zębów rozmieszczonych na jego obwodzie, współpracujących z innym kołem zębatym lub z listwą zębatą. Koła zębate z uwagi na kształt ich wieńca dzieli się na walcowe i stożkowe. Profil linii zęba wprowadza podział na: proste, skośne, śrubowe, łukowe oraz strzałkowe (daszkowe) [58, 143, 149].

Walcowe koło zębate składa się z wieńca zębatego o określonej liczbie zębów, a także z elementów łączących wieńiec z wałem lub piastą.

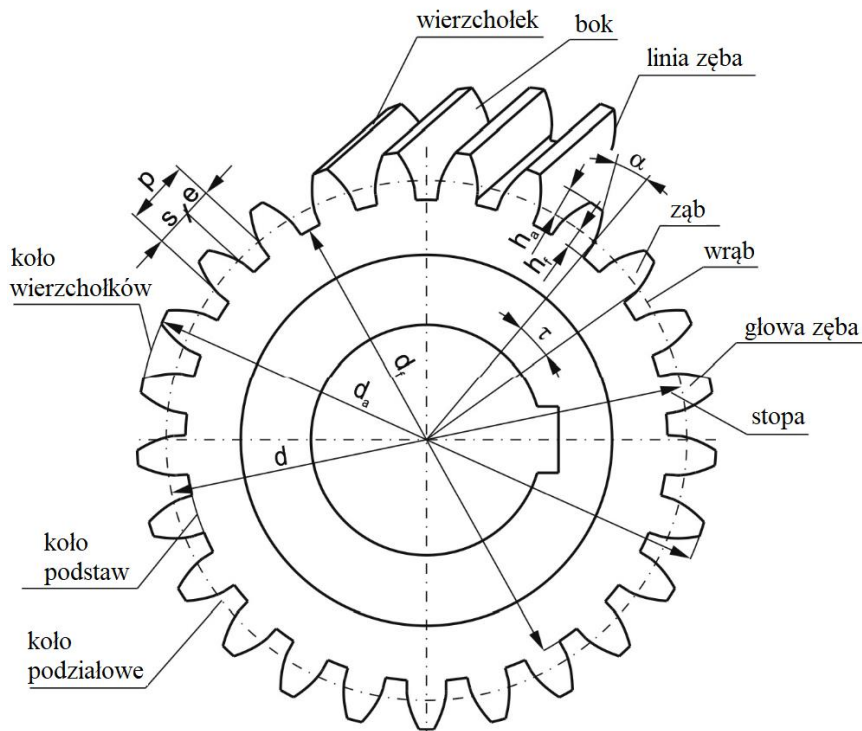
Walcowe koła zębate charakteryzują się wielkościami geometrycznymi takimi jak:

- koło podziałowe (wyznacza się poprzez przecięcie walca podziałowego z płaszczyzną prostopadłą do osi koła, pozwala podzielić ząb na stopę i głowę);
- koło wierzchołków (wyznacza się poprzez przecięcie walca wierzchołków z płaszczyzną prostopadłą do osi koła);
- koło podstaw (wyznacza się poprzez przecięcie walca podstaw z płaszczyzną prostopadłą do osi koła)

- podziałka (p) (to długość łuku na kole podziałowym, która jest zawarta między dwoma sąsiednimi zębami)

- podziałka kątowa (τ) (jest to wynik ilorazu kąta pełnego i liczby zębów z)

Podstawowe wymiary geometryczne walcowego koła zębatego przedstawia rys. 20 [58].



Rys. 20. Wymiary koła zębatego: d - średnica podziałowa, d_a - średnica wierzchołkowa, d_f - średnica podstaw, h_a - wysokość głowy zęba, h_f - wysokość stopy zęba, s - grubość zęba, e - szerokość wrębu, p - podziałka, α - kąt zarysu, τ - podziałka kątowa [58]

Iloraz podziałki p do liczby π nazywa się modułem zęba m [mm]. Parametr ten służy do określenia wymiarów zębów i można go oznaczyć na podstawie równania (3). W tym celu w pierwszej kolejności oblicza się obwód koła podziałowego L wg równania (1):

$$L = \pi \cdot d = p \cdot z \quad (1)$$

gdzie: d - średnica podziałowa, p - podziałka, z - liczba zębów.

Z równania (1) wyznacza się średnicę podziałową:

$$d = \frac{p}{\pi} \cdot z \quad (2)$$

Stąd wyznacza się moduł zęba m :

$$m = \frac{p}{\pi} \rightarrow p = \pi \cdot m \quad (3)$$

Podstawiając równania (3) oraz (2) otrzymuje się zależność w kole zębatym:

$$d = m \cdot z \quad (4)$$

W większości przekładni zębatych wartości modułów są znormalizowane, jest to konieczne do ułatwienia wymiany kół zębatych oraz ograniczenia wydatków związanych z ilością kosztownych narzędzi do otrzymywania kół zębatych.

Kąt zarysu α jest również wartością znormalizowaną dla przekładni walcowych i stożkowych ($m \geq 1$), a nominalnie jest najczęściej równy 20° . Pozostałe parametry koła zębatego ustala się na podstawie poniższych równań [58, 109]:

- wysokość głowy zęba h_a :

$$h_a = y \cdot m \quad (5)$$

gdzie: y – współczynnik wysokości zęba,

- wysokość stopy zęba h_f :

$$h_f = (y + c^*) \cdot m \quad (6)$$

gdzie: c^* – współczynnik luzu wierzchołkowego, który przybiera wartości w zakresie $0,1 \leq c^* \leq 0,4$ (a najczęściej od 0,2 do 0,25)

- luz wierzchołkowy c :

$$c = c^* \cdot m \quad (7)$$

- całkowita wysokość zęba h :

$$h = h_a + h_f \quad (8)$$

gdzie: $h_a < h_f$

$$\text{wtedy: } h = 2y \cdot m + c \quad (9)$$

- średnica wierzchołków d_a :

$$d_a = d + 2h_a \quad (10)$$

- średnica dna wrębu d_f :

$$d_f = d - 2h_f \quad (11)$$

- współczynnik grubości zęba s^* :

$$s^* = \frac{1}{2} \pi \quad (12)$$

- grubość zęba s :

$$s = s^* \cdot m \quad (13)$$

• przełożenie geometryczne (u) – to iloraz zębów koła O_2 o liczbie zębów z_2 i koła O_1 o liczbie zębów z_1

$$u = \frac{z_2}{z_1} \quad (14)$$

gdzie: z_1 – liczba zębów w kole o mniejszej średnicy.

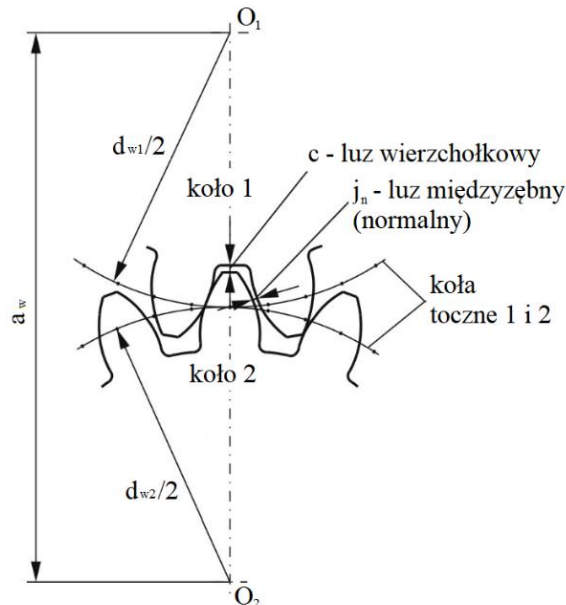
Współpracujące koła zębate muszą spełnić podstawowe parametry, co przedstawia rys. 21:

- rzeczywista odległość osi współpracujących kół a_w :

$$a_w = \frac{d_{w1}}{2} + \frac{d_{w2}}{2} \quad (15)$$

W przypadku, kiedy promienie toczne są równe podziałowym to odległość $a_w = a$, wtedy:

$$a_w = a = \frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2} \quad (16)$$



Rys. 21. Parametry pary współpracujących kół zębatach: gdzie O_1, O_2 – środki obrotu każdego z kół [58]

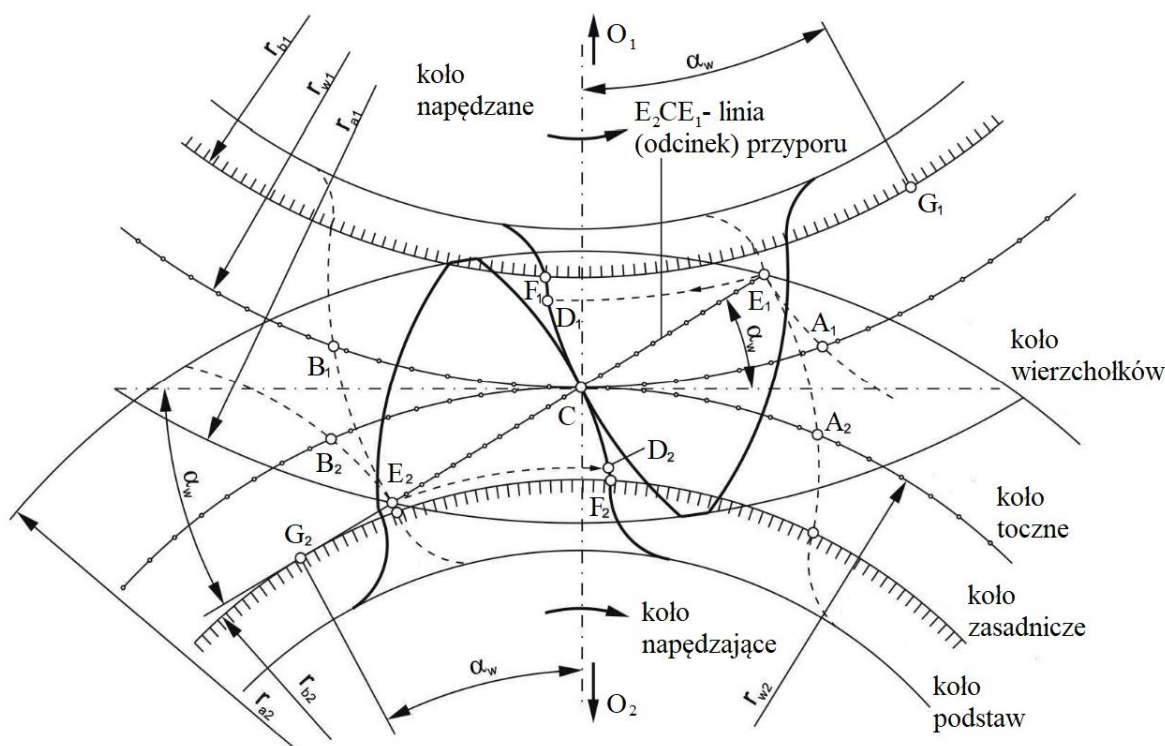
Na prawidłową pracę przekładni zębatej mają wpływ luzy międzyzębne, które mają za zadanie zabezpieczenie jej przed skutkami zakleszczenia się zębów, a także pozwalają na przepływ środka smarnego na współpracującej powierzchni bocznej. Ich wartość jest zależna od wielu parametrów, do których zalicza się: odchyłki grubości zębów w układzie współpracujących kół, położenie osi obrotu kół, zarys linii zęba podziałki, bicie promieniowe, a także temperatura styku zębów i odkształcenia sprężyste kół zębatach.

Wyróżnia się trzy typy luzów międzyzębnych (rys. 21) [146]:

- luz wierzchołkowy (c) – to najkrótszy odcinek na prostej łączącej środki współpracujących kół O_1 i O_2 , pomiędzy walcem podstawy jednego koła zębatego, a walcem wierzchołków koła drugiego; jest zależny od narzędzia stosowanego do nacinania zębów;
- luz normalny / międzyzębny (j_n) – to najkrótsza odległość między niewspółpracującymi powierzchniami zębów przy istnieniu boków pracujących; zależy od parametrów przekładni i klasy dokładności wykonania zębów;

- luz obwodowy (j_i) – to długość łuku na kole podziałowym, która powstała w wyniku obrotu koła o kąt pozwalający na zetknięcie się niewspółpracujących boków w przypadku, kiedy koło współpracujące jest nieruchome; zależny od parametrów przekładni i klasy dokładności wykonania zębów [58, 146].

W przekładniach walcowych o zarysach ewolwentowych, ruch jest przenoszony pomiędzy zębami znajdującymi się w linii prostej, na tzw. odcinku przyporu. Sam zarys stanowi ewolwentę okręgu, czyli krzywą, która jest wykreślona przez punkt położony na prostej odtaczanej bez poślizgu po okręgu zasadniczym. Na rys. 22 pokazano kinetykę zazębienia pary kół zębatych w trzech fazach współpracy. W początkowej fazie współpracy pary zębów, wierzchołek zęba koła napędzanego styka się ze stopą zęba koła napędzającego. Miejsce to oznaczono linią przerywaną i punktem E_2 . W kolejnej fazie para współpracujących zębów znajduje się w położeniu centralnym. Miejsce styku znajduje się na kole tocznym oznaczonym linią ciągłą w punkcie C . W ostatniej, trzeciej fazie następuje wyjście zębów z zazębienia, a wierzchołek zęba koła napędzającego styka się ze stopą zęba w kole napędzanym. Na rys. 22 miejsce to znajduje się w punkcie E_1 [58].



Rys. 22. Punkty przenoszenia obciążeń w układzie dla sztywnych i idealnie geometrycznych kół zębatych [19]

W kołach ewolwentowych siły, prędkości poślizgu oraz współczynniki ślizgowe różnią się w zależności od miejsca styku. Podczas pracy dwóch kół, miejsce to przesuwają się wzdłuż

zarysu zęba od jego stopy do głowy zęba. Aby zachować ciągłość ruchu, każda para zębów musi być zastąpiona kolejną parą, jeszcze przed zakończeniem tego cyklu. Ta koncepcja ma zastosowanie, gdy koła pracujące w przekładni są sztywne i geometrycznie doskonałe [19].

W przypadku kół zębatych, które są wykonane z tworzyw termoplastycznych kontakt zostaje wydłużony poza linię działania. Jest to spowodowane odkształceniami zębów podczas pracy oraz obciążeniami dynamicznymi wynikającymi z właściwości lepkosprężystych polimerów. Poza ruchem względnym, stykających się zębów, występuje ruch posuwisty, który generuje tarcie w ich punkcie styku. Następstwem tego procesu jest wzrost temperatury zębów w zależności od szybkości pędu układu [19]. Z drugiej strony, ta cecha polimerowych kół zębatych pozwala lepiej im znieść obciążenia udarowe, niewspółosiowość wału i miejscowe zginanie, w porównaniu z metalowymi odpowiednikami [12].

W przypadku ciał, które są narażone na działanie tarcia, maksymalna temperatura pracy występuje w obszarze styku pary zębów. Ilość wydzielanego w tym miejscu ciepła zależy od prędkości poślizgu oraz siły nacisku dwóch elementów. Histereza ciepła związana jest z naprężeniami panującymi w układzie napędowym. Koła zębate narażone są na zmienne naprężenia w zależności od punktu styku. Może to doprowadzić do uszkodzeń zmęczeniowych, pomimo nieprzekroczenia granicy sprężystości materiału. Objawem tego będą pęknięcia u podstawy zęba. W przypadku tworzyw sztucznych z powodu niższej sztywności materiałów, zniekształcenia zębów są większe od ich metalowych odpowiedników. W związku z nieliniowością w zachowaniu właściwości mechanicznych polimerów, najlepszym źródłem informacji o wytrzymałości zmęczeniowej kół zębatych jest studiowanie wyników badań znormalizowanych próbek oraz testów rzeczywistych detali [19].

I.4.2 Trybologiczne uwarunkowania przekładni zębatych

Trybologia jest nauką o oddziaływujących na siebie powierzchniach w ruchu względnym. Obejmuje mechanizmy tarcia, zużycia, smarowania i konstrukcję elementów. Od trybologicznych aplikacji wymaga się różnych poziomów tarcia i zużycia, dlatego wymagania właściwości materiałów także są zróżnicowane. Łożyska i koła zębate wymagają jak najmniejszego współczynnika tarcia i zużycia, podczas gdy dla materiałów ciernych (klocki hamulcowe, okładziny sprzęgła) tarcie powinno być umiarkowanie wysokie, w zużycie średnio niskie. W przypadku materiałów adhezyjnych tarcie powinno być jak największe, a zużycie jak najmniejsze. W ten sposób skład trybomateriałów jest dostosowywany do tych dwóch parametrów, z jednoczesnym bezkompromisowym utrzymaniem innych wymagań

dotyczących m.in. wytrzymałości zmęczeniowej. Co ciekawe manipulowanie jednym z parametrów, nie oznacza, że drugi nie ulegnie zmianie. Rozsądny wybór odpowiedniej matrycy, wypełniaczy i wzmocnień prowadzi do właściwego algorytmu trybowydajności wraz z innymi pożądanymi właściwościami takimi jak wytrzymałość. Wydajność kompozytu jest kontrolowana przez rodzaj i udział matrycy i wypełniaczy, jakość połączenia z między tymi składowymi, długość włókien oraz obróbkę technologiczną [40].

Kiedy dwie poruszające się powierzchnie współpracują ze sobą w różnych możliwych trybokonfiguracjach, wytwarzane na ciepło jest bezpośrednią funkcją tarcia, ciśnienia i prędkości [117]. Polimery o słabych właściwościach termofizycznych tj. bardzo niskim przewodnictwie oraz wysokim współczynnikiem rozszerzalności, nie mogą skutecznie rozpraszać ciepła wytwarzanego na granicy faz. W takim przypadku powierzchnie topią się lub ulegają degradacji termicznej, prowadząc do awarii wyrobu. W związku z tym polimery są zwykle stosowane w warunkach niskiego obciążenia i prędkości obrotowej. W celu rozszerzenia zastosowania polimerów jedyną alternatywą jest zastosowanie specjalistycznych kompozytów konstrukcyjnych [117]. Istnieje coraz więcej zastosowań technicznych w których kompozyty polimerowe, zawierające różne napełniacze są stosowane jako odpowiedniki metalowych elementów ślizgowych. Stale prowadzone są prace badawcze mające na celu zastosowanie kompozytów polimerowych w bardziej ekstremalnych obciążeniach, pod kątem warunków środowiskowych oraz temperaturowych [41].

Przekładnie wykonane z polimerowych kół zębatych są stosowane w licznych i coraz bardziej wymagających aplikacjach, gdzie należy zastosować dokładne obliczenia projektowe, określające ich żywotność. Zaletami wynikającymi z zastosowania polimerowych przekładni zębatych jest ich stosunkowo niski koszt wytworzenia, mała gęstość, która przekłada się na niewielki ciężar, swoboda w projektowaniu, niski poziom hałasu oraz niskie drgania. Dodatkową cechą przemawiającą na korzyść jest to, że przekładnie polimerowe mogą pracować bez zewnętrznego smarowania. Korzyści te wynikają z tego, że polimery są materiałami o całkowicie innych właściwościach w porównaniu z metalami. Mają także szereg wad, które utrudniają ich zastosowanie w niektórych elementach maszyn [98]. Jedną z nich jest wartość modułu Younga, który może być stukrotnie niższy od stali. Powoduje to wzrost temperatury pracy przekładni polimerowej, ponieważ ciepło tarcia nie jest efektywnie usuwane z zębów [124]. Efektem tego są trwałe uszkodzenia, a nawet topienie się zębów, co nie zdarza się w metalowych kołach zębatych. Innymi przyczynami awaryjności polimerowych kół zębatych są uszkodzenia zmęczeniowe bocznych powierzchni zębów, wżery oraz pęknięcia stopy zęba [98, 171]. Aby minimalizować możliwości wystąpienia usterek termicznych, często wybiera

się układy zestawiające polimerowe i metalowe koła zębate. Ma to na celu lepsze odprowadzenie ciepła na powierzchniach styku dwóch elementów [98].

Jedną z najbardziej znaczących zalet przekładni polimerowych, wymienioną powyżej, jest możliwość pracy w warunkach bez udziału smaru. Zużycie boków zębów prowadzi do zmiany profilu zęba, spowodowanego zmianą kąta przyporu i zmieniającymi się warunkami obciążenia. To prowadzi do różnych prędkości ślizgowych i nacisków kontaktowych w miejscu styku układu. Zmiany te prowadzą do wzrostu temperatury co przekłada się na obniżenie wytrzymałości polimeru i kolejno do topienia się boków i deformacji zębów. Dlatego kluczowym elementem przekładni polimerowej, w szczególności pracującej na sucho, jest tempo zużywania się zębów koła zębatego [96]. W przeciwieństwie do przekładni wykonanej z metalowych elementów, dla których obliczenia konstrukcyjne są znormalizowane poprzez DIN 3990 [28], ISO 6336 [65], AGMA 2001-D04 [4], projektowanie przekładni polimerowych długo nie odnosiło się do żadnej z norm. Dopiero w 2014 r., w oparciu o normę DIN3990, zaproponowano nowy standard VDI 2736 [169]. Jest to jedyna ogólnie dostępna wytyczna dotycząca zużycia przekładni polimerowych, oparta na hipotezie Hertza. Jednakże norma ta podaje zalecenia, że współczynniki zużycia przekładni do przewidywania trwałości eksploatacyjnej są pozyskane z badań eksperymentalnych, a więc zależne od wielu czynników takich jak prędkość obrotowa, chropowatość powierzchni, nacisk na powierzchnię styku, temperatura otoczenia i wilgotność, mechaniczne i termiczne właściwości materiału oraz jego mikrostruktura.

Wybór rodzaju konfiguracji przekładni musi wynikać z rozpatrywanego systemu trybotechnicznego, która dostarcza informacji o występujących mechanizmach zużycia oraz ubytku materiału [72]. Jednak rzeczywiste warunki eksploatacji zębów w przekładniach polimerowych są znacznie bardziej złożone, ponieważ ulegają zmianom podczas pracy. W trakcie testów zmieniają się obciążenie i ugięcie zęba, a także warunki kontaktu wzdłuż linii styku. Przekłada się to na zmianę kształtu zęba i modyfikuje warunki styku wzdłuż linii zazębienia, a w efekcie końcowym żywotność przekładni. Z tego powodu należy liczyć się z tym, że obliczona wartość współczynnika zużycia będzie odbiegać od rzeczywistego wyniku zarejestrowanego podczas eksperymentu [98]. Dlatego badania materiałów w laboratoryjnych warunkach mogą być traktowane jako pomocnicze narzędzie przesiewowe. Natomiast ostateczny wybór właściwej kombinacji materiałów jest uzależniony od badań eksperymentalnych z wykorzystaniem rzeczywistych elementów badawczych [72].

Aby opisać lepkosprężyste zachowanie przekładni PA 6.6, Letzelter wraz z zespołem opracowali model numeryczny do analizy nacisku styku i ciepła wytwarzanego w zębie koła

zębatego. Metoda numeryczna wykorzystywała lepkosprężysty model zależności temperatury, wilgotności i prędkości obrotowej oraz obliczała podział obciążeń pomiędzy punktowo stykającymi się kołami zębatymi, co dostarczyło wyników takich jak ciśnienie kontaktowe, naprężenia korzenia zęba lub błąd transmisji. Porównanie to pozwoliło na walidację modelu w trakcie działających na niego obciążeń. Naukowcy wykazali, że naprężenie styku znacznie wzrasta podczas fazy początkowej i końcowej zazębiania się zębów [21]. Černe i in. przedstawili model opisujący wzrost temperatury kół zębatych PEEK, który umożliwia parametryczne badanie czynników materiałowych i geometrycznych [87]. Właściwości mechaniczne użytych w teście trzech typów włókien węglowych typu PAN różniły się między sobą pod kątem wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości. Jeden z zastosowanych typów włókna miał znacznie wyższą temperaturę wytwarzania a jego budowa strukturalna zawierała mniejszą ilość grup karboksylowych i hydroksylowych. Dało to przypuszczenie, że ten typ włókna, jest mniej kompatybilny z matrycą PEEK, co może powodować wyższe właściwości ścierne i większą chropowatość powierzchni bocznej kół zębatych z danego kompozytu [81].

Mimo powyższych przykładów większość współczesnych modeli numerycznych nie uwzględnia zmienności właściwości polimerów, w zależności od temperatury pracy przekładni. Przewidywanie żywotności polimerowych kół zębatych pozostaje nadal ograniczone do równań empirycznych takich jak teoria kontaktu Hertza czy równanie wspornika Lewisa. Niedostateczna wiedza na temat zachowania zmęczeniowego przekładni polimerowych znacznie ogranicza ich dalsze użytkowanie w ciężkich warunkach.

I.4.3 Charakterystyka polimerowych i metalowych przekładni zębatych

Tworzywa polimerowe zastępują materiały metaliczne w wielu zastosowaniach przemysłowych. Pomijając własności mechaniczne, zasadniczo zmiana ta wynika z mniejszej gęstości, mniejszych kosztów podczas przetwórstwa polimerów, niższego poziom hałasu i wibracji podczas pracy [42]. Materiały metaliczne zastosowane do budowy przekładni zębatych wymagają stałego smarowania w celu zminimalizowania strat mocy, spowodowanego tarciami oraz przeciwdziałania korozji pojawiającej się w nieprzyjaznym środowisku pracy. Przekładnie polimerowe mogą pracować bez dodatkowego, zewnętrznego smarowania. Nie oznacza to jednak wyeliminowania zużycia ślizgowego i występujących podczas przenoszenia mocy przeciążeniach. W niektórych przypadkach, brak smaru w przekładniach polimerowych, nie tylko zwiększa wydzielanie się ciepła podczas zazębiania się kół zębatych,

ale również zmniejsza ilość energii odprowadzanej z przekładni. Jednak w zdecydowanej większości przekładnie pracujące bez smaru w połączeniu z niskim przewodnictwem cieplnym polimerów, sprzyjają punktowemu podwyższeniu temperatury powierzchni kół zębatach podczas ich pracy [135]. Jak przedstawiono w tab. 8, głównym ograniczeniem zastosowania termoplastycznych tworzyw sztucznych w szerszym zakresie aplikacji jest to, że ich właściwości mechaniczne i stabilność wymiarowa ściśle zależy od temperatury pracy. Zbyt drastyczny wzrost tego parametru może mieć nie tylko negatywny wpływ na pracę przekładni, ale również spowodować jej przedwczesną awarię [45]. Główną różnicą jest moduł Younga, który jest zależny od temperatury, a dla tworzyw sztucznych w warunkach pokojowych może być nawet sto razy niższy w przypadku stali i trzydzieści razy niższy od aluminium. Także przewodnictwo ciepła polimerów jest znacznie niższe niż w przypadku stali. Te cechy przekładają się na wzrost temperatury pracy, ponieważ ciepło powstałe w wyniku tarcia nie jest szybko usuwane z zębów. W rezultacie może to spowodować trwałe odkształcenie lub topienie się zębów, co nie jest częstym zjawiskiem w przekładaniach metalowych. Aby przeciwdziałać temu problemowi należy wydłużyć czas styku pomiędzy zębami, ponieważ odkształcenia pojawiające się podczas pracy mają tendencję do obciążania każdej pary zębów stykających się ze sobą w danym momencie [19, 45, 141].

Tab. 8. Główne zalety i wady przekładni wykonanej z tworzyw sztucznych w porównaniu do przekładni stalowych [45, 141]

| Zalety | Wady |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • konkurencyjna cena wynikająca z masowej produkcji przy formowaniu wtryskowym | <ul style="list-style-type: none"> • brak szczegółowych norm dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej |
| <ul style="list-style-type: none"> • możliwość pracy bez użycia dodatkowych smarów | <ul style="list-style-type: none"> • ograniczony zakres temperatur pracy |
| <ul style="list-style-type: none"> • niższa masa, mniejsza gęstość | <ul style="list-style-type: none"> • niższa nośność |
| <ul style="list-style-type: none"> • możliwość zastosowania w środowisku agresywnych płynów | <ul style="list-style-type: none"> • duża liczba czynników wpływających na wytrzymałość przekładni |
| <ul style="list-style-type: none"> • niższy poziom natężenia dźwięku | <ul style="list-style-type: none"> • zmienna stabilność wymiarowa zależna od temperatury pracy |

Zęby kół zębatach ulegają deformacji pod wpływem obciążenia, co powoduje, że rzeczywisty współczynnik styku obciążonych kół zębatach jest większy niż liczba przyporu, która jest stosowana podczas modelowania warunków naprężenia wg norm DIN 3990 [28] oraz ISO 6336 [64]. Aby uniknąć wstępnego uszkodzenia powierzchni czołowej w przypadku

stosowania stalowych kół zębatach, często stosuje się modyfikację profilu powierzchni czołowej. W porównaniu ze stalą, w przekładniach termoplastycznych dochodzi do wzrostu rzeczywistego współczynnika kontaktu, co jest spowodowane wyższą plastycznością tworzyw sztucznych. Dla polimerowych kół zębatach wzrost obciążenia wywołanego ugięciem, a wynikającego z zazębiania się zębów, nie jest tak krytyczny jak w przypadku kół stalowych. Wynika to z większej rozszerzalności tworzyw termoplastycznych. Prace badawcze z przekładniami z tworzyw termoplastycznych wskazują, że w porównaniu do nominalnego współczynnika styku poprzecznego stali, osiągnane są znacznie wyższe współczynniki styku podczas prób wyłamania stopy zęba bez krytycznych uszkodzeń współpracujących boków. Istniejące wytyczne dotyczące projektowania przekładni z materiałów polimerowych pomijają opisane zjawiska spowodowane ugięciem zęba w wyniku działającego obciążenia [55]. Zginanie tworzywowych zębów kół zębatach, powoduje zwiększenie długości ścieżki styku oraz zmianę w podziale obciążeń. Naprężenia początkowe, zasadniczo niezależne od modułu, są zupełnie inne dla kół zębatach z tworzyw sztucznych z powodu zmian w podziale obciążenia. W przypadku naprężeń kontaktowych zależnych od modułu, wstępna i wydłużona droga kontaktu powoduje ich wysokie wartości szczytowe. Wyniki badań wykonanych metodą elementów skończonych wskazują, że kinematyka polimerowych kół zębatach powoduje, że końcówka zęba stykając się z podstawą współpracującego koła zębatego, wykonuje ruch posuwisto – zwrotny. Wyniki badań wskazują, że taki ruch w znacznej mierze przyczynia się do zużycia polimerowych przekładni [100]. Dane nośności przekładni z tworzyw sztucznych opierają się wyłącznie na eksperymentalnych próbach. A uzyskane wartości charakterystyczne będą miały zastosowanie tylko w podobnych warunkach testów. Wartość wytrzymałości statycznej materiału polimerowego wyznaczonej na znormalizowanych kształtkach, nie przekłada się na wytrzymałość zmęczeniową przekładni zębatach i nie dostarcza prawie żadnych informacji o przydatności materiału. Na podstawie takich wyników w przypadku stosowania nowych mieszanek kompozytowych, możliwe jest jedynie oszacowanie żywotności przekładni.

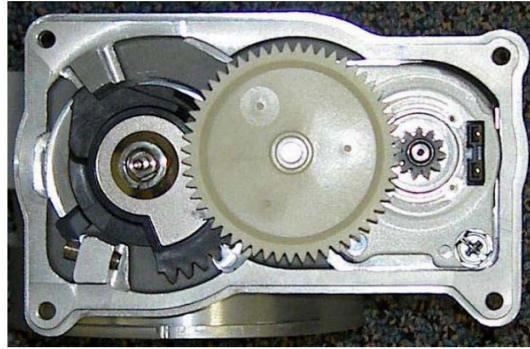
Główne rodzaje awarii przekładni polimerowych obejmują uszkodzenia wywołane temperaturą podczas pracy, co wpływa ich szybsze zużycie i zmęczenie materiału. Rodzaje awarii przekładni polimerowych są zróżnicowane i występują w typowych warunkach pracy, które zależą od zestawienia układu materiałów, smarowania i stosowanego obciążenia. Przykładem może być fakt, że ta sama para tworzyw przy stosunkowo dużym momencie obciążającym, ulegnie uszkodzeniu z powodu nadmiernego obciążenia i gwałtownym wzroście temperatury, a przy niższym obciążeniu ulegnie uszkodzeniu z powodu zużycia ściernego.

Natomiast w przypadku zewnętrznego smarowania układu może ulec uszkodzeniu w powodu zużycia zmęczeniowego [194]. Często zdarza się, że występuje kombinacja kilku rodzajów awarii, np. pęknięcie zęba w wyniku wcześniejszego zużycia ściernego i zmniejszenia jego grubości. W przypadku stosowania kombinowanych przekładni ze stali i polimeru oczekuje się, że powierzchnia o niższej twardości pierwsza ulegnie awarii. Istnieją trzy mechanizmy zużycia powierzchni w kontakcie metalu z polimerem. Obejmują one zużycie adhezyjne, zużycie ściernie i zużycie termiczne. Intuicyjnie można stwierdzić, że mniejsza chropowatość stalowego koła zębatego będzie mieć wpływ na wydłużenie czasu potrzebnego do zużycia przekładni. Jednak jak wykazały badania, szybkość zużycia ekstremalnie gładkich powierzchni jest porównywalna z obszarami o stosunkowo chropowatej strukturze [194].

I.4.4 Przykłady zastosowań tworzyw sztucznych i kompozytów polimerowych w elementach maszyn z branży motoryzacyjnej

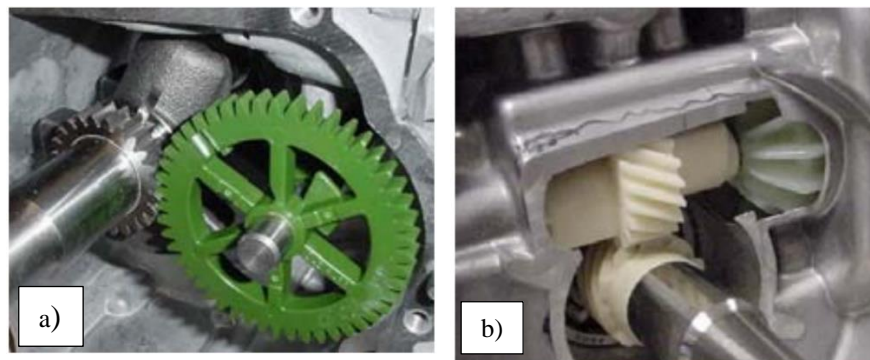
Pierwsze zastosowanie kompozytów polimerowych w przemyśle motoryzacyjnym, w samochodzie Chevrolet Corvette, datuje się na rok 1953. Od tamtego czasu tworzywa sztuczne, w szczególności wzmacniane włóknem szklanym, cieszą się dużym zainteresowaniem w przemyśle automotive. Z kompozytów wytwarza się panele kratowe, pokrywy bagażników, wzmocnienia i części karoserii, panele drzwi, ramy silników, urządzenia bezpieczeństwa i inne konstrukcje wewnętrzne [174].

W motoryzacji, polimerowe koła zębate znalazły zastosowanie w mechatronice siłowników drive-by-wire i jako uzupełniające mechanizmy w zamkach elektrycznych, oknach i lusterkach bocznych. Rys. 23 przedstawia przekładnię pracującą w komorze silnika (tj. przepustnicy) w zakresie temperatur od -48 do $+135$ °C. Układ początkowo był wyposażony w metalowe koła zębate. Aby zredukować koszty, rozważono zmianę na koło zębate z tworzywa sztucznego. Komponenty wchodzące w skład przekładni, a także elementy jej obudowy, cechowały się różną rozszerzalnością cieplną (polimerowe koło zębate, metalowy zębnik, aluminiowe obudowy). Przekładnie polimerową zaprojektowano tak, aby umożliwiała zmiany rozszerzalności ciepłej różnych materiałów, co pozwoliło na kompensację wszystkich różnic wymiarowych związanych z wahaniami temperatury [69].



Rys. 23. Przekładania zębata pracująca w zakresie temperatur od -48 do $+135$ °C [69]

Na rys. 24 przedstawiono napęd popychaczy w rozrządzie (rys. 24 a) oraz napęd odśrodkowego regulatora obrotów (rys. 24 b). Oba układy napędowe pracują w temperaturze do $+160$ °C. Zaproponowana konstrukcja przekładni i odpowiednie dobranie tworzyw polimerowych zapewniły znaczną redukcję kosztów produkcji tych elementów w stosunku do ich metalowych odpowiedników [69].



Rys. 24. Przekładanie zębata [69]: a) rozrząd – napęd popychaczy; b) napęd odśrodkowego regulatora obrotów

Na rys. 25 przedstawiono polimerowe koło zębata, zastosowane w przekładni planetarnej, zapewniającej przełożenie $(63:1)$ oraz wysoki moment przy jednoczesnej minimalizacji wymiarów gabarytowych [69].



Rys. 25. Przekładnia planetarna [69]

Przedstawiona na rys. 26 przekładnia zębata o kołach walcowych jest stosowana w urządzeniach rolniczych. Zastąpiono tutaj przekładnię metalową, tańszym, bezpiecznym i bezobsługowym napędem składającym się z polimerowych kół zębatach [69].



Rys. 26. Przekładnia walcowa poprzeczna [69]

Na rys. 27 przedstawiono pompę, w której zostały zaprojektowane asymetryczne zęby, pozwalające na zapewnienie lepszego uszczelnienia, pomiędzy przekładnią, a jej obudową. Skutkowało to wyższymi parametrami pompy, tj. poprawionym ciśnieniem wyjściowym, zwiększonym przepływem oraz sprawnością urządzenia.



Rys. 27. Przekładnia z asymetrycznymi zębami [69]

Kolejnym z przykładów zastosowania kompozytów polimerowych jest wykorzystanie tych materiałów w nowej generacji mocowań wahaczy i przegubów kulowych usytuowanych w podwoziu samochodu, gdzie eksploatacja układu napędowego będzie odbywać się niekorzystnych warunkach [41].

I.5. Podsumowanie

W obecnych czasach technologie formowania wtryskowego pozwalają na otrzymywanie szerokiego spektrum detali konstrukcyjnych. Sama technologia wtrysku stanowi najbardziej powszechną metodę wytwarzania wyrobów polimerowych. Dzięki jednorodności wtryskiwanej struktury, właściwości wytrzymałościowe wyprasek, w znaczącym stopniu górują nad ich odpowiednikami wykonanymi przy pomocy innych metod przetwarzania polimerów m.in. technologii addytywnych. Dzisiejsze wtryskarki pozwalają na produkcję wyprasek w ściśle nadzorowanych warunkach. Natomiast oczekiwania związane z poszukiwaniem rozwiązań konstrukcyjnych detali i własności mechanicznych zastosowanych materiałów polimerowych, zmuszają branżę przetwórstwa tworzyw sztucznych do stałego rozwoju.

Jednym z najbardziej wymagających elementów, które mogą być otrzymywane na drodze formowania wtryskowego są koła zębate. Ich specyficzna budowa w zestawieniu z właściwościami rozszerzalności cieplnej polimerów, przysparza wiele problemów technologicznych i jakościowych. Z powodu skurczu przetwórczego oraz niskiej odporności cieplnej termoplastów, zastosowanie wykonanych z nich kół zębatych, w wysoce obciążonych układach napędowych, niesie ze sobą wiele trudności. Problem pogłębia brak wytycznych i norm, dotyczących konstrukcji przekładni formowanej wtryskowo. Jedyne sposoby pozyskania wiedzy dotyczącej trwałości polimerowego układu napędowego, polega na przeprowadzeniu badań eksperymentalnych. Co prawda, w literaturze naukowej dostępne są wyniki testów zmęczeniowych, jednak skupiają się one głównie na podstawowych, standardowych i najbardziej dostępnych tworzywach sztucznych. W przeważającej części publikacji, spotyka się badania dotyczące testów przekładni POM. Materiał ten ma dobre właściwości samosmarujące, jednak charakteryzuje się niską odpornością temperaturową, która jest cechą eliminującą go w wysokoobciążonych układach zębatych. Kolejną szeroko opisywaną grupą są niemodyfikowane lub wzmocnione włóknem poliamidy 6 i 6.6. Natomiast jest niewiele prac poświęconych badaniom innych poliamidów. W szczególności brakuje badań nad PA 4.6 czy PPA, które odznaczają się dobrymi właściwościami mechanicznymi i stanowią doskonałą podstawę do otrzymania kompozytów hybrydowych.

Należy zaznaczyć, że w publikacjach opisujących istniejące przykłady zastosowania polimerowych przekładni zębatych w branży motoryzacyjnej, często pomijane są szczegółowe dane dotyczące rzeczywistych warunków przeprowadzania testów. Najprawdopodobniej wynika to z polityki ochrony informacji (np. NDA, *ang. Non Disclosure Agreement*), stosowanej przez producentów elementów automotive. Bez parametrów geometrycznych takich jak moduł, liczba zębów, kat przyporu, przyjęty luz obwodowy, luz wierzchołkowy oraz dokładny przebieg testu (m.in. moment obrotowy), niemożliwe staje się określenie sił w zazębieniu kół i wyciągnięcie wniosków przydatnych w procesie projektowania polimerowych przekładni zębatych w akademickim środowisku laboratoryjnym.

Modyfikacja własności polimerów termoplastycznych do otrzymywania kół zębatych jest rzadkością i głównie opiera się na wprowadzeniu pojedynczego napełniacza do matrycy polimeru. Przedstawione wyniki nie są satysfakcjonujące, ponieważ nie zawierają pełnej charakterystyki wyrobów, pod kątem ich własności zmęczeniowych. Wprowadzenie do matrycy polimerowej tylko pojedynczego dodatku często nie daje gwarancji uzyskania pożądanych rezultatów właściwości użytkowych. Aby sprostać temu zadaniu przeważnie stosuje się układy hybrydowe składające się z więcej niż jednego napełniacza. Połączenie wielu zalet formowania wtryskowego z ponadprzeciętnymi właściwościami uzyskanych w ten sposób materiałów, pozwoli na zapewnienie całkowicie nowej jakości wytwarzania polimerowych kół zębatych i innych elementów branży automotive.

II. METODYKA BADAWCZA

II.1. Materiały zastosowane do badań

Zastosowane materiały:

- 1) niemodyfikowany poliamid 6 – nazwa handlowa TARNAMID T-27 NATUR, producent Azoty Tarnów; oznaczono **PA6**
- 2) poliamid 6 z dodatkiem włókna szklanego 30 % – nazwa handlowa TARNAMID T-27 GF30 BK04; oznaczono **PA6/30GF**
- 3) niemodyfikowany poliamid 6.6 – nazwa handlowa ZYTEL 101L NC010; oznaczono **PA66**
- 4) poliftalamid modyfikowany włóknem szklanym w ilości 35 % oraz stabilizowany termicznie i z dodatkiem środka smarnego – nazwa handlowa ZYTEL HTN51G35HSL NC010; producent Du Point – oznaczono **PPA/35GF**
- 5) poliftalamid modyfikowany włóknem szklanym w ilości 30 % - nazwa handlowa GRIVORY HTV-3H1 BLACK 9205; producent EMS CHEMIE AG – oznaczono **PA 6T/6I/30GF**
- 6) poliamid 66 modyfikowany włóknem szklanym w ilości 35 % – nazwa handlowa ZYTEL PLS95G35DH1 BK549; producent Du Point – oznaczono **PA66/6T/35GF**
- 7) poliamid 66 modyfikowany włóknem szklanym w ilości 50 % – nazwa handlowa ZYTEL PLS95G50DH2 BK261; producent Du Point – oznaczono **PA66/6T/50GF**
- 8) poliamid 46 stabilizowany termicznie z dodatkiem środka smarnego – nazwa handlowa STANYL TW341-N; producent DSM Engineering Materials – oznaczono **PA46**
- 9) poliamid 46 z dodatkiem teflonu PTFE – nazwa handlowa STANYL HGR2 BK00001, producent DSM Engineering Materials / oznaczono **PA46/PTFE**
- 10) poliamid 66 modyfikowany PTFE oraz włóknem szklanym w ilości 30 %, stabilizowany termicznie – nazwa handlowa TECOMID HT NT40 GR30 N RTOC; producent Eurotec – oznaczono **PA66/PTFE/30/GF**

Zastosowane napełniacze i modyfikatory:

- 1) wielościennie nanorurki węglowe – nazwa handlowa PlasmaChem – oznaczono **CNT**
- 2) środek smarny oparty na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylenowych – nazwa handlowa LICOWAX E FL – producent Clariant / oznaczono **SM**
- 3) kompatybilizator chemicznie modyfikowany polietylen szczepiony bezwodnikiem maleinowym Fusabond E926, DuPont, Wilmington, DE, USA – oznaczono **E926**

II.2. Aparatura i sprzęt laboratoryjny

- 1) Drobnny sprzęt laboratoryjny
- 2) Drukarka 3D do metalu EOS M 290
- 3) Ekstensometr MF Mess & Feinwerktechnik, model MFA 25
- 4) Forma wytryskowa do otrzymywania znormalizowanych kształtek
- 5) Forma wtryskowa do otrzymywania kół zębatach KZ25 i KZ17
- 6) Maszyna wytrzymałościowa Hegewald& Peschke 50 kN inspect 50 table
- 7) Mikroskop cyfrowy Keyence VHX-7000N
- 8) Młot udarnościowy Charpy'ego Instron Ceast 9050
- 9) Momentomierze typu MT 50 Nm (2 szt.)
- 10) Skaner optyczny Atos III Triple Scan 16M
- 11) Skaningowy mikroskop elektronowy SEM Thermo Scientific Prisma E
- 12) Skaningowy mikroskop elektronowy SEM Hitachi SEM TM3000
- 13) Sonometr CEM DT-95
- 14) Suszarka ze złożem molekularnym firmy Moretto
- 15) Stanowisko do badań wytrzymałości trwałościowej kół zębatach
- 16) Termostat TT-137 B/BP (n) / MP-988 Tool-Temp
- 17) Twardościomierz Shore'a D firmy Hildebrand
- 18) Waga elektroniczna Radwag AS 110.X2
- 19) Wagosuszarka RadWag MA50.R
- 20) Współrzędnościowa maszyna pomiarowa P40 firmy Klingelnberg
- 21) Wtryskarka Engel EVC 310/80
- 22) Wytłaczarka dwuślimakowa z linią do granulacji, Coperion, ZSK 18ML

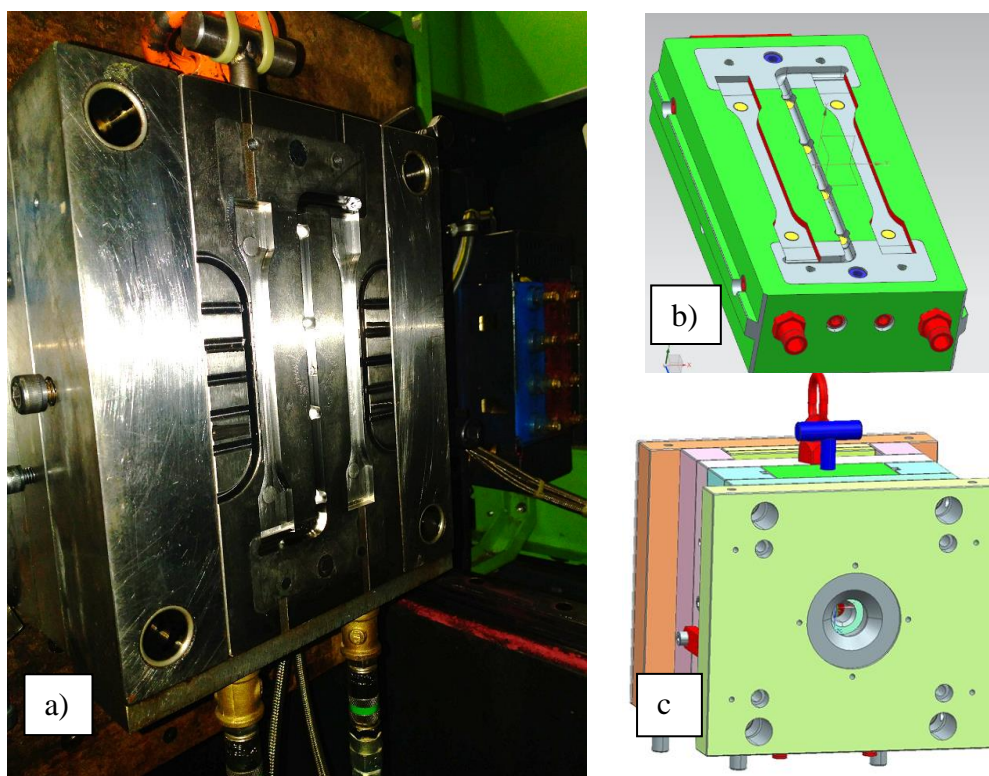
II.3. Otrzymywanie kształtek do badań właściwości mechanicznych

Wytypowane w podrozdziale II.1 tworzywa posłużyły do otrzymania znormalizowanych próbek. Kształtki wykonano przy pomocy technologii formowania wtryskowego, zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN ISO 294-1:2017-07. Proces wtryskiwania prowadzono na wtryskarce Engel EVC 310/80, o maksymalnej sile zwarcia 80 kN, którą przedstawiono na rys. 28.



Rys. 28. Wtryskarka Engel EVC 310/80 znajdująca się w firmie Splast Sp. z o.o.

Do formowania kształtek wykorzystano formę wtryskową, zaopatrzoną w wymienne wkładki wtryskowe, przedstawioną na rys. 29. Prace narzędziowe zostały w pełni wykonane w Narzędziowni firmy Splast.



Rys. 29. Forma wtryskowa z wymiennymi wkładkami do otrzymywania znormalizowanych kształtek:
 a) rzeczywisty widok formy z gniazdem formującym, b) model wkładki formującej, wykonany
 w programie Simens NX, c) model formy wtryskowej od strony punktu wtrysku, wykonany
 w programie Simens NX

Przed wtrysnięciem kształtek, materiały zostały wysuszone w suszarce z aktywnym złożem. Zbyt wysoka zawartość wilgoci w materiale, skutkuje pogorszeniem jakości wyprasek powstałych podczas wtrysku i w dalszym etapie zaburza końcowe wyniki badań [162]. Poliamidy oraz poliftalamidy, które są materiałami higroskopijnymi, suszono zgodnie z parametrami zestawionymi w tab. 9.

Tab. 9. Parametry procesu suszenia dla wymienionych materiałów

| Material | Temperatura, °C | Czas suszenia, h | Dopuszczalny poziom wilgoci, % |
|----------------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| PA6 | 80 | od 2 do 4 | < 0,1 |
| PA6/30GF | 80 | od 2 do 4 | < 0,1 |
| PA66 | 80 | od 2 do 4 | < 0,2 |
| PPA/35GF | 100 | od 2 do 8 | ≤ 0,1 |
| PA6T/6I/30GF | 100 | od 2 do 8 | 0,1 |
| PA66/6T/35GF | 80 | od 2 do 4 | ≤ 0,2 |
| PA66/6T/50GF | 80 | od 2 do 4 | ≤ 0,2 |
| PA46 | 80 | od 4 do 8 | 0,1 – 0,2 |
| PA46/PTFE | 80 | od 4 do 8 | 0,1 – 0,2 |
| PA66/PTFE/30GF | 80 | od 2 do 4 | 0,1 |

Dobierając parametry procesu wtrysku dla znormalizowanych kształtek kierowano się zaleceniami producentów, znajdujących się w udostępnionych przez nich kartach charakterystyki, a także wytycznymi literaturowymi [189, 190]. Profil temperaturowy cylindra ustalono poprzez stopniowe podnoszenie temperatury, aż do wypełnienia gniazda formy. Pozostałe parametry procesu wtryskiwania, takie jak czasy i ciśnienia, były dobierane w trakcie zmian ustawień temperatur cylindra i formy. Główne parametry cyklu zamieszono w tab. 10, natomiast wygląd próbek wtryskiwanych zaprezentowano na rys. 30.

Tab. 10. Parametry procesu wtrysku znormalizowanych kształtek

| Osnowa | Temp. cylindra | Temp. formy | Czas wtrysku | Czas docisku | Czas chłodzenia | Ciśnienie wtrysku | Ciśnienie docisku |
|------------------|----------------|-------------|--------------|--------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | [°C] | [°C] | [s] | [s] | [s] | [bar] | [bar] |
| PA6 | 245-255 | 70 | 2,6 | 8 | 20 | 880 | 250 |
| PA6/30GF | 245-255 | 70 | 2,6 | 8 | 20 | 880 | 250 |
| PA66 | 280-285 | 70 | 3,2 | 8 | 15 | 722 | 880 |
| PPA/35GF | 300-340 | 155 | 2,97 | 8 | 20 | 1000 | 600 |
| PA6T/6I/30GF | 300-340 | 140 | 0,58 | 5 | 30 | 950 | 750 |
| PA66/6T/35GF | 285-310 | 100 | 0,47 | 5 | 30 | 950 | 350 |
| PA66/6T/50GF | 285-310 | 105 | 0,22 | 5 | 30 | 950 | 350 |
| PA46 | 285-290 | 85 | 0,85 | 4 | 10 | 1200 | 400 |
| PA46/PTFE | 285-290 | 85 | 0,85 | 4 | 10 | 1200 | 400 |
| PA66/PTFE/30GF | 320-340 | 150 | 0,61 | 5 | 10 | 950 | 350 |
| PA46/CNT/SM | 285-290 | 85 | 0,85 | 4 | 10 | 1200 | 400 |
| PA46/PTFE/CNT/SM | 285-290 | 85 | 0,85 | 4 | 10 | 1200 | 400 |



Rys. 30. Wygląd znormalizowanych próbek wykonanych w celu pomiaru własności mechanicznych tworzyw sztucznych

II.4. Oznaczenie cech wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania

Oznaczenie właściwości wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Hegewald &Peschke 50 kN, w temperaturze otoczenia. Przed badaniem próbki w kształcie wiosełek przechowywano w eksykatorze z higroskopijnym żelom silikonowym. Kształtki mocowano jednoosiowo w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Do precyzyjnego określenia wartości modułu Younga wykorzystano ekstensometr bezpośrednio mocowany na badanej próbce. Parametr ten określano przy zadanej prędkości rozciągania równej 1 mm/min. Po osiągnięciu przez próbkę umownej granicy plastyczności ekstensometr usuwano i kontynuowano dalsze badanie z prędkością 5 mm/min. Postęp procesu rejestrowano w formie elektronicznej. Dla każdej serii wykonano po pięć powtarzalnych pomiarów zgodnie z normą PN-EN ISO 527.

II.5. Oznaczenie udarności wg Charpy'ego z karbem

Udarność Charpy'ego z karbem oznaczono wykorzystując młot udarowy Instron Ceast 9050 o energii 2 J. Próbkę do badań w kształcie beleczek przygotowano nacinając karb o głębokości 2 mm. Następnie kształtkę układano poziomo na podporach maszyny w taki sposób, aby młot uderzał w jej środek. Dla każdej serii wykonano pięć pomiarów zgodnie z normą PN-EN ISO/179/1eA.

II.6. Oznaczenie twardości wg Shore D

Pomiar twardości Shore'a D wykonano za pomocą twardościomierza Hildebrand w temperaturze pokojowej. Próbkę umieszczono w aparacie, przyłożono określone obciążenie i rozpoczęto 15 sekundowy pomiar. Dla każdej z serii przeprowadzono dziesięć oznaczeń zgodnie z normą PN-EN ISO 868.

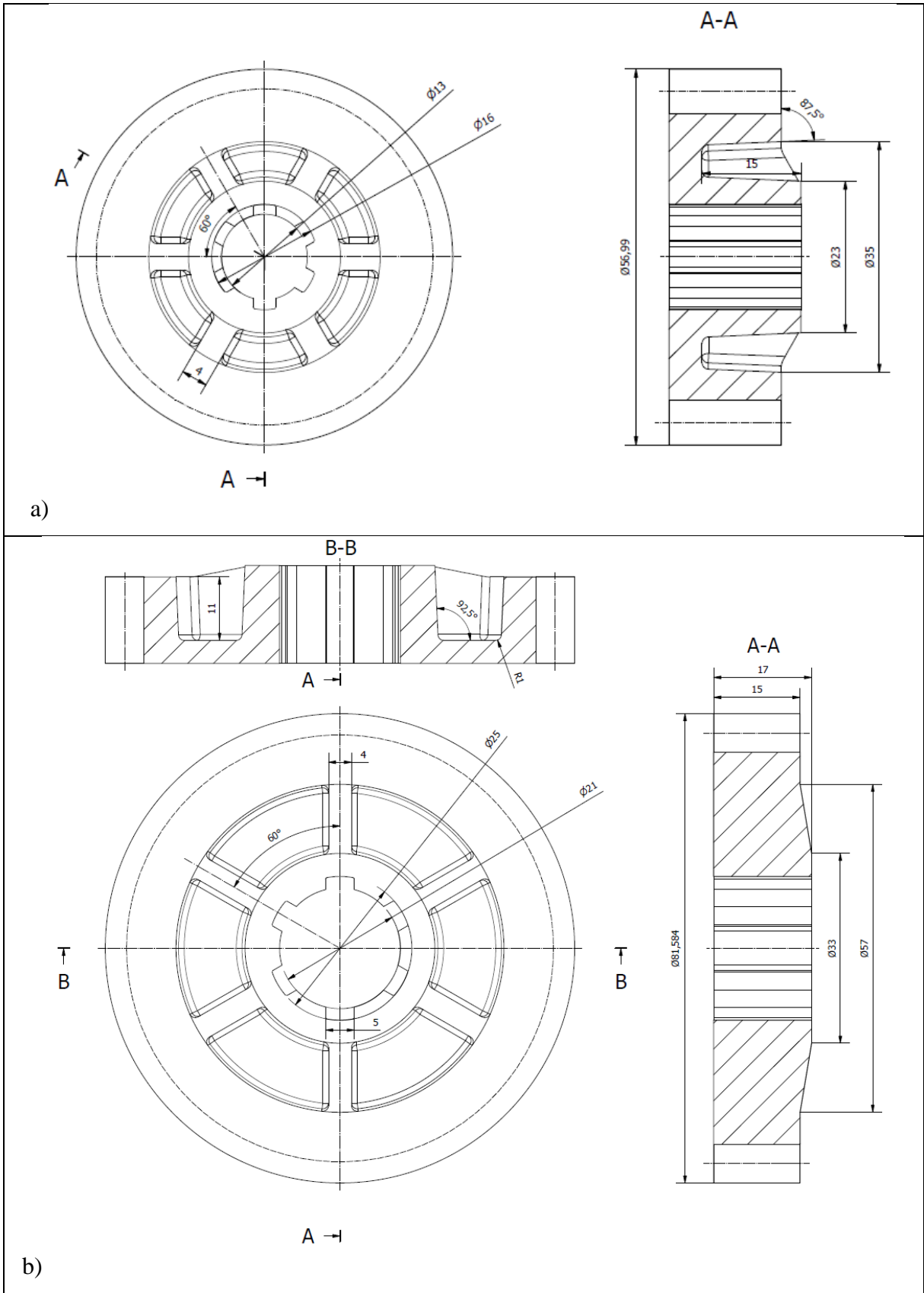
II.7. Analiza mikrostruktury wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM)

Do obserwacji mikrostruktury badanych materiałów, zastosowano kruche przełomy, otrzymane poprzez złamanie udarowe próbki po poprzednim ochłodzeniu jej w ciekłym azocie. Obserwacje wykonano za pomocą dwóch skaningowych mikroskopów elektronowych Hitachi SEM TM3000 oraz Thermo Scientific Prisma E. Przed badaniem SEM próbki kruchych

przełomów napyłano warstwą złota z palladem. Obserwacje prowadzono stosując napięcie 5keV.

II.8. Projekt geometrii dwóch kół zębatach

Przy pomocy programu Inventor, zaprojektowano jednostopniową walcową przekładnię zębatą o zębach prostych. Zdecydowano się na niesymetryczną geometrię kół zębatach, która w zamiarze miała eksponować wpływ skurczu przetwórczego. Wymiary kół zębatach dobrano w taki sposób, aby większe z nich miało objętość mniejszą niż 50 cm^3 . Wymiar ten został podyktowany wartością maksymalnej objętości dozowania, podyktowanej parametrami pierwotnie wytypowanej wtryskarki. Konstrukcje modeli kół zębatach zostały zaprojektowane w Katedrze Konstrukcji Maszyn znajdującej się na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Ich rysunki zostały przedstawione na rys. 31.



Rys. 31. Rysunek kół zębatych, zgodny z dokumentacją firmy Splast: a) KZ17; b) KZ25

W tab. 11 zamieszczono podstawowe parametry przekładni badawczej. Oznaczenia KZ25 i KZ17, określają kolejno koło zębate napędzane o liczbie zębów równej 25, oraz koło zębate napędzające o liczbie zębów 17.

Tab. 11. Podstawowe parametry kół zębatach

| Parametr | Koło zębate KZ25 (napędzane) | Koło zębate KZ17 (napędzające) |
|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Liczba zębów | 25 | 17 |
| Kąt zarysu [°] | 20 | |
| Moduł [mm] | 3 | |
| Odległość osi [mm] | 63 | |
| Szerokość uzębienia [mm] | 15 | 17 |
| Średnica wierzchołków [mm] | 81 | 57 |

II.9. Symulacja numeryczna procesu wtrysku kół zębatach

Po wygenerowaniu modelu bryłowego pary kół zębatach, przy pomocy programu CAE - Autodesk Moldflow Insight wersja 2018 (AMI) przeprowadzono symulacje procesu wtrysku KZ25 i KZ17. Wykonano analizy numeryczne dla następujących zagadnień: umiejscowienie punktów wtrysku wraz z wyborem układu wlewowego, wyznaczenie czasu i sposobu napełnienia gniazda formującego, rozmieszczenie linii łączenia, ustalenie orientacji włókna szklanego podczas przepływu, określenie równomierności skurczu objętościowego oraz paczenia wypraski.

Badania symulacyjne obejmowały następujące etapy:

- import przestrzennego modelu KZ25 i KZ17 do programu symulacyjnego Autodesk Moldflow Insight;
- wytypowanie tworzywa, dla którego będą wykonywane dalsze symulacje (materiał został wybrany z komputerowej bazy danych materiałowych aplikacji Autodesk Moldflow Insight);
- wygenerowanie siatki czworościanów MES (Metoda Elementów Skończonych);
- sprawdzenie oraz poprawa siatki;
- wprowadzenie warunków początkowych parametrów;
- ustalenie miejsca doprowadzenia tworzywa wraz z liczbą punktów wtrysku;

- specyfikowanie parametrów procesu wtrysku;
- przeprowadzenie obliczeń numerycznych;
- analiza wyników symulacji;

II.10. Projekt formy wtryskowej kół zębatach z wymiennym gniazdem formującym

Przy pomocy programu Simens NX 12 zaprojektowano elementy formujące (matrycę i stempel) oraz korpus formy o parametrach przedstawionych w tab. 12. Po opracowaniu kluczowej koncepcji narzędzia i wstępnych symulacjach wtrysku został zrealizowany proces projektowy formy wtryskowej kół zębatach z dwoma wymiennymi wkładkami formującymi.

W niniejszej analizie zostały przedstawione rozwiązania wprowadzone w:

- układzie formującym i naniesionych na model korektach związane z procesem wtrysku;
- zaprojektowanie układu doprowadzenia tworzywa;
- układ chłodzenia;
- konstrukcja wypychaczy.

Tab. 12. Dane użytkowe formy

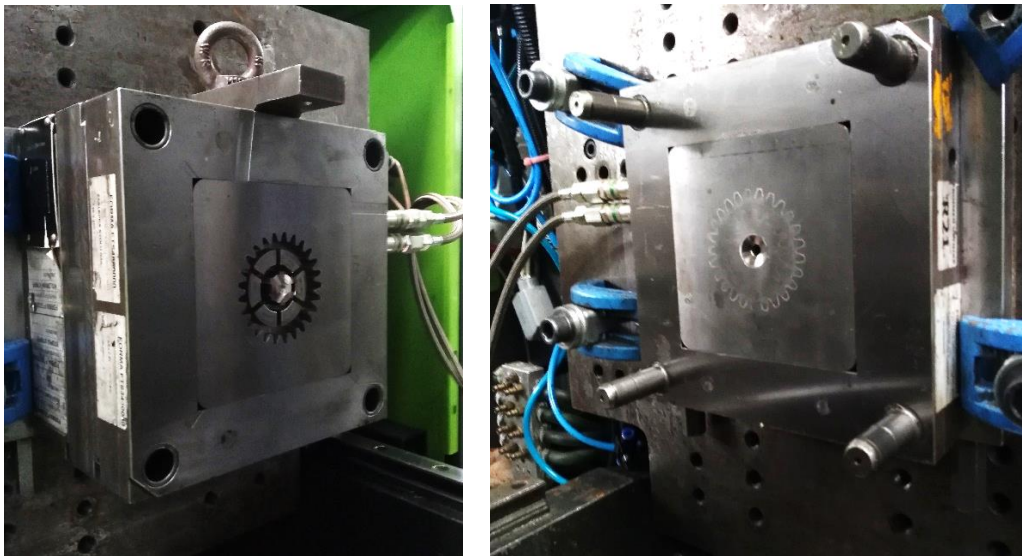
| Parametr | Wymiar | Jednostka |
|---|--------|-----------|
| Liczba gniazd | 1 | |
| Ciężar formy | 210 | kg |
| Ciężar stempla | 120 | kg |
| Ciężar matrycy | 90 | kg |
| Maksymalny skok wyrzutnika | 44 | mm |
| Długość formy | 246 | mm |
| Szerokość formy | 296 | mm |
| Wysokość formy | 270 | mm |
| Optymalna wysokość otwarcia | 100 | mm |
| Średnica pierścienia centrującego od strony nieruchomej | 125 | mm |
| Tuleja wtryskowa rk | 21 | mm |
| Tuleja wtryskowa d | 4,5 | mm |

Do wykonania obu części formy wtryskowej, tj. matrycy i stempla, użyto stali narzędziowej o oznaczeniu 1.2343. Gniazda formujące KZ25 i KZ17 wykonano przy pomocy technologii

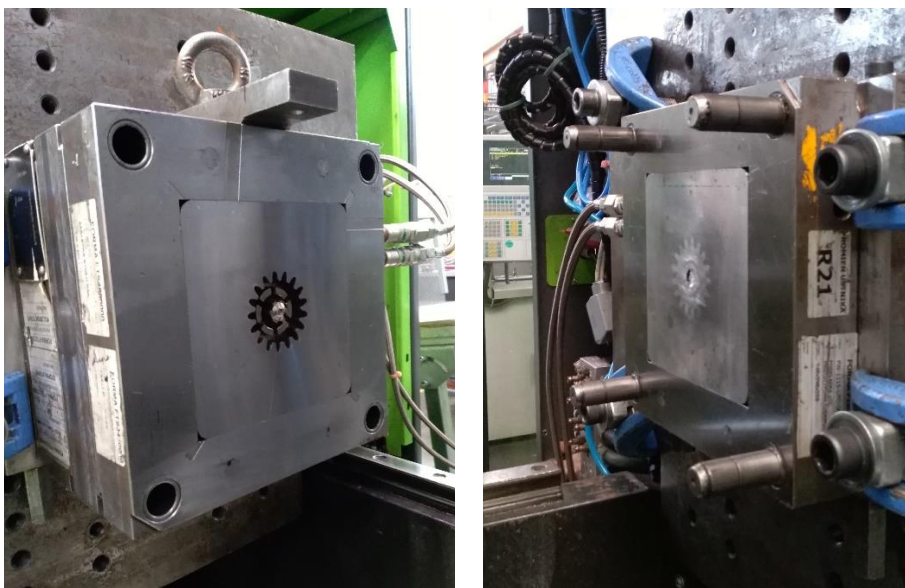
obróbki elektroerozyjnej na elektrodrążarce wgłębnej. Proces ten umożliwił wykonanie skomplikowanych kształtów, trudnych do uzyskania przy pomocy frezarki sterowanej numerycznie (CNC). Wszystkie prace narzędziowe wykonano w firmie Splast.

II.11. Wtrysk kół zębatach

Wtrysk kół zębatach KZ25 i KZ17 wykonano przy użyciu formy wtryskowej wyposażonej w dwie wymienne wkładki formujące (rys. 32 i 33) oraz maszyn wchodzących w skład parku maszynowego firmy Splast, tj. wtryskarki ENGEL EVC 310/80 i termostatu TT-137 B/BP (n) / MP-988 Tool-Temp. Przeprowadzono serie pilotażowych wtrysków materiałów zestawionych w podrozdziale II.1 oraz ich nowo otrzymanych kompozytów.



Rys. 32. Gniazdo formy wtryskowej do produkcji kół zębatach o oznaczeniu KZ25



Rys. 33. Gniazdo formy wtryskowej do produkcji kół zębatach o oznaczeniu KZ17

Bezpośrednio przed procesem wtrysku, tworzywa zostały wysuszone zgodnie z parametrami zestawionymi w tab. 9 (podrozdział II.3). Za pomocą wilgotnościomierza został skontrolowany udział zawartej z nich wilgoci. Na podstawie kart danych technicznych materiałów (*TDS, Technical Data Sheet*) oraz nabytego doświadczenia, określono ostateczne parametry wtrysku dla każdego z materiałów wykorzystanych do otrzymania KZ25 i KZ17 (tab. 13).

Tab. 13. Parametry wtrysku KZ25 i KZ17

| Parametr | Jednostka | PA6 | PA6/30GF | PA66 | PPA/35GF | PA6T/6I/30GF | PA66/6T/35GF | PA66/6T/50GF | PA46 | PA46/PTFE | PA66/PTFE/30GF |
|-----------------------------|-----------|---------|----------|---------|----------|--------------|--------------|--------------|---------|-----------|----------------|
| Koło zębate KZ25 | | | | | | | | | | | |
| Temperatura wtrysku | °C | 260 | 280 | 300 | 330 | 330 | 290 | 305 | 320 | 321 | 320 |
| Profil temperatury cylindra | °C | 240-260 | 265-280 | 280-300 | 320-330 | 305-330 | 285-290 | 290-305 | 290-320 | 290-321 | 290-320 |
| Ciśnienie wtrysku | bar | 1000 | 1600 | 1000 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 |
| Czas wtrysku | s | 1,5 | 1,3 | 1,4 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,7 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Ciśnienie docisku | bar | 1400 | 1700 | 1200 | 1800 | 1650 | 1600 | 1700 | 1800 | 1800 | 1800 |
| Czas docisku | s | 10 | 12 | 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Prędkość obrotowa ślimaka | m/min | 0,200 | 0,165 | 0,400 | 0,200 | 0,200 | 0,200 | 0,300 | 0,450 | 0,450 | 0,450 |
| Temperatura formy | °C | 70 | 80 | 70 | 150 | 140 | 120 | 120 | 100 | 100 | 150 |
| Koło zębate KZ17 | | | | | | | | | | | |
| Temperatura wtrysku | °C | 255 | 280 | 310 | 325 | 330 | 295 | 305 | 330 | 331 | 320 |
| Profil temperatury cylindra | °C | 240-255 | 268-280 | 290-310 | 310-325 | 305-330 | 285-295 | 290-305 | 300-330 | 300-331 | 290-320 |
| Ciśnienie wtrysku | bar | 1600 | 1600 | 1100 | 1700 | 1700 | 1600 | 1700 | 1400 | 1400 | 1200 |
| Czas wtrysku | s | 1,8 | 1,4 | 2,9 | 1,3 | 2,1 | 2,6 | 2,1 | 1,4 | 1,4 | 1,6 |
| Ciśnienie docisku | bar | 1500 | 1500 | 900 | 1400 | 1400 | 1600 | 1450 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Czas docisku | s | 20 | 20 | 8 | 8 | 12 | 12 | 12 | 15 | 15 | 4 |
| Prędkość obrotowa ślimaka | m/min | 0,165 | 0,165 | 0,165 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,120 | 0,120 | 0,120 |
| Temperatura formy | °C | 70 | 80 | 70 | 150 | 140 | 120 | 120 | 100 | 100 | 150 |

II.12. Pomiar geometrii formy wtryskowej oraz kół zębatych za pomocą skanera optycznego

Badanie dokładności geometrycznej gniazd formy wtryskowej oraz kół zębatych wykonano na skanerze optycznym Atos III Triple Scan 16M, który przedstawiono na rys. 34. Przed przystąpieniem do pomiarów gniazd formy wtryskowej, rozmieszczono markery referencyjne na mierzonych wkładkach oraz na stole pomiarowym. Analogiczny proces wykonano przed pomiarem geometrii wtryskiwanych kół zębatych, poprzez nałożenie punktów referencyjnych na powierzchni skanowanych detali. Przy pomocy programu Atos Professional (wersja 2018) oraz pola roboczego MV 170 o dokładności 0,02 mm, zaimportowano i dopasowano chmury zeskanowanych punktów. Następnie wykonano dopasowanie nominalnego modelu do rzeczywistego elementu. Pomiar gniazd formujących i kół zębatych wykonano w 30 położeniach stołu, które później zostały połączone w siatkę MESH. W wyniku skanowania elementów uzyskano chmury punktów, w których każdy był opisany współrzędnymi X, Y, Z. Na podstawie chmur punktów stworzono kolorowe mapy odchyłek, obrazujących odwzorowanie modelu 3D do rzeczywistych skanów geometrii.



Rys. 34. Skaner optyczny Atos III Triple Scan 16M wraz ze stołem pomiarowym znajdującym się w Centrum Badawczo - Rozwojowym firmy Splast

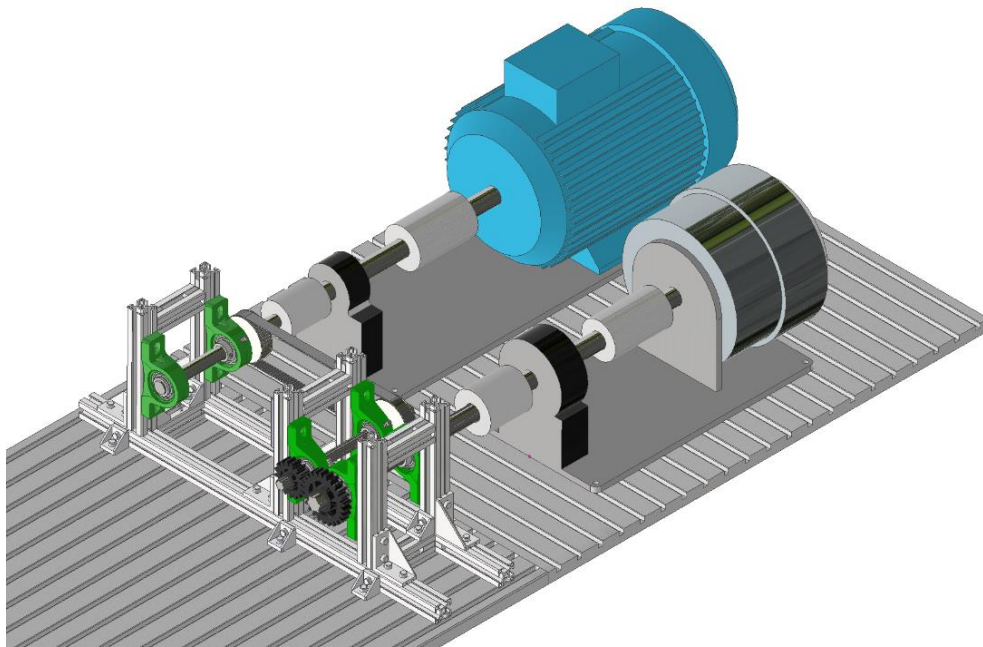
II.13. Pomiar dokładności geometrycznej wykonany za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40

Badanie dokładności geometrycznej kół zębatach wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej P40 firmy Klingelberg. Procedura przygotowania i realizacji pomiaru polegała na wprowadzeniu do programu GINA parametrów kół (podrozdział II.8, tab. 11), które umożliwiły określenie geometrii bazowych KZ17 i KZ25. W tym celu dobrano trzpienie pomiarowe, określono zbiór parametrów pomiarowych, zdefiniowano sposób pomiaru topografii zęba oraz ustalono tolerancję jego zarysu. Do pomiaru zarysu i linii wybrano trzy zęby rozmieszczone równomiernie na obwodzie badanego koła zębatego. Dla wszystkich zębów zmierzono podziałkę i ich grubość. Pomiaru dokonywano w warunkach laboratoryjnych w temperaturze od 18 °C do 20 °C i stałej niskiej wilgotności. Do pomiaru obu wielkości kół zębatach użyto trzpienia złożonego z dwóch końcówek rubinowych o średnicy 1,5 mm, z odpowiednio możliwie najkrótszymi wysięgami. Podczas pomiaru korzystano z dwóch baz odniesienia (powierzchni walcowej i powierzchni czołowej). Koła były mocowane w uchwycie trójścękowym centrowanym na stole obrotowym współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40.

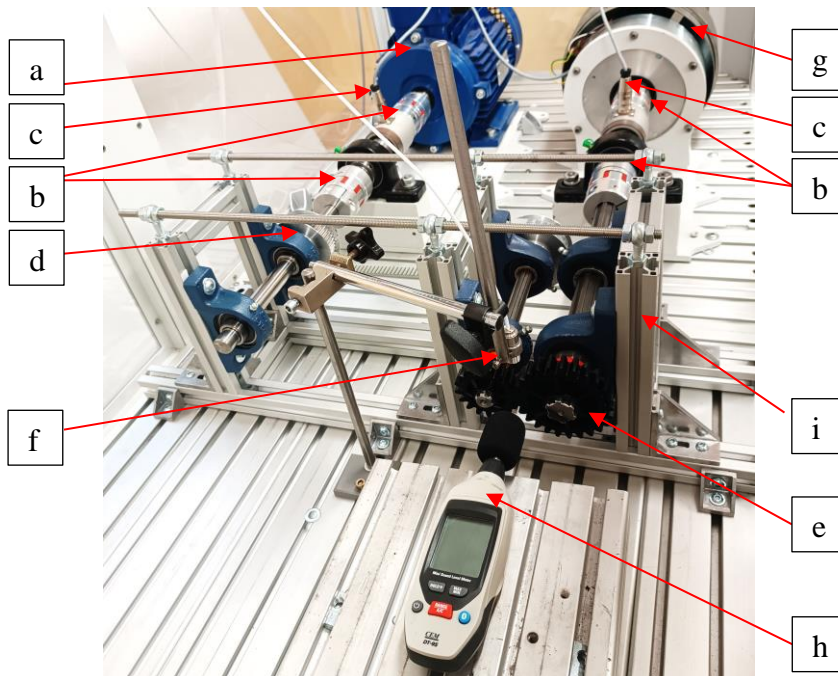
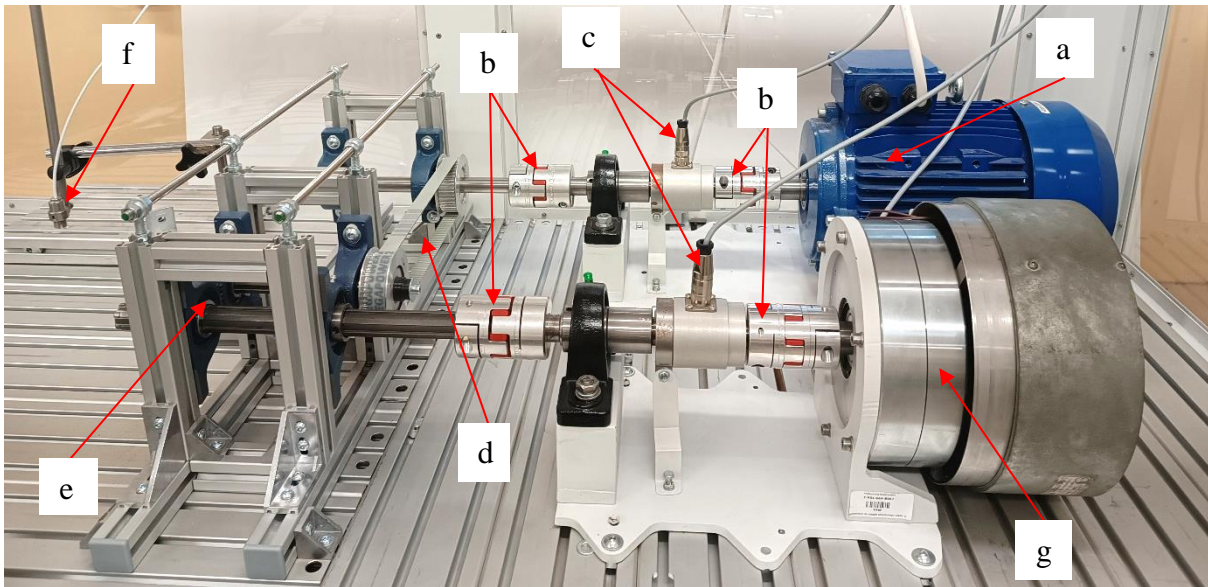
II.14. Stanowisko do badań wytrzymałości trwałościowej kół zębatach

Porównawcze badania trwałości dla zaprojektowanej przekładni zębatej, przeprowadzono na stanowisku pracującym w układzie otwartym, które przedstawiono na rys. 35 i 36. Testowana przekładnia była napędzana przez 6-cio biegowy silnik indukcyjny firmy Promotor typ MS2 112M-6, o mocy nominalnej równej 2,2 kW. Jego zakres obrotów wynosił do 955 obr./min, a nominalny moment obrotowy był równy 22 Nm. Dzięki modyfikacji parametrów zasilania poprzez zastosowanie trójfazowego regulatora (falownika) Goodrive 10, uzyskiwano prędkości od 200 obr./min do maksymalnych obrotów silnika. Stanowisko zostało wyposażone w dwa momentomierze typu MT 50 Nm, podłączone do rejestratora RMC. Momentomierze pozwalały na odczyt wartości momentu i obrotów oraz rejestrację w czasie rzeczywistym. Częstotliwość próbkowania rejestratora wynosiła 10 Hz natomiast rozdzielczość momentomierza była 0,1 %. Pomiędzy momentomierzami umieszczono układ badawczy – przekładnię zębatą z tworzywa polimerowego, którą obciążono hamulcem proszkowym firmy Elfa typ P 80. Za jego pomocą wprowadzano do układu moment napinający, mierzony jednym z momentomierzy. Charakteryzował się możliwością płynnej regulacji momentu hamującego

do 80 Nm. Ze względu na zastosowany silnik oraz momentomierze, stanowisko można było obciążyć do maksymalnie ok. 22 Nm. Badana przekładnia zębata została osadzona na ramie stabilizującej, zaopatrzonej w pręty ułatwiające regulację rozstawu osi. Ponieważ wytypowane koła charakteryzowały się różnym skurczem, jako wielkość stałą, wprowadzono luz międzyzębny o wartości 0,25 mm. Temperatura punktu styku dwóch zębów w przekładni, była mierzona metodą bezdotykową przy pomocy pirometru Micro-Epsilon, którego sygnał cyfrowy trafiał do rejestratora RMC. Pomiary ciśnienia akustycznego [dBA] były prowadzone przy pomocy ręcznego sonometru CEM DT-95. W celu zapewnienia bezpieczeństwa i higieny pracy, stanowisko badawcze zostało wyposażone w ochronną osłonę wykonaną z materiału plexiglass.

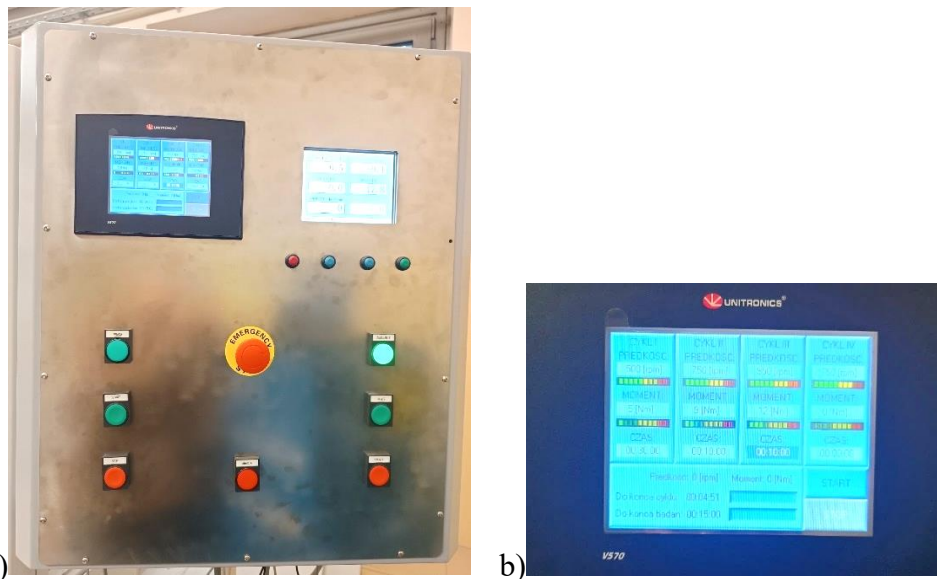


Rys. 35. Schemat modelu CAD stanowiska do badań trwałościowych kół zębatach w układzie otwartym



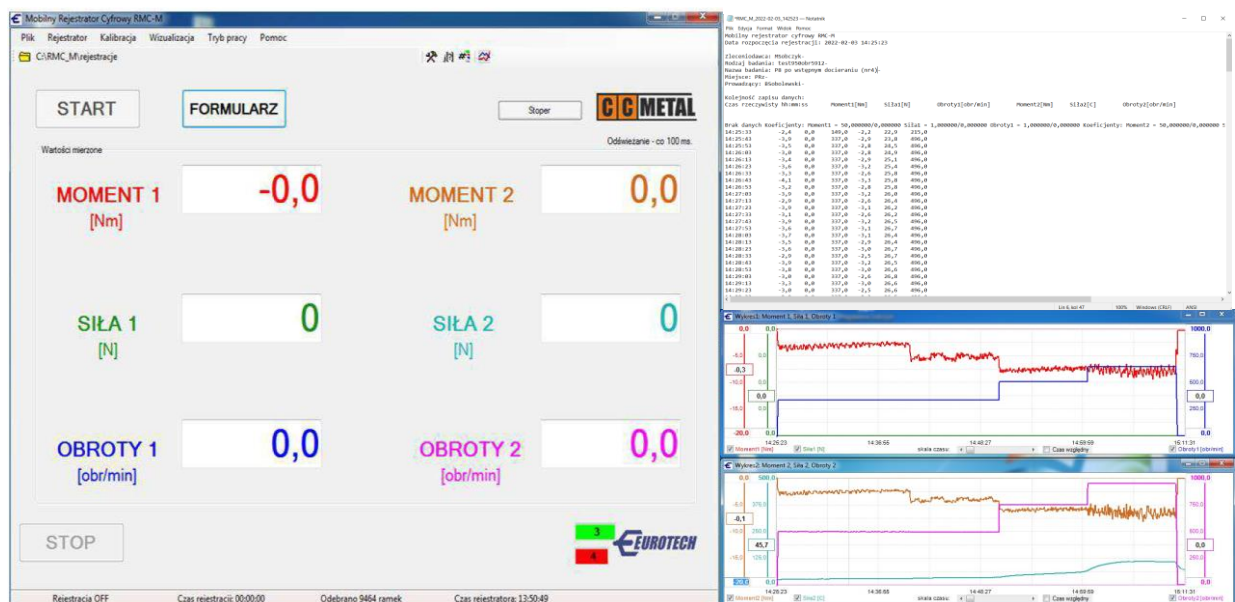
Rys. 36. Widok stanowiska przekładni zębatej: a) silnik; b) sprzęgła; c) momentomierze;
 d) przekładnia pasowa; e) przekładnia zębata redukcyjna; f) pirometr; g) hamulec; h) sonometr;
 i) rama stabilizująca

Układ badawczy został połączony ze sterownikiem z programowanymi cyklami pracy, który przedstawiono rys. 37 a. Ustawienia parametrów wprowadzano za pomocą okna programowego sterownika przemysłowego HMI firmy Unitronics, który przedstawiono na rys. 37 b. Dało to możliwość zaprogramowania programu badawczego składającego się z 4 etapów, różniących się parametrami pracy przekładni, takimi jak: prędkość obrotowa [obr./min]; moment obrotowy [Nm] oraz czas [s].



Rys. 37. Wyposażenie układu badawczego: a) panel sterowania stanowiska badawczego; b) okno programowe sterownika badawczego

Na rys. 38, przedstawiono widok danych zapisywanych poprzez program RMC-M. Wartości były wyświetlane w postaci pliku tekstowego oraz wykresów, które umożliwiały podgląd pomiarów w czasie rzeczywistym oraz ich wydruk w postaci raportu w pliku txt.



Rys. 38. Widok programu RMC-M do rejestru danych

Badaniom trwałościowym poddano kilkadziesiąt par kół zębatach wykonanych w technologii formowania wtryskowego. Program cykli badawczych został opracowany

doświadczalnie. W trakcie każdego z testów przekładni, kontrolowano wzrost temperatury kół w punkcie styku [°C] oraz wytwarzane w trakcie badania ciśnienie akustyczne [dBA]. Wartości uzyskane podczas cykli badawczych przedstawiono w graficznej postaci, będącej średnią uzyskaną dla trzech powtórzeń. Po zakończeniu każdego z testów, wizualnie i za pomocą mikroskopu cyfrowego Keyence VHX-7000N, oceniano zużycie powierzchni bocznej kół zębatach.

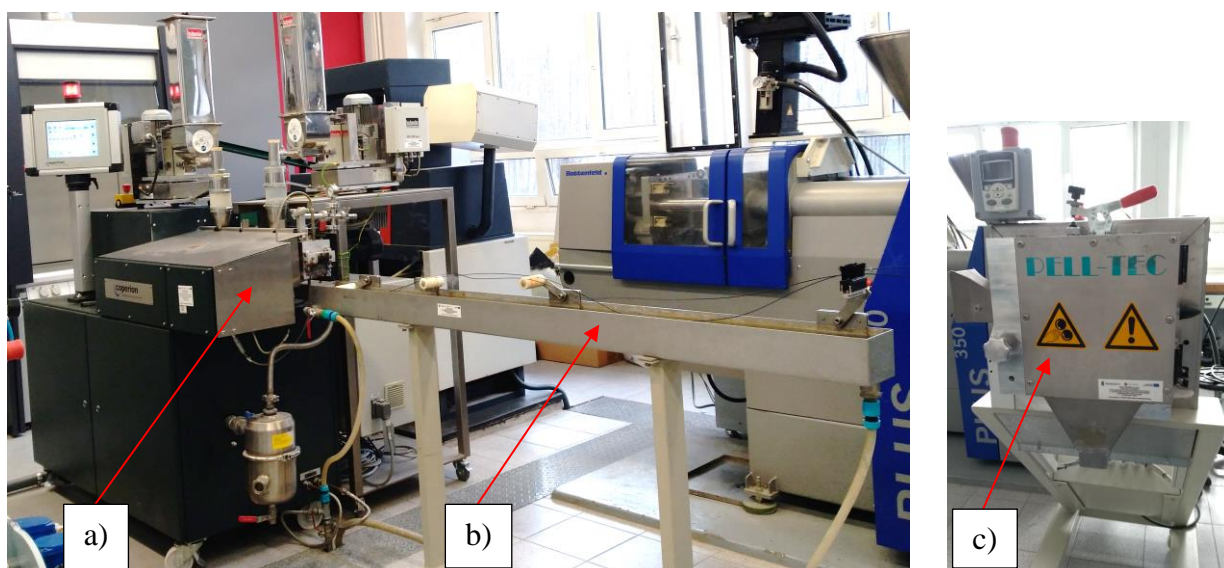
II.15. Otrzymywanie nowych kompozycji przy pomocy wylączarki ślimakowej

Po zakończeniu pierwszego cyklu badań własności mechanicznych, strukturalnych, współrzędnościowych oraz wstępnych serii testów przekładni zębatach, wykonanych z wytypowanych tworzyw (podrozdział II.1), wybrano materiały, które charakteryzowały się najmniejszym zużyciem współpracującej powierzchni zębów. Na podstawie wyników badań, przedstawionych w podrozdziałach III.1 – III.4, wytypowano trzy materiały: PA66/6T/35GF, PA46 i PA46/PTFE. Po analizie danych literaturowych wyselekcjonowano dwa dodatki modyfikujące, tj. środek smarny CNT i wielościenne nanorurki węglowe SM, których potencjał wykorzystania został opisany w podrozdziałach I.2.5; I.2.6; I.2.7. W celu wykorzystania pełnych możliwości dodawanych modyfikatorów, zadbane o ich dobrą kompatybilizację z osnową polimerową poprzez użycie środka E926. Receptury dla nowych kompozycji przedstawiono w tab. 14.

Tab. 14. Oznaczenia i zawartość poszczególnych składników w wytypowanych kompozycjach

| Kompozycja | CN | SM | E926 |
|---------------------|----------|----------|----------|
| | [% wag.] | [% wag.] | [% wag.] |
| PA46/CNT/SM | 0,5 | 0,5 | 1 |
| PA46/PTFE/CNT/SM | 0,5 | 0,5 | 1 |
| PA66/6T/35GF/CNT/SM | 0,5 | 0,5 | 1 |

W celu otrzymania nowych kompozytów przeprowadzono proces wylączania ustalonych kompozycji. Wykorzystano wylączarkę dwuślimakową firmy Coperion ZSK 18DL wyposażoną w linię do granulacji, którą przedstawiono na rys. 39.



Rys. 39. Linia do otrzymywania kompozycji polimerowych: a) wylączarka dwuślimakowa firmy Coperion ZSK 18DL; b) wanna chłodząca; c) granulator z nożem tnącym

Przed zmieszaniem odpowiedniej ilości składników, zgodnie z recepturami zestawionymi w tab. 14, materiały wrażliwe na wilgoć suszono w suszarce ze złożem aktywnym. Parametry procesu przedstawiono w tab. 15.

Tab.15. Parametry procesu suszenia dla wymienionych materiałów

| Materiał | Temperatura, °C | Czas suszenia, h | Dopuszczalny poziom wilgoci, % |
|---------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| PA46/CNT/SM | 80 | od 4 do 8 | 0,1 - 0,2 |
| PA46/PTFE/CNT/SM | 80 | od 4 do 8 | 0,1 - 0,2 |
| PA66/6T/35GF/CNT/SM | 80 | od 4 do 8 | 0,1 - 0,2 |

Warunki prowadzenia procesu wylączania były ustalone tak, by uzyskać jak najniższą dopuszczalną temperaturę przetwórstwa, mieszczącą się w zakresie sugerowanym przez producenta bazowej osnowy polimerowej. Zwiększenie wydajności otrzymywania nowego kompozytu, poprzez zwiększenie prędkości obrotowej ślimaka, mogłoby wpłynąć na gwałtowny wzrost tarcia i spowodować lokalne przekroczenie temperatury uplastycznienia tworzywa w cylindrze wylączarki. Wybór właściwych parametrów wylączania stanowił istotne zagadnienie zarówno z powodu wąskiego zakresu temperatury cylindra, a także z powodu niskiej wydajności linii do granulacji.

Ostatecznie zrezygnowano z przygotowania kompozycji PA66/6T/35GF/CNT/SM. Było to spowodowane tym, że włókno szklane znajdujące się już w materiale handlowym PA66/6T/35GF uległoby znacznemu skróceniu, na skutek ponownego przejścia przez układ uplastyczniający wylączarki. Przełożyłoby się to na pogorszenie parametrów mechanicznych ostatecznej kompozycji i uniemożliwiłoby porównanie nowego kompozytu PA66/6T/35GF/CNT/SM, względem jego pierwotnej niemodyfikowanej wersji PA66/6T/35GF. Istotne parametry wytłoczonych kompozytów zamieszczono w tab.16.

Tab. 16. Parametry procesu wytłaczania mieszającego kompozytów

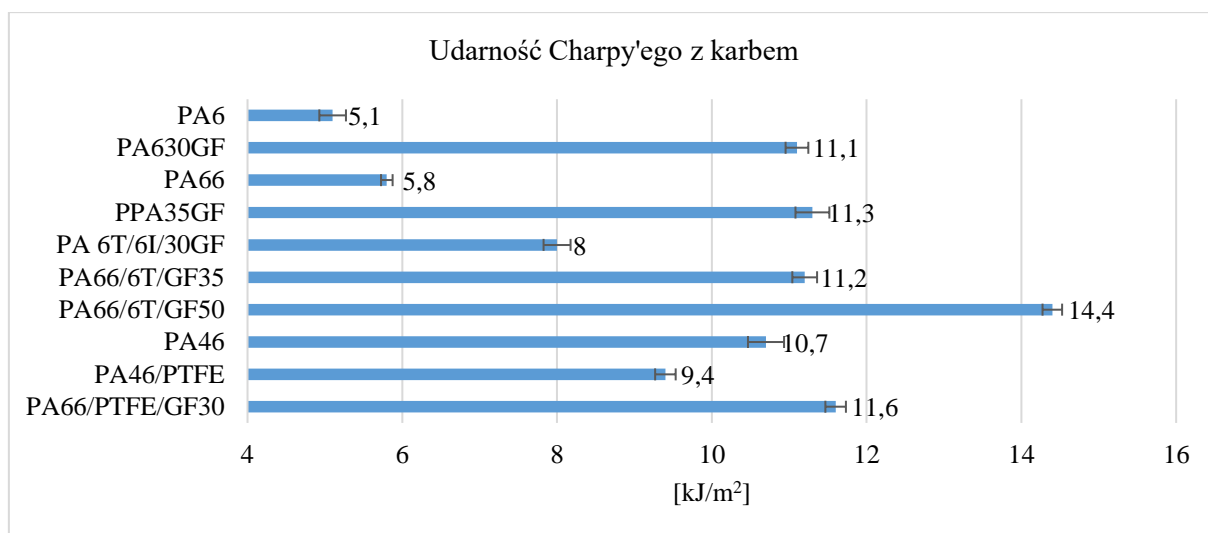
| Material | Prędkość wytłaczania, obr./min | Wydajność wytłaczania, kg/h | Temperatura, °C |
|------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| PA46/CNT/SM | 400 | 4 | 300 – 320 |
| PA46/PTFE/CNT/SM | 400 | 4 | 300 – 320 |

Po otrzymaniu kompozycji materiałowych przeprowadzono kolejną pełną serię badań. Przed wtryskiem znormalizowanych kształtek oraz kół zębatych, granulaty PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM suszono zgodnie parametrami w tab. 15. Parametry wtrysku kształtek zestawiono w tab. 10 (podrozdział II.3).

III. ANALIZA I OMÓWIENIE WYNIKÓW PRACY

III.1. Analiza oznaczenia udarności wg Charpy'ego z karbem

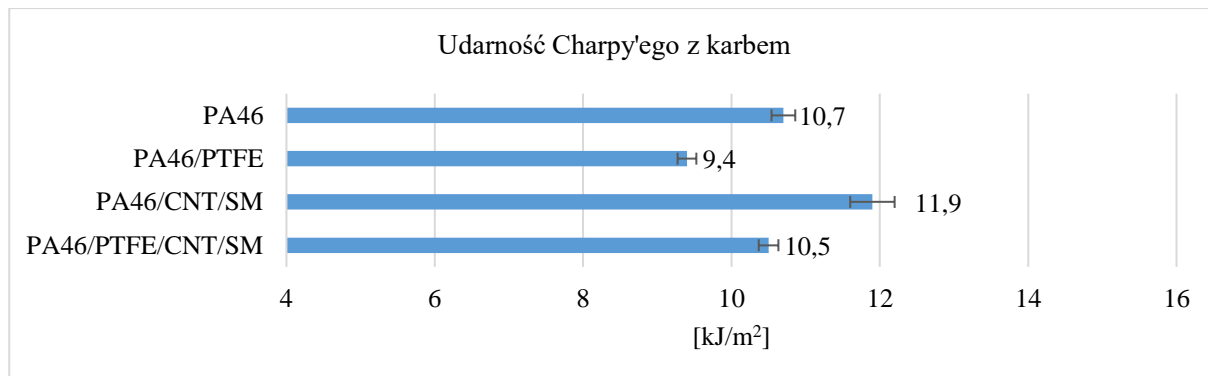
Wyniki badania udarności zestawiono w formie wykresów słupkowych, na rys. 40 i 41. Badanie przeprowadzono na znormalizowanych próbkach otrzymanych zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale II.5.



Rys. 40. Zestawienie wyników udarności wg Charpy'ego z karbem dla poliamidów (PA6, PA66, PA46) i ich kompozytów

Analizując otrzymane rezultaty badań stwierdzono, że poliamidy niemodyfikowane tj. PA6 oraz PA66 charakteryzowały się porównywalną wartością udarności, która wahała się w okolicach 5,5 kJ/m². We wszystkich materiałach, w których zastosowano napełnienie włóknem szklanym, odnotowano znaczny wzrost odporności na dynamiczne pękanie w miejscu karbu. Dodatek 30 % włókna szklanego, które znajdowało się w PA6/30GF spowodował wzrost udarności o 118 % w porównaniu z niemodyfikowanym PA6. Porównując dwa kompozyty o napełnieniu włóknem szklanym w ilości 30 %, tj. PA6/30GF oraz PA6T/6I/30GF, obserwowano znaczną różnicę udarności wynoszącą 3,1 kJ/m². Rozbieżność ta wynikała prawdopodobnie z większego udziału fazy amorficznej w strukturze matrycy polimerowej PA6T/6I/30GF, względem PA6/30GF [99]. Dwie kompozycje zawierające 35 % wag. włókna szklanego (PPA/35GF, PA66/6T/35GF), cechowały się jednakową odpornością na pękanie pod wpływem dynamicznego uderzenia, wynoszącą 11,2 – 11,3 kJ/m². Do badań wytypowano także kompozyt mający w strukturze 50 % udziału wag. GF – PA66/6T/50GF. Spośród badanych tworzyw, materiał ten charakteryzował się najwyższą udarnością, która wynosiła 14,4 kJ/m². Porównując wpływ PTFE na udarność poliamidu 4.6, zaobserwowano obniżenie tego

parametru o 12,1 % w kompozycie PA46/PTFE względem PA46. Należy wspomnieć, że na podstawie danych literaturowych zaobserwowano podobne zależności pogorszenia się parametrów udarnościowych przy wzroście udziału PTFE w kompozycie z poliamidem 6 [83].



Rys. 41. Zestawienie wyników udarności wg Charpy'ego z karbem dla PA46 i jego kompozytów

Na rys. 41, przedstawiono rezultaty wyznaczenia udarności dla nowych kompozytów poliamidu 4.6. Dodanie wielościennych nanorurek węglowych do PA46 oraz PA46/PTFE wpłynęło pozytywnie na właściwości udarnościowe otrzymanych kompozytów. PA46/CNT/SM oraz PA46/PTFE/CNT/SM cechowały się tą właściwością na poziomie 11,9 oraz 10,5 kJ/m². Zastosowanie modyfikatora CNT posiadającego wysoko rozwiniętą powierzchnię właściwą, przyczyniło się do wzrostu właściwości adhezyjnych i zwiększenia nośności modyfikowanych próbek PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM. W dalszym rozumowaniu, przełożyło się to na zwiększenie energii potrzebnej do pęknięcia tych kształtek na skutek dynamicznego uderzenia. Podobne obserwacje dotyczące modyfikacji CNT innego termoplastu (poliwęglanu) opisano w literaturze [67].

III.2. Analiza badań cech wytrzymałościowych podczas statycznej próby rozciągania

Styczna próba rozciągania jest podstawową metodą badań właściwości wytrzymałościowych polimerów i ich kompozytów. Analiza została przeprowadzona zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale II.4. Otrzymane wyniki będące wartością średnią wyciągniętą z pięciu powtarzalnych testów, zebrano w tab. 17 i 18.

Tab. 17. Zestawienie wyników badań mechanicznych dla poliamidów (PA6, PA66, PA46) i ich kompozytów

| Oznaczenie | Moduł Younga, MPa | Naprężenie rozciągające przy zerwaniu, MPa | Odształcenie przy zerwaniu, % |
|----------------|-------------------|--|-------------------------------|
| PA6 | 2648 ± 58 | 75 ± 3 | 67,8 ± 14,2 |
| PA6/30GF | 10320 ± 110 | 177 ± 1 | 2,9 ± 0,2 |
| PA66 | 3074 ± 9 | 77 ± 4 | 31,0 ± 3,6 |
| PPA/35GF | 11535 ± 72 | 213 ± 2 | 2,4 ± 0,3 |
| PA6T/6I/30GF | 9874 ± 132 | 175 ± 3 | 1,8 ± 0,2 |
| PA66/6T/35GF | 10087 ± 124 | 188 ± 1 | 3,4 ± 0,2 |
| PA66/6T/50GF | 16124 ± 209 | 232 ± 2 | 2,8 ± 0,4 |
| PA46 | 3247 ± 45 | 101 ± 2 | 11,2 ± 1,6 |
| PA46/PTFE | 2907 ± 79 | 88 ± 1 | 26,5 ± 2,8 |
| PA66/PTFE/30GF | 10155 ± 591 | 163 ± 2 | 1,8 ± 0,2 |

Porównując rezultaty przedstawione w tab. 17 stwierdzono, że wybrane do badań niemodyfikowane polimery PA6 i PA66 charakteryzują się podobnymi parametrami całkowitego odkształcenia oraz naprężenia rozciągającego mierzonego podczas zerwania. Natomiast w porównaniu do PA66, próbki PA6 cechowały się niższą o 13,9 % sztywnością oraz ponad dwukrotnie wyższym odkształceniem przy zerwaniu. Obserwując otrzymane wyniki modułu Younga stwierdzono, że wprowadzenie do PA6 włókna szklanego w ilości 30 % wpłynęło na czterokrotny wzrost tego parametru w próbce oznaczonej PA6/30GF. Kompozyty z zawartością 30 % wag. włókna szklanego, ale różną osnową polimerową, tj. PA6/30GF i PA6T/6I/30GF, charakteryzowały się zbliżonymi parametrami wytrzymałościowymi, takimi jak moduł Younga – ok. 10000 MPa oraz naprężenie rozciągające przy zerwaniu – ok. 176 MPa. Zwiększenie ilości włókna szklanego z 35 do 50 % w osnowie PA66/6T pozytywnie wpłynęło na sztywność kompozytu. Materiał PA66/6T/50GF z maksymalną, spośród badanych próbek, ilością włókna szklanego, charakteryzował się modułem Younga o wartości 16124 MPa. W porównaniu do PA66/6T/35GF daje to aż 59,8 % przyrost sztywności. W przypadku dodatku PTFE do poliamidu 4.6 w kompozycie PA46/PTFE, obserwowano nieznaczne pogorszenie trzech mierzonych parametrów wytrzymałościowych. W tym

przypadku moduł Younga uległ zmniejszeniu o 10,5 %, naprężenie zrywające o 12,9 %, a odkształcenie przy zerwaniu o 12,1 %. Analogiczne wnioski zostały przedstawione w literaturze [83]. Uzyskane dane korelują z wcześniej przedstawionymi wynikami udarności (rys. 41).

Kompozyt PA66/PTFE/30GF mimo stosunkowo wysokiego modułu Younga o wartości 10155 MPa, uzyskał niższą od przewidywanej, wartość naprężenia zrywającego. Otrzymany wynik wynosił 163 MPa. Przyczyną takiego spadku tego parametru wytrzymałościowego, najprawdopodobniej było zbyt słabe połączenie włókna szklanego z osnową polimerową. Problem ten został opisany w pozycji literaturowej [119]. Dla próbek niezawierających włóknistego napełniacza tj. PA6, PA66, PA46 i PA46/PTFE, obserwowano tworzenie się podczas rozciągania szyjki poprzedzającej zerwanie wiósełka. Dla pozostałych próbek, zawierających włókno szklane, nie obserwowano tworzącego się przewężenia, a badanie kończyło się w wyniku kruchego zerwania wiósełka.

Tab. 18. Zestawienie wyników badań mechanicznych dla PA46 i jego kompozytów

| Oznaczenie | Moduł Younga, MPa | Naprężenie rozciągające przy zerwaniu, MPa | Odkształcenie przy zerwaniu, % |
|------------------|-------------------|--|--------------------------------|
| PA46 | 3247 ± 45 | 101 ± 2 | 11,2 ± 1,6 |
| PA46/PTFE | 2907 ± 79 | 88 ± 1 | 26,5 ± 3,1 |
| PA46/CNT/SM | 3404 ± 22 | 104 ± 2 | 9,1 ± 1,2 |
| PA46/PTFE/CNT/SM | 3046 ± 54 | 90 ± 1 | 20,3 ± 3,8 |

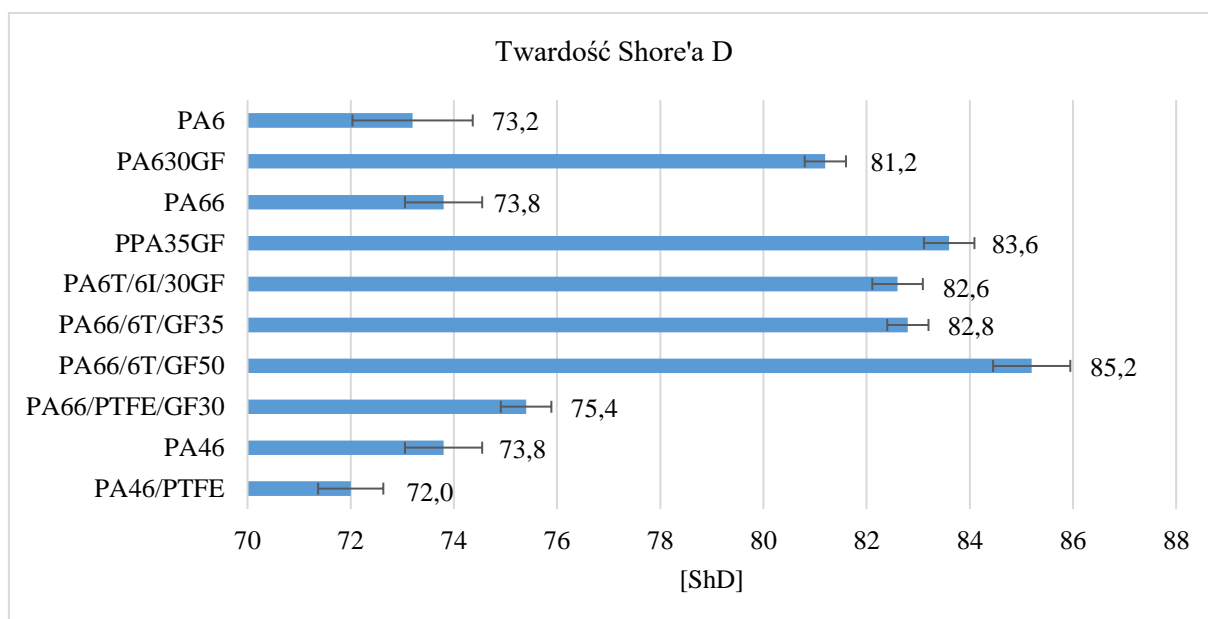
Przy ocenie rezultatów zestawionych w tab. 18 dla kształtek wytworzonych w technologii formowania wtryskowego zauważono, że wprowadzenie wielościennych nanorurek węglowych i środka smarnego spowodowało nieznaczny wzrost sztywności o ok. 4,8 % dla obu kompozytów PA46/CNT/SM oraz PA46/PTFE/CNT/SM. Poprawa modułu Younga wiązała się z wprowadzeniem nanokompozytu do struktury polimeru, którego cechą charakterystyczną jest wysoki stosunek powierzchni do objętości. Działając jako swoiste nanowzmocnienie, CNT wpływa na poprawę wiązań międzyfazowych i podniesienie poziomu krystalizacji w matrycy polimerowej [108]. W przypadku obu kompozytów PA46/CNT/CM i PA46/PTFE/CNT/SM odnotowano także wzrost parametru naprężenia rozciągającego przy zerwaniu. Jednak

w porównaniu do PA46/PTFE/CNT/SM, relatywnie większy przyrost zaobserwowano dla kompozytu PA46/CNT/SM. Także w obu przypadkach zmniejszeniu uległo odkształcenie przy zerwaniu. Można przypuszczać, że wprowadzenie CNT do struktury kompozytu wpłynęło na ograniczenie ruchu łańcuchów polimeru. W pozycji literaturowej opisano podobne obserwacje [102].

Porównując modyfikację materiałów PA46 i PA46/PTFE, można stwierdzić, że dla pozycji zawierającej już w swej strukturze teflon tj. PA46/PTFE, modyfikacja nanorurkami i środkiem smarnym zaowocowała mniejszą poprawą właściwości w porównaniu do PA46. Było to spowodowane tym, że już sama obecność PTFE w poliamidzie 4.6, spowodowała obniżenie modułu Younga i naprężenia rozciągającego przy zerwaniu, a także poprawę elastyczności w PA46/PTFE.

III.3. Analiza oznaczenia twardości wg Shore'a D

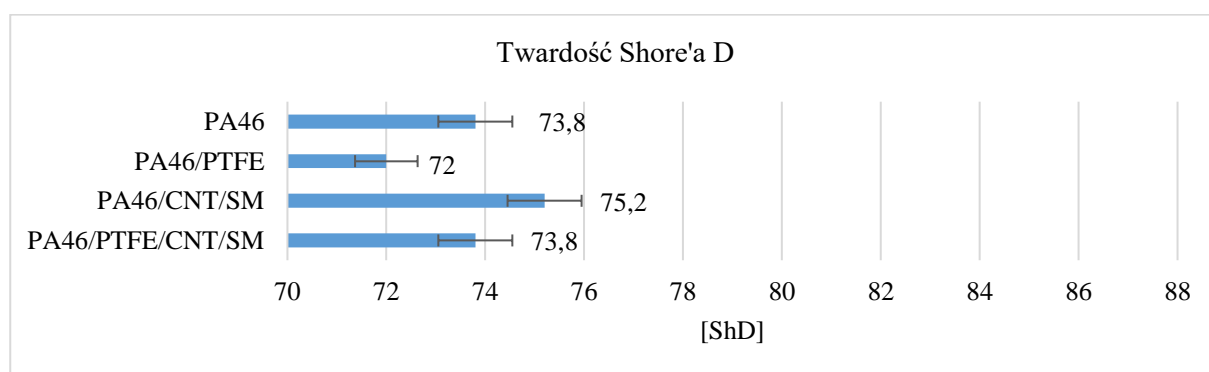
Na rys. 42 i 43 przedstawiono uzyskane wyniki oznaczenia twardości Shore'a D. Badanie wykonano według metodyki opisanej w podrozdziale II.6.



Rys. 42. Zestawienie wyników twardości Shore'a D karbem dla poliamidów (PA6, PA66, PA46) i ich kompozytów

Otrzymane wyniki twardości Shore'a D zestawiono w formie wykresu słupkowego. Rozkład twardości na powierzchni wiosełek badano za pomocą twardościomierza zaopatrzonego w znormalizowany wgłębnik. Zaobserwowano, że niektóre pomiary wykonane

na łopatkę wiosełka, znajdującej się dalej od punktu wtrysku i jednocześnie bliżej końca drogi płynięcia termoplastu, cechowały się względnie niższymi wartościami twardości. Efekt ten był najprawdopodobniej związany z różnicami strukturalnymi tj. udziałem fazy krystalicznej w masie polimeru. Wraz ze stopniem uporządkowania łańcuchów polimerowych wzrasta gęstość, a także twardość polimerów [11]. Materiały niezawierające włókna szklanego (PA6, PA66, PA46, PA46/PTFE) charakteryzują się porównywalną wartością twardości, która mieści się w granicach 72,0 – 73,8 ShD. Natomiast dla wszystkich wzmocnionych włóknem szklanym tworzyw odnotowano znaczny wzrost oporu materiału, podczas wprowadzania w jego powierzchnię węgelnika, w celu otrzymania trwałego odkształcenia. Dla większości próbek zawartość włókna na poziomie 30 – 35 % była przyczyną wzrostu twardości w przedziale 81,2 – 83,6 ShD. Wyjątkiem jest kompozyt PA66/PTFE/30GF, gdzie uzyskana wartość twardości wynosiła 75,4 ShD. Było to spowodowane zawartością teflonu. Taką samą zależność zaobserwowano dla innego kompozytu PA46/PTFE, w którym także zanotowano obniżenie twardości w tym przypadku o 2,4 %. Kompozyt PA66/6T/50GF charakteryzował się najwyższą twardością wynoszącą 85,2 ShD. Porównując PA46 i PA46/PTFE widoczne jest pogorszenie twardości o ok. 1,8 ShD w materiale zawierającym teflon. Dodatek stałych środków smarnych może przyczynić się do spadku właściwości mechanicznych, co zaobserwowano także w przypadku zestawienia parametrów udarnościowych i wytrzymałościowych (rys. 41, tab. 17).



Rys. 43. Zestawienie wyników twardości Shore'a D dla PA46 i jego kompozytów

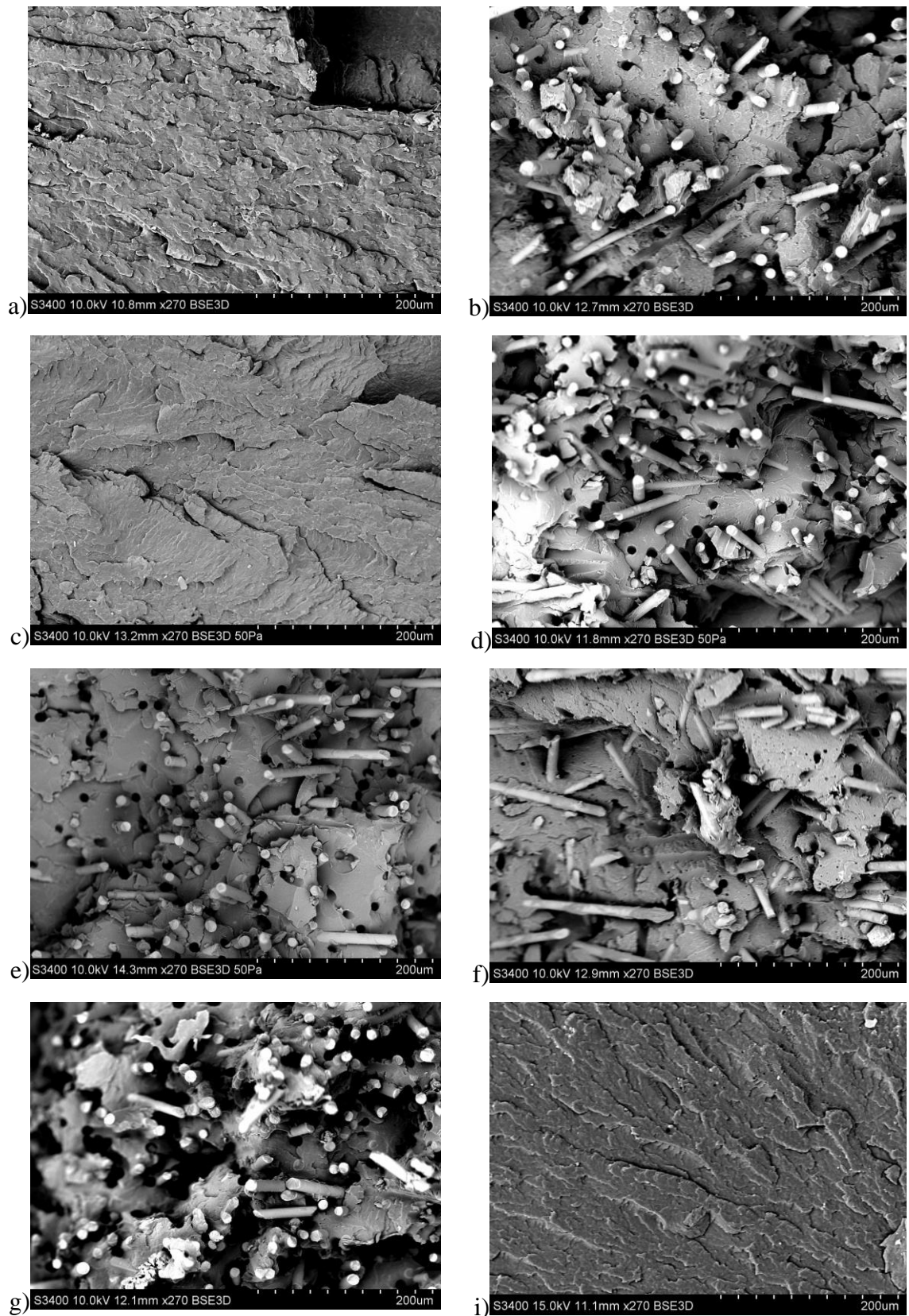
W kolejnym etapie badań właściwości mechanicznych, poddano analizie wyniki twardości przedstawione na rys. 43. Obecność PTFE w poliamidzie 4.6 spowodowała obniżenie twardości z wyniku 73,8 ShD (PA46) do 72,0 ShD (PA46/PTFE). Wartość ta jest związana z właściwościami fizykochemicznymi teflonu, który jest materiałem względnie miękkim. Natomiast modyfikacja PA46 oraz PA46/PTFE za pomocą CNT i środka smarnego SM,

pozytywnie wpłynęła na twardość wg skali Shore'a D. PA46/CNT/SM oraz PA46/PTFE/CNT/SM cechowały się tą twardością na poziomie 75,2 i 73,8 ShD. Dało to poprawę o 2,3 % dla PA46/CNT/SM oraz 2,5 % dla PA46/PTFE/CNT/SM, względem materiałów PA46 i PA46/PTFE.

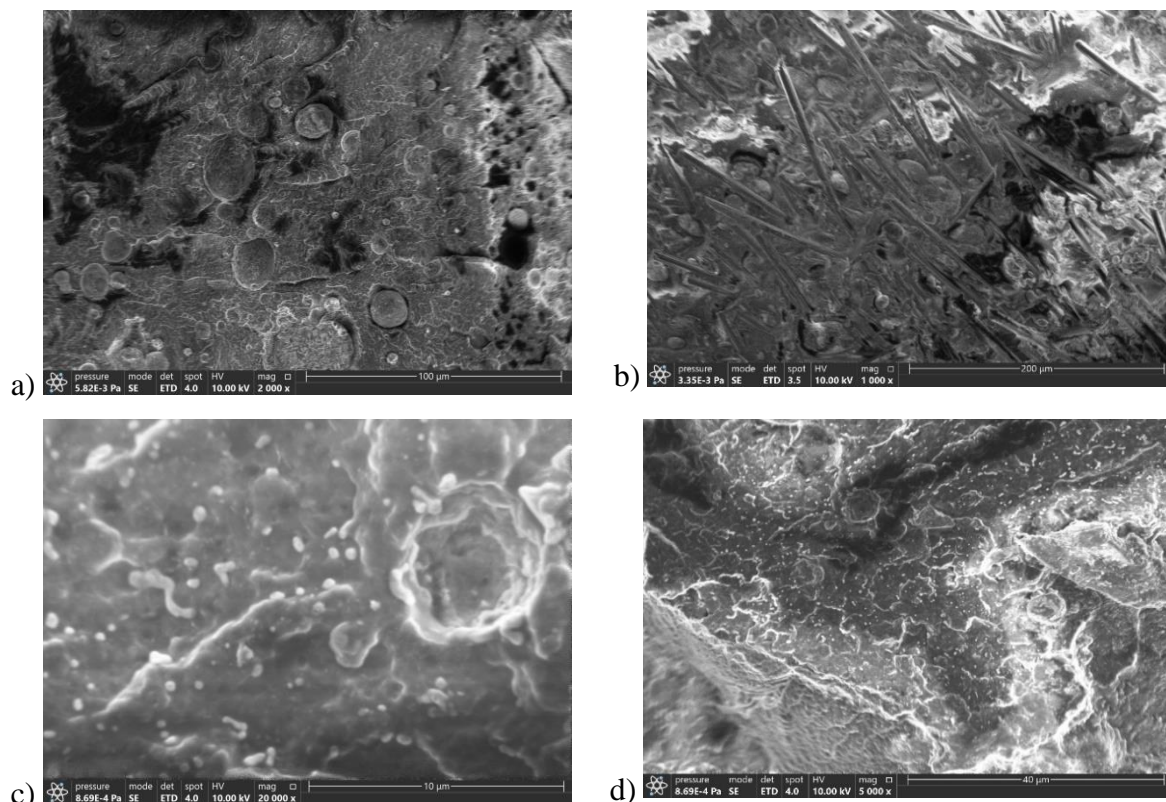
Podsumowując otrzymane rezultaty badań mechanicznych stwierdzono, że udział 30 – 50 % włókna szklanego w osnowie poliamidowej wpływa na wyraźną poprawę właściwości udarnościowych, wytrzymałości na rozciąganie i twardości. Obecność PTFE w kompozycie PA46 w nieznacznym stopniu pogorszyła jego właściwości mechaniczne. Modyfikacja struktury PA46 i PA46/PTFE przy pomocy wielościennych nanorurek węglowych i środka smarnego spowodowała poprawę właściwości wytrzymałości o ok. 4,8 %, udarności o ok. 11,5 % i twardości o ok. 2,4 %.

III.4. Analiza mikrostruktury za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM)

Analizę mikrostruktur wytypowanych i otrzymanych materiałów, przeprowadzono według metodyki opisanej w podrozdziale II.7. Morfologia kruchych pęknięć badanych materiałów, została przeanalizowana za pomocą dwóch skaningowych mikroskopów elektronowych: Hitachi SEM TM3000 oraz Thermo Scientific Prisma E. Badanie mikrostruktury powierzchni przeprowadzono z uwagi na chęć sprawdzenia rozmieszczenia napełniaczy oraz ich połączenia z matrycą polimerową. Wyniki tych obserwacji przedstawiono na rys. 44 i 45.



Rys. 44. Zdjęcia SEM wykonane przy pomocy mikroskopu Hitachi SEM TM3000 dla poliamidów i ich kompozytów: a) PA6; b) PA6/30GF, c) PA66; d) PPA/35GF, e) PA6T/6I/30GF, f) PA66/6T/35GF, g) PA66/6T/50GF, i) PA46



Rys. 45. Zdjęcia SEM wykonane przy pomocy mikroskopu Thermo Scientific Prisma E dla poliamidów i ich kompozytów: a) PA46/PTFE; b) PA66/PTFE/30GF; c) PA46/CNT/SM; d) PA46/PTFE/CNT/SM

Nienapełnione poliamidy PA6, PA66 i PA46 charakteryzowały się występowaniem na powierzchni licznych linii bruzd i pofałdowanych, nierównych płytek (rys. 44 a, c, i). Wśród pozycji zawierających włókno szklane, nie zaobserwowano aglomeratów tego napełniacza w matrycy polimerowej (rys. 44 b, d, e, f, g). Średnia średnica włókien szklanych zastosowanych w wytypowanych materiałach mieści się w okolicach 10 μm . Włókno o takiej wartości średnicy jest najpowszechniej stosowane w przemyśle przetwórczym [35].

Dla kompozytów PA66/6T/35GF (rys. 44 f) i PA66/6T/50GF (rys. 44 g) obserwowano wysoką kompatybilność z polimerową matrycą, ponieważ w chwili wykonania kruchego przełomu włókna pozostały połączone z polimerem. Odwrotną sytuację zaobserwowano dla kruchego przełomu kompozytu PA6T/6I/30GF (rys. 44 e), gdzie na zdjęciu SEM są widoczne liczne puste jamy, powstałe po wyrwaniu wzmocnienia z osnowy polimerowej. Ta wada miała odzworowanie w uzyskanych parametrach wytrzymałościowych (tab. 17) i udarnościowych (rys. 41), gdzie dla kompozytu PA6T/6I/30GF zaobserwowano wyniki gorsze od spodziewanych wartości.

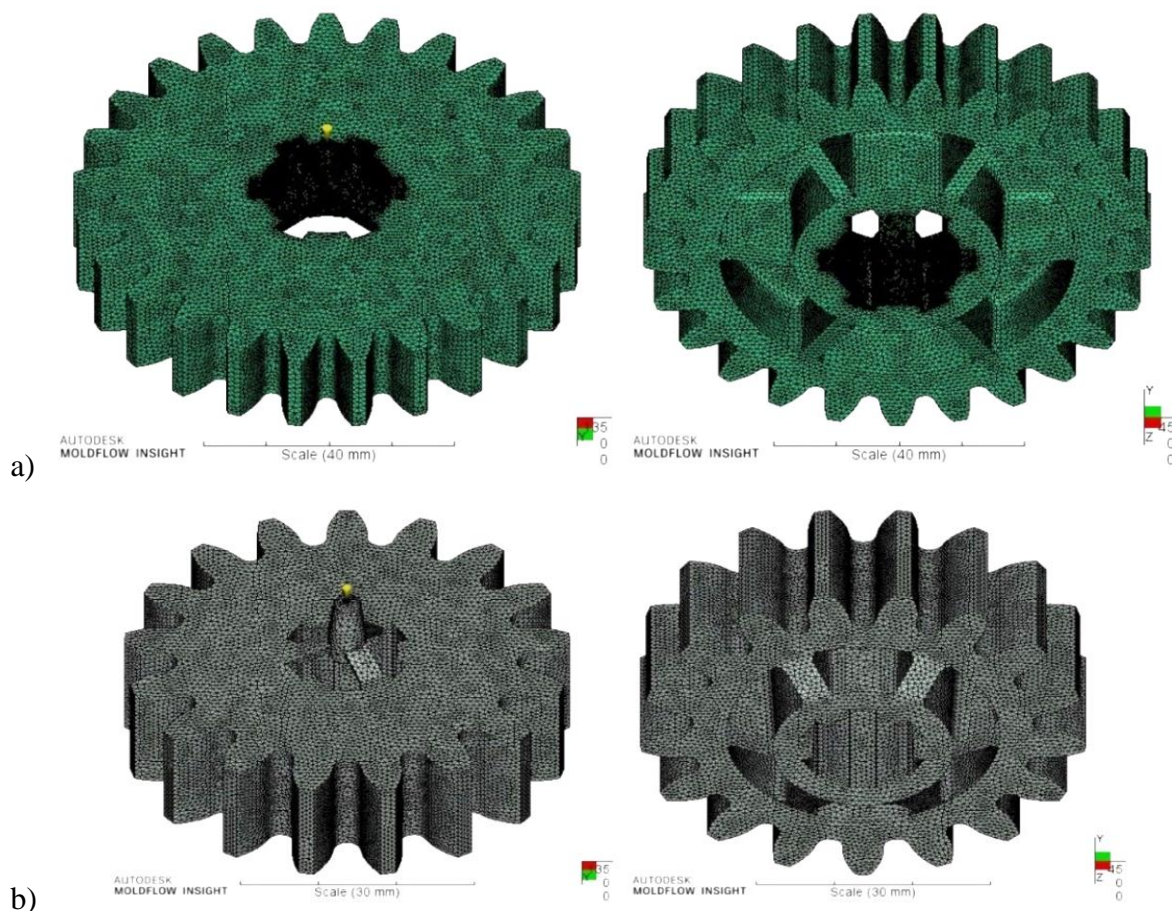
Na rys. 45 zostały przedstawione zdjęcia SEM, wykonane przy pomocy różnych obiektywów pozwalających na uzyskanie powiększeń w zakresie od 1000 do 20000x dla eksplorowanego obszaru kompozytu. Z uwagi, że w badanych materiałach występują napełniacze i nanonapełniacze różniące się między sobą rzędami wielkości, zastosowanie tylko jednego powiększenia wykluczyłoby ich pełną obserwację. Na rys. 45 a, widoczne są sferyczne drobiny teflonu równomiernie rozmieszczone w matrycy poliamidu 4.6. Natomiast rys. 45 b przedstawia strukturę kompozytu na osnowie poliamidu 6.6, w którym także jest obecny ten sam rodzaj środka smarnego zestawiony dodatkowo z włóknami szklanymi. Na podstawie zarejestrowanych struktur oszacowano, że maksymalne średnice PTFE wynosiły 20 μm (rys. 45 a, b). W wykonanych kruchych przełamach PA46/PTFE i PA66/PTFE/30GF nie zaobserwowano śladów aglomeratów, które mogłyby wpłynąć na pogorszenie końcowych właściwości mechanicznych tych kompozytów. Na rys. 45 c i 45 d zidentyfikowano wielościennie nanorurki węglowe, w postaci drobnych jasnych punktów, jednolicie rozproszonych w matrycy polimerowej. Na rys. 45 d widoczne są sferyczne cząstki środka smarnego SM, będącego drugim modyfikatorem dodanym do wytypowanych kompozycji podczas procesu przetłaczania opisanego w podrozdziale II.15.

III.5. Import modelu oraz poprawa siatki MES

Numeryczny zapis docelowych geometrii kół zębatych KZ25 i KZ17 wygenerowano w systemie Autodesk Inventor Professional, a następnie za pomocą formatu *.stp wyeksportowano do programu Autodesk Moldflow Insight. Przy wykorzystaniu generatora MES, została nałożona równoległa siatka czworościennych elementów skończonych dla zaimportowanych brył. Program automatycznie dopasował powierzchnię siatki do założonego modelu tak, aby w jak największym stopniu odwzorować jego powierzchnie walcowe i swobodne. Wstępnie przygotowany model geometryczny poddano ręcznej naprawie błędów, które nie zostały poprawione przez generator siatki MES. Należały do nich m.in.: dziury w powierzchni oraz elementy częściowo nakładające się na siebie.

Na rys. 46 przedstawiono skorygowane siatki MES dla rozważanych modeli kół zębatych, których krawędź czworościanów wynosiła średnio ok. 0,6 mm. W tab. 19 ujęto najważniejsze parametry modeli przygotowanych do przeprowadzenia analizy MES. Na jej podstawie zamieszczonych w niej danych wynika, że całkowita liczba trójkątów, tworzących czworościany dla KZ25 wyniosła 1443333, a dla KZ17 – odpowiednio 910284. Objętość KZ25

wraz z układem dolotowym wynosiła $46,3239 \text{ cm}^3$, natomiast KZ17 ta wartość była równa $20,2564 \text{ cm}^3$.



Rys. 46. Widok modelu siatki MES dla koła zębatego: a) KZ25; b) KZ17

Tab.19. Statystyka modeli siatek MES

| | KZ25 | KZ17 |
|--|---------|---------|
| Liczba tetraedrów, szt. | 1443333 | 910284 |
| Połączenia węzłów pomiędzy tetraedrami, szt. | 261855 | 165266 |
| Połączone regiony, szt. | 1 | 1 |
| Objętość gniazda formy wtryskowej, cm^3 | 46,3239 | 28,2564 |
| Średni współczynnik proporcji | 3,35 | 3,17 |
| Maks. kąt dwuścienny, ° | 178 | 176,9 |

Po zakończeniu naprawy siatki MES (rys. 46) oraz naniesieniu punktu wtrysku (rys. 47, 48), do wykonania dalszych analiz numerycznych AMI, wytypowano tworzywo o nazwie Zytel HTN92G45DH2 BK083. Jest to materiał oparty na osnowie PPA z dodatkiem 45 % włókna szklanego.

III.6. Przeprowadzenie analiz wypełniania gniazd formujących koła zębate

Położenie punktu wtrysku jest jednym z kluczowych czynników decydujących o jakości końcowego wyrobu. Dla kół zębatach KZ17 i KZ25 przeprowadzono po dwie symulacje numeryczne. Zmiennym elementem w algorytmie obliczeniowym programu było ustalenie optymalnej pozycji punktów wtrysku, w odniesieniu do geometrii detalu i układu wlewowego. System wlewowy projektowano zważając na zrównoważony przepływ uplastycznionej strugi tworzywa, tak aby kolejne fragmenty koła zębatego wypełniały się w tym samym czasie i z jednakową prędkością.

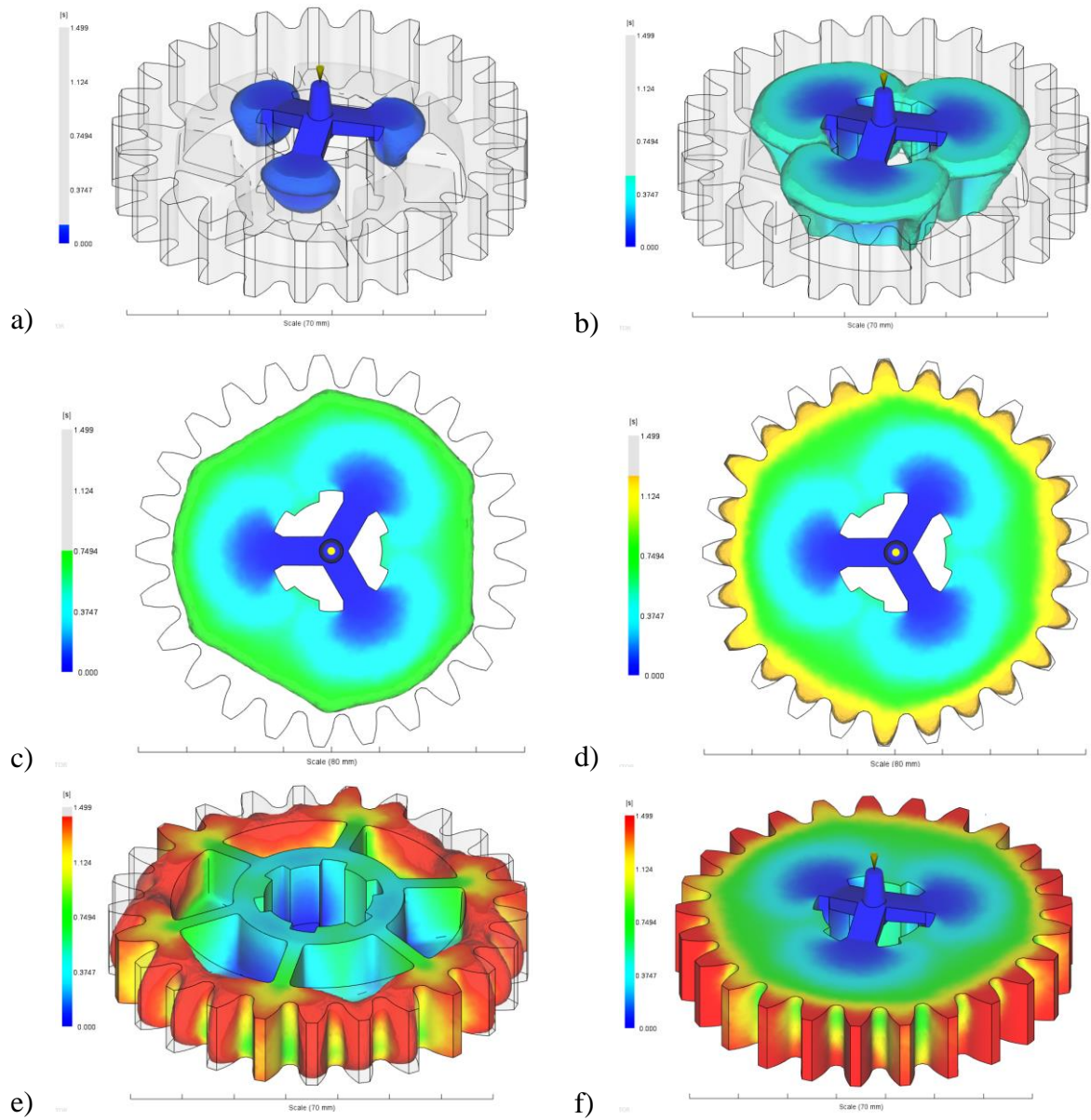
Na rys. 47 i 48, przedstawiono rozważane etapy symulacji wypełnienia gniazda formy z wkładką formującą koło zębate KZ25. Symulacje numeryczne AMI dla KZ17 zostały przeprowadzone w analogiczny sposób do KZ25, dlatego też zdecydowano się pominięcie ich opisu w niniejszym rozdziale.

Symulacje przeprowadzono dla dwóch różnych wariantów układu wlewowego: wlewu z zimnym kanałem (rys. 47) lub wlewu z gorącym kanałem (rys. 48). Pierwszym rozpatrywanym rozwiązaniem (rys. 47) był bezpośredni układ wlewowy rozmieszczony w głównej płaszczyźnie podziału. Główny kanał wlewowy rozdzielał się na trzy kanały doprowadzające tworzywo do gniazda formy, rozmieszczone w układzie gwiazdowym. Każdy z kanałów kończył się przewężką typu filmowego, zlokalizowaną w wielowypuszcie piasty koła zębatego. Drugi z rozpatrywanych wariantów zakładał zastosowanie bezpośredniego wlewu goręcokanałowego z zastosowaniem trzech izolowanych kanałów (rys. 48). W tym wariantcie, każdy z trzech punktów wtrysku został umiejscowiony w bocznej płaszczyźnie wieńca koła zębatego. Do tej symulacji przyjęto uproszczenie w postaci domyślnych dla programu AMI punktów wtrysku, zamiast modeli i pełnej konstrukcji gorących kanałów.

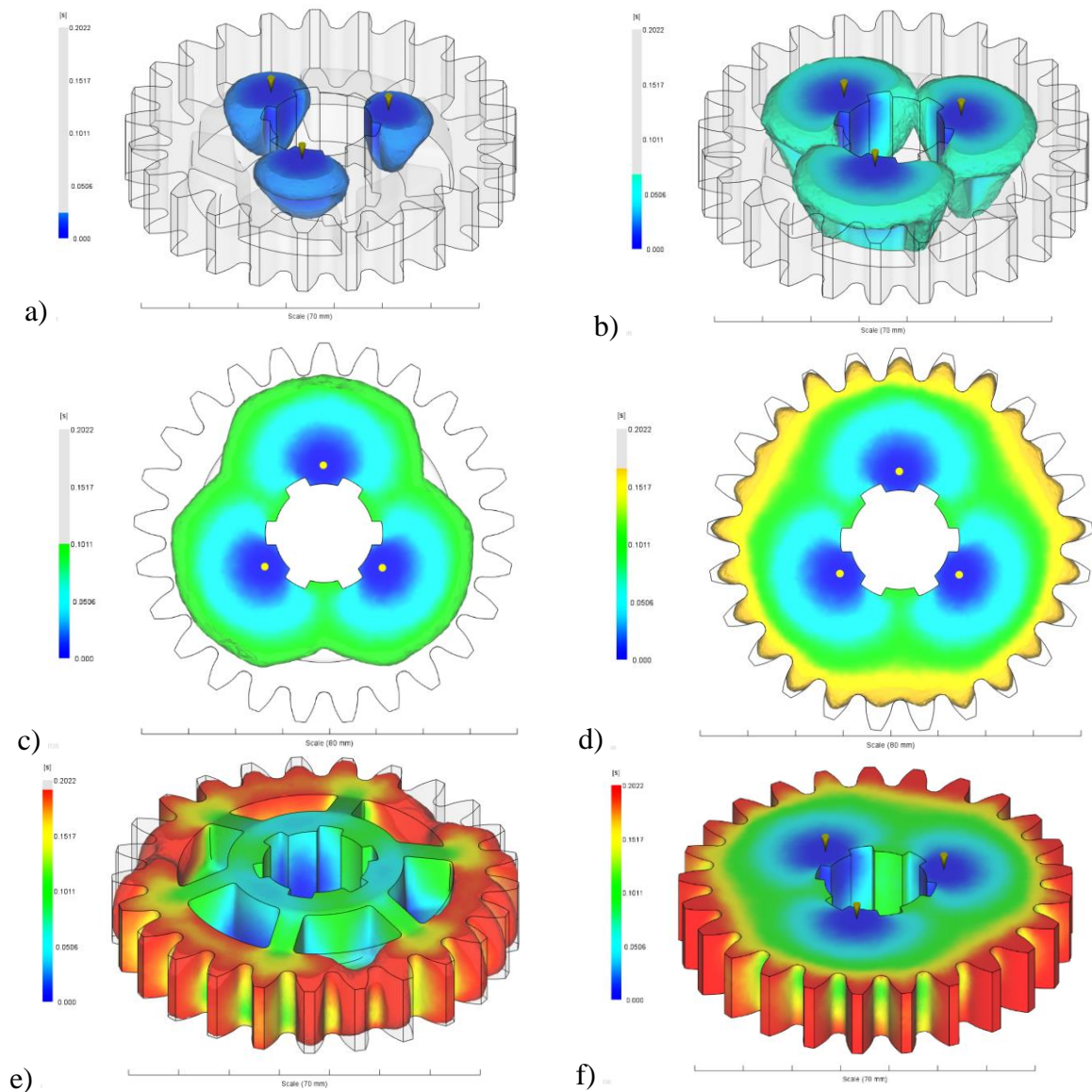
Mimo, iż układ wlewowy z gorącym kanałem jest rozwiązaniem technologicznie nowocześniejszym, pozwalającym na zużycie mniejszej dawki dozowanego materiału, zdecydowano się na wariant pierwszy (rys. 47). Przemawiały za tym względy konstrukcyjne, jakościowe i ekonomiczne. Problem konstrukcyjny w układzie goręcokanałowym, był związany ze stosunkowo niewielkimi wymiarami kół zębatach (tab. 11) i polegał na bliskim rozmieszczeniu trzech izolowanych, gorących kanałów w matrycy formy wtryskowej. Natomiast pod kątem jakościowym, przy zastosowaniu układu zimnokanałowego, ślad pozostawiony po odcięciu wlewka nie oddziaływał na wartości wytrzymałościowe kół zębatach oraz jakość bocznej powierzchni zębów. Należy także nadmienić, że układ goręcokanałowy wymagałby znacznie wyższych nakładów finansowych, a zaprojektowana na poczet projektu

doktorskiego forma wtryskowa była prototypową wersją, niezakładającą produkcji wielkoseryjnej.

Na rys. 47 i 48, przedstawiono wybrane etapy analizy wypełnienia gniazda formy wtryskowej obrazującej płynięcie stopu termoplastu z położeniem czoła przepływu w regularnych odstępach czasu. Każdy z kolorów obrazuje przepływ tworzywa w zależności od regionów wypełniania. Barwa ciemnoniebieska reprezentuje obszar wypełniany na początku, tj. od punktu wtrysku. Natomiast ostatnie sekcje wypełnienia zostały oznaczone w kolorze czerwonym. Ich wypełnienie miało miejsce tuż przed punktem przełączenia z fazy wtrysku na docisk. Na rys. 47 a i 48 a, został przedstawiony początkowy etap wypełniania gniazda formy. Rys. 47 b i 48 b przedstawiają moment zetknięcia się frontów uplastycznionych strug tworzywa. Rys. 47 c i 48 c pokazują stopień wypełnienia gniazda formy w połowie założonego czasu wtrysku. Na rys. 47 d - e i 48 d - e, pokazano tempo wypełnienia zębów w kole zębatym KZ25. Rys. 47f i 48 f obrazują pełne wypełnienie gniazda formy wtryskowej. Przedstawione symulacje potwierdzają, że wszystkie strumienie przepływu tworzywa w zbilansowany sposób rozpluwają się równomiernie w gnieździe formy i w równym czasie docierają do krawędzi modelu [197]. Na podstawie otrzymanych analiz (rys. 47, 48) stwierdzono, że rozpatrywane typy kanałów wlewowych, mają nieznaczny wpływ na przemieszczanie się strugi tworzywa w rozpatrywanym gnieździe formy wtryskowej.



Rys. 47. Czas wypełnienia gniazda formy z układem zimno kanałowym dla koła zębatego KZ25

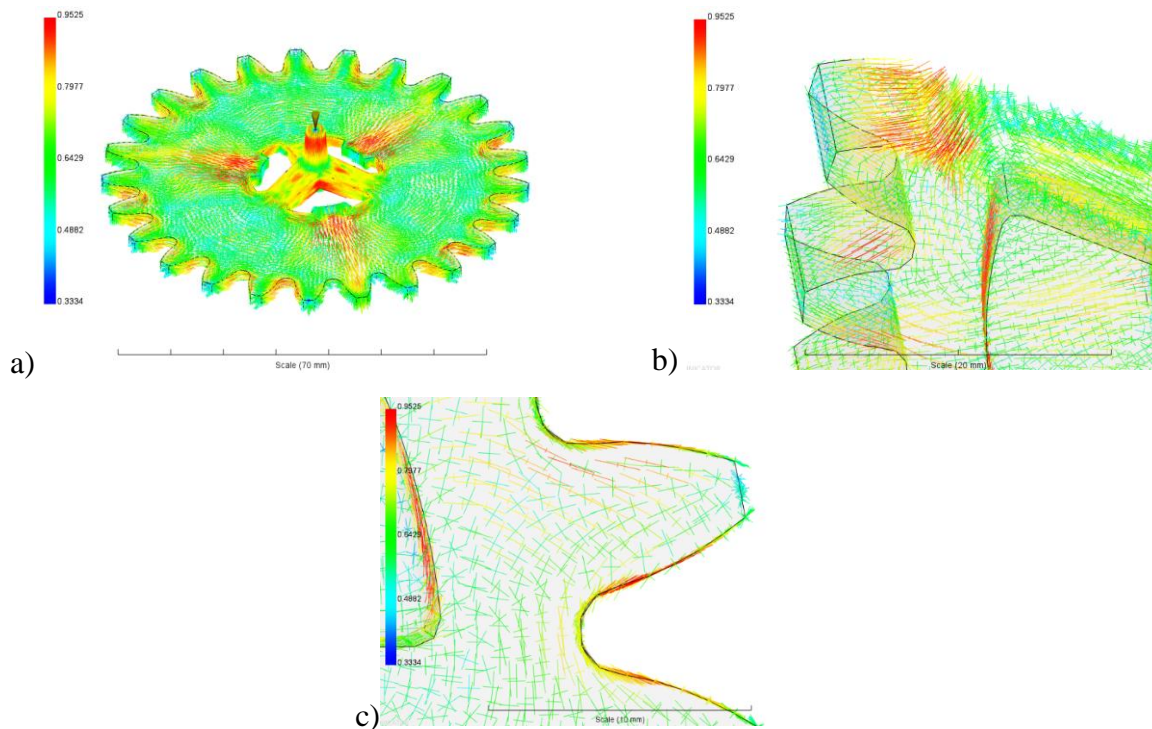


Rys. 48. Czas wypełnienia gniazda formy z układem gorąco kanałowym dla koła zębatego KZ25

Na rys. 49 przedstawiono symulację tensora orientacji włókien szklanych z wykorzystaniem modelu Folgara - Tuckera [37], który obrazuje prawdopodobny kierunek ułożenia tego wzmocnienia w rozpatrywanym KZ25. Skala w zakresie 0 – 1 informuje o tendencji ułożenia włókna, względem przepływu tworzywa. Wartość 1, oznaczona kolorem czerwonym, pokazuje pożądany kierunek położenia włókna wzdłuż nurtu przepływu uplastycznionego tworzywa. Natomiast im bliżej barwy niebieskiej, tym przewidywalna orientacja włókna układała się coraz bardziej w kierunku prostopadłym do przepływu [39].

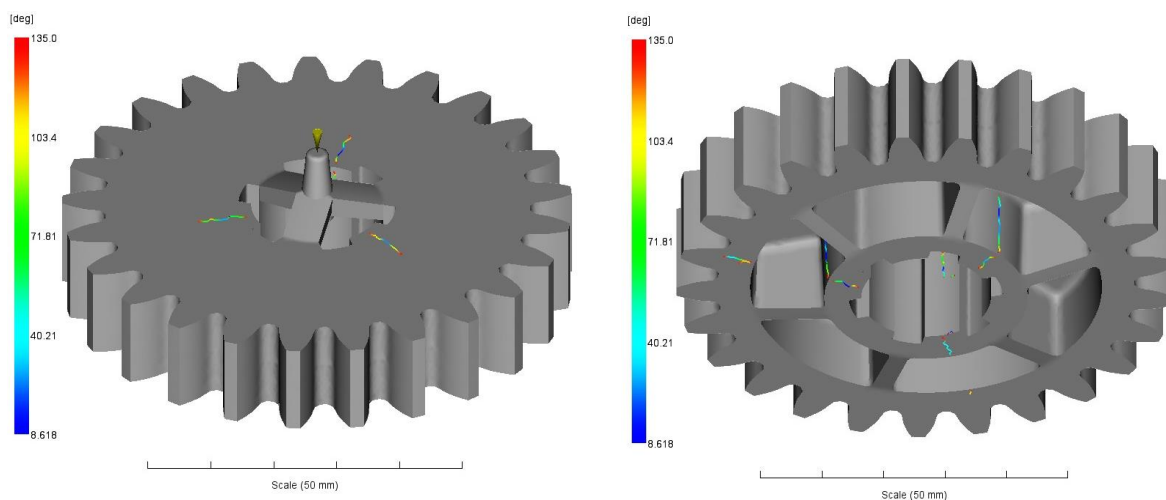
Na rys. 49 przedstawione są trzy rzuty koła KZ25, na których widoczne są zjawiska dezorientacji włókien, spowodowane m.in. złożoną geometrią rozpatrywanej bryły. Dane literaturowe dowodzą, że zjawiska dezorientacji orientacji włókien szklanych zachodzą także

w przypadku znacznie prostszych geometrii wykonanych przy pomocy formowania wtryskowego, nawet tak prostych jak znormalizowane wioselko [39] oraz jednakowe kształtki wycięte z prostokątnej płytki pod kątem 0, 45 i 90°, względem kierunku przepływu [88]. Na rys. 49 a przestawiono wierzchnią warstwę koła zębatego KZ25, w taki sposób, żeby jak najbardziej uwidocznić nurt ułożenia wzmocnienia. W miejscu łączenia się dwóch frontów strugi, włókna są ułożone w sposób równoległy do kierunku przepływu, co w tym przypadku prowadzi do pojawienia się linii łączenia i miejscowego osłabienia detalu pod kątem właściwości mechanicznych. Na rys. 49 b i 49 c została przedstawiona m.in. boczna powierzchnia wybranego zęba, na której duża część włókien układa się w sposób zgodny z kierunkiem przepływu (kolor czerwony). Jak dowodzą badania przedstawione w literaturze, takie ułożenie włókien w wyprascie wykonanej z poliamidu 6.6, przekłada się na większą sztywność i wytrzymałość na rozciąganie, a także zmniejszone odkształcenie przy zerwaniu. Rys. 49 c pokazuje zbliżenie na pojedynczy ząb koła zębatego, gdzie w obszarze jego głowy widoczne są włókna ułożone prostopadłe do kierunku płynięcia materiału. Taka konfiguracja napelnacza, przypuszczalnie może wpływać na szybsze zużycie koła zębatego na skutek wzmożonego ścierania się wierzchołka zęba. Dodatkowo układ włókien w zębach koła zębatego jest niesymetryczny osiowo, co może być przyczyną braku ich jednakowej wytrzymałości.



Rys. 49. Symulacja orientacji włókien szklanych dla koła zębatego KZ25: a) w wierzchniej warstwie wypraski, b) na bocznej powierzchni zęba; c) na bocznej powierzchni zęba

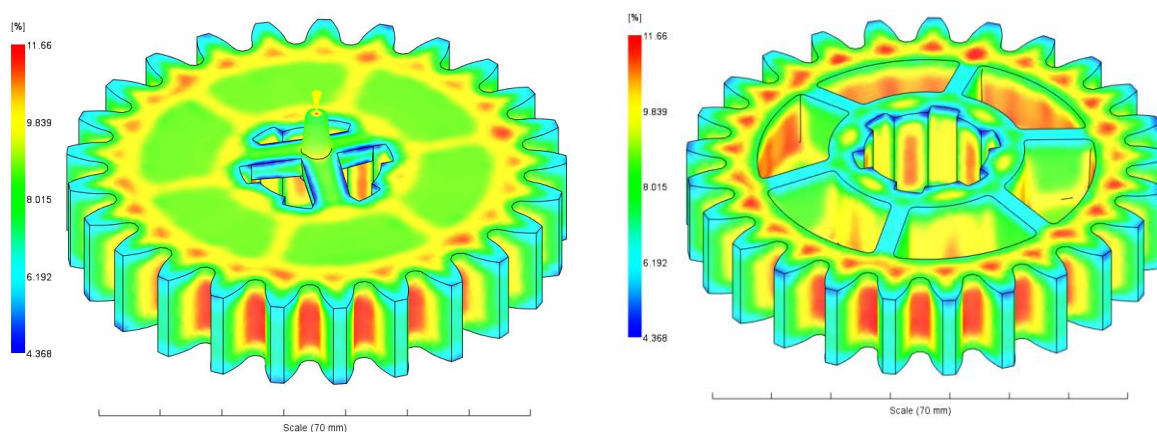
Na rys. 50 określono umiejscowienie linii łączenia w kole zębatym KZ25. Linie łączenia są niepożądanym efektem zetknięciem się dwóch frontów przepływu polimeru. Efektem ich występowania jest miejscowe osłabienie detalu na skutek wyraźnej orientacji łańcuchów polimeru w spoinie. To zjawisko jest szczególnie niekorzystne, jeżeli sięga krawędzi wypraski [190, 197]. Z uwagi na złożoną geometrię rozpatrywanego KZ25, tj. występowaniem wzmocnień i zmiennych grubości ścianek detalu, następuje dodatkowe rozdzielanie strumienia tworzywa. Symulacja AMI pozwoliła, przy pomocy skali kolorów, na rozróżnienie kąta zbieżności styku dwóch frontów przepływu [197]. Im większy kąt łączenia się frontów przepływu tym mniejsze ryzyko osłabienia własności mechanicznych na skutek wyraźnej orientacji cząstek w miejscu linii łączenia. Na rys. 50 czerwony kolor na fragmentach linii łączenia oznacza miejsca w KZ25, gdzie fronty polimeru łączą się ze sobą pod kątem 135° . Natomiast zmiana barwy na niebieski, pokazuje miejsca, gdzie kąt może sięgać ok. 9° , co jest zjawiskiem szczególnie niekorzystnym. Jak pokazują symulacje przedstawione na rys. 50, w zdecydowanej większości linii łączenia umiejscowione są blisko piasty koła zębatego, co pozwala przypuszczać, że nie mają znaczącego wpływu na wytrzymałość trwałościową wieńca zębatego.



Rys. 50. Symulacja rozmieszczenia linii łączenia dla koła zębatego KZ25

Zagadnienie opisujące pierwotny skurcz przetwórczy zostało omówione w podrozdziale 1.3.2.1. Oprogramowanie AMI dało pozwoliło na określenie rozmieszczenia tego zjawiska, co zostało przedstawione na rys. 51. Jednolity skurcz wypraski w całej jej objętości, zapobiega zjawiskom deformacji i wypaczania się koła zębatego. Symulacja numeryczna AMI umożliwia określenie odpowiedniego naddatku na skurcz, który należy zastosować przy konstruowaniu i pracach narzędziowych formy wtryskowej. Obszary zaznaczone na kolor czerwony charakteryzują się największym skurczem objętościowym, zachodzącym w gnieździe formy

wtryskowej. Zlokalizowane są w rejonie czołowych powierzchni wieńca koła zębatego oraz wrębach umieszczonych między zębami. Powodem tego zjawiska prawdopodobnie jest znaczna grubość ścianki detalu. Natomiast jak pokazała symulacja, najmniejszy skurcz ma miejsce na wierzchołkach zębów oraz na żebrach łączących piastę z wieńcem. Taki wynik można upatrywać w zjawisku mechanicznego stłumienia skurczu na skutek zaburzenia swobodnego przepływu tworzywa, spowodowanego występowaniem w tym miejscu żeber lub zębów [190]. Kolejnym czynnikiem powodującym nierównomierność kierunkową skurczu jest włókno szklane, obecne w rozpatrywanym materiale Zytel HTN92G45DH2 BK083. Wzmocnienie to ogranicza skurcz przetwórczy w zależności od jego orientacji w wyprase. Wynika z tego, że geometria koła zębatego, układ wlewowy oraz zastosowany materiał mają wpływ na równomierność skurczu w poszczególnych fragmentach analizowanego detalu.



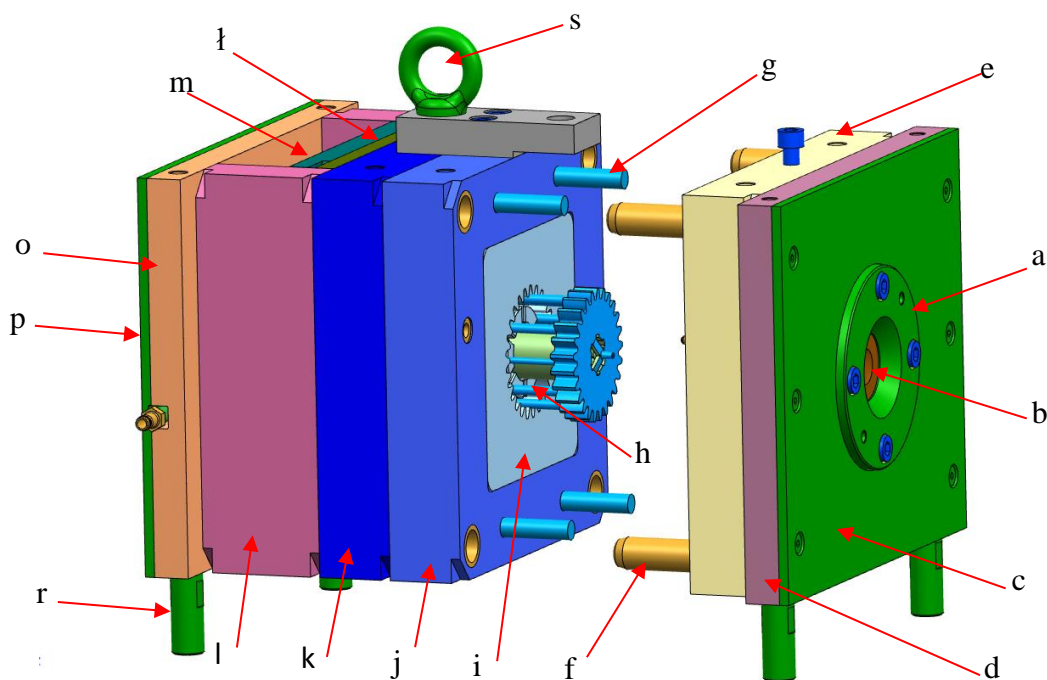
Rys. 51. Symulacja rozkładu skurczu objętościowego dla koła zębatego KZ25

Podsumowując, wykonane analizy symulacji numerycznych ułatwiły wybór rozmieszczenia punktów wtrysku oraz jego geometrię dla KZ25 i KZ17. Symulacja procesu wypełniania pozwoliła na poprawę jakości ostatecznego wyrobu i znaczną redukcję kosztów przez decyzję dotyczącą sposobu doprowadzenia tworzywa do gniazda formy, skrócenie czasu projektowania oraz ilości późniejszych prób technologicznych. Analiza tensora orientacji wzmocnienia pozwala mieć pewne obawy co do szybszego zużycia wierzchołków zębów na skutek miejscowego niekorzystnego ułożenia włókna szklanego. W przypadku rozpatrywanych kół zębatych zlokalizowane linie łączenia nie będą miały wpływu na wytrzymałość trwałościową zębów. Uzyskane wyniki analiz skurczów, w znacznym stopniu pozwalają na wyeliminowanie odkształcenia spowodowanego różnicami wartości skurczów tworzywa w kierunku grubości ścianki i płaszczyzny przekroju podziału.

III.7. Analiza modelu formy wtryskowej kół zębatych

Kolejnym etapem prac badawczych, było wykonanie modelu konstrukcji formy wtryskowej wyposażonej w dwie wymienne wkładki, które formowały geometrię KZ25 i KZ17. Wyjściowe modele obu kół zębatych (podrozdział II.8. rys. 31), zaprojektowane w Katedrze Konstrukcji Maszyn, zostały przystosowane pod kątem wytwarzania w technologii formowania wtryskowego. Równoległym krokiem było wykonanie prototypowej formy wtryskowej. Całość zaprojektowano przy pomocy programu Simens NX 12.

Na rys. 52 przedstawiono pogląd złożeniowy prototypowej formy wtryskowej wraz z opisem poszczególnych jej części. Najważniejsze układy funkcjonalne, wchodzące w jej skład to: gniazdo formujące, układ wlewowy, układ chłodzenia, układ wypychania wypraski, układ usuwania wlewka, napędy płyt i segmentów, elementy prowadzące i ustalające podział formy.

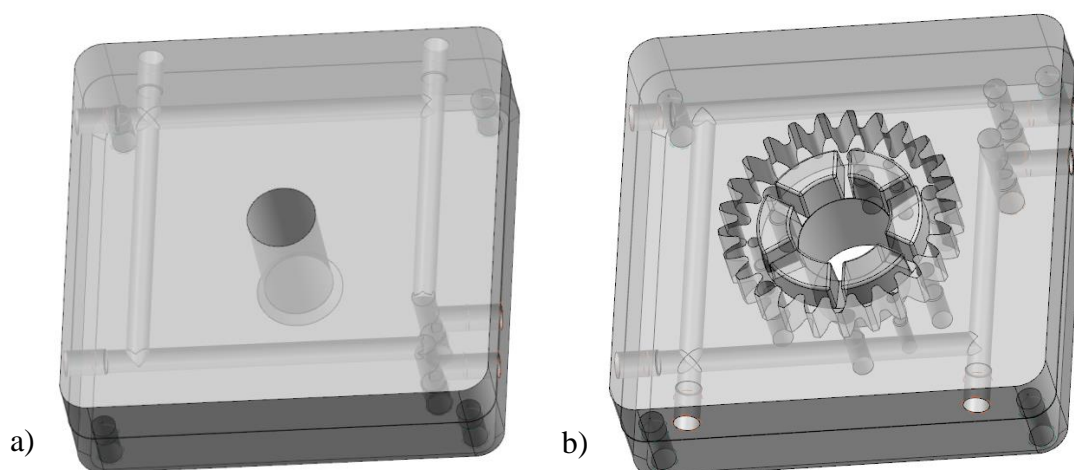


Rys. 52. Budowa formy wtryskowej KZ25: a) pierścień centrujący przedni; b) tuleja wtryskowa; c) płyta izolacyjna przednia; d) płyta mocująca przednia; e) matryca; f) słup prowadzący; g) układ cofaczy; h) układ wypychaczy; i) wkładka formująca stempla; j) stempel; k) płyta podporowa stempla; l) listwy dystansowe; ł) płyta wypychaczy; m) płyta oporowa wypychaczy; o) płyta mocująca tylna; p) płyta izolacyjna tylna; r) noga; s) zawiesie

W poniższych analizach zdecydowano się na zebranie i omówienie informacji dotyczących konstrukcji formy z wkładką formującą koło zębate KZ25. Z uwagi na zastosowanie takich samych rozwiązań konstrukcyjnych w wersji KZ17, została ona pominięta w niniejszym podrozdziale.

III.7.1. Gniazdo formujące

Widok gniazda formującego KZ25, będącego przestrzenią ograniczoną powierzchniami stempla, matrycy i wypychacza, został przedstawiony na rys. 53. W przypadku rozpatrywanej konstrukcji układu formującego koło zębate KZ25, jego matryca stanowi płaską część, współpracującą ze stemplem, w którym znajduje się gniazdo kształtujące geometrię KZ25.



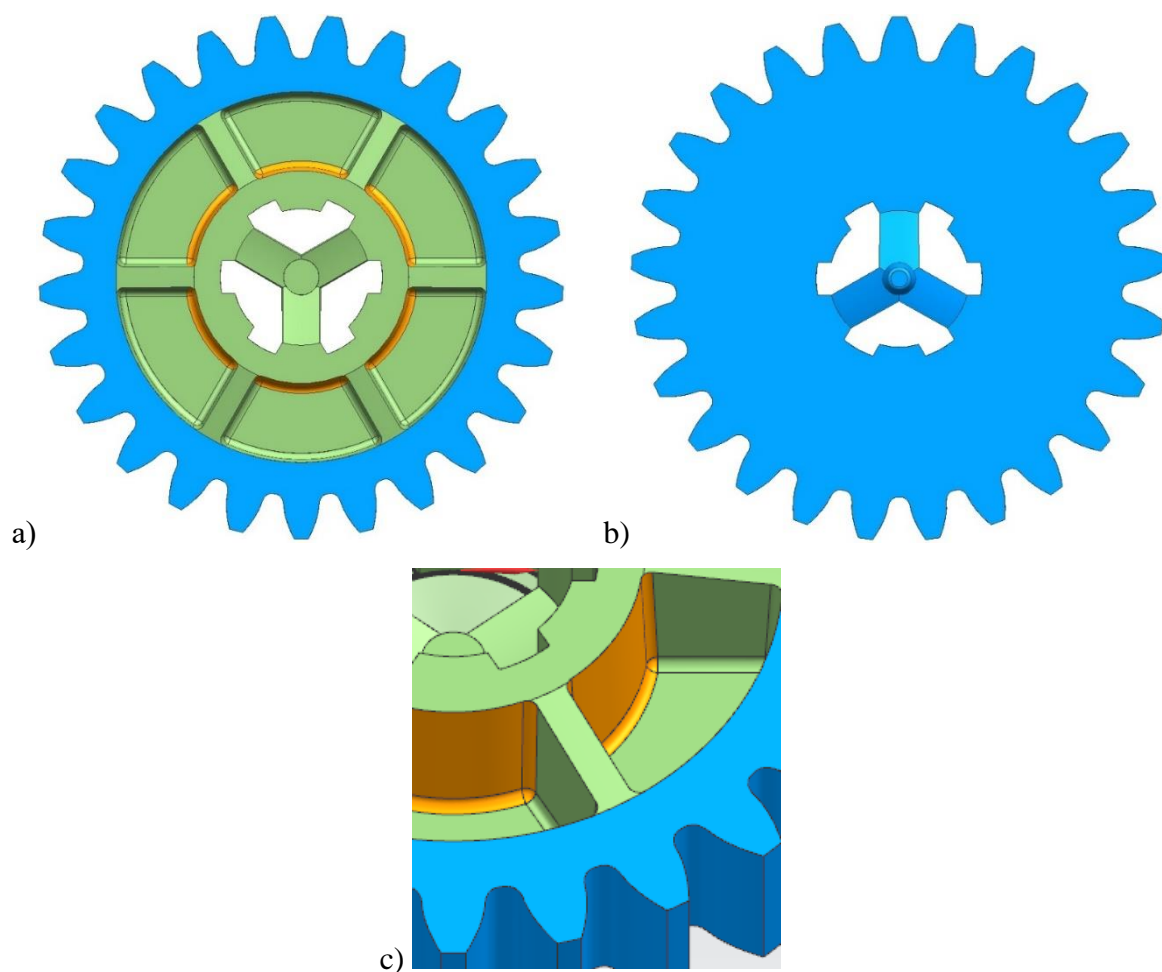
Rys. 53. Widok izometryczny: a) matrycy z tuleją wtryskową; b) stempla z gniazdem

Nominalna geometria gniazda formy jest wyznaczana na podstawie wymiarów modelu koła zębatego, powiększonych o wartość spodziewanego skurczu objętościowego. Jednak z uwagi na właściwości termoplastów, związanych ze zmianami objętości właściwej materiału podczas przechodzenia ze stanu uplastycznionego do stałego (podrozdział I.3.2.1), dokładne obliczenie skurczu nie jest w zupełności możliwe. W związku z tym, pożądaną wielkość wypraski uzyskano poprzez zwiększenie wartości wymiarów odpowiadającej jej części formującej. Wykonano to dzięki pozostawieniu nadatków technologicznych, które znalazły się w miejscach występowania ryzyka deformacji, określonych przez analizę AMI (podrozdział III.6, rys. 51). Przy wprowadzaniu tych modyfikacji do modelu KZ25, miano na uwadze ewentualne późniejsze korekty elementów formujących, które nie musiałyby wymagać konieczności napawania czy wymiany wkładek.

Na podstawie wyników analizy symulacji AMI, określającej umiejscowienie skurczów przetwórczych dla materiału Zytel HTN92G45DH2 BK083 (podrozdział III.6., rys. 51), określono rozkład tego parametru w bryle KZ25. Na rys. 54 a i 54 b, przedstawiono dwa obszary wielkości skurczów (*ang. Safety steel*) dla rozpatrywanych kół zębatach:

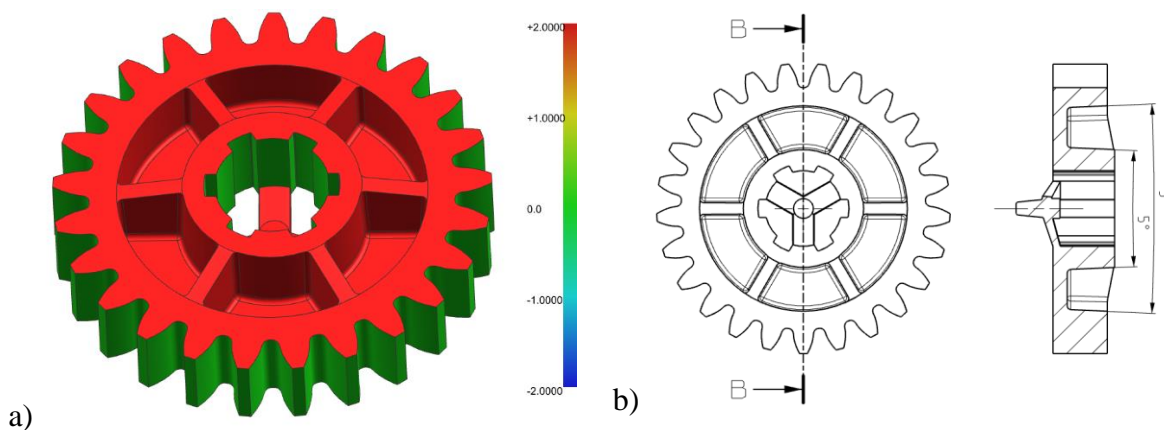
- obszar niebieski - 0,4 %;
- obszar zielony - 1,5 %.

Kolejną modyfikację względem modelu KZ25, wprowadzono poprzez przesunięcie bocznej ściany piasty o 0,15 mm w kierunku osi koła. Obszar tej zmiany został oznaczony kolorem pomarańczowym na rys. 54 c.



Rys. 54. Założone obszary skurczu objętościowego materiału w KZ25: a) widok od strony stempla; b) widok od strony matrycy; c) miejsce przesunięcia bocznej ściany piasty

W celu ułatwienia usuwania detalu z gniazda stempla, na model naniesiono szereg pochyleń ścian bocznych. Dzięki temu rozwiązaniu, już przy niewielkim przesunięciu wypraski względem gniazda formującego, powstaje między nimi luz, dzięki czemu znika ryzyko zatarcia, zniekształcenia oraz zniszczenia koła zębatego [190]. Jedną ze zmian adaptujących koło KZ25 było wprowadzenie pochylenia ścian formowanych przez stempel, a nie mających wpływu na pracę przekładni oraz jej zużycie. Modyfikacja ta objęła obszary: piasty z pominięciem jej otworu przelotowego, tarczy z zębami, a także bocznej powierzchni wieńca. Na rys. 55 miejsca te oznaczono kolorem czerwonym, a kąt tych pochyleń wynosił $2,5^\circ$. Zmiana nie objęła powierzchni współpracujących KZ25, czyli bocznej powierzchni zębów i otworu przelotowego piasty.



Rys. 55. KZ25 z naniesionymi pochyleniami ścian bocznych: a) model 3D;
b) przekrój B-B (zgodny z dokumentacją Splast)

Na rys. 56 przedstawiono kolejny typ modyfikacji, które wprowadzono do modelu KZ25. Było to naniesienie zaokrągleń w ostrych narożach między zębami, a sąsiadującymi z nimi elementami wieńca, tarczy i piasty. Zmiana miała na celu łatwiejsze wypełnienie gniazda formy oraz odformowania detalu. Wprowadzony promień wynosił 1 mm.



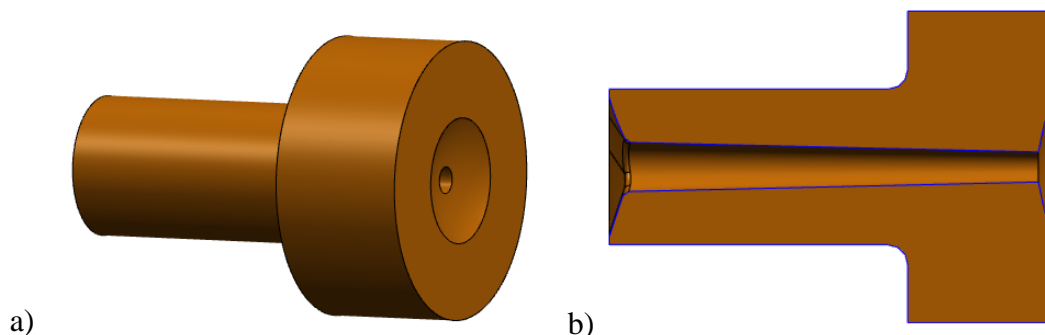
Rys. 56. KZ25 z naniesionymi zaokrągleniami naroży

III.7.2. Układ wlewowy

Na podstawie analiz AMI (podrozdział III.6, rys. 47 - 48) zdecydowano się na układ zimnokanałowy z wlewem bezpośrednim. Układ został zaprojektowany współosiowo z dyszą wtryskarki, a jego zakończenie mieściło się w głównej płaszczyźnie podziału formy.

Jak przedstawiono na rys. 57, układ wlewowy został zakończony kulistym zagłębieniem, zapewniającym jego dokładniejsze pasowanie i uszczelnienie do dyszy wtryskowej. Główny kanał wlewowy rozdzielał się na trzy kanały doprowadzające tworzywo do gniazda formy,

rozmieszczone w układzie gwiazdzistym. Od strony stempla, kanały te były formowane przez rdzeń wypychacza, a każdy z nich był zakończony przewężką filmową. Miejsca położenia trzech punktów wtrysku uwzględniały wpływ orientacji łańcuchów polimeru i włókna szklanego (podrozdział III.6, rys. 49).

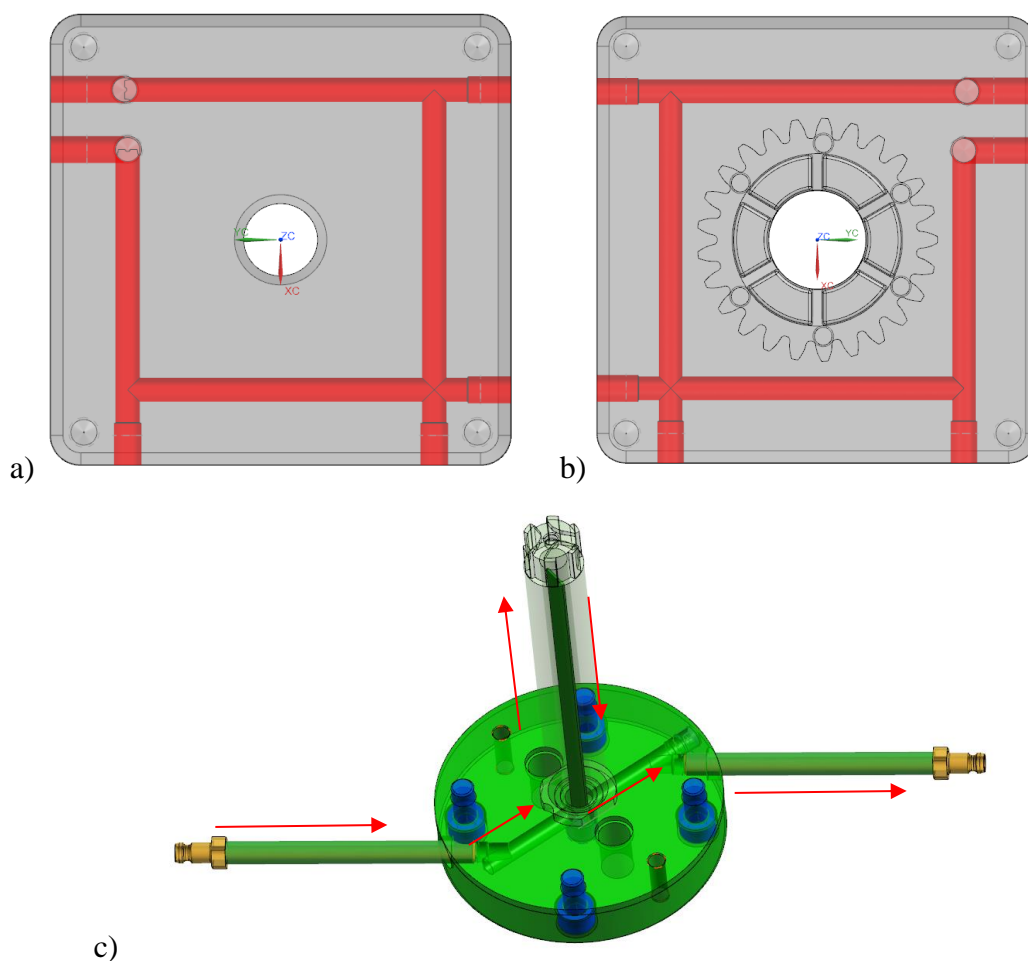


Rys. 57. Tuleja wlewowa: a) widok poglądowy; b) przekrój

III.7.3. Układ chłodzenia

Najważniejszymi kryteriami dobrze zaprojektowanego układu chłodzenia są intensywność i równomierność odbioru ciepła z detalu. Parametry te zależą od kształtu, wielkości i sposobu rozmieszczania kanałów regulacji temperatury [190]. Z uwagi na badawczy charakter rozpatrywanego problemu i prototypową wersję formy wtryskowej, względy ekonomiczne związane z czasem cyklu, nie były jednym z kluczowych kryteriów wyboru. Z tego względu zdecydowano się na rozwiązanie związane z uproszczeniem konstrukcji kanałów regulacji temperatury, kosztem wydłużenia czasu chłodzenia wypraski.

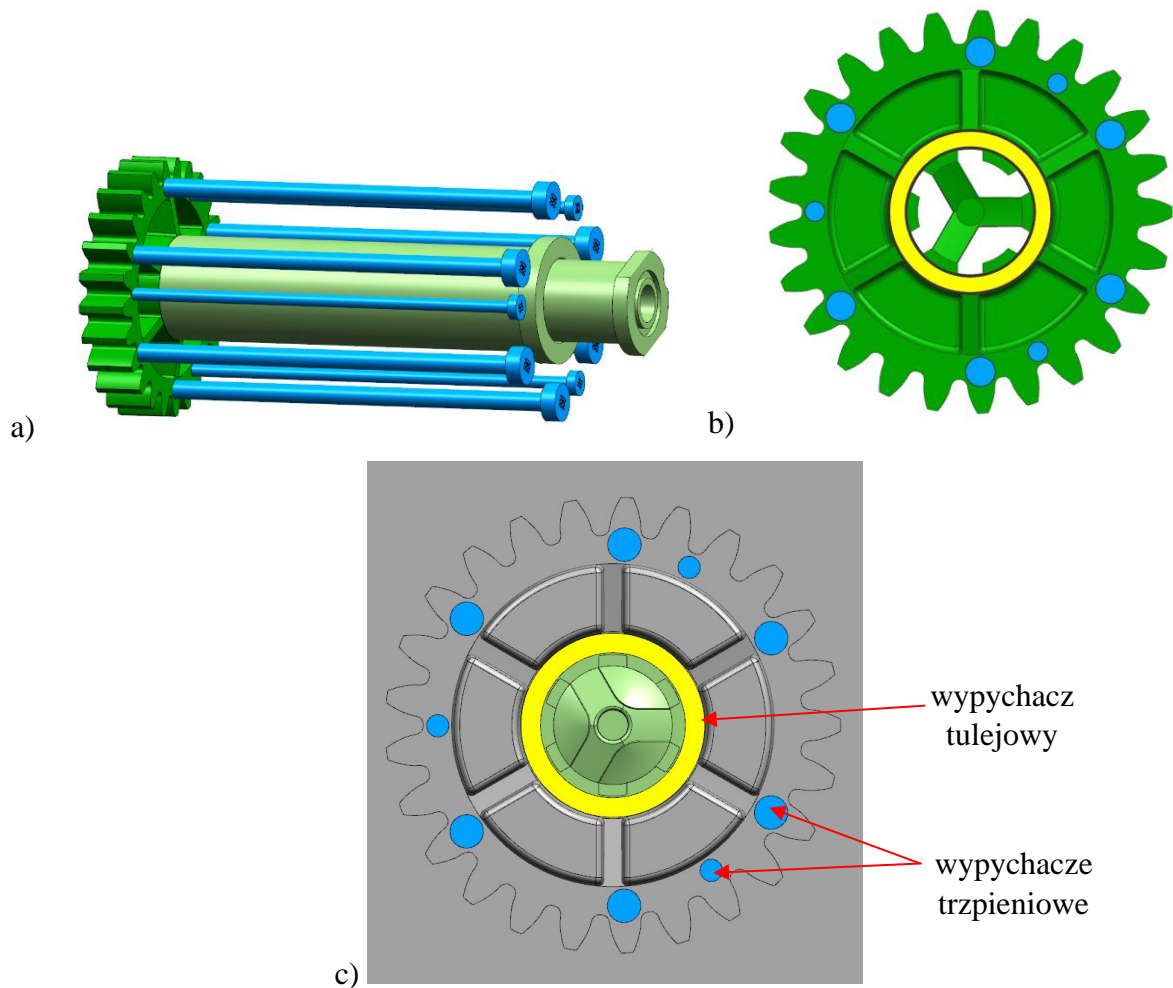
Mając na uwadze powyższe założenia, zaprojektowano układ składający się z trzech niezależnych obiegów chłodzących, tj.: pojedynczego kanału w matrycy (rys. 58 a) oraz dwóch lokalizowanych w stemple (rys. 58 b - c). Z celu zbilansowanego chłodzenia, jeden z obiegów chłodzących stempeł umieszczono w rdzeniu wypychaczowym (rys. 58 c). Umożliwiło to intensywniejsze chłodzenie wypraski począwszy od punktu wtrysku. Została tam osadzona dodatkowa przegroda, wymuszająca obieg medium chłodzącego w rdzeniu wypychaczowym. Ponieważ temperatura formy dla rozpatrywanych tworzyw mieściła się w zakresie 70 – 150 ° (podrozdział II.6.11, tab. 13), w celu ograniczenia jej strat ciepła do wtryskarki, w formie zastosowano przednią i tylną płytę izolacyjną (rys. 52).



Rys. 58. Widok systemu chłodzenia KZ25: a) stempel b) matryca, c) rozprowadzenie wody w stemplu wraz z oznaczeniem rzeczywistego kierunku przepływu wody

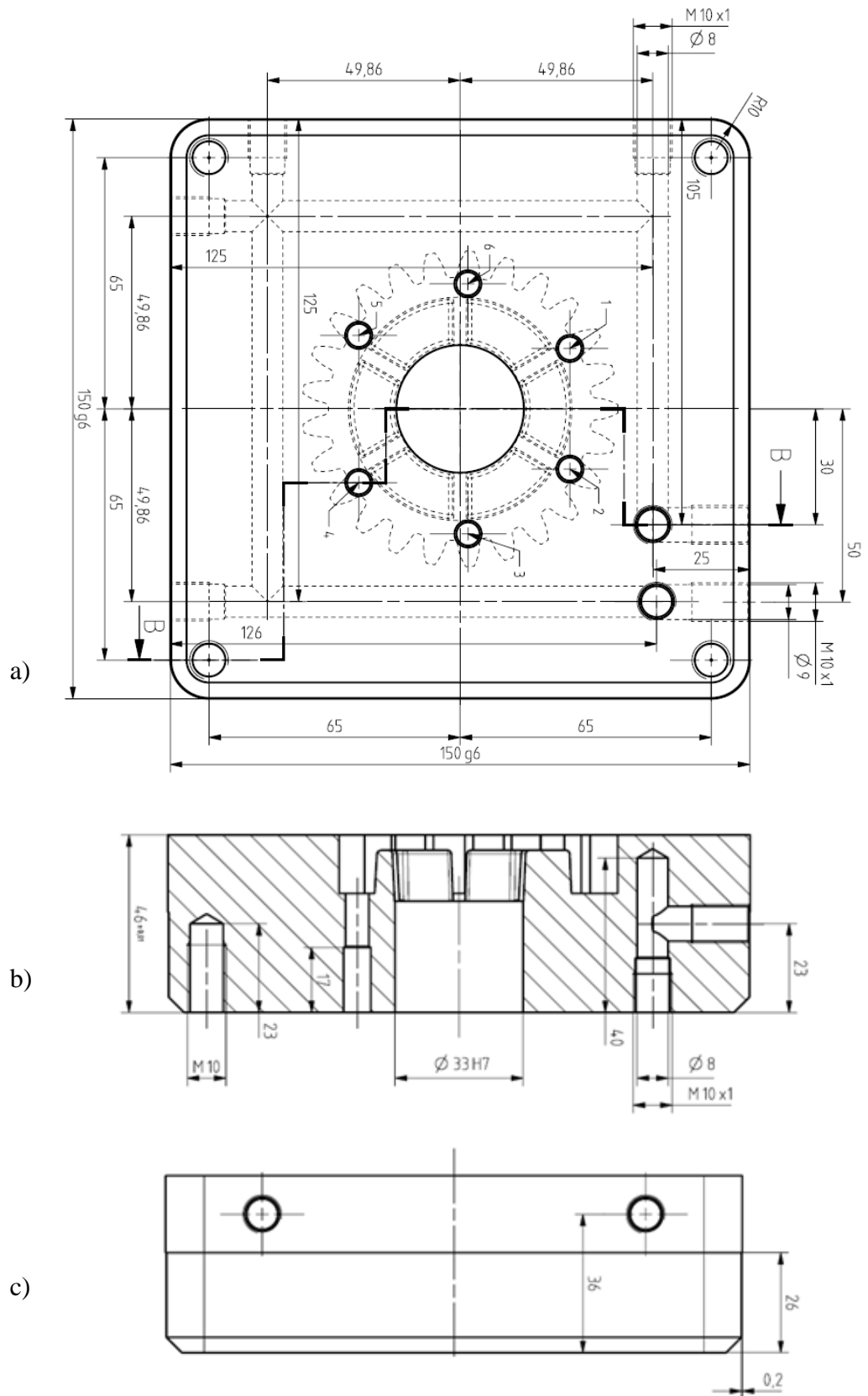
III.7.4. Układ wypychaczy

Układ wypychaczy został zaprojektowany w sposób zapewniający samoczynne i bezkolizyjne wysunięcie oraz wycofanie się tych elementów z gniazda formującego. Cykl wtrysku KZ25 zakładał, że po otwarciu formy wypraska będzie przylegała do połowy stempla. Dlatego też układ wypychaczy został zamocowany w płycie wypychaczy i kolejno poprowadzony w płycie stemplowej. W przypadku KZ25 zastosowano dwa typy wypychaczy (rys. 59). Pierwszymi były trzpieniowe okrągłe o płaskich czołach, przy wypchnięciu działające na wieniec koła. Z uwagi, że oddziaływały miejscowo ze znaczną siłą na detal, aby wykluczyć zjawisko deformacji lub pęknięcia KZ25, zwiększono ich pierwotną liczbę z 6 do 9 szt. Drugim zastosowanym typem był pojedynczy wypychacz tulejowy, który miał za zadanie działać z przyłożoną siłą, na piastę koła zębatego.

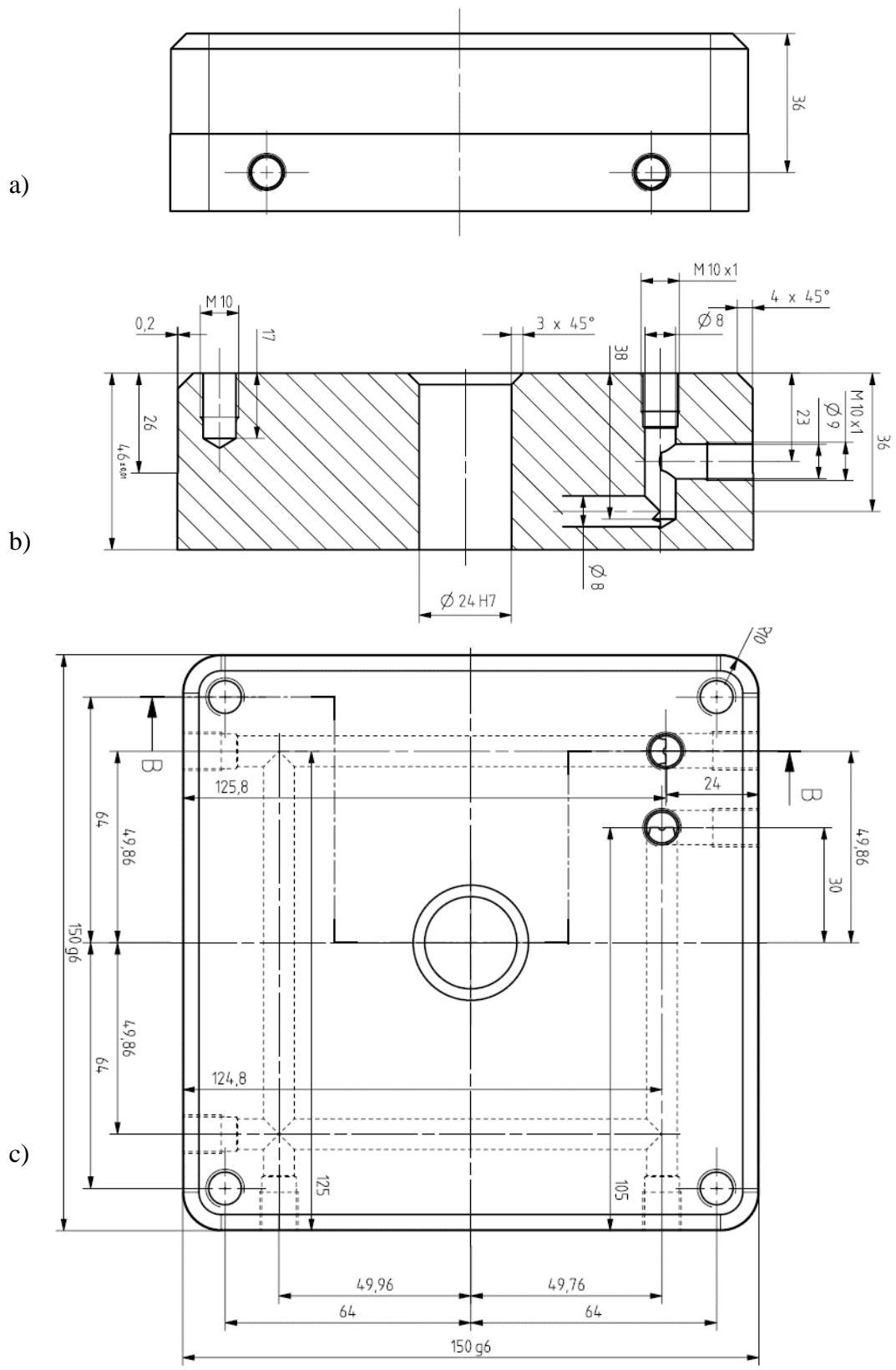


Rys.59. Widok układu wypychaczy KZ25: a) rozmieszczenie przestrzenne względem detalu;
 b) odcisk na detalu; c) położenie na stemplu

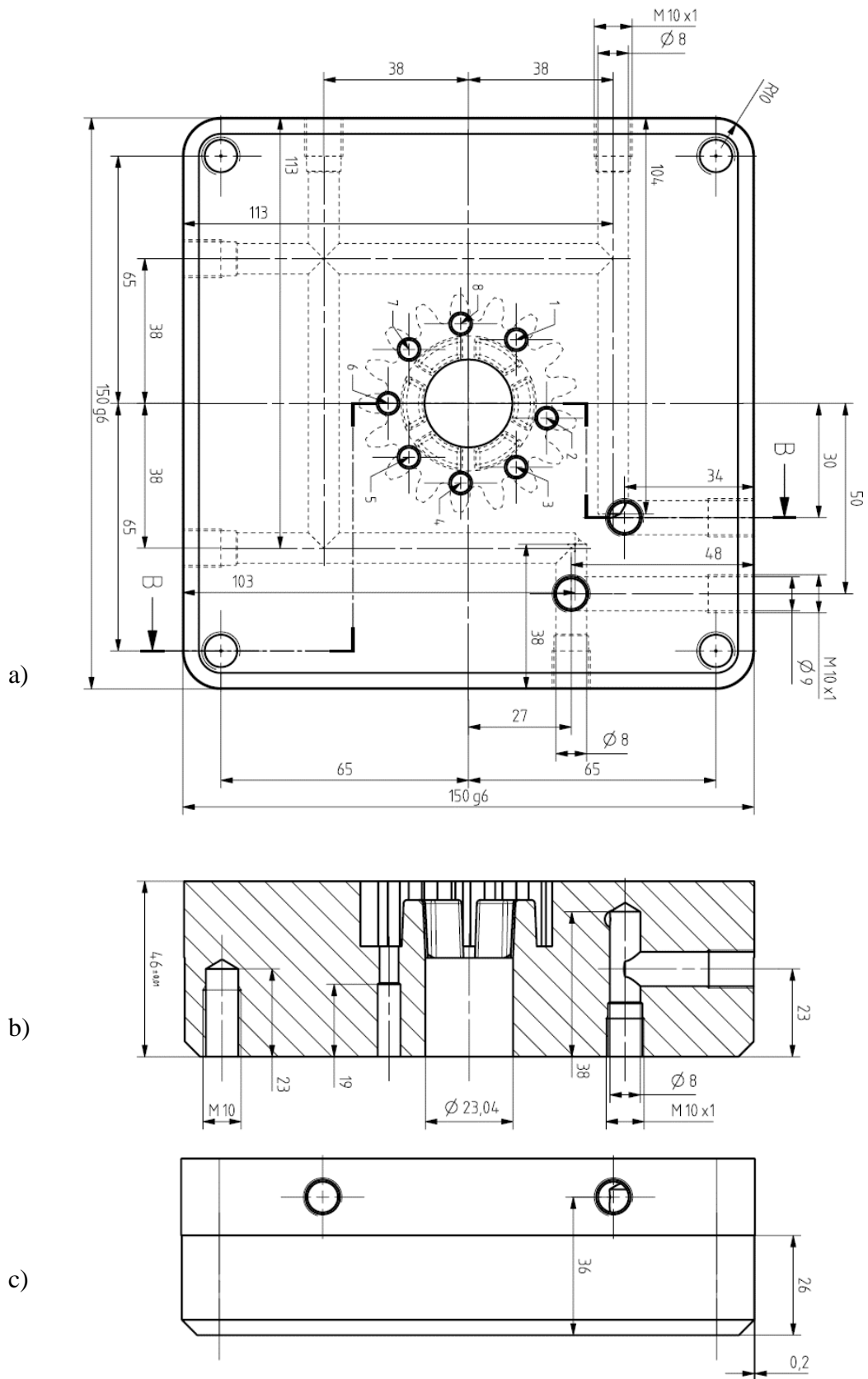
Na podstawie przestrzennych modeli formy, została sporządzona dokumentacja technologiczna zawierająca m.in. rysunki techniczne matrycy i stempla dla koła zębatego KZ25 (rys. 60 – 61) oraz KZ17 (rys. 62 – 63).



Rys. 61. Rysunek stempla KZ25, zgodny z dokumentacją firmy Splast: a) widok główny; b) przekrój B-B; c) widok z dołu



Rys. 62. Rysunek matrycy KZ17, zgodny z dokumentacją firmy Splast: a) widok z góry; b) przekrój B - B; c) widok główny



Rys.63. Rysunek stempla KZ17, zgodny z dokumentacją firmy Splast: a) widok główny; b) przekrój B - B; c) widok z dołu

III.8. Analiza procesu wtrysku kół zębatach z wykorzystaniem opracowanej formy wtryskowej

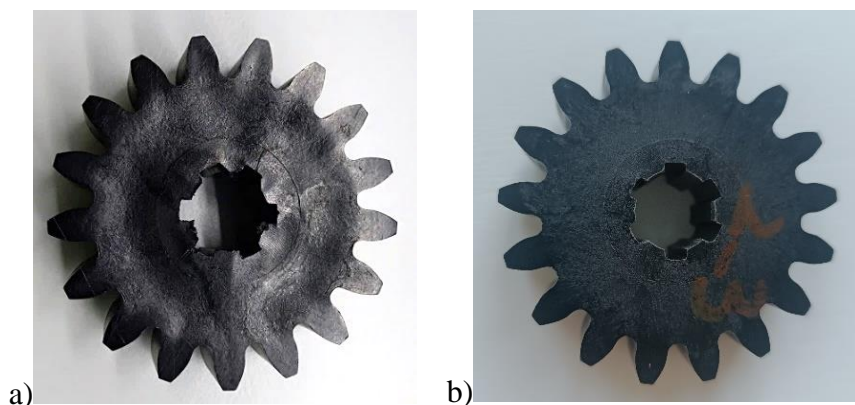
Pierwsze próby formy weryfikowały zgodność prac narzędziowych z przygotowaną dokumentacją konstrukcyjną (podrozdział III.7.). Do pierwszych wtrysków został wytypowany materiał PA6/30GF. Postępując według wewnętrznych procedur firmy Splast, przeprowadzono kontrolę pracy formy wtryskowej zgodnie z dokumentem „Karta odbioru technologicznego przejmowanej formy wtryskowej”. Zweryfikowano sposób zakładania formy, pracę formy w cyklu jałowym, operację wtryskiwania, jakość wyprasek i przygotowaną dokumentację.

Po ustabilizowaniu się wymaganych temperatur cylindra i formy, przy użyciu parametru ciśnienia wtrysku, skontrolowano poprawność wypełniania się gniazd formujących KZ25 i KZ17. Jest to tzw. metoda niedolewów, pozwalająca ocenić proporcjonalność płynięcia strug tworzywa od punktów wtrysku, a także określić umiejscowienie linii łączenia, co pokazano na rys. 64.



Rys. 64. Widok kół zębatach KZ25 i KZ17 otrzymanych w trakcie weryfikacji poprawności wypełniania gniazd formujących

Następnym krokiem było ustalenie punktu przełączenia ciśnienia wtrysku na docisk. Ciśnienie i czas docisku zostały określone przy pomocy metody ważenia detali. Polega ona na stopniowym zwiększaniu tych parametrów i kontroli masy wyprasek, aż do uzyskania stałej wagi, co przedstawiono na rys. 65. Ostatnim z etapów było określenie czasu chłodzenia. Ustalone eksperymentalnie wartości zamieszczono w tab. 13 (podrozdział II.11). Dla PA6/30GF masa KZ25 z wlewką była równa 65,8 g, zaś sam detal stanowił ok. 94,9 % całkowitej masy. W przypadku KZ17 całość ważyła 37,5 g, a detal stanowił udział 92,6 % wag.



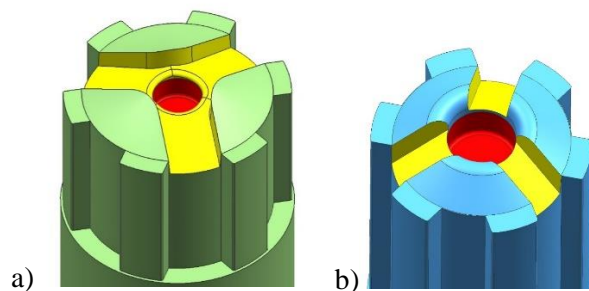
Rys. 65. Widok KZ17 podczas ustalania parametrów docisku: a) zapadnięcia na detalu (zbyt krótki czas i ciśnienie docisku; masa detalu 33,4 g); b) detal wypełniony prawidłowo (zoptymalizowany czas i ciśnienie docisku; masa detalu 34,7 g)

Jedną z rozpoznanych niezgodności dla KZ25 i KZ17, były przypalenia zębów, wypełnianych w końcowym etapie wtrysku (rys. 66). Wada w znacznym stopniu została skorygowana poprzez obniżenie ostatniego etapu profilu prędkości wtrysku. Jednak główną przyczyną przypaleń był brak dostatecznych odpowietrzeń, co skutkowało zamykaniem się gazów w szczelnej formie i występowaniem efektu Diesla [119]. Eliminującym tą wadę działaniem, było wykonanie dodatkowych odpowietrzeń na wszystkich okrągłych wypychaczach.



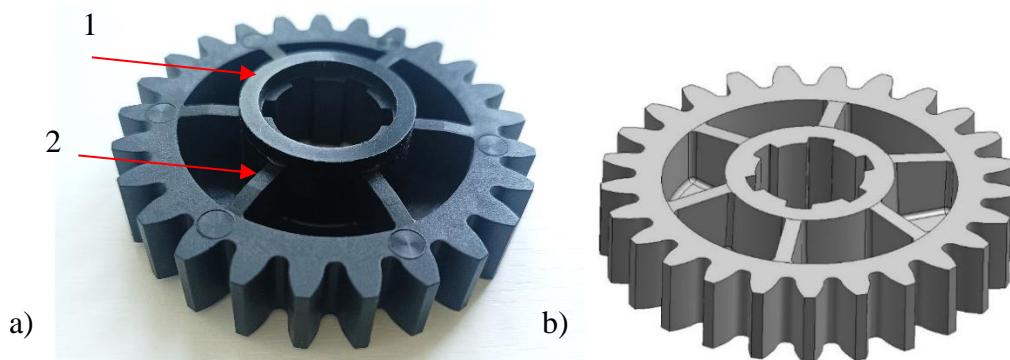
Rys. 66. Widok KZ25 z oznaczonymi przypaleniami w miejscu linii łączenia

Zarówno dla KZ25 i KZ17 napotkano na duży problem z powtarzającym się klinowaniem, w układzie wlewowym, fragmentu wlewką zwanego marchewką. Rozwiązaniem dla obu kół zębatach było dodanie zabieraków na rdzeniach wypychacza. Tą zmianę konstrukcyjną pokazuje rys. 67.



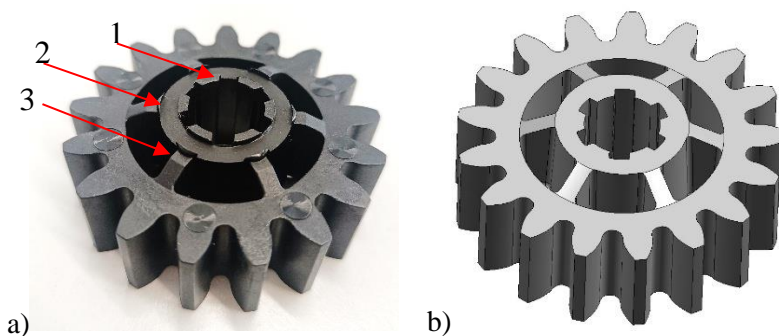
Rys. 67. Widok korekty konstrukcyjnej, w postaci dodatku zabieraka wlewka na rdzeniu wypychacza:
a) KZ25; b) KZ17. Zabierak oznaczono kolorem czerwonym

Kolejnymi niezgodnościami w przypadku KZ25, były dodatkowy kołnierz piasty, formowany przez nieprawidłowy wypychacz tulejowy oraz niepoprawny kształt sześciu żeber, co zostało przedstawione na rys. 68. Działaniem korygującym było dospawanie wypychacza tulejowego i poprawę drażenia żeber.



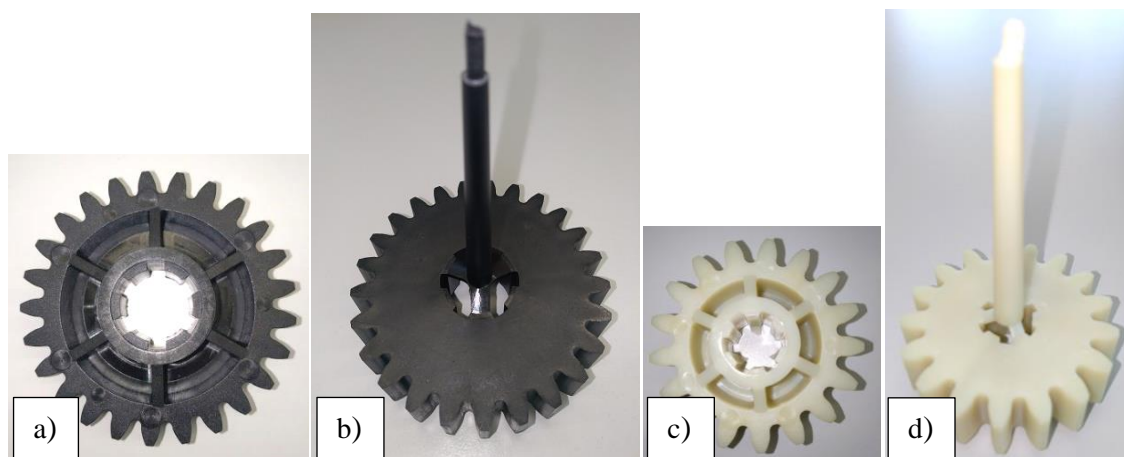
Rys. 68. Widok różnic między: a) wypraską KZ25 z niepoprawnie wykonaną piastą (1) i żebrami (2);
b) modelem CAD KZ25

Niezgodności KZ17 względem modelu zostały przedstawione na rys. 69. Działaniami korygującymi było skrócenie wypychacza tulejowego i poprawa drażenia żeber.



Rys. 69. Widok różnic między: a) wypraską KZ17 z niepoprawnie wykonaną piastą (1, 2)
i żebrami (3); b) modelem CAD KZ17

Po zakończeniu niezbędnych korekt narzędziowych wykonano trzy serie wtrysków obu typów kół zębatach KZ25 i K17. Na rys. 70 przedstawiono detale pozbawione wad przetwórczych. W trakcie formowania wtryskowego, każde z kół ważono oraz wizualnie kontrolowano jego jakość powierzchni. Dla wykonania dalszych badań poprawności kształtowo – wymiarowej oraz testów trwałościowych przekładni zębatej, wykonano po 25 szt. KZ25 i KZ17. W wyniku czego uzyskano ok. 600 szt. kół zębatach z różnych materiałów kompozytowych.



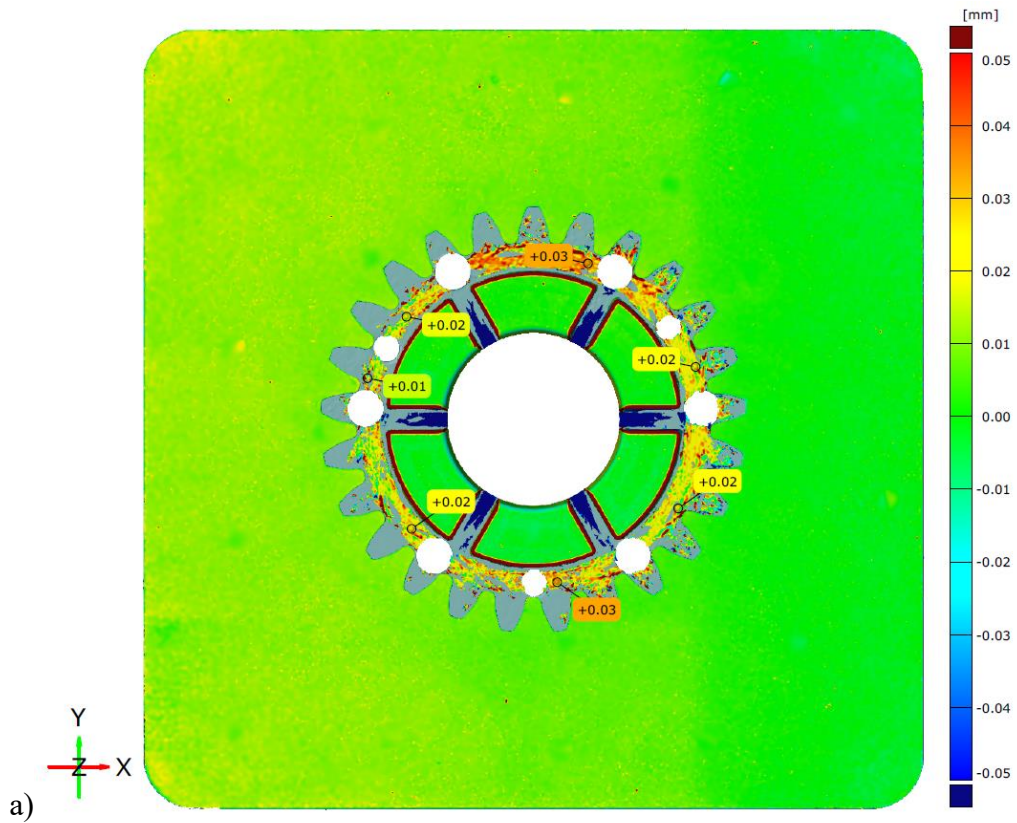
Rys. 70. Widok otrzymanych detali: a) KZ25 (PA66/6T/35GF) od strony formowanej przez stempel; b) KZ25 (PA66/6T/35GF) z wlewkiem od strony układu wlewowego; c) KZ17 (PPA/35GF) od strony formowanej przez stempel; d) KZ17 (PPA/35GF) z wlewkiem od strony układu wlewowego

III.9. Analiza geometrii wkładek formujących oraz wyprasek KZ25 i KZ17

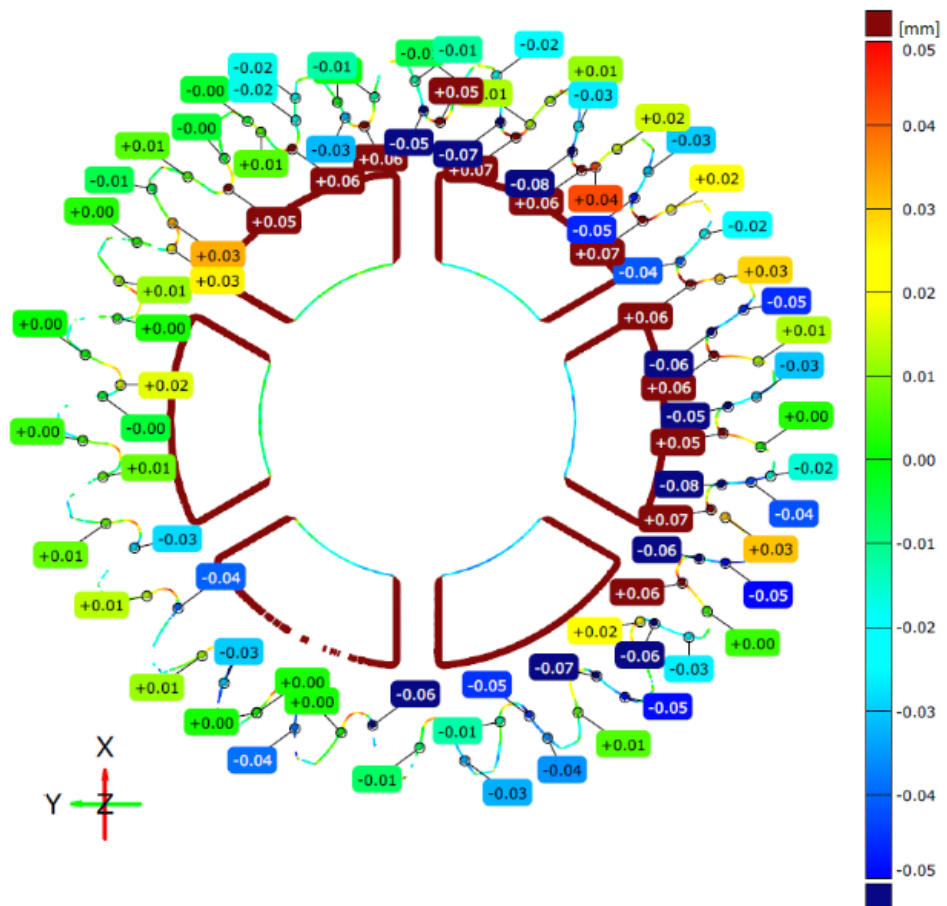
W pierwszym etapie przeprowadzono analizę dokładności geometrii gniazd formujących KZ25 i KZ17. Z uwagi, że w tym przypadku tylko części stemplowe gniazd wtryskowych brały udział w kształtowaniu geometrii wyrobów, zdecydowano się na wykonanie ich skanów z pominięciem płaskiej powierzchni obu matryc. Otrzymane pomiary miały na celu określenie poprawności kształtowo – wymiarowej wytworzonej formy wtryskowej. Bazowanie obu wkładek zostało wykonane tak, aby uzyskać jak najlepsze dopasowanie skanu MESH z nominalnym modelem CAD (metoda bestfit).

Podczas analizy gniazda formującego KZ25 stwierdzono lokalne braki fragmentów geometrii modelu. Rys. 71 a przedstawiono odchyłki powierzchni, w wklęsłym gnieździe formującym, na poziomie od +0,01 do +0,03 mm. Płaszczyzna powierzchni podziału stempla wykazywała błędy geometrii w granicach -0,01 do +0,02 mm. Analiza odchyłek zarysu KZ25 przedstawiona na rys. 71 b, uwidaczniała naddatki materiału na całym wewnętrznym obrysie wieńca oraz elementach formujących zębra. Niezgodności te mieściły się w zakresie od +0,05

do +0,07 mm. W obrębie zarysu zębów stwierdzono lokalne odchylenia geometrii zmierzonej do bazowej, zawierające się w granicach od -0,05 do +0,03 mm. Dokładność wykonania tego fragmentu geometrii decyduje o właściwej pracy przekładni. Natomiast obrys piasty wskazuje na odchyłki w zakresie od -0,05 do +0,01 mm.



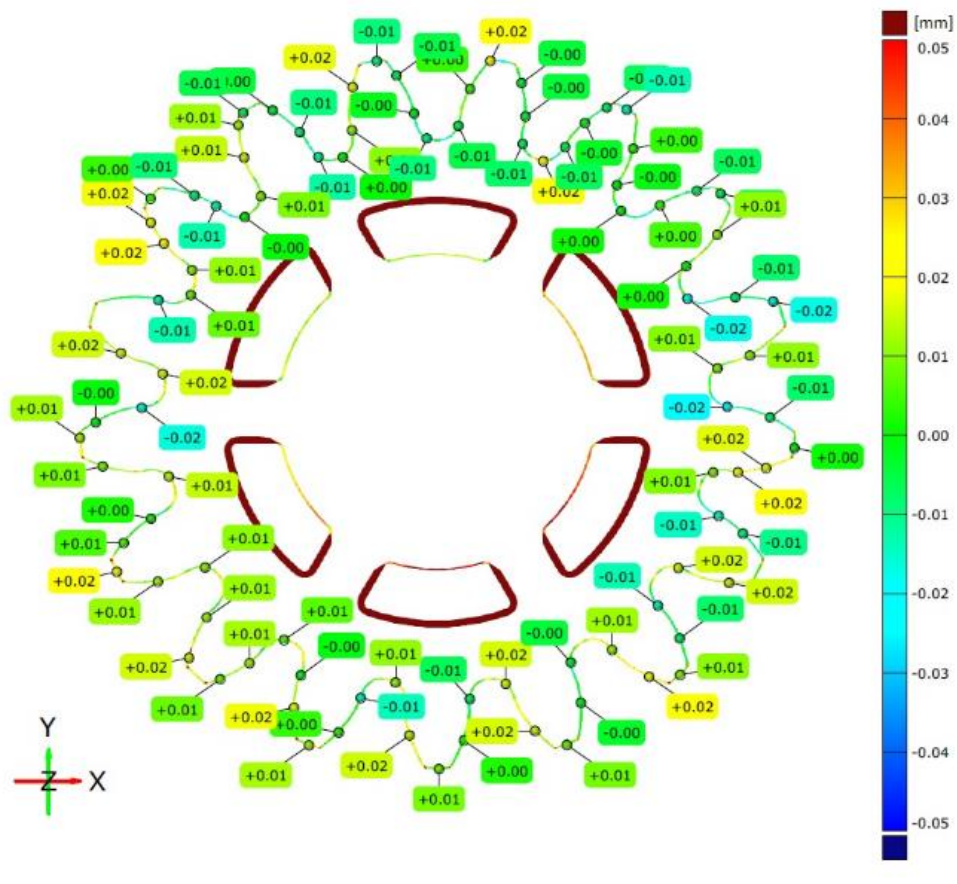
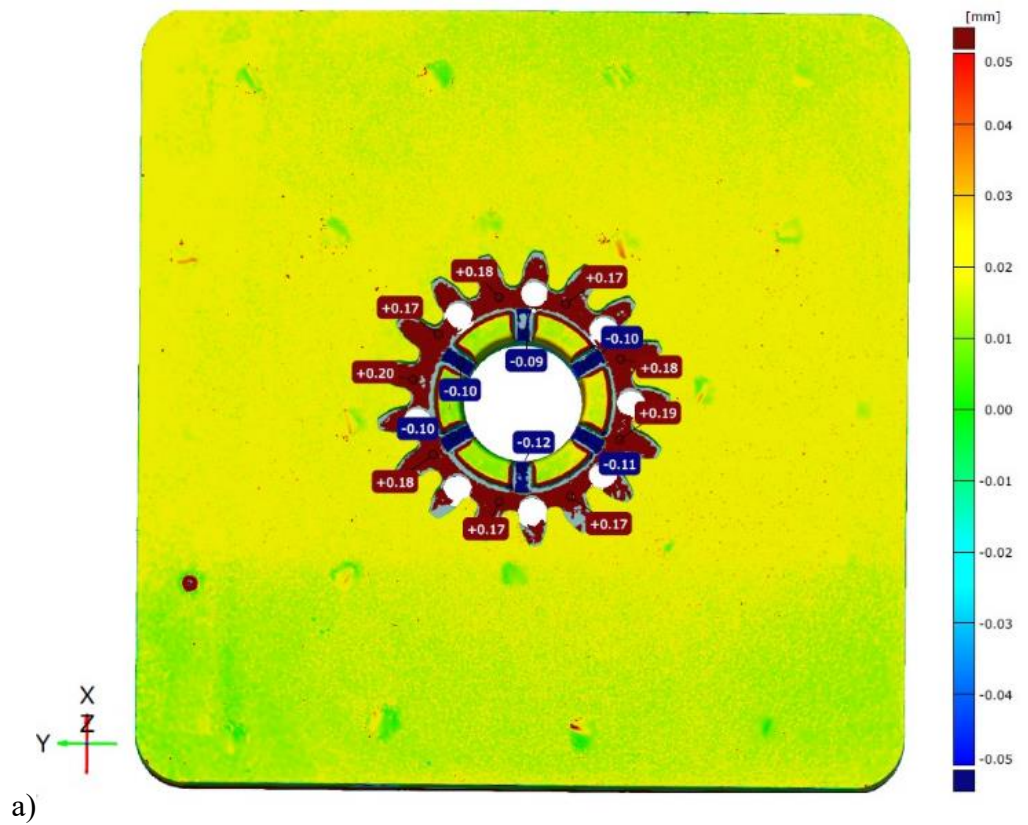
a)



b)

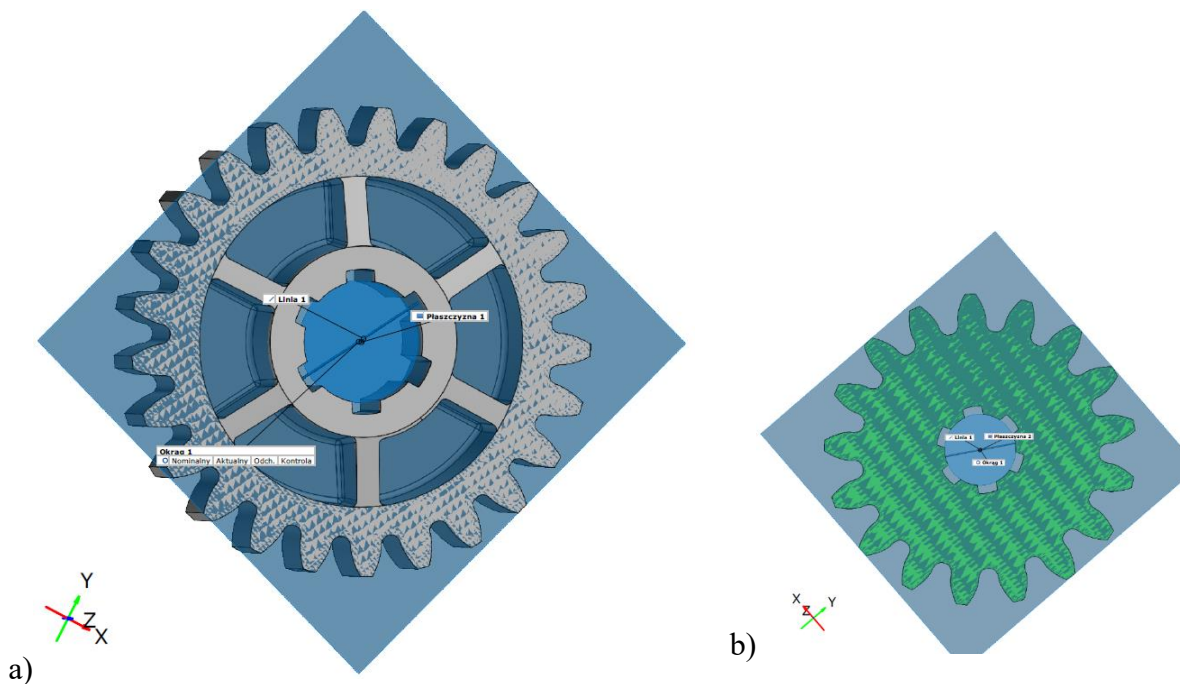
Rys. 71. Analiza globalna dokładności odwzorowania geometrii nominalnego modelu gniazda formy wtryskowej KZ25: a) wkładka formująca; b) zarys wieńca zębatego

Na rys. 72 a przedstawiającym wkładkę formującą gniazdo KZ17, stwierdzono liczne występowanie odchyłek dodatnich w obrębie wieńca. Mieściły się one w zakresie od +0,17 do +0,20 mm. Natomiast w rejonie sześciu żeber stwierdzono braki powierzchni w między -0,12, a -0,09 mm. Pokazana na rys. 72 b analiza odchyłek zarysu KZ17, wskazuje na analogiczne niezgodności jak w przypadku KZ25. Także tutaj powtórzyły się błędy odchyłek na wewnętrznym obrysie wieńca i na elementach formujących zębra. W każdym z tych miejsc odchyłki błędów wykazały wartości przekraczające przyjętą skalę wyświetlania, tj. powyżej +0,05 mm. Natomiast zarys zębów ujawniał dopasowanie zmierzonej geometrii do bazowego modelu, ponieważ odchyłki błędów w tym obszarze, mieściły się od -0,02 do +0,02 mm.



Rys. 72. Analiza globalna dokładności odwzorowania geometrii nominalnego modelu gniazda formy wtryskowej KZ17: a) wkładka formująca; b) zarys wieńca zębatego

Kolejnym etapem było przeprowadzenie analiz dokładności odwzorowania globalnej geometrii KZ25 i KZ17. Otrzymane wyniki miały na celu określenie miejsc deformacji kół zębatych w porównaniu do wzorca modelu bryłowego CAD, wyznaczonego dla Zytel HTN92G45DH2 BK083. W środowisku oprogramowania inspekcyjnego, przeprowadzono analizy dokładności geometrii dla wyprasek wytypowanych materiałów (podrozdział II.1) oraz nowych kompozytów PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM. Bazowanie wykonano w oparciu o trzy elementy geometrii, tak aby siatka mierzonego koła, została dopasowana w jak najlepszym stopniu z nominalnym modelem CAD (rys. 73) [220]. Dla KZ25 i KZ17 miejscami odniesienia był punkt położony w osi każdego z kół zębatych oraz prosta przechodząca przez środek koła i dwa przeciwległe zębra. Trzeci z elementów geometrii różnił się w zależności od typu koła zębatego. Jak przedstawiono na rys. 73 a, w przypadku KZ25, na płaszczyznę bazującą wybrano boczną powierzchnię wieńca po uźebrowanej stronie koła zębatego. Natomiast dla KZ17, płaszczyzną bazującą była płaska powierzchnia koła, uformowana przez matrycę (rys. 73 b).

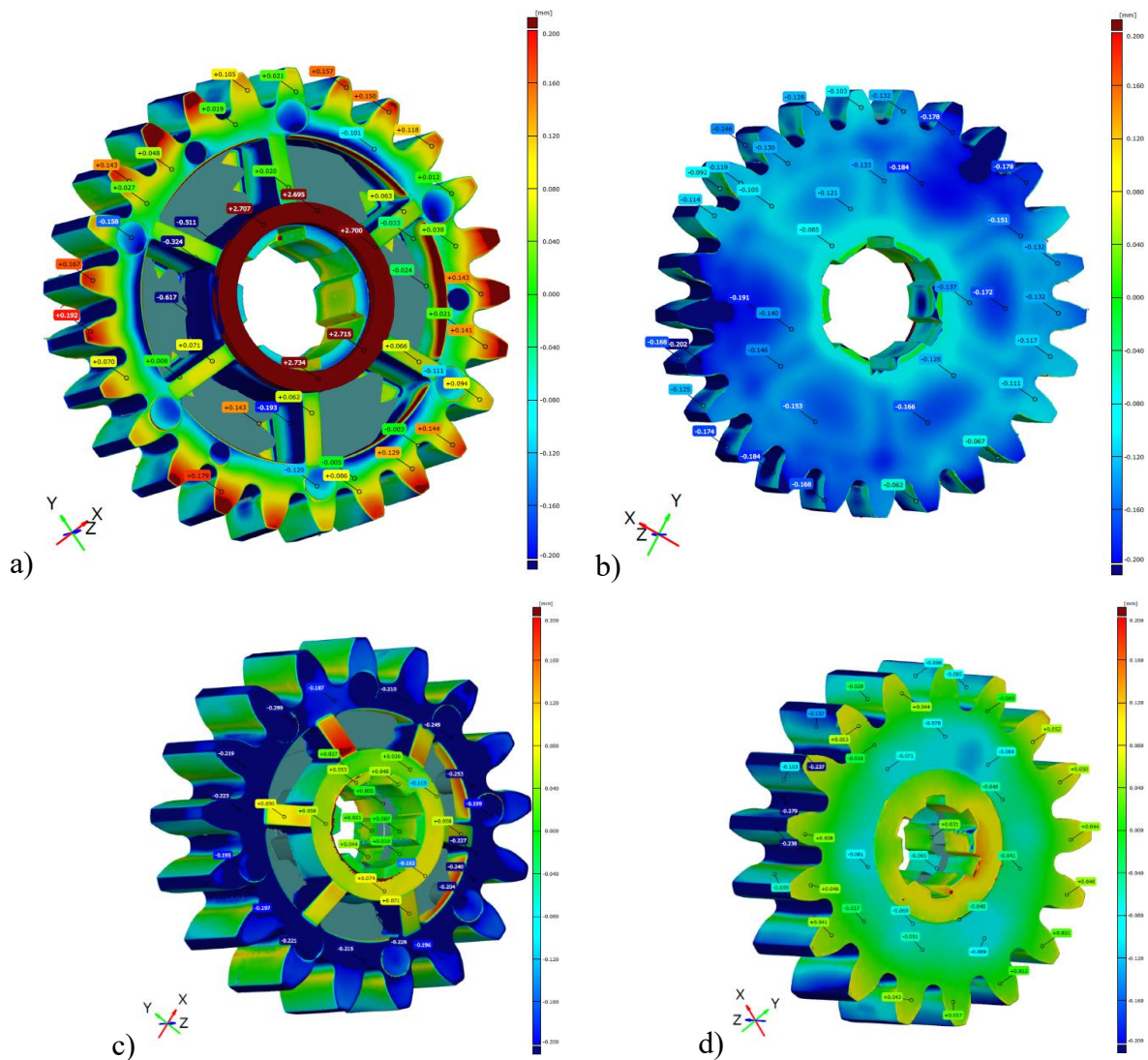


Rys. 73. Widok bazowania przy pomocy płaszczyzny, punktu i linii dla: a) KZ25; b) KZ17

Na rys. 74 a, na skanach przedstawiających rzut KZ25 z materiału PA6, widoczne są zagłębienia na powierzchni bocznej wieńca, spowodowane wciskaniem się wypychaczy w wieniec koła (maks. odchyłki wynoszą poniżej $-0,2$ mm). Kolejne miejsca zapadnięć były zlokalizowane przy wewnętrznej krawędzi wieńca, w obszarach leżących naprzeciwko punktów wtrysku (maks. odchyłki poniżej $-0,2$ mm). Natomiast w obszarze piasty widoczne

były znaczące dodatnie odchyłki powierzchni dochodzące do +2,700 mm. Przyczyną ich występowania był nieodpowiedni wypychacz tulejowy, wymieniony na etapie korekcyjnych prac narzędziowych. Ta niezgodność została wskazana w podrozdziale III.8, rys. 68. Drugim obszarem występowania odchyłek powierzchni były głowy zębów położone naprzeciwko punktów wtrysku oraz na końcu drogi płynięcia uplastycznionego tworzywa. Na rys. 74 a, przedstawiono zęby położone w linii żeber charakteryzujące się geometrią najbliższą modelowi CAD. Podczas analizy skanu KZ25 (PA6) formowanej przez płaską matrycę (rys. 74 b), stwierdzono ujemne odchyłki geometrii w całym obszarze skanowania. Odchyłki mieściły się w zakresie od -0,202 do -0,062 mm. Jedynie powierzchnia zlokalizowana bezpośrednio przy otworze przelotowym była zgodna z modelem bazowym. Tak duże zapadnięcia powierzchni były spowodowane zastosowaniem PA6, z którego zostało wykonane koło KZ25. Jak pokazuje tab. 20, jest to nienapełniony poliamid, którego skurcz poprzeczny i wzdłużny, ma znacznie wyższą wartość w porównaniu do przyjętego wzorca, którym było tworzywo napełnione włóknem szklanym w ilości 45 % wag.

Mimo innej powierzchni bazowania w przypadku skanów KZ17 zaobserwowano podobną zależność. Na rys. 74 d, po stronie płaskiej matrycy, odchyłki powierzchni kształtowały się na poziomie od -0,071 do +0,052 mm. Rys. 74 c przedstawiający uźebrowaną stronę koła zębatego pokazuje, że wieniec charakteryzował się znacznym skurczem, zaś jego odchyłki geometrii mieściły się w zakresie -0,299 do -0,187 mm. Piasta i żebra były bliższe nominalu, ponieważ w tym obszarze odchyłki wynosiły od +0,027 do +0,095 mm.



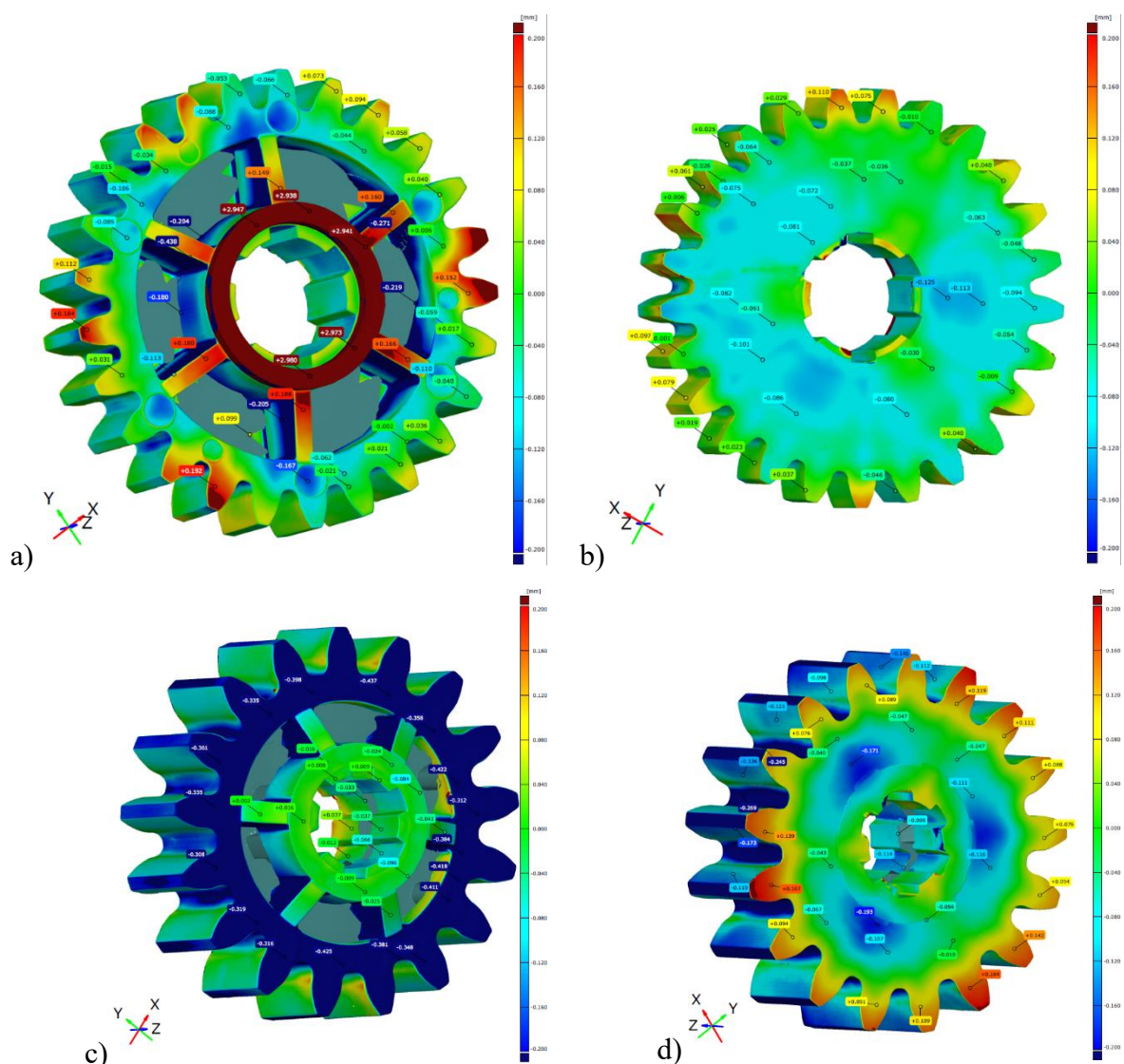
Rys. 74. Analiza globalna dokładności odwzorowania geometrii nominalnych modeli KZ25 i KZ17 ze zdefiniowanymi punktami inspekcyjnymi siatki, wykonanymi z materiału PA6

Analizując mapy odchyłek przedstawiające dokładność odwzorowania kół zębatych wykonanych z materiału PA6T/6I/30GF (rys. 75), zaobserwowano lokalne różnice geometrii w porównaniu do PA66 (rys. 74). Pierwszą z rozbieżności jest to, że w przypadku KZ25 (PA6T/6I/30GF), ubytki powierzchni w miejscu styku z wypychaczami są znacznie mniej widoczne (odchyłki w zakresie -0,167 do -0,085 mm). Przy wewnętrznej krawędzi wieńca z tarczą, obserwowano miejscowe ujemne odchyłki o wartości ok. -0,100 mm. Natomiast element piasty formowany przez wypychacz tulejowy charakteryzował się wzrostem dodatnich odchyłek w porównaniu do materiału PA6. Różnice mieściły się w okolicach +2,940 mm, co wynikało z mniejszego skurczu materiału wzmocnionego w porównaniu do PA6 (tab. 20). Także zębra w miejscach łączenia się z piastą posiadały lokalne odchyłki tworzywa wynoszące ok. +0,166 mm. W porównaniu z PA6, mapa odchyłek geometrii zębów dla KZ25 wykonanego

z PA6T/6I/30GF przedstawia się nieco inaczej. W przypadku koła zębatego wykonanego z materiału wzmocnionego zaobserwowano, że lokalizacje dodatnich odchyłek materiału położone są głównie na końcu drogi płynięcia tworzywa. Wyjątkiem jest pojedynczy ząb, ułożony na wprost jednego z punktów wtrysku (rys. 75 a). Jednak przypuszcza się, że niezgodność w tym miejscu jest spowodowana błędem narzędziowym i powtarzała się dla większości geometrii kół zębatych o liczbie zębów równej 25.

Strona KZ25 (PA6T/6I/30GF) formowana przez płaską matrycę (rys. 75 b) charakteryzuje się znacznie mniejszymi odstępstwami geometrii powierzchni w porównaniu do analogicznych miejsc z KZ25 (PA6). Na rys. 75 b, dla geometrii PA6T/6I/30GF widoczne są zapadnięcia o wielkości od -0,125 do -0,072 mm. Ich obszar pokrywa się z miejscami początkowego niezaburzonego płynięcia materiału, przedstawionego na analizie AMI (podrozdział III.6, rys. 47 a i 47 b). Obszary, na których zgodnie z analizą symulacji AMI, przebiega linia łączenia oraz równoległa orientacja włókien (podrozdział III.6, rys. 49), charakteryzują się występowaniem najmniejszych odchyłek powierzchni.

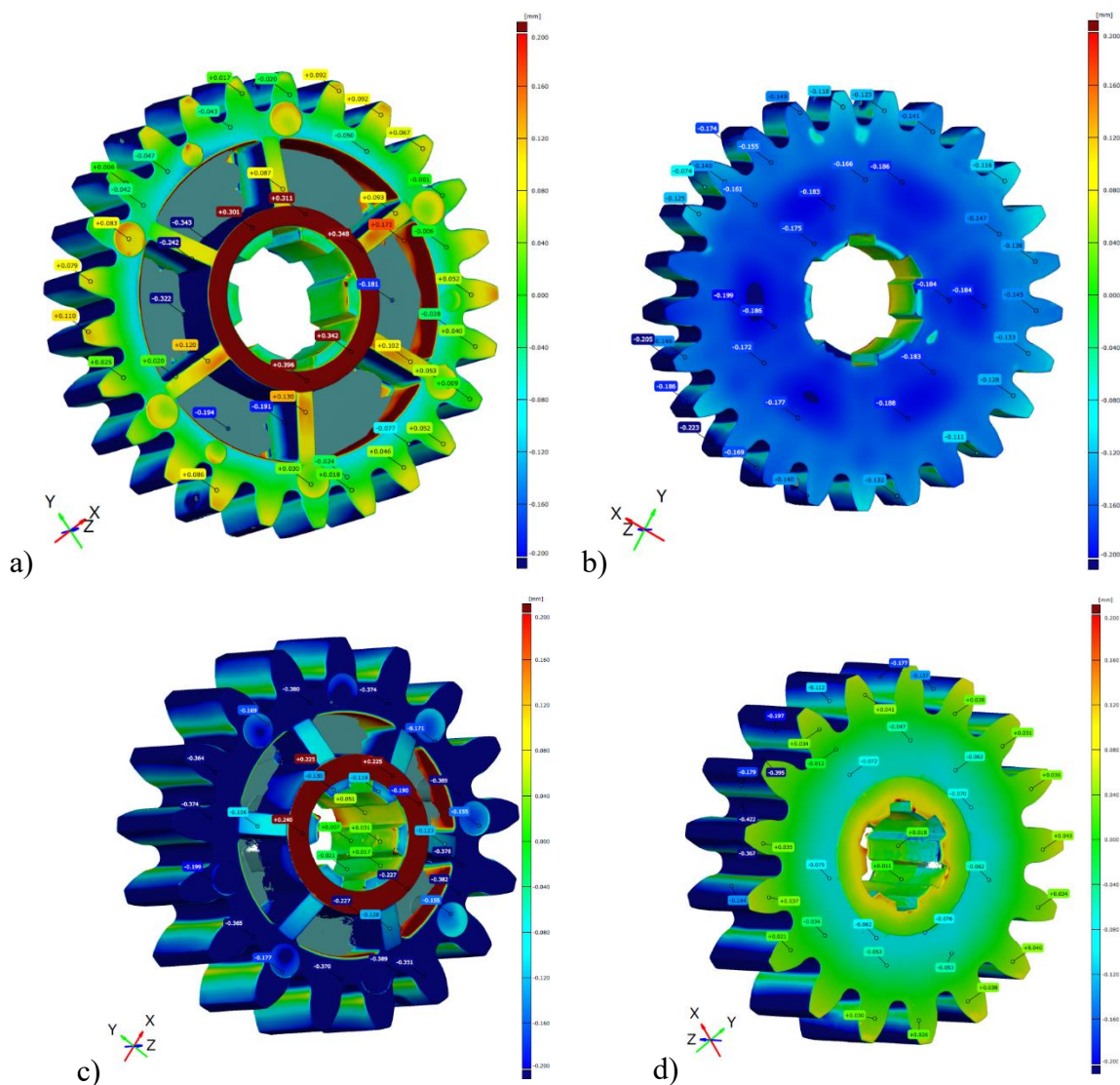
Porównując geometrię KZ17 (PA6T/6I/30GF) przedstawioną na rys. 75 c stwierdzono, że były na niej widoczne powtarzalne zależności jak w KZ25 (rys. 75 a). Natomiast w porównaniu do nienapełnionego KZ17 (rys. 74 d), zauważono znaczne większe odchyłki i zdecydowanie gorsze odwzorowanie do geometrii modelu CAD. Rys. 75 c przedstawiający uźebbraną stronę koła zębatego, ukazuje zapadnięcia powierzchni w obszarze wieńca (nawet do -0,4 mm). Natomiast sama piasta i żebra były zgodne z nominałem, a ich odchyłki mieściły się od -0,096 do +0,008 mm.



Rys. 75. Analiza globalna dokładności odwzorowania geometrii nominalnych modeli KZ25 i KZ17 ze zdefiniowanymi punktami inspekcyjnymi siatki, wykonanymi z materiału PA6T/6I/30GF

Kolejna globalna analiza dokładności kół zębatach dla materiału PA46 (rys. 76), miała miejsce po wymianie wypychacza tulejowego w gniazdach formujących obie wersje kół zębatach. Dzięki temu dla KZ25 (PA46) w obszarze piasty odchyłki tworzywa uległy korekcyi o rząd wielkości do ok. $+0,300\text{mm}$ (rys. 76 a). Dla tej samej geometrii, jak w poprzednich materiałach (rys. 74 a, 75 a) są widoczne odchyłki powierzchni na zębach leżących na końcu płynięcia, ale zjawisko to zostało skorelowane do ok. $+0,090\text{ mm}$. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że PA46 jest tworzywem niewzmocnionym, a jego skurcz przetwórczy nie zależy od kierunku płynięcia strugi polimeru (tab. 20). Powierzchnia KZ25 (PA46) formowanej przez płaską matrycę, charakteryzuje się ujednoliconymi zapadnięciami w całym obrębie mapowanego pola, w zakresie $-0,199$ do $-0,118\text{ mm}$ (rys. 76 b). W porównaniu do PA6 i PA6 i PA6T/6I/30GF, różnice w geometrii KZ17 (PA46) kształtowanej przez gniazdo stempla,

charakteryzują się znacznie większymi brakami materiału w obszarze żeber i elementów kształtkujących otwór przelotowy (odchyłki ok. $-0,123$ mm) (rys. 76 c). Dla KZ17 (PA6T/6I/30GF) te obszary mieściły się w nominale. Na rys. 76 d zaobserwowano, że geometria KZ17 dla PA46 charakteryzuje się profilem zgodnym z modelem CAD.



Rys. 76. Analiza globalna dokładności odwzorowania geometrii nominalnych modeli KZ25 i KZ17 ze zdefiniowanymi punktami inspekcyjnymi siatki, wykonanych z materiału PA46

Z uwagi na dużą powtarzalność analizy globalnej dla wtryskiwanych kół zębatach, zdecydowano się na przedstawienie trzech reprezentatywnych geometrii KZ25 i KZ17. Porównując wszystkie wyniki mierzonych kół zębatach, stwierdzono powtarzające się zależności w grupie tworzyw nienapełnionych (PA6; PA66) oraz wzmocnionych włóknem szklanym (PA6/30GF, PPA/35GF, PA66/6T/35GF, PA66/6T/50GF, PA66/PTFE/30GF). Natomiast trzeci z wybranych materiałów tj. PA46 był przedstawicielem grupy: PA46,

PA46/PTFE, PA46/CNT/SM, PA46/PTFE/CNT/SM, która charakteryzowała się znacznie mniejszym rozrzutem odchyłek w obrębie pojedynczej powierzchni skanu. Kolejnym z powodów było to, że ta grupa detali została wykonana już po wymianie wypychacza tulejowego. Jednak ta zmiana narzędziowa nie miała żadnego wpływu na dokładność obszarów innych niż sama piasta.

Tab. 20. Wartości skurczu równoległego i poprzecznego dla badanych materiałów (stan suchy), które są zamieszczone w kartach charakterystyki producentów

| Oznaczenie | Skurcz równoległy ISO 294-5 (stan suchy), % | Skurcz poprzeczny ISO 294-4 (stan suchy), % |
|------------------------------|---|---|
| wzór Zytel HTN92G45DH2 BK083 | 0,1 | 0,6 |
| PA6 | 1,1 | 1,2 |
| PA6/30GF | 0,3 | 0,9 |
| PA66 | 1,0 | 1,1 |
| PPA/35GF | 0,2 | 0,6 |
| PA6T/6I/30GF | 0,2 | 0,8 |
| PA66/6T/35GF | 0,2 | 0,9 |
| PA66/6T/50GF | 0,3 | 0,6 |
| PA46 | 2,0 | 2,0 |
| PA46/PTFE | 2,0 | 2,0 |
| PA66/PTFE/30GF | n/a | n/a |
| PA46/CNT/SM | n/a | n/a |
| PA46/PTFE/CNT/SM | n/a | n/a |

Podsumowując, podstawową przyczyną licznych odchyłek mierzonych kół zębatach względem modelu CAD było to, że gniazda formy wtryskowej zostały zaprojektowane pod kątem jednego wybranego tworzywa. Natomiast z uwagi, że jest to projekt badawczy zdecydowano się na wtrysk różnych materiałów, mając świadomość, że zarówno zawartość napełniacza oraz orientacja cząstek polimeru, ma wpływ na kierunkowość skurczu. To zjawisko jest szczególnie widoczne w przypadku materiałów zawierających włókno szklane, które w zależności od sposobu ułożenia na zarysie zębów może powodować anizotropię skurczu i w dalszej konsekwencji zmieniać geometrię zarysu zęba.

III.10. Analiza dokładności geometrycznej wykonanej za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej P40

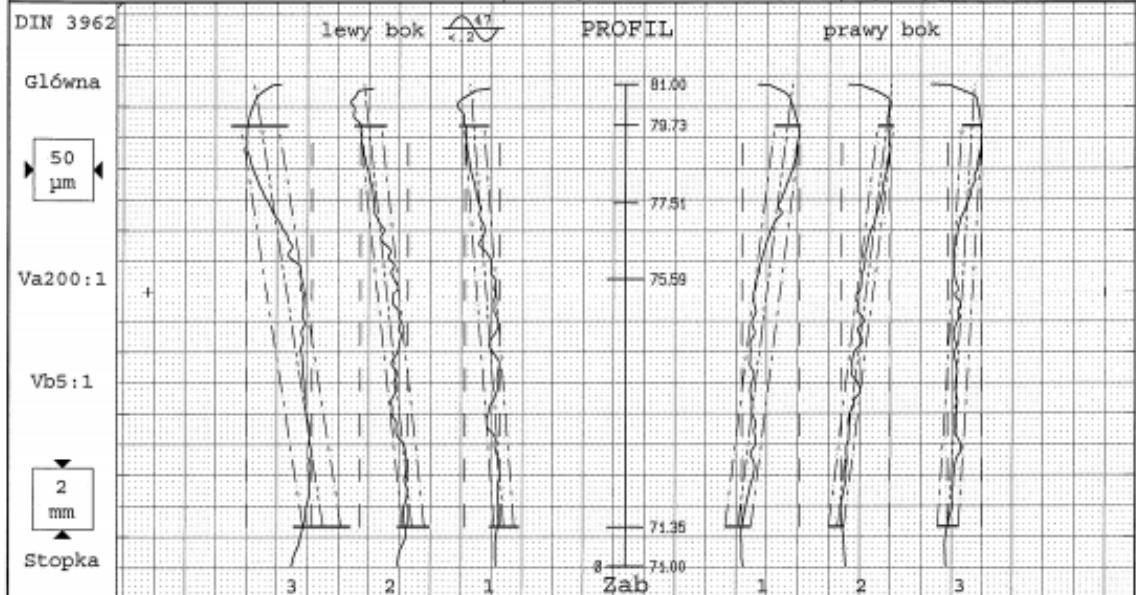
Pomiary kół zębatach wykonano w celu określenia dokładności geometrycznej oraz sprawdzenia stabilności (powtarzalności) procesu wtrysku. Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale II.13. Wyniki analizy geometrii polimerowych przedstawiono w tab. 21 – 22. W raportach otrzymanych po pomiarach kół zębatach zawarto dane dotyczące:

- odchyłek zarysu (F_α – odchyłka całkowita zarysu; $f_{f\alpha}$ – odch. kształtu zarysu, C_α - beczkowanie zarysu, $f_{H\alpha}$ – odch. położenia zarysu, $f_{K\alpha}$ - modyfikacja wierzchołka);
- odchyłek zarysu bocznego linii zęba (F_β – odch. całkowita linii zęba, $f_{f\beta}$ – odch. kształtu linii zęba, $f_{H\beta}$ - odch. położenia linii zęba, C_β - beczkowanie linii zęba);
- odchyłek podziałki (f_p - pojedyncze odch. podziałki, F_p - sumaryczne odch. podziałki, f_{pmax} - maksymalne jednostkowe odchylenie podziałki, f_{umax} - największy skok podziałki, R_p - wahania podziałki, $F_{pz/8}$ – odch. rozpiętości podziałki dla 8 sąsiednich pomiarów);
- odchyłki kinematycznej koła (od ruchu obrotowego) F_r ;
- odchyłki grubości zęba R_s ;
- topografii zęba.

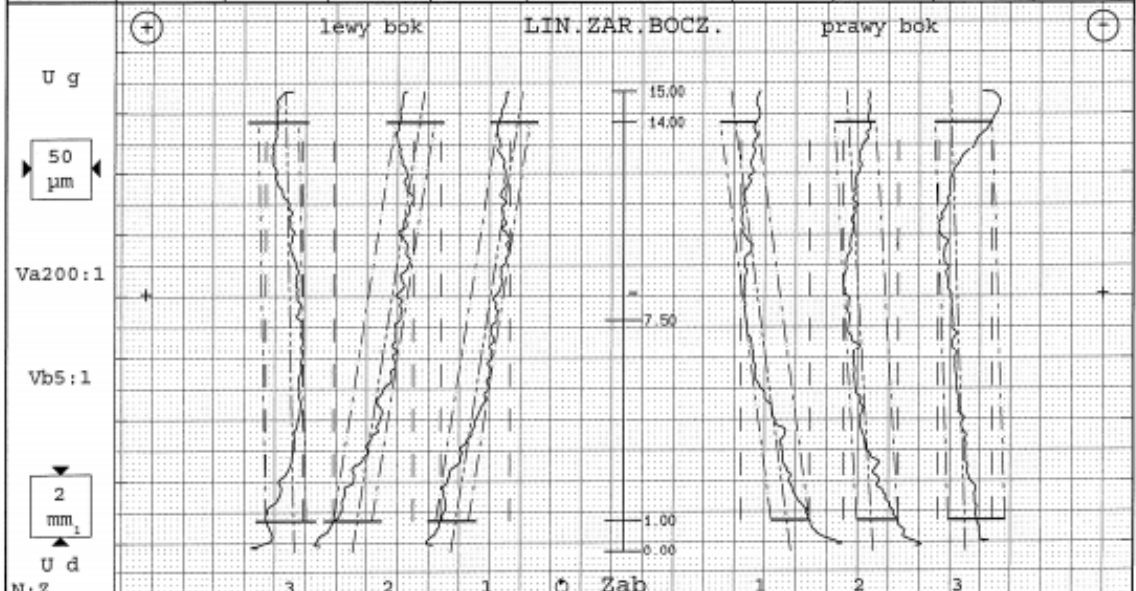
Wartości powyższych parametrów posłużyły do wyznaczenia klasy dokładności składowych geometrycznych koła zębatego i wyznaczenie jej ostatecznej wielkości. Należy zaznaczyć, że klasa dokładności wyznaczona dla danego parametru dokładności charakteryzującego uzębienie koła zębatego jest klasą dokładności koła zębatego. Dla wszystkich kół zębatach z wyjątkiem PA6/30GF wykonano arkusze pomiarowe składające się z raportów dotyczących zarysu i linii zęba, topografii zęba, podziałki i grubości uzębienia. Przykładowy zestaw raportów dla KZ25 i KZ17 wykonanych z PA66/PTFE/30GF, przedstawiono na rys. 77 – 82. Na podstawie otrzymanych wyników określono klasę dokładności poszczególnych kół zębatach (z wyjątkiem PA6/30GF). W tab. 21 - 22 przedstawiono wyniki klas dokładności dla kół zębatach KZ25 i KZ17.

Walcowe Profil/Zarys boczny

| | | |
|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Nr prog.: GST0411h00 -1 P 40 | Sprawdzający: jp | Data: 02.11.2022 16:08 |
| Nazwa: z25 external top | Liczba zębów z: 25 | Szerokość zęba b: 15mm |
| Nr rysunku: z17 25 M8 gear | Moduł m: 3mm | Prof.-Obes.kon. La: 13.08mm |
| Nr słu./serii.: 62 | Kąt przyporu: 20° | Pow.nos.-ob.ko. L8: 13mm |
| Klient/Maszyna Nr.: P40 B7248 | Kąt linii arubowej: 0° | Wart.mier.-p. M1: 5.56mm |
| Stanow.pomiar: Rzeszow | Pros.podst.Ø db: 70.4769mm | Ø czujnika (#16) 1mm |
| Stan: 17 nr1 | Podst.współ.sko: 0° | Ws.przes.pro. x: .099 |

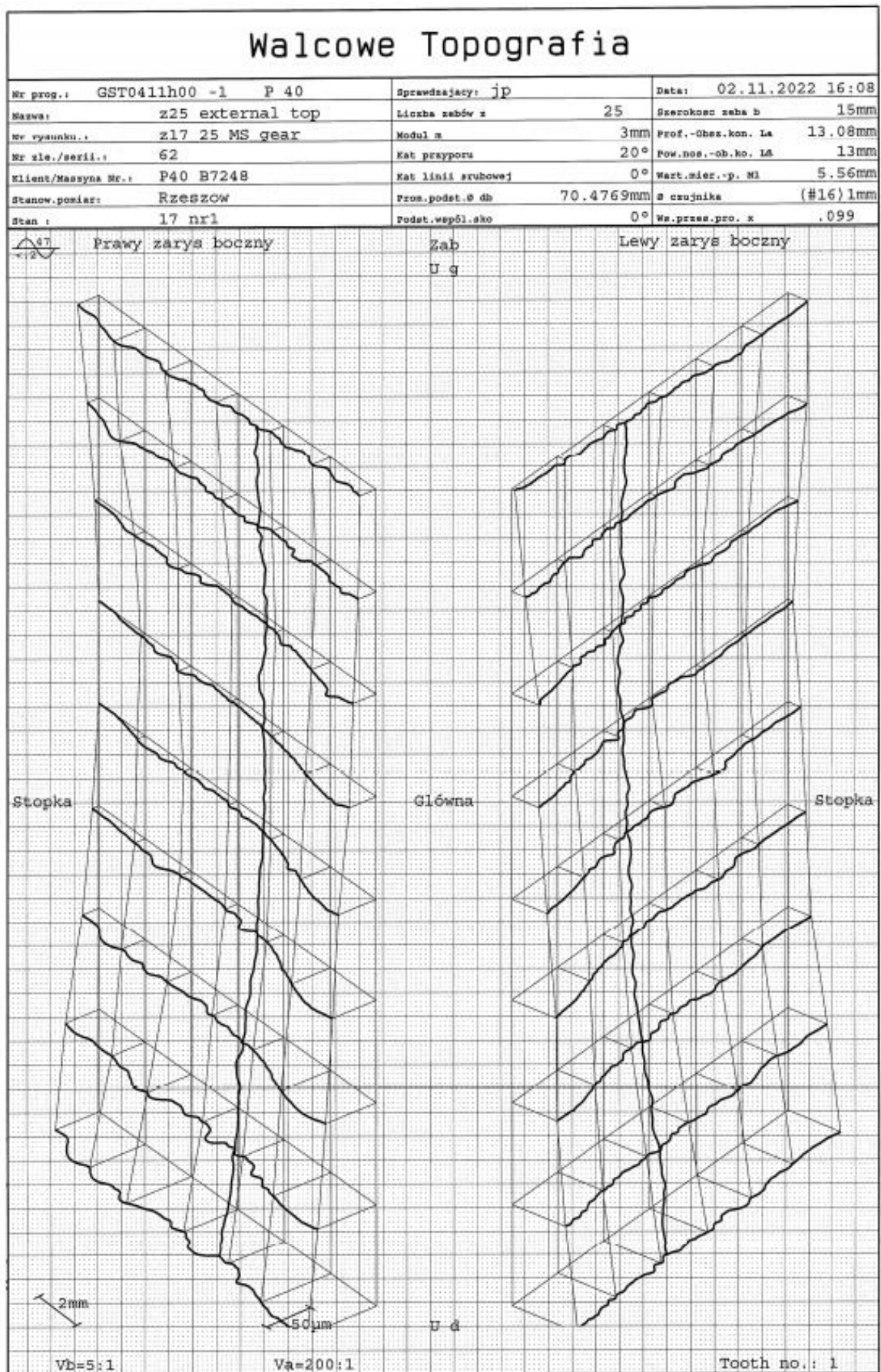


| | Wart.mier [µm] Jakosc | | | Wart.dopu Jakosc | | | Wart.mier [µm] Jakosc | | | | | |
|-----|-----------------------|----|--------|------------------|-----|----|-----------------------|------|-------|--------|------|-------|
| fHm | 37.0 | 11 | V 25.7 | ±6 | 6 | ±6 | 6 | 33.0 | 11 | V 20.5 | | |
| fHa | 50.8 | 12 | 35.2 | 25.1 | ±6 | 6 | ±6 | 6 | 39.8 | 11 | 39.8 | 19.3 |
| Fa | 53.5 | 11 | 38.9 | 28.7 | ±10 | 6 | ±10 | 6 | 46.6 | 11 | 39.2 | 28.0 |
| ffa | 30.9 | 10 | 17.6 | 16.2 | ±8 | 6 | ±8 | 6 | 21.1 | 9 | 12.7 | 17.0 |
| Ca | -26.5 | | -11.7 | -11.9 | | | | | -18.6 | | -7.7 | -10.7 |



| | V 65.6 | | | V 35.9 | | | | | | | | | |
|------|--------|-------|-------|--------|------|---|------|---|-------|----|-------|-------|----|
| fHSm | -36.3 | 11 | | 27.6 | 10 | | | | | | | | |
| fHS | 7.4 | -58.2 | 12 | -58.1 | ±8 | 6 | ±8 | 6 | 48.6 | 11 | 21.6 | 12.7 | |
| FBS | 30.1 | 64.6 | 11 | 56.2 | ±9 | 6 | ±9 | 6 | 55.2 | 11 | 44.5 | 44.1 | |
| ffB | 32.9 | 11 | 31.5 | 26.5 | ±5.5 | 6 | ±5.5 | 6 | 30.5 | 11 | 33.5 | 47.0 | 12 |
| cB | -26.2 | | -27.6 | -25.1 | | | | | -28.5 | | -26.8 | -24.6 | |

Rys. 77. Wyniki pomiarów zarysu i linii zęba KZ25 wykonanego z PA66/PTFE/30GF

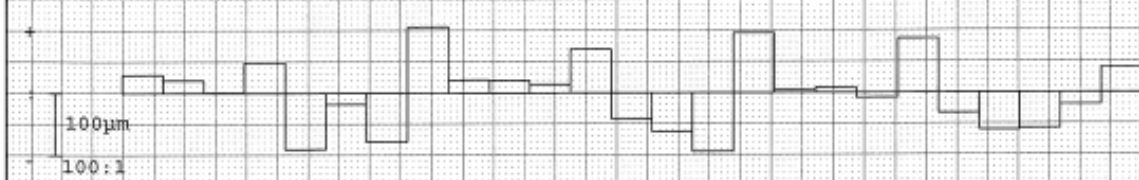


Rys. 78. Wyniki pomiaru topografii zęba koła KZ25 wykonanego z materiału PA66/PTFE/30GF

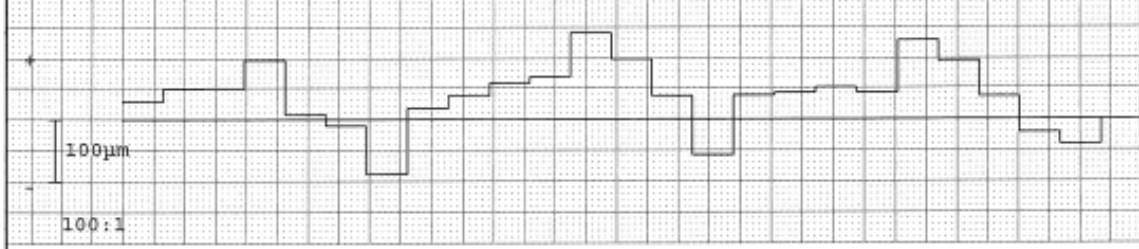
Walcowe Podziałka

| | | |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| Nr prog.: GST0411h00 -1 P 40 | Sprawdzający: jp | Data: 02.11.2022 16:08 |
| Nazwa: z25 external top | Liczba zębów z: 25 | Kąt przyporu: 20° |
| Nr rysunku: z17 25 M8 gear | Moduł m: 3mm | Kąt linii grubości: 0° |
| Nr zie./serii.: 62 | Stanow.pomiar: Rzeszów | |
| Klient/Maszyna Nr.: P40 B7248 | Stan: 17 nrl | |

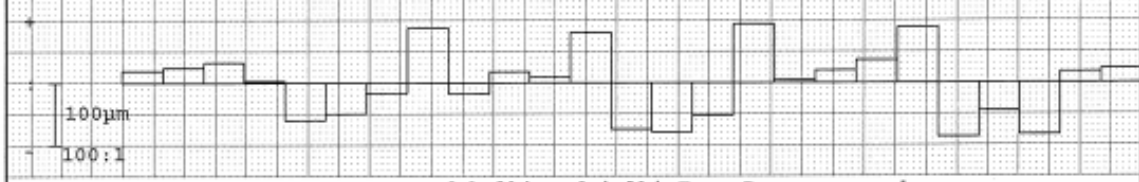
DIN 3962 Indywidualne odchyłki podziałki fp Lewy zarys boczny



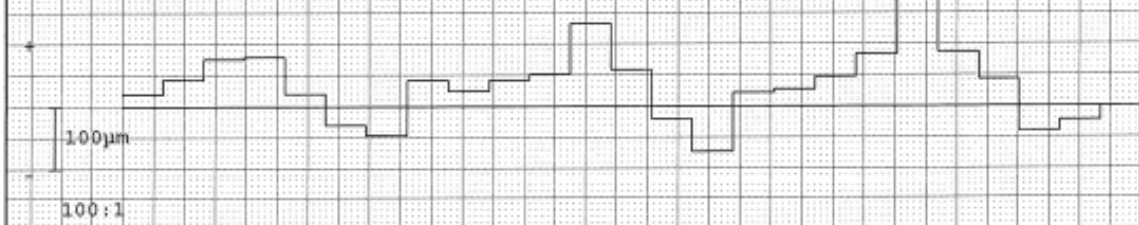
Sumaryczne odchyłki podziałki Fp Lewy zarys boczny



Indywidualne odchyłki podziałki fp Prawy zarys boczny

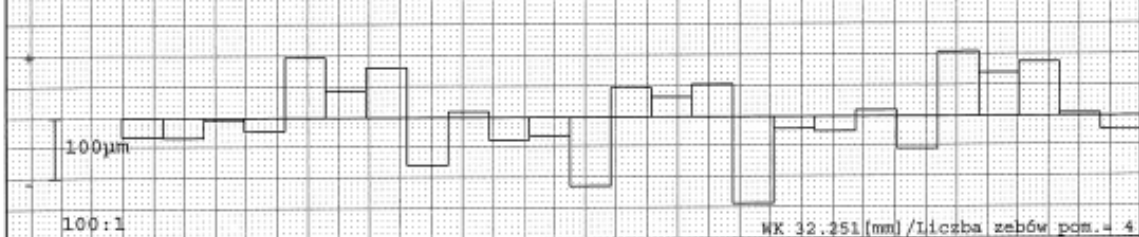


Sumaryczne odchyłki podziałki Fp Prawy zarys boczny



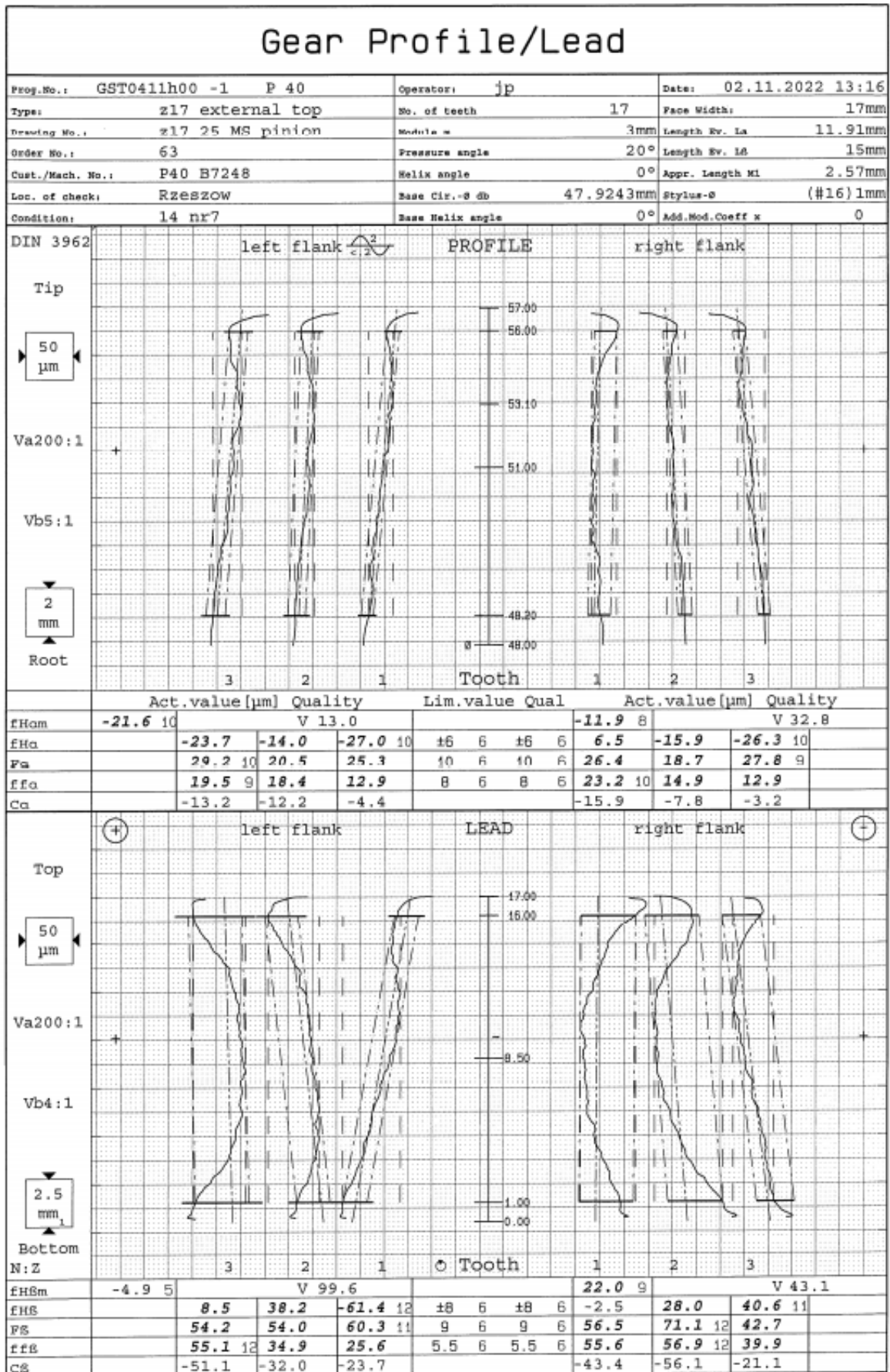
| Obsz. pomiar. podziałki 77.506 ± 7.5mm | Lewy zarys boczny | | | | Prawy zarys boczny | | | |
|--|-------------------|--------|-----------|--------|--------------------|--------|-----------|--------|
| | Wart.mier | Jakość | Wart.dopu | Jakość | Wart.mier | Jakość | Wart.dopu | Jakość |
| Duże jednost.odchyłki pods. fp max | 106 | 12 | 7.0 | 6 | 94.3 | 12 | 7.0 | 6 |
| Duże skoki podziałki fu max | 190 | 12 | 9.0 | 6 | 176 | 12 | 9.0 | 6 |
| Nahania podziałki fp | 200 | | | | 181 | | | |
| Sumaryczn. odchyłki podziałki Fp | 229 | 12 | 28.0 | 6 | 246 | 12 | 28.0 | 6 |
| Odchyłki rozpiętości pods. Fps/8 | 198 | 12 | 18.0 | 6 | 213 | 12 | 18.0 | 6 |

DIN 3962 Ruch obrotowy Fr (Ø kulki = 4.5mm)



| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----|----|------|---|-----------|--------|--------|
| Odchyłka od ruchu obrotowego Fr | 248 | 12 | 20.0 | 6 | Wart.dopu | 32.255 | 32.251 |
| Nahania grubości zębów ks | 101 | 12 | 12.0 | 6 | Wart.mier | 32.138 | 31.824 |

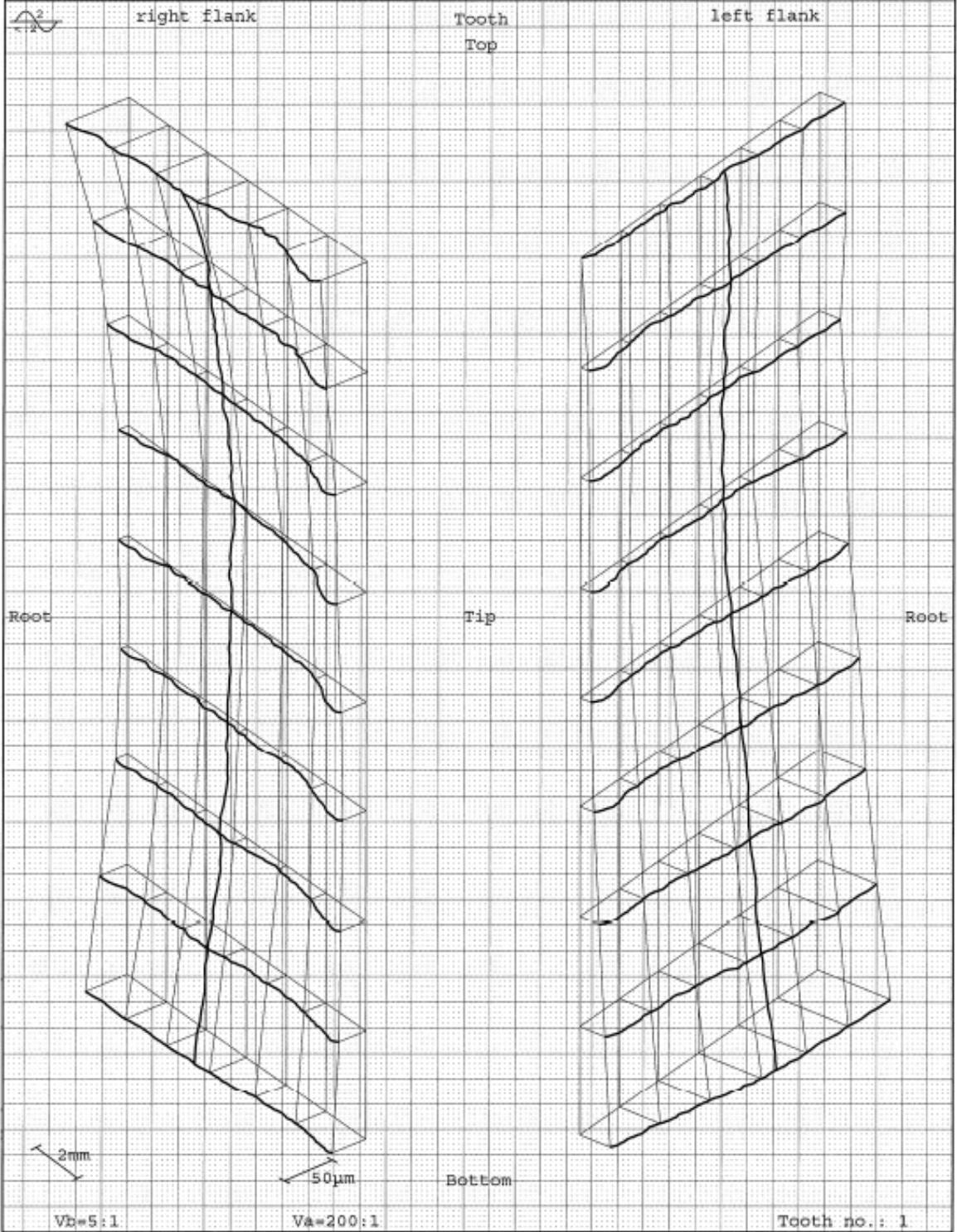
Rys. 79. Wyniki pomiaru podziałki i grubości zębów KZ25 wykonanego z PA66/PTFE/30GF



Rys. 80. Wyniki pomiarów zarysu i linii zęba KZ17 wykonanego z PA66/PTFE/30GF

Gear Topography

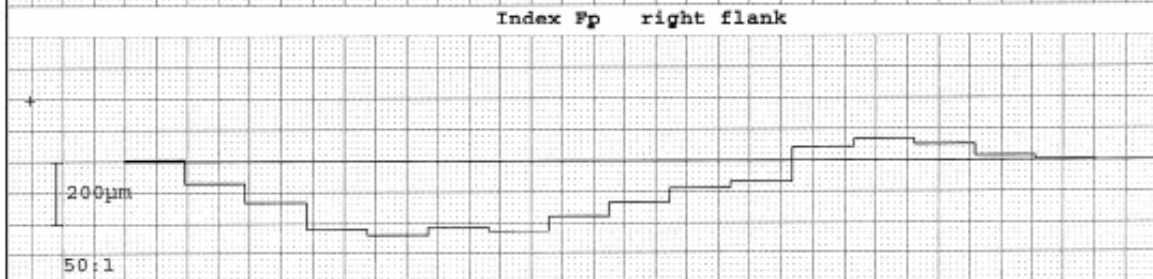
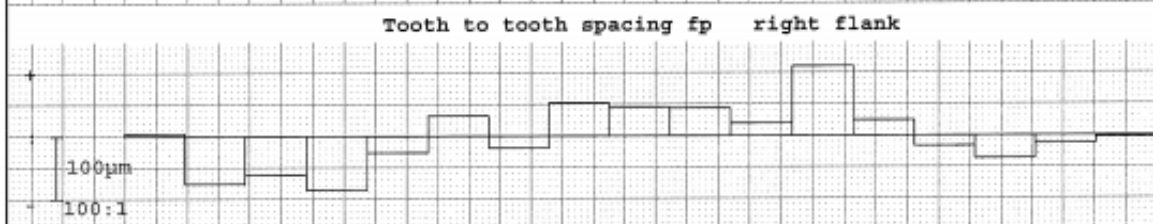
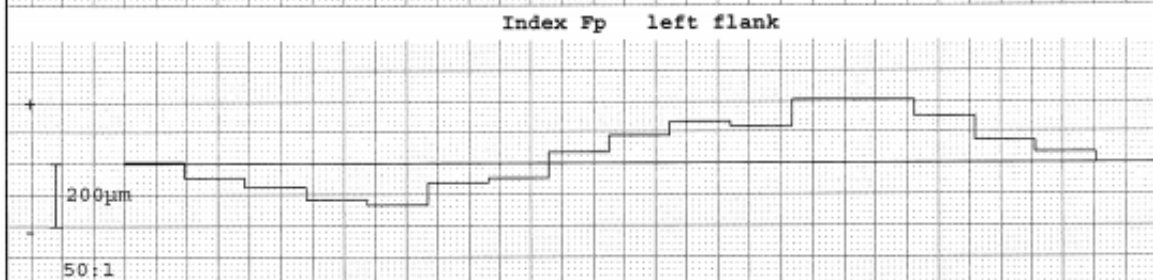
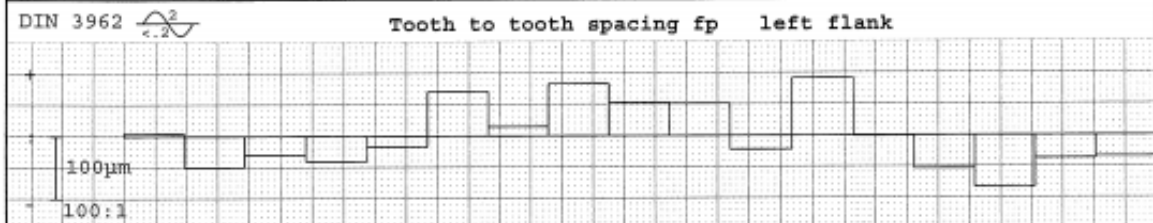
| | | |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Prog.No.: GST0411h00 -1 P 40 | Operator: jp | Date: 02.11.2022 13:16 |
| Type: z17 external top | No. of teeth: 17 | Face Width: 17mm |
| Drawing No.: z17 25 MS pinion | Module m: 3mm | Length Ev. La: 11.91mm |
| Order No.: 63 | Pressure angle: 20° | Length Ev. Ls: 15mm |
| Cust./Mach. No.: P40 B7248 | Helix angle: 0° | Appr. Length M1: 2.57mm |
| Loc. of check: Rzeszow | Base Cir.-S db: 47.9243mm | Stylus-S (#16) 1mm |
| Condition: 14 nr7 | Base Helix angle: 0° | Add.Mod.Coeff x: 0 |



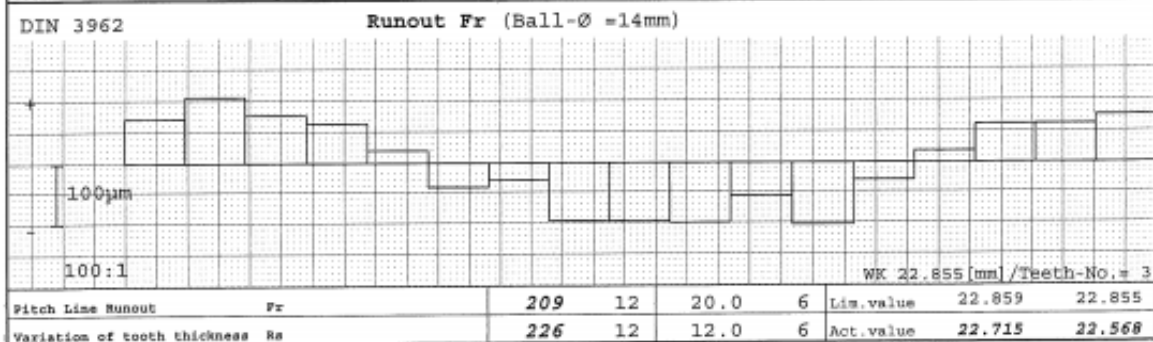
Rys. 81. Wyniki pomiaru topografii zęba koła KZ17 wykonanego z PA66/PTFE/30GF

Gear Spacing

| | | |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| Prog.No.: GST0411h00 -1 P 40 | Operator: jp | Date: 02.11.2022 13:16 |
| Type: z17 external top | No. of teeth: 17 | Pressure angle: 20° |
| Drawing No.: m17 35 MS pinion | Module = 3mm | Helix angle: 0° |
| Order No.: 63 | Loc. of check: Rzeszow | |
| Cust./Mach. No.: P40 B7248 | Condition: 14 nr7 | |



| | | left flank | | | | right flank | | | |
|--|--------|------------|-------|-----------|-------|-------------|-------|-----------|-------|
| | | Act.value | Qual. | Lim.value | Qual. | Act.value | Qual. | Lim.value | Qual. |
| Pitch measuring circle: 53.095 s=8.5mm | | | | | | | | | |
| Worst pitch variation | fp max | 91.4 | 12 | 7.0 | 6 | 111 | 12 | 7.0 | 6 |
| Worst spacing variation | fu max | 114 | 12 | 9.0 | 6 | 90.6 | 12 | 9.0 | 6 |
| Range of Pitch Error | Fp | 174 | | 196 | | | | | |
| Total index variation | Fp | 341 | 12 | 20.0 | 6 | 311 | 12 | 28.0 | 6 |
| Total index var. within sector Fps/8 | | 136 | 12 | 18.0 | 6 | 146 | 12 | 18.0 | 6 |



Rys. 82. Wyniki pomiaru podziałki i grubości zębów KZ17 wykonanego z PA66/PTFE/30GF

Tab. 21. Wyniki klasy dokładności KZ25 oraz klas zarysu i linii zęba, podziałka koła, bicia promieniowego oraz grubości zęba (DIN 3962)

| Koło badawcze | Zarys zęba | | Linia zęba | | Podziałka | | Grubość i bicie F_r, R_s | Klasa koła |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|------------|
| | Lewy | Prawy | Lewa | Prawa | Lewa | Prawa | | |
| PA6 | >> | >> | >> | >> | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | all | $f_{H\beta}, f_{f\beta}$ | f_{pmax}, f_{umax} | f_{pmax}, f_{umax} | | |
| PA66 | >> | >> | >> | >> | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\beta}, f_{f\beta}$ | $f_{H\beta}, f_{f\beta}$ | f_{umax} | f_{umax} | | |
| PPA/35GF | 12 | 12 | 10 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | all | $f_{H\alpha}, F_\beta$ | f_{pmax}, f_{umax} | f_{pmax}, f_{umax} | | |
| PA6T/6I/30GF | 12 | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | all | all | All | all | | |
| PA66/6T/35GF | 12 | >> | >> | 12 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | all | All | all | | |
| PA66/6T/50GF | 12 | >> | 11 | >> | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | $f_{f\beta}$ | $f_{H\beta}$ | All | all | | |
| PA46 | >> | 12 | 12 | 11 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\beta}$ | $f_{H\beta}$ | All | all | | |
| PA46/PTFE | >> | >> | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\beta}$ | $f_{H\beta}$ | f_{umax}, F_p | f_{pmax}, F_p | | |
| PA66/PTFE/30GF | 12 | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\beta}$ | $f_{f\beta}$ | All | all | | |
| PA46/CNT/SM | >> | 12 | 12 | >> | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\beta}$ | $f_{H\beta}$ | f_{pmax}, F_p | f_{pmax}, F_p | | |
| PA46/PTFE/CNT/SM | >> | >> | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\alpha}, F_\alpha$ | $f_{H\beta}, F_\beta$ | $f_{H\beta}, F_\beta$ | f_{pmax}, f_{umax} | f_{pmax}, f_{umax} | | |

Tab. 22. Wyniki klasy dokładności reprezentatywnych kół zębatach KZ17 oraz klas dokładności zarysu i linii zęba, podziałka koła, bicia promieniowego oraz grubości zęba (DIN 3962)

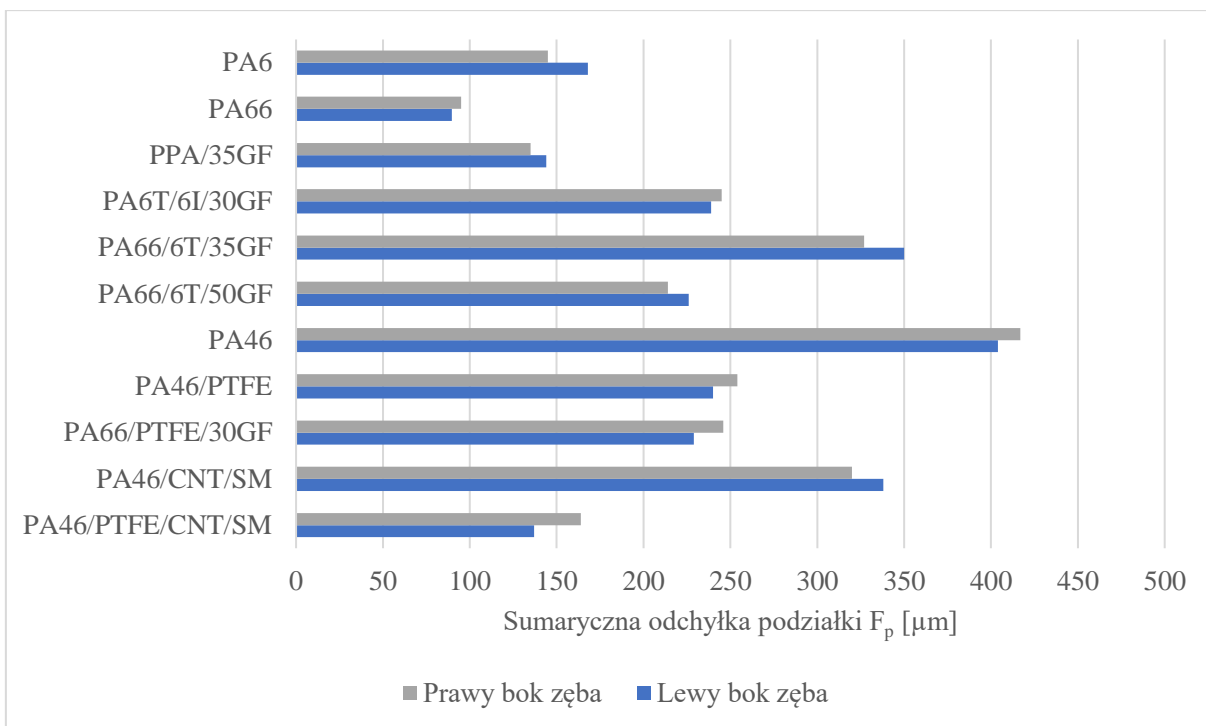
| Koło badawcze | Zarys zęba | | Linia zęba | | Podziałka | | Grubość i bicie F_r , R_s | Klasa koła |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------|
| | Lewy | Prawy | Lewa | Prawa | Lewa | Prawa | | |
| PA6 | >> | >> | 10 | 10 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\beta}$, F_β | $f_{H\beta}$, F_β | All | all | | |
| PA66 | >> | >> | 11 | 11 | 11 | 12 | 10 | >> |
| | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\alpha}$, F_α | all | all | f_{pmax} , f_{umax} | f_{umax} | | |
| PPA/35GF | 12 | 12 | 12 | >> | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | ffB | $f_{f\beta}$ | f_{pmax} , F_p | all | | |
| PA6T/6I/30GF | 12 | 12 | >> | 12 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | $f_{f\beta}$ | all | f_{pmax} , f_{umax} , F_p | f_{pmax} , f_{umax} , F_p | | |
| PA66/6T/35GF | 10 | 12 | >> | 12 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | $f_{f\beta}$ | $f_{H\beta}$ | All | all | | |
| PA66/6T/50GF | 12 | 12 | >> | 12 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\alpha}$ | $f_{H\beta}$ | $f_{H\beta}$ | All | all | | |
| PA46 | >> | >> | 10 | 11 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\beta}$, F_β | $f_{H\beta}$, F_β | f_{pmax} , f_{umax} , F_p | f_{pmax} , f_{umax} , F_p | | |
| PA46/PTFE | >> | >> | 10 | 9 | 12 | 12 | 11 | >> |
| | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\beta}$, F_β | all | f_{umax} | f_{umax} | | |
| PA66/PTFE/30GF | 10 | 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\alpha}$, ff_α | $f_{H\beta}$, $f_{f\beta}$ | F_β , $f_{f\beta}$ | All | all | | |
| PA46/CNT/SM | >> | >> | 9 | 11 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{f\beta}$ | $f_{H\beta}$ | f_{pmax} | f_{pmax} | | |
| PA46/PTFE/CNT/SM | >> | >> | 9 | 9 | 12 | 12 | 12 | >> |
| | $f_{H\alpha}$, F_α | $f_{H\alpha}$, F_α | all | all | All | all | | |

Na końcową klasę dokładności koła zębatego mają wpływ wyniki klas dokładności parametrów składowych geometrii kół zębatach jak zarys zęba, linia zęba, podziałka oraz grubość zęba. Najmniej dokładny parametr uzębienia definiuje klasę dokładności koła

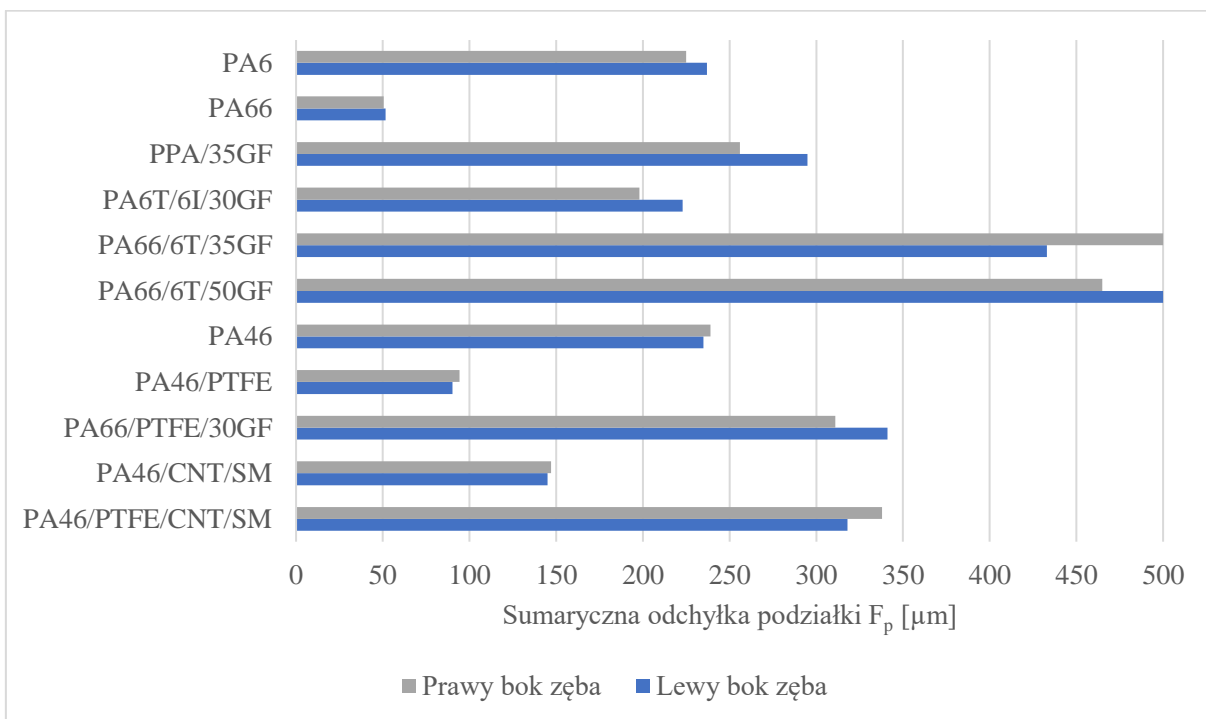
zębatego. Z przeprowadzonej analizy wyników stwierdzono, że spośród KZ25 najwyższą klasę dokładności uzyskały koła PPA/35GF i PA6T/6I/30GF (tab. 21), których linie zęba miały 11 klasę dokładności, a na ostateczną 12 klasę dokładności wpływały wyższe wartości parametrów zarysu i podziałki uzębienia. Pomiarów pozostałych mierzonych kół zębatach KZ25 znalazły się poza 12 skalą klasyfikacji. Należy podkreślić, że koła zębata KZ25 wykonane z materiałów PA6 i PA66 uzyskiwały wartości parametrów zarysu i linii zęba dla obu stron zęba poza 12 klasą dokładności. W przypadku KZ17, jedynym materiałem, który uzyskał klasę 12 był PA66/PTFE/30GF, natomiast pozostałe koła zębata znalazły się poza klasyfikacją. W przypadku koła zębatego z materiału PA46/PTFE, mimo że charakteryzowało się 10 klasą dokładności linii zęba ostatecznie znalazło się poza klasyfikacją z powodu niskiej dokładności zarysu zęba.

Ocenie podlegała także topografia zębów kół badawczych, którą określono na podstawie pomiaru 9 zarysów równomiernie rozmieszczonych na odpowiednim odcinku oceny zarysu (odcinku L_α definiowanym wg normy) i 7 liniach zęba umiejscowionych na odpowiednim odcinku oceny linii zęba (odcinku L_α definiowanym wg normy). Przykładową topografię jednego zęba koła KZ25 i KZ17 z materiału PA66/PTFE/30GF przedstawiano na rys. 78 i 81. Każdy zestaw mierzonych kół z określonego materiału charakteryzował się specyficzną geometrią topografii. Najczęściej topografia uwidaczniała odchylenia kąta zarysu zęba. W przypadku materiału PA66/PTFE/30GF kąt zarysu wybranego zęba zmniejszał się, a jego wierzchołek się rozszerzał (rys. 78 i 81). Na topografiach zębów większości kół zębatach pojawiały się niewielkie wklęsłości.

Analiza parametrów dotyczących: podziałki kół, bicia promieniowego oraz grubości zębów uszeregowala koła w 12 klasie dokładności lub poza jej skalą. Wykres prezentowany na rys. 83 przedstawia średnią wartość sumarycznych odchyłek podziałek F_p dla kół KZ25 zarówno dla prawej i lewej strony zęba. Wahania podziałki, czyli różnice pomiędzy największą i najmniejszą grubością zębów pokazują, że najmniejsze odchyłki wynoszące poniżej 100 μm , ma koło wykonane w materiale PA66. Największą wartość F_p w przypadku KZ25, uzyskały koła z materiału PA46. W przypadku KZ17 (rys. 84) najmniejsze sumaryczne odchyłki podziałki F_p uzyskał materiał PA66 (ok. 50 μm), zaś największe PA66/6T/35GF i PA66/6T/50GF (ok. 500 μm).



Rys. 83. Zestawienie średniej wartości sumarycznych odchyłek podziałek F_p dla KZ25



Rys. 84. Zestawienie średniej wartości sumarycznych odchyłek podziałek F_p dla KZ17

Najczęściej spotykana klasa dokładności polimerowych kół zębatych, otrzymywanych w regularnej produkcji formowania wtryskowego mieści się w między 10 a 12 klasą wg normy ISO 1328 [62, 63]. Jak opisano w podrozdziale I.3.2.1 przyczyną takiego stanu jest nierównomierny skurcz przetwórczy w obrębie geometrii koła zębatego. Pozycja literaturowa

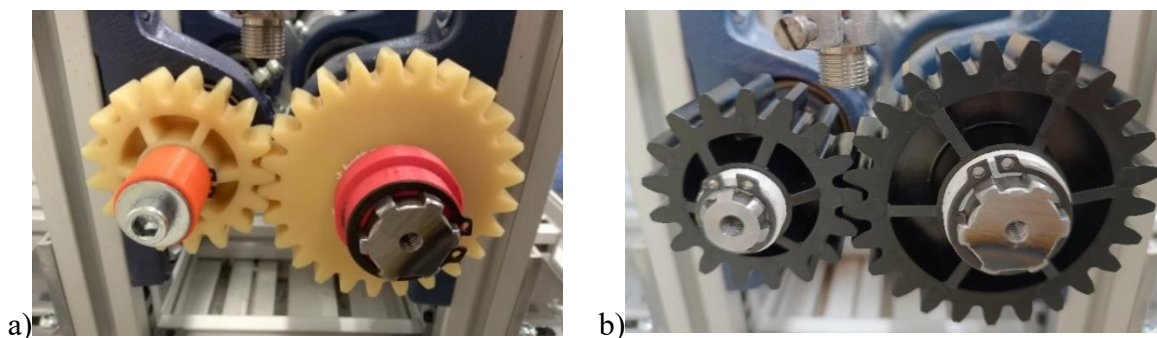
[168] wskazuje na to, że wartość skurczu tworzywa przy wierzchołku jest mniejsza niż w stopie zęba. Taką zależność obserwowano dla większości badanych kół zębatych zawierających włókniste wzmocnienie. Prawdopodobną przyczyną był nierównomierny skurcz przetwórczy wynikający z orientacji włókien szklanych na wierzchołku zęba, co było widoczne także w analizie AMI (podrozdział III.6, rys. 49). Przypuszcza się, że przeprowadzenie ponownych pomiarów geometrii przy założeniu skorygowanej wartości kąta zarysu, mogłoby przełożyć się na uzyskanie wyższej klasy dokładności wtryskiwanych kół zębatych. Źródłem takiego rozumowania jest to, że najniższe wartości klasy dokładności uzyskano dla zarysów zębów, natomiast mierzone podziałki i linie zęba miały względnie ustabilizowane wyniki osiągające nawet 9 klasę dokładności (np. prawa linia zęba PA46/PTFE).

Na obniżenie jakości dokładności badanych kół zębatych wpływa także fakt, że ich wtrysk został wykonany przy pomocy tych samych gniazd formujących skorygowanych o skurcz względem założonego pierwotnego tworzywa Zytel HTN92G45DH2 BK083.

III.11. Analiza badań trwałościowych przekładni zębatych

Badania trwałościowe układu dwóch kół zębatych wykonanych z materiałów polimerowych, przeprowadzono na układzie badawczym przedstawionym na rys. 36. Badaniom poddano kilkadziesiąt par kół zębatych otrzymanych w technologii formowania wtryskowego. Program cykli badawczych został opracowany doświadczalnie zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale II.14. Przed rozpoczęciem badań ustawiono rozstaw osi, zwracając uwagę na zwiększoną rozszerzalność tworzyw sztucznych w wysokich temperaturach. Przy pomocy szczelinomierza przed każdym testem kontrolowano luz międzyzębny, tak żeby przed rozpoczęciem badania wynosił 0,25 mm.

Głównym celem badań było porównanie trwałości przekładni, a w toku testów zweryfikowano także wpływ skurczu przetwórczego materiałów. Jego oddziaływanie na trwałość przekładni oceniono poprzez dwa odmienne sposoby ułożenia, względem siebie kół zębatych w przekładni, co ukazuje rys. 85. Na rys. 85 a przedstawiono, ułożenie pary kół zębatych, gdzie ich żebra są skierowane w przeciwną stronę (wariant 1), natomiast na rys. 85 b dla obu kół żebra są skierowane w tą samą stronę (wariant 2).



Rys. 85. Widok ułożenia kół zębatych względem siebie: a) zębra są skierowane w przeciwną stronę (wariant 1); b) zębra są skierowane w tą samą stronę (wariant 2)

W każdej z przeprowadzonych serii badawczych, miernikiem wytrzymałości badanej pary kół zębatych, był wzrost temperatury, ciśnienia akustycznego i czas mierzony do zakończenia ustalonych cykli badawczych lub awarii przekładni zębatej. Przeprowadzone testy pozwoliły na porównanie właściwości wytrzymałości trwałościowej materiałów wytypowanych do badań. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na przyśpieszenie procesu dopracowania innowacyjnych kompozycji polimerowych kół zębatych.

III.11.1. Określenie warunków brzegowych dla przekładni zębatych wykonanych z niemodyfikowanych materiałów PA6 i PA66 oraz badania wytrzymałości trwałościowej dla pozostałych wytypowanych tworzyw

W pierwszym etapie skupiono się na przetestowaniu przekładni zębatych pod kątem zmiennych prędkości oraz momentów obrotowych. Badania rozpoczęto od układów kół zębatych wykonanych z niemodyfikowanych materiałów polimerowych. Z pozycji dostępnych na rynku, wytypowano tworzywa niemodyfikowane PA6 oraz PA66. Na podstawie analizy danych materiałowych i literaturowych prognozowano, że będą charakteryzować się najniższą trwałością. Test wykonywano przy stałej prędkości i zmiennym momencie obrotowym w przedstawionych poniżej czasookresach zgodnych z tab. 23. W kolejnych testach parametry zwiększano stopniowo, aż do zniszczenia obu przekładni wykonanych z PA6 i PA66. Testy wykonywano w celu określenia parametrów granicznych dla kół zębatych z materiałów PA6 i PA66, stanowiących odniesienie do trwałościowych badań porównawczych przekładni otrzymanych z modyfikowanych polimerów.

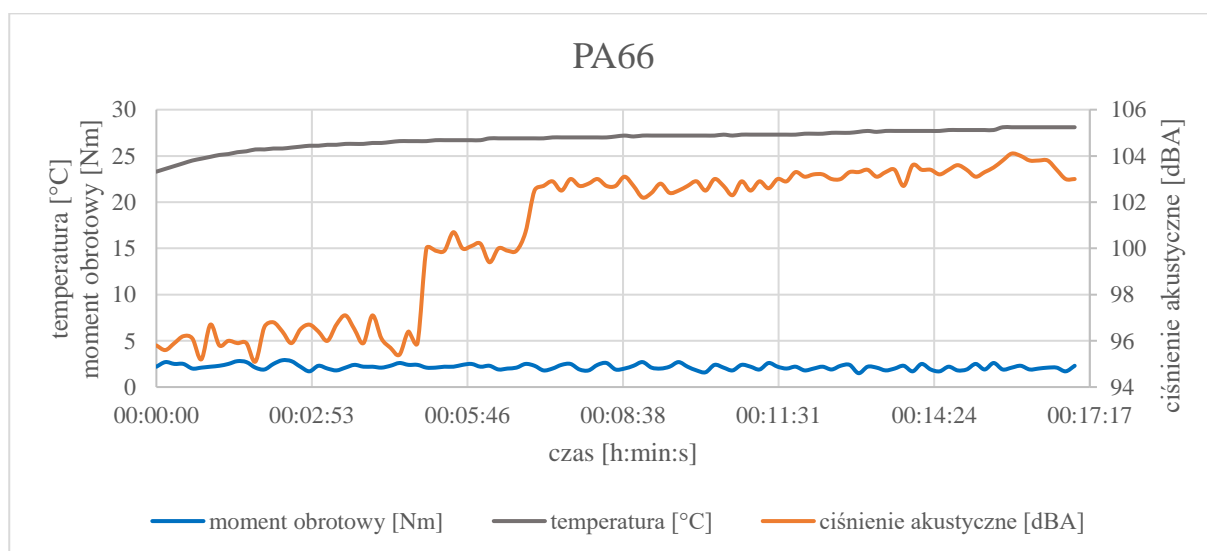
Układ dwóch kół zębatych przekładni ułożono zgodnie z wariantem 1 i rys. 85 a. Program badań został ustalony w oparciu o wcześniejsze próby doświadczalne. W tab. 23 przedstawiono

warunki testu, składającego się z czterech cykli przekładni. W początkowym etapie badań wykonano pierwsze badania dla pary kół zębatach wykonanych z materiału PA66.

Tab. 23. Parametry przekładni

| Parametr | cykl I | cykl II | cykl III | cykl IV |
|-----------------------------|--------|---------|----------|---------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 600 | 600 | 600 | 600 |
| moment obrotowy, Nm | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 4,0 |
| czas, min | 25 | 10 | 10 | 10 |

Jak przedstawiono na rys. 86, w trakcie testu obserwowano niewielki wzrost temperatury z 23 °C do 38,2 °C. Zauważono, że na zębach powstały nieznaczne ślady zużycia dogładzającego. Objawiało się ono lokalnym zmniejszeniem chropowatości i powstaniem lustrzanej powierzchni bocznej zębów KZ25 i KZ17 (rys. 87).



Rys. 86. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA66 o parametrach przedstawionych w tab. 21



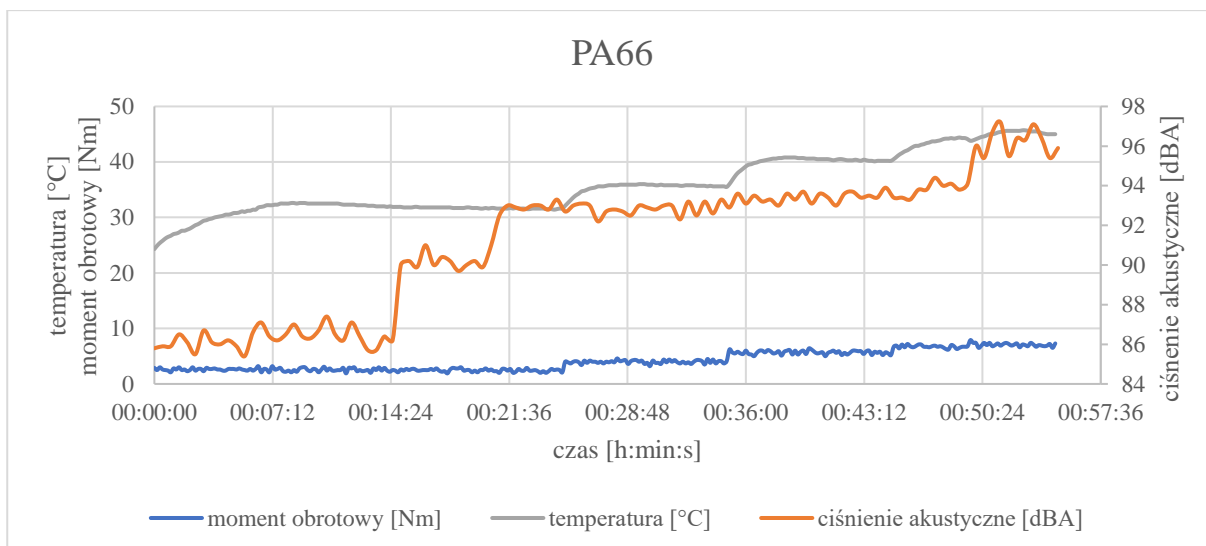
Rys. 87. Widok pary kół zębatych po teście trwałościowym, zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 23

Zdecydowano się na zwiększenie momentu obrotowego, aż do ustalenia warunków brzegowych, oznaczających zużycie przekładni z tego materiału. W tab. 24, zostały przedstawione kolejne wejściowe parametry testu.

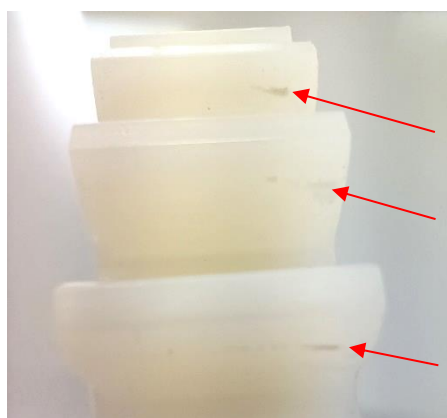
Tab. 24. Parametry przekładni

| Parametr | cykl I | cykl II | cykl III | cykl IV |
|-----------------------------|--------|---------|----------|---------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 600 | 600 | 600 | 600 |
| moment obrotowy, Nm | 2,0 | 4,0 | 6,0 | 7,0 |
| czas, min | 25 | 10 | 10 | 10 |

Zwiększenie momentów obrotowych spowodowało końcowy wzrost temperatury styku kół zębatych do 45,7 °C (rys. 88). W trakcie cyklu IV, między 50 a 53 min testu, zaobserwowano wzrost ciśnienia akustycznego do ok. 96,5 dBA. Temperatura w obszarze styku kół zębatych wynosiła ok. 44 °C. Po zakończeniu testu stwierdzono nieznaczne uszkodzenia na bocznej powierzchni zęba KZ25, zlokalizowane w obrębie głowy zębów, powyżej okręgu tocznego (rys. 89).



Rys. 88. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA66 o parametrach przedstawionych w tab. 24



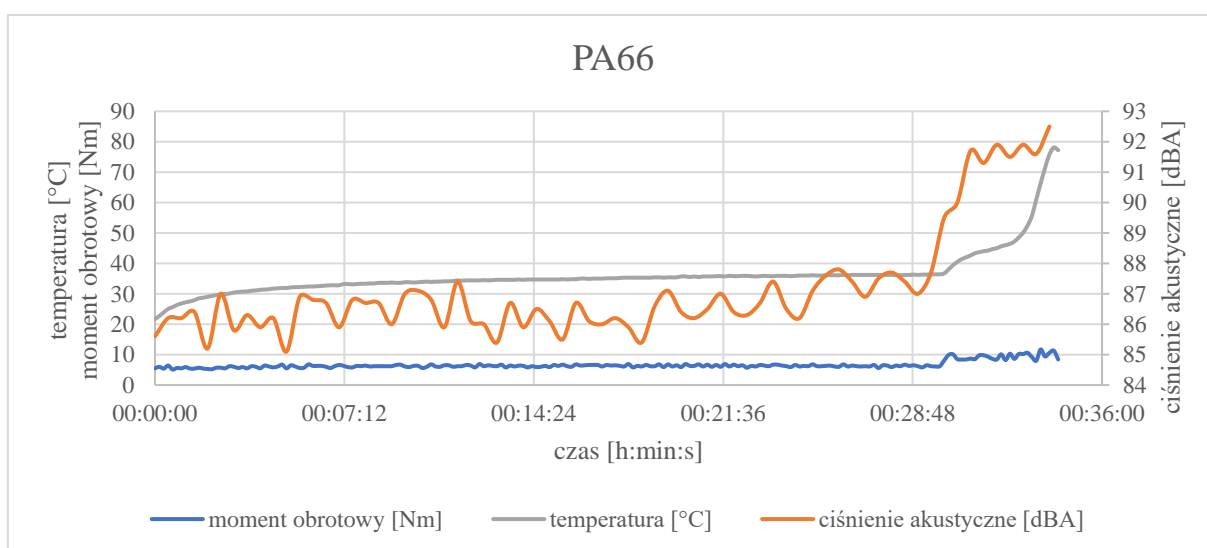
Rys. 89. Widok uszkodzonej powierzchni bocznej zęba KZ25 (PA66) po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 24

W kolejnym etapie badań przekładni PA66 zmodyfikowano stanowisko badawcze poprzez zamontowanie dodatkowego profilu usztywniającego ramę przekładni pasowej i zębatej. Przyczyniło się to do zmniejszenia natężenia drgań, mających negatywny wpływ na przekładnię. Zamontowano parę kół zębatach z materiału PA66 o parametrach zgodnych z tab. 25.

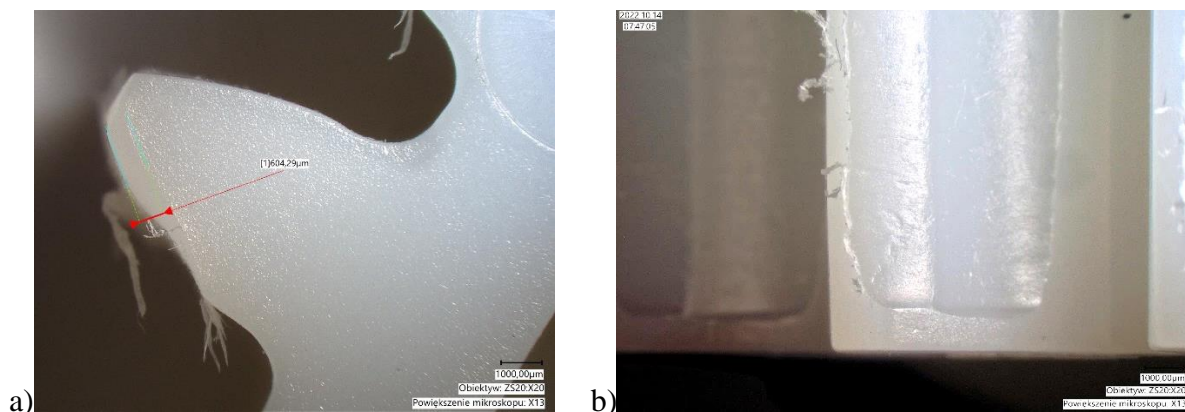
Tab. 25. Parametry przekładni

| Parametr | cykl I | cykl II | cykl III |
|-----------------------------|--------|---------|----------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 500 | 750 | 950 |
| moment obrotowy, Nm | 5,0 | 9,0 | 12,0 |
| czas, min | 30 | 10 | 2 |

Jak pokazano na rys. 90, w pierwszym etapie cyklu przy prędkości 500 obr./min oraz momencie obrotowym 5 Nm, założono czas 30 min przeznaczony na docieranie pary kół zębatych. Na tym etapie temperatura układu wzrosła od początkowej 20,9 °C do 33,5 °C, natomiast ciśnienie akustyczne utrzymywano się na stałym poziomie 85 – 87 dBA. W drugim etapie zwiększono prędkość układu do 750 obr./min, a moment obrotowy do 9 Nm. Zmiana spowodowała gwałtowny wzrost temperatury do ok. 78 °C. Spowodowało to uszkodzenie powierzchni bocznej zębów. Bezpośrednim objawem zużycia przekładni była zmiana charakterystycznego dźwięku wytwarzanego w trakcie pracy zębatego układu napędowego. Po awaryjnym zatrzymaniu stanowiska, zauważono warstwę stopionego materiału na powierzchni bocznej zębów oraz wyraźne uszkodzenia zębów. Na rys. 91 przedstawiono widok zniszczeń obserwowanych przy pomocy mikroskopu cyfrowego. Zauważono zmianę zarysu zębów na skutek wytarcia się materiału PA6 o ok. 0,6 mm w okolicy głowy zęba oraz występowania w tym rejonie zużycia ściernego. Zmiany zarysu zęba pogorszyły warunki współpracy i zwiększyły luz międzyzębny, co doprowadziło do wzrostu obciążeń dynamicznych i jeszcze szybszego zużycia przekładni PA66.



Rys. 90. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA66 o parametrach przedstawionych w tab. 25



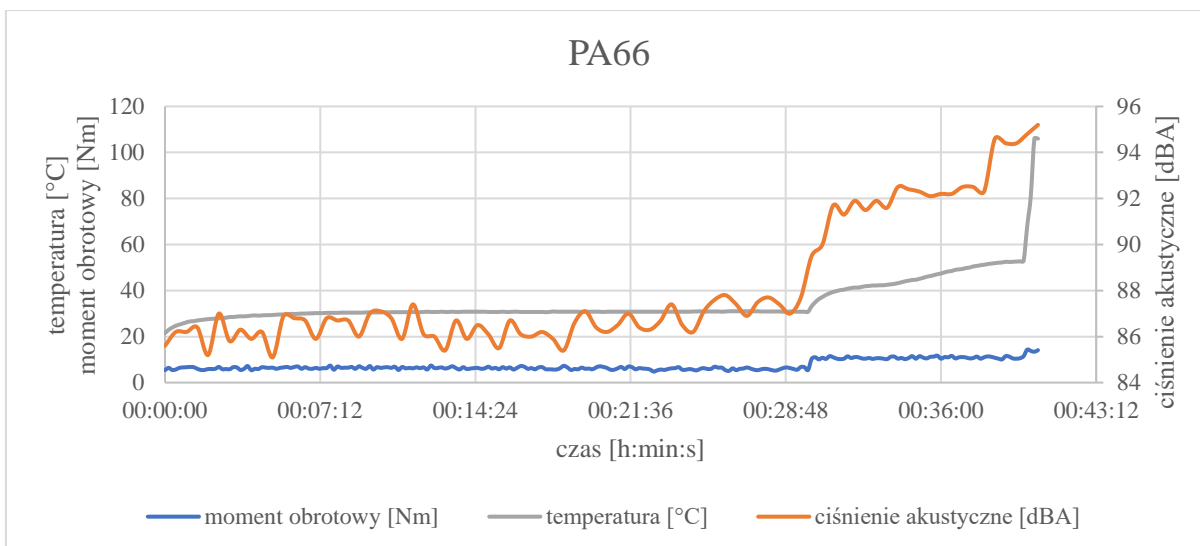
Rys. 91. Uszkodzona powierzchnia boczna zębów po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25: a) KZ25 (PA66); b) KZ17 (PA66)

W kolejnym teście przekładni PA66 przy zmiennej prędkości i zmiennym momencie obrotowym (tab. 26), osiągnięto parametry badania, które doprowadziły do całkowitego zniszczenia kół zębatach (rys. 93).

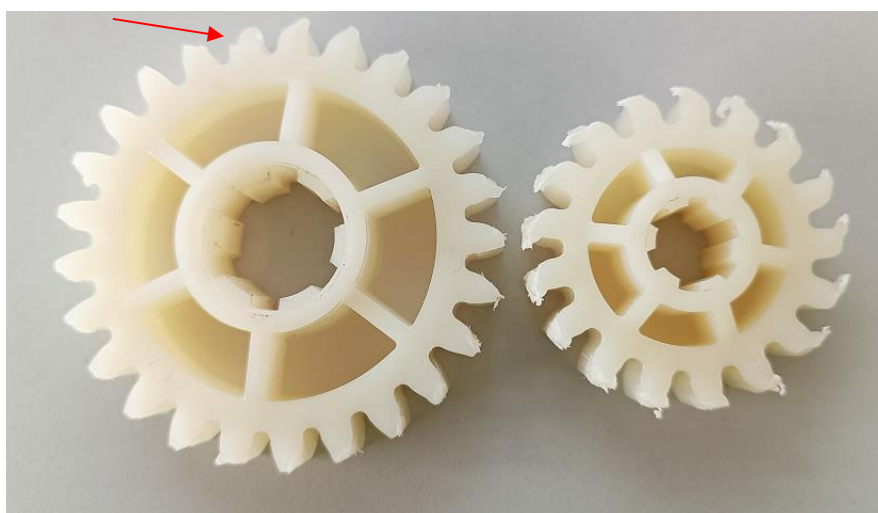
Tab. 26. Parametry przekładni

| Parametr | cykl I | cykl II | cykl III |
|-----------------------------|--------|---------|----------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 500 | 750 | 950 |
| moment obrotowy, Nm | 6,0 | 11,0 | 14,0 |
| czas, min | 30 | 10 | 10 |

Na rys. 92, w pierwszym etapie cyklu przy parametrach równych prędkości 500 obr./min oraz momencie obrotowym 6 Nm, założono dłuższy czas 30min przeznaczony na docieranie pary kół zębatach. Na tym etapie temperatura układu wzrosła od początkowej 21,5 °C do 30,8 °C. W kolejnym etapie zwiększono prędkość układu do 750 obr./min, a moment obrotowy do 11 Nm. Zmiana spowodowała wzrost temperatury do 52,9 °C. W trzecim etapie założono prędkość równą 950 obr./min i 14 Nm. Te warunki spowodowały gwałtowny wzrost temperatury w ciągu pierwszej minuty etapu – wyniosła ona 106 °C. Zaobserwowano deformacje plastyczne zębów obu kół zębatach. Widoczne było także złamanie dwóch zębów w kole napędzanym, które nastąpiło na skutek działania siły przekraczającej wytrzymałość doraźną zastosowanego materiału PA66 (rys. 93). Układ został zatrzymany awaryjnie.

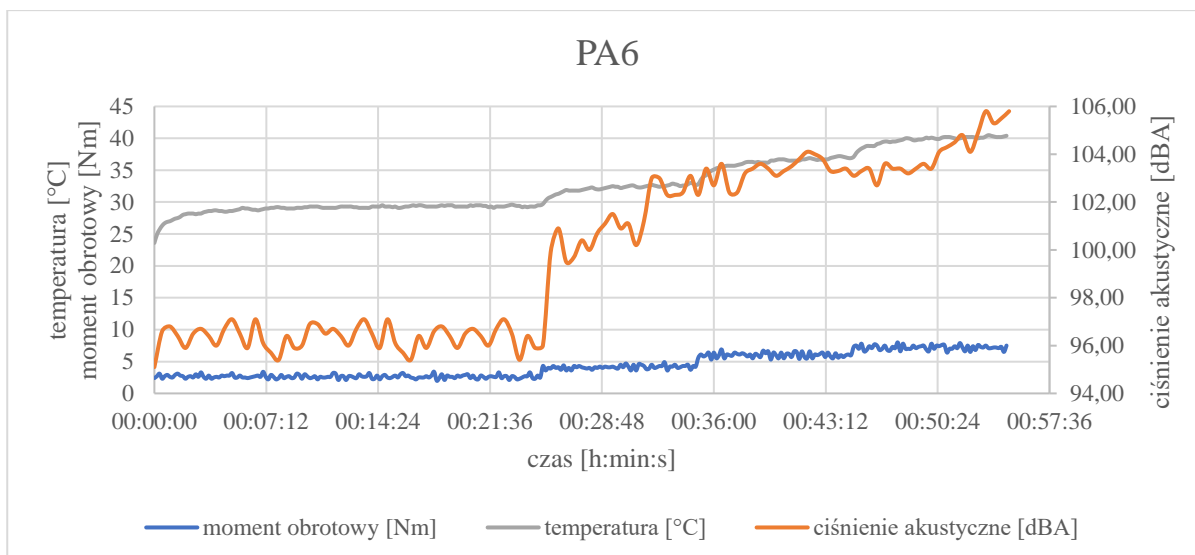


Rys. 92. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA66 o parametrach przedstawionych w tab. 26

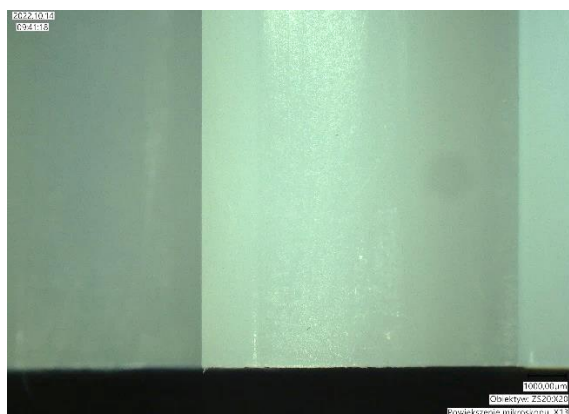


Rys. 93. Uszkodzenia na zębach KZ25 i KZ17 (PA66), po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 26. Strzałką oznaczono wyłamane zęby w KZ25

Drugim z niemodyfikowanych materiałów był PA6. Układ badano w warunkach zgodnych z tab. 23. Jak przedstawiono na rys. 94, ustalone początkowe warunki badań, spowodowały nieznaczny wzrost temperatury w punkcie styku kół zębatych z 23,6 °C do 44,4 °C. Nie stwierdzono uszkodzeń na powierzchni zęba (rys. 95). Ciśnienie akustyczne wzrastało wraz z wielkością rejestrowanego momentu obrotowego (rys. 94).



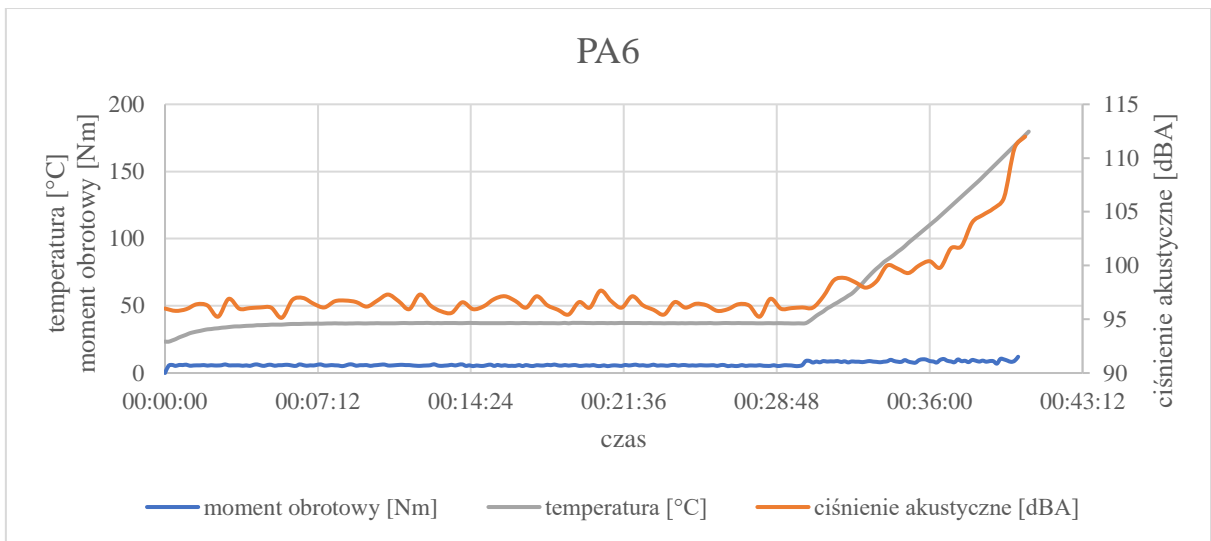
Rys. 94. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA6 o parametrach przedstawionych w tab. 23



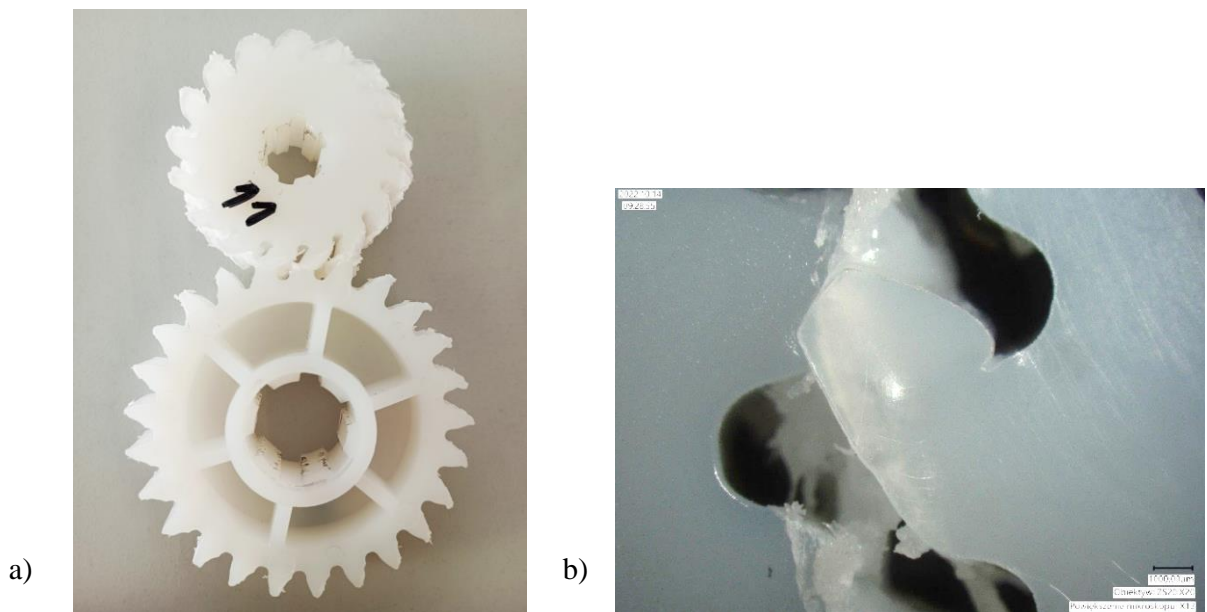
Rys. 95. Widok powierzchni bocznej zęba KZ25 po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 23

W kolejnym teście przekładni PA6 przy zmiennej prędkości i momencie obrotowym (tab. 25), osiągnięto parametry badania, które doprowadziły do całkowitego zniszczenia kół zębatych. Jak przedstawiono na rys. 96, w pierwszym etapie cyklu przy parametrach równych prędkości 500 obr./min oraz momencie obrotowym 6 Nm, założono czas równy 30 min przeznaczony na docieranie pary kół zębatych. Na tym etapie temperatura układu wzrosła od początkowej 23,4 °C do 40,5 °C. W kolejnym kroku zwiększenie momentu obrotowego do 9 Nm i prędkości do 750 obr./min, spowodowało gwałtowny wzrost temperatury aż do 179,7 °C. Podczas tego gwałtownego przyrostu temperatury, obserwowano deformację plastyczną całych zębów na KZ25 i KZ17 (rys. 97). Zauważono, że topienie się zębów nastąpiło

po przekroczeniu granicznego obciążenia, gdy temperatura zęba zbliżała się do temperatury mięknięcia wg Vicat'a. W tym przypadku, niskie przewodnictwo cieplne doprowadziło do sytuacji, że do zęba zostało dostarczone więcej ciepła, niż było z niego wydzielane. Doprowadziło to do drastycznego spadku wytrzymałości mechanicznej, poniżej zdolności przenoszenia mocy i przyspieszyło uszkodzenie zęba. Podczas trwania testu, bezpośrednim efektem zużycia przekładni była zmiana charakterystycznego dźwięku pracy reduktora. Test został zatrzymany awaryjnie z uwagi na ryzyko uszkodzenia stanowiska badawczego.



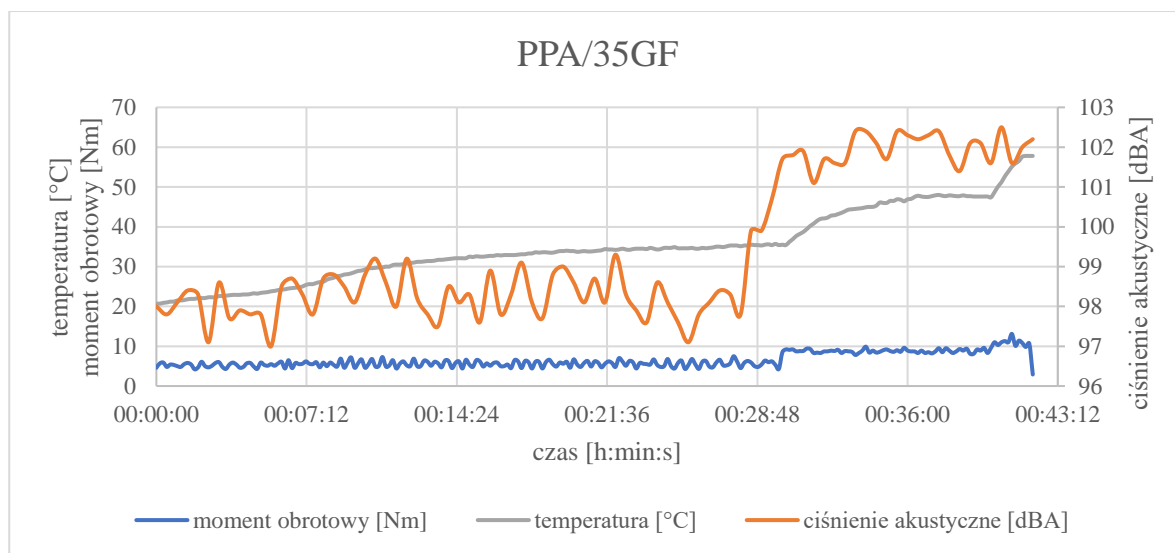
Rys. 96. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA6 o parametrach przedstawionych w tab. 25



Rys. 97. Zniszczone koła zębate PA6 po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25: a) stopione i zdeformowane wieńce zębate; b) zdeformowany ząb KZ17

Po ustaleniu warunków brzegowych w jakich dochodzi do powstania uszkodzeń i zniszczenia przekładni zębatych wykonanych z niemodyfikowanych poliamidów PA6 i PA66 będących odniesieniem do dalszych wytypowanych materiałów, podjęto się dalszych prac badawczych nad polimerami wzmocnionymi włóknem szklanym.

Pierwszym z testowanych poliamidów wzmocnionych włóknem szklanym był poliiftalamid stabilizowany termicznie i z dodatkiem środka smarnego, oznaczony jako PPA/35GF. Jego testy rozpoczęto od warunków opisanych w tab. 25. Jak przedstawiono na rys. 98, test rozpoczęto przy parametrach prędkości 500 obr./min oraz momencie obrotowym 5 Nm. Ten etap trwał 30 min, a w jego czasie obserwowano wzrost temperatury od początkowej 20,7 °C do 35,4 °C. Średni poziom ciśnienia akustycznego wynosił między 97 – 98 dBA. W kolejnym 10-minutowym etapie, zwiększono prędkość układu do 750 obr./min, a moment obrotowy do 9 Nm. Temperatura pracy na styku dwóch kół zębatych w tym etapie rosła liniowo, osiągając maksymalnie 47,8 °C. Zaobserwowano wzrost ciśnienia akustycznego do 102 dBA. Ostatni z etapów trwał 2 min, a jego pozostałe parametry wynosiły 950 obr./min i 2 Nm. Nie zaobserwowano zwiększenia poziomu rozchodzącej się fali akustycznej, natomiast temperatura wzrosła o kolejne 9 °C (do 56,8 °C). Po zakończeniu trzech pełnych cykli badania, nie stwierdzono oznak uszkodzeń bocznej powierzchni zębów w testowanej przekładni.

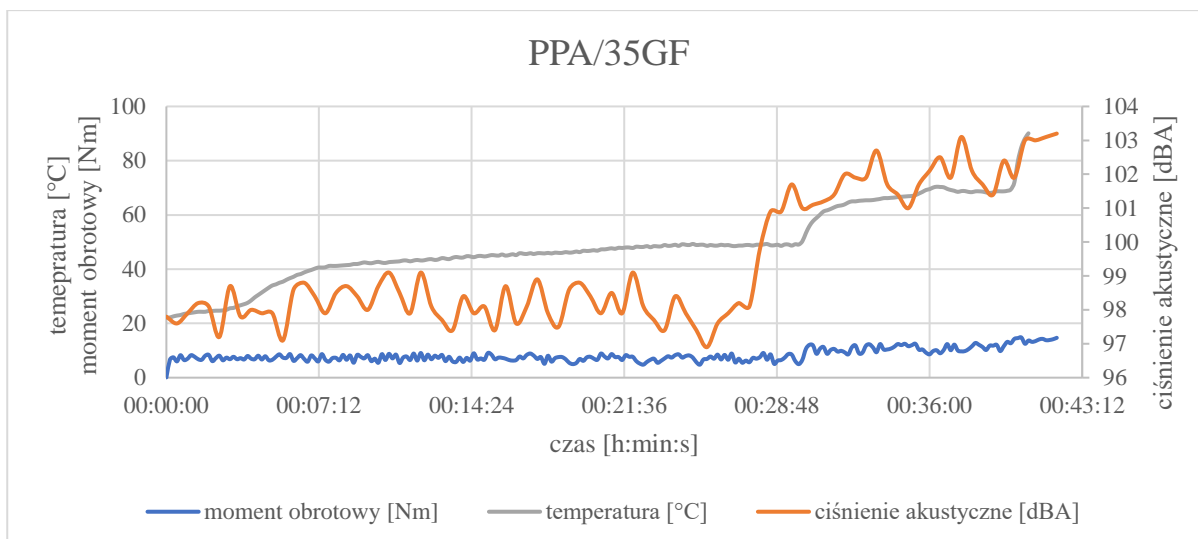


Rys. 98. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PPA/35GF o parametrach przedstawionych w tab. 25

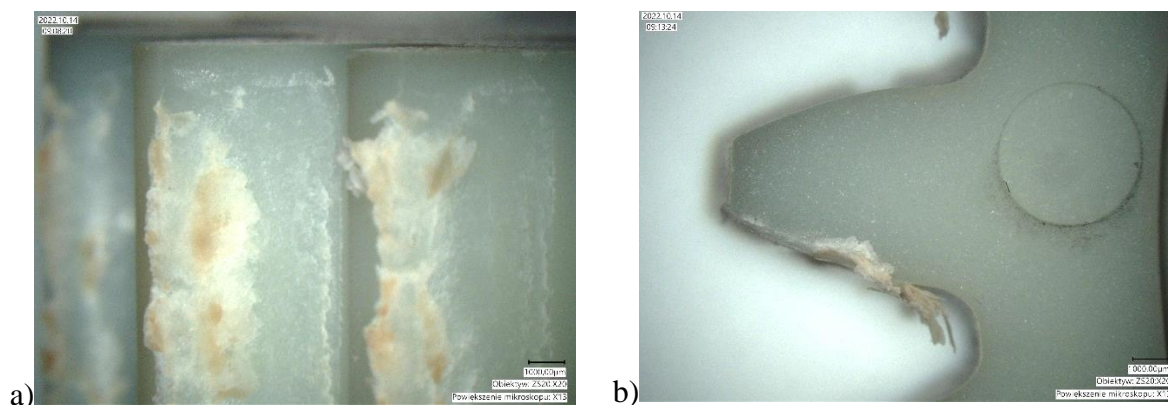
Zdecydowano się na dalsze zwiększenie momentów obrotowych dla materiału PPA/35GF. Test wykonywano zgodnie z parametrami w tab. 27. Jak przedstawiono na rys. 99, pierwszy etap trwający 30 min, o prędkości równej 500 obr./min i momencie obrotowym 7 Nm, cechował się średnim ciśnieniem akustycznym na poziomie 97 – 99 dBA i temperaturą układu od 22,1 °C do 49,1 °C. W kolejnym etapie zmiana parametrów nastawczych, spowodowała wzrost temperatury do 69,4 °C i ciśnienia akustycznego do 103 dBA. W trzecim etapie założono prędkość równą 950 obr./min i 14 Nm. Te warunki spowodowały kolejny gwałtowny wzrost temperatury do 90,1 °C. W ostatnim etapie testu zauważono znaczny przyrost natężenia dźwięku do ok. 105 dBA. Wartości te sugerowały nieprawidłowe działanie przekładni, co potwierdzono po zakończeniu testu. Obserwowano liczne uszkodzenia zębów, powstałe na skutek tarcia i kumulowanego ciepła. Temperatura przyczyniła się do zużycia ściernego oraz wzrostu lepkości współpracujących zębów. Skutkiem tego było odrywanie się fragmentów materiału ze współpracującej powierzchni kół zębatych. W wyniku gromadzenia się nadmiernej ilości ciepła w zębach, spowodowanego występowaniem zbyt dużej wartości siły tarcia, doszło do przypaleń ich pracującej powierzchni. Największe uszkodzenia były zlokalizowane w obrębie głów zębów (rys. 100).

Tab. 27. Parametry przekładni

| Parametr | cykl I | cykl II | cykl III |
|-----------------------------|--------|---------|----------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 500 | 750 | 950 |
| moment obrotowy, Nm | 7,0 | 10,0 | 14,0 |
| czas, min | 30 | 10 | 2 |



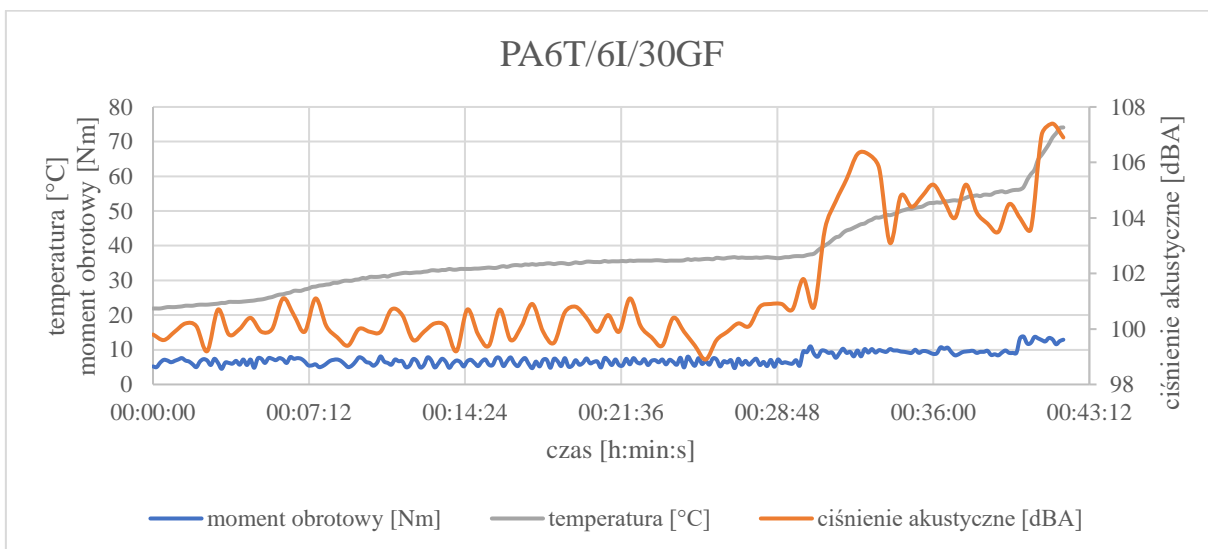
Rys. 99. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PPA/35GF o parametrach przedstawionych w tab. 27



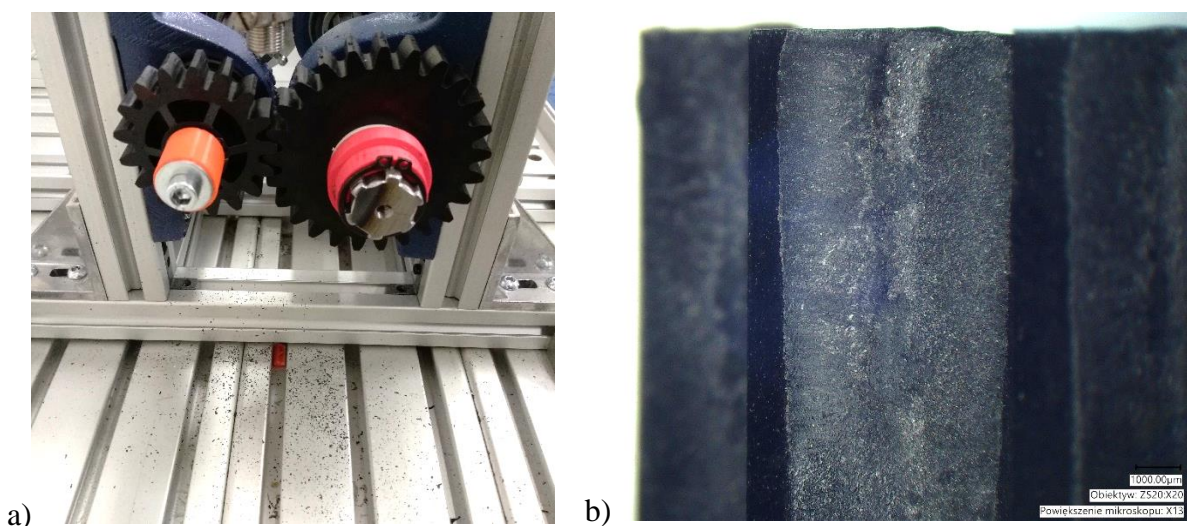
Rys. 100. Uszkodzenia kół zębatych PPA/35GF występujące po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 27: a) boczna powierzchnia zęba – zatarcia i przypalenia; b) zarys zęba – zużycie ściernie

Następnymi ze sprawdzanych poliamidów wzmacnianych włóknem szklanym były PA6/30GF oraz PA/6T/6I/30GF. Ich testy rozpoczęto od warunków opisanych w tab. 25. Wyniki testów dla obu tych materiałów okazały się bardzo podobne, dlatego też zdecydowano się na przedstawienie przebiegu badań dla PA/6T/6I/30GF (rys. 101). Pierwszy z etapów charakteryzował się ciśnieniem akustycznym w zakresie 99 – 100 dBA. Temperatura w ciągu 30 min wzrosła o ok. 15 °C od początkowej równej 22,1 °C. W kolejnym etapie zmiana nastawczych parametrów spowodowała wzrost temperatury do 56,1 °C i ciśnienia akustycznego do ok. 104 dBA. W trzecim etapie założono prędkość równą 950 obr./min i momentu hamującego ok. 12 Nm. Zaobserwowano gwałtowny wzrost temperatury wynoszący ok. 4,5 °C / 30s. W momencie zakończenia testu temperatura wynosiła 107,0 °C,

a ciśnienie akustyczne 107 dBA. Podczas pracy przekładni obserwowano liczne odpryski materiału pochodzącego z roboczej powierzchni zębów, co widać na rys. 102 a. Po zakończeniu testów, na zębach widoczne były pionowe rysy, zgodne z kierunkiem występującego poślizgu przekładni, a także ubytki materiału położone powyżej średnicy tocznej (rys. 102 b). Wyrwany materiał w postaci drobnych, twardych cząstek, spowodował wzrost chropowatości i zwiększenie wpływu sił ścierających, co przyspieszyło zużycie przekładni.

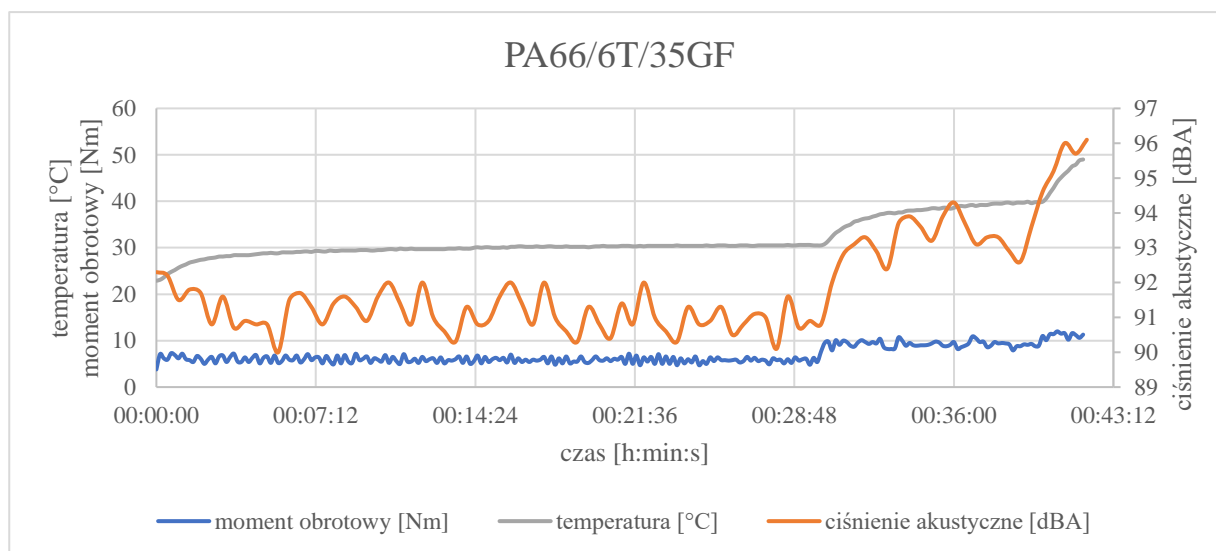


Rys. 101. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA/6T/6I/30GF o parametrach przedstawionych w tab. 25



Rys. 102. Przekładnia wykonana z PA6T/6I/30GF po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25: a) widok ilości odłamków kruszącego się tworzywa; b) zarys zęba po teście trwałościowym

Kolejne testy wykonano na parach kół zębatych otrzymanych z materiału PA66/6T/GF35 wzmocnianego włóknem szklanym w ilości 35 % wag. Parametry układu zaprogramowano zgodnie z tab. 25. Jak przedstawiono na rys. 103, w przypadku tworzywa PA66/6T/35GF, w pierwszym etapie cyklu temperatura układu wzrosła od początkowej 22,9 °C do 30,5 °C, a ciśnienie akustyczne mieściło się w zakresie 90-91 dBA. W drugim etapie zwiększono prędkość układu do 750 obr./min, a moment hamujący do 9 Nm. Zmiana spowodowała wzrost temperatury do 39,9 °C. Trzeci dwuminutowy etap prowadzono przy parametrach 950 obr./min oraz 12 Nm. Temperatura badania wzrosła maksymalnie do 49,0 °C, a wytwarzane ciśnienie akustyczne do 96 dBA. Po zakończeniu testu zaobserwowano nieznaczne objawy występowania zużycia o charakterze pittingu, występującego lokalnie w okolicy średnicy tocznej obu kół zębatych (rys. 104). Ubytki te były zdecydowanie mniejsze niż w przypadku badanych PA6/30GF oraz PA/6T/6I/30GF (rys. 102).

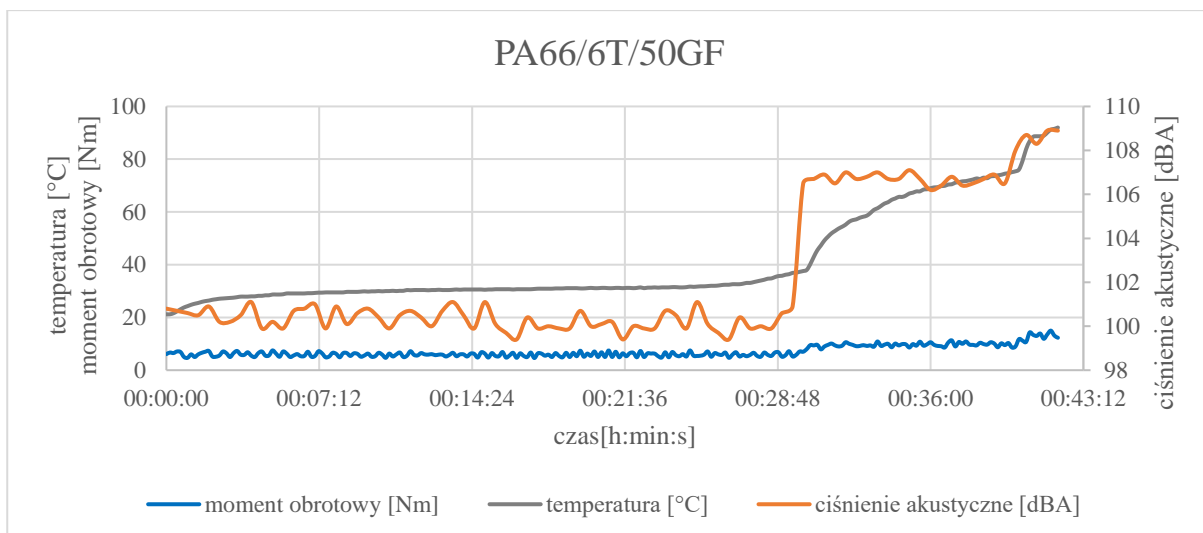


Rys. 103. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA66/6T/35GF o parametrach przedstawionych w tab. 25

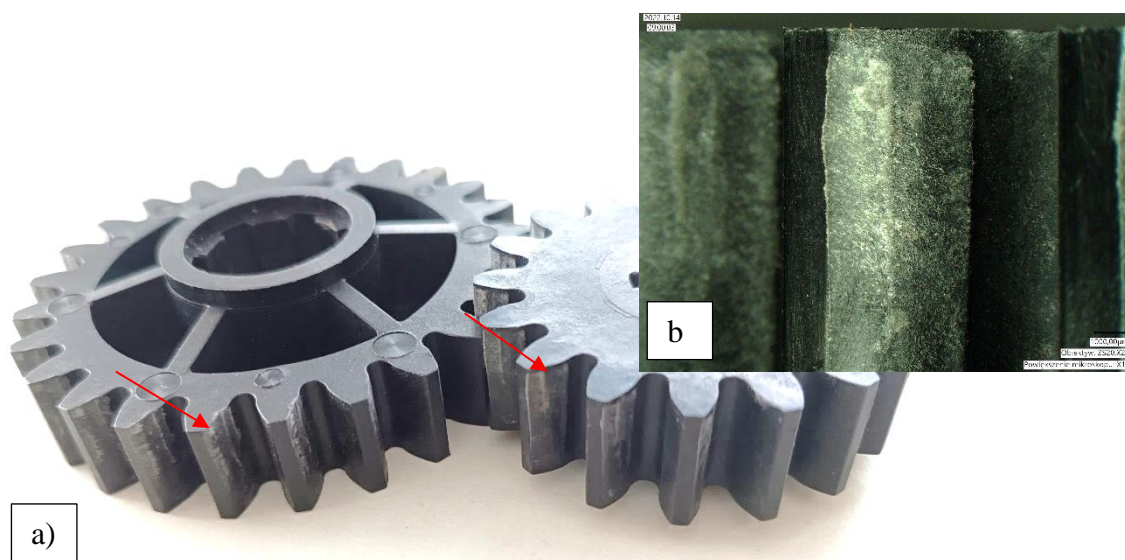


Rys. 104. Uszkodzenia kół zębatych PA66/6T/35GF występujące po teście trwałościowych zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25

W celu porównania wpływu zwiększonej ilości włókna na wyniki testu, do badań zestawiono parę kół zębatych zawierających 50 % wag. tego wypełniacza - PA66/6T/50GF, pracujących w warunkach zgodnych z tab. 25. Jak przedstawiono dla rys. 105, dla tworzywa PA66/6T/50GF w pierwszym etapie cyklu temperatura układu wzrosła od początkowej 21,2 °C do 37,0 °C, a ciśnienie akustyczne wynosiło ok. 100 dBA. Przejście do drugiego cyklu spowodowało wzrost temperatury do 75,4 °C i ciśnienia akustycznego do 106 dBA. Ostatni krótki etap o prędkości 950 obr./min oraz momencie hamującym 12 Nm przełożył się na dalszy wzrost temperatury do 92,0 °C i ciśnienia akustycznego do 108 dBA. W porównaniu z badanym wcześniej PA66/6T/35GF, który różni się tylko niższą zawartością włókna szklanego, w przekładni wykonanej z PA66/6T/50GF, w każdym z etapów cyklu odnotowano wyższe parametry temperatury i ciśnienia akustycznego. Po zakończeniu testu na kole zębatym KZ25 zauważono na powierzchni bocznej zęba nacięcia spowodowane naciskami stykowymi. Widoczne były także zarysowania mające postać równoległych rys w obszarze przyporu zębów, biegnące w kierunku zgodnym z wektorem poślizgu międzyzębnego (rys. 106 a). Obserwowano nieznaczne ilości ubytku materiału w postaci odprysków. Zauważono także objawy zużycia ściernego roboczej powierzchni zębów (rys. 106 b).



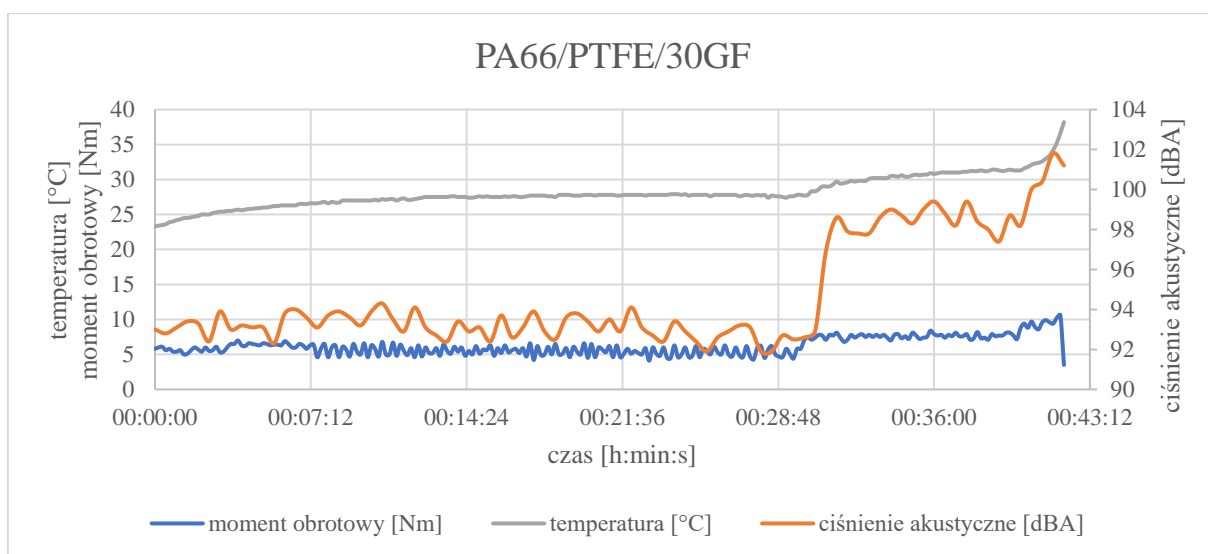
Rys. 105. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA66/6T/50GF o parametrach przedstawionych w tab. 25



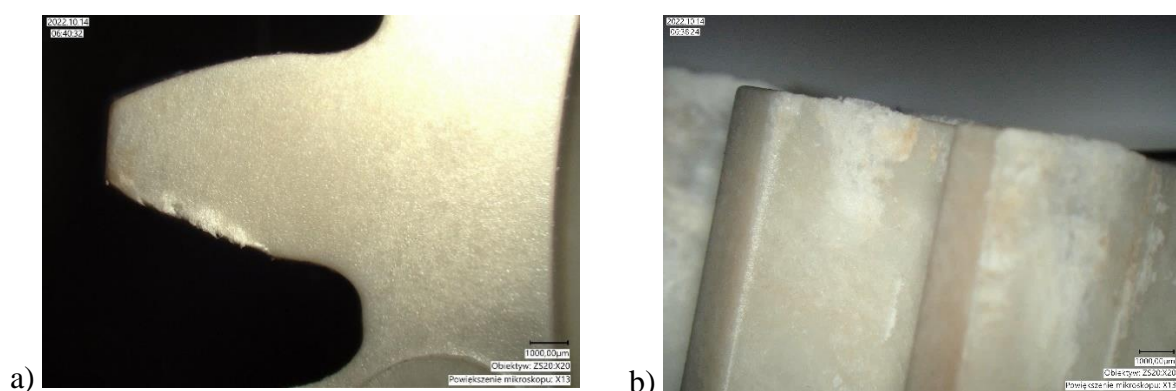
Rys. 106. Przekładnia wykonana z PA/6T/6I/50GF po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25: a) widok ilości odłamków kruszącego się tworzywa; b) zarys zęba po teście trwałościowym

Z uwagi na widoczny negatywny wpływ włókna szklanego w testowanych suchobieżnych przekładniach, zdecydowano się na wprowadzenie do badań tworzywa zawierającego wewnętrzny środek smarny. W związku z tym w kolejnym teście wytypowano przekładnię wykonaną z poliamidu 6.6 modyfikowanego PTFE i włóknem szklanym w ilości 30 % oraz stabilizowanego termicznie – PA66/PTFE/30GF. Parametry badania przedstawiono w tab. 25. Jak przedstawiono rys. 107, w pierwszy etap cechował się średnim ciśnieniem akustycznym na poziomie ok. 93 dBA i temperaturą układu od 23,3 °C do 27,8 °C. Zmiana warunków testu do

750 obr./min i 9 Nm, spowodowało wzrost temperatury do 31,3 °C i ciśnienia akustycznego do 97 dBA. W trzecim etapie założono prędkość równą 950 obr./min i 14 Nm. Te warunki spowodowały dalszy wzrost temperatury do 38,2 °C. W ostatnim etapie testu zauważono znaczny wzrost natężenia dźwięku do ok. 100 - 102 dBA. Mimo, że temperatura podczas testu przyrastała w mniejszym stopniu niż dla przekładni wykonanych z innych polimerów zawierających włókno szklane, w tym przypadku także obserwowano duże uszkodzenia wierzchniej warstwy zębów. Obserwowano zużycie ściernie oraz łuszczenie się wierzchniej warstwy zębów w obrębie średnicy tocznej i głowy zęba (rys. 108).

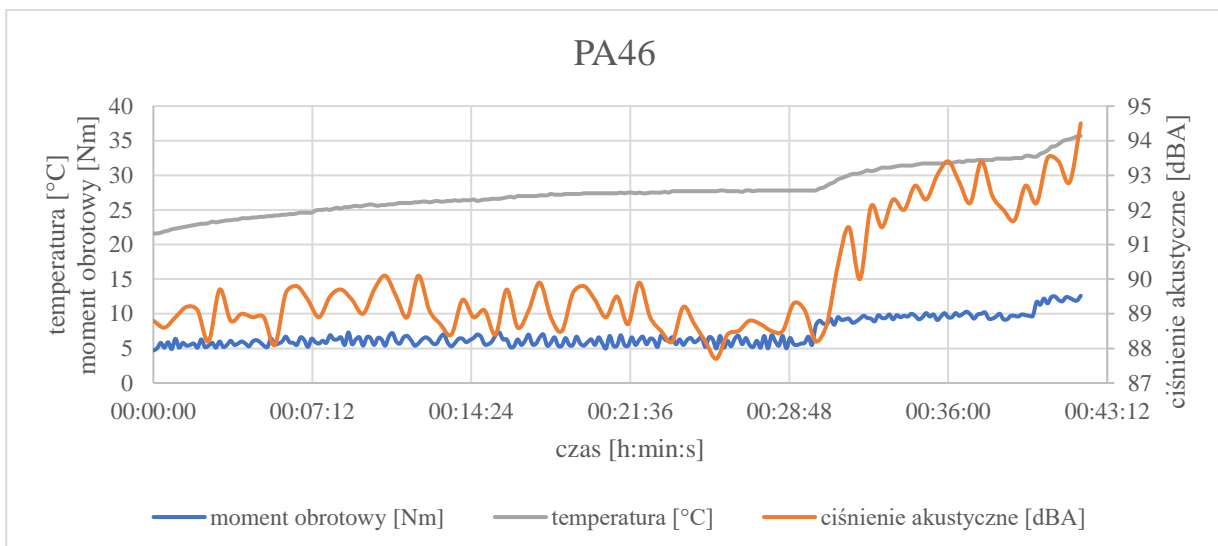


Rys. 107. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA66/PTFE/30GF o parametrach przedstawionych w tab. 25

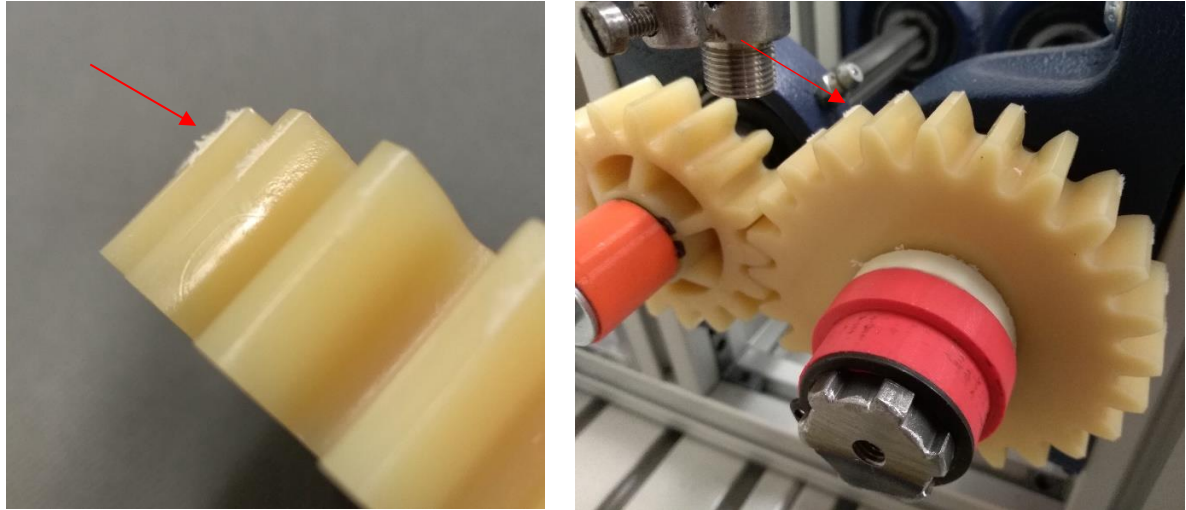


Rys. 108. Widok uszkodzeń zębów PA66/PTFE/30GF po teście trwałościowych zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25: a) zarys zęba; b) powierzchnia boczna zęba

W związku z powyższymi wynikami badań trwałościowych badanych układów zębatych, zdecydowano się na przetestowanie poliamidów 4.6 nie zawierających już włókna szklanego, a mających w kompozycji środek wpływający na zmniejszenie tarcia. Ostatnie z dwóch testowanych materiałów były oparte na poliamidzie 4.6. W pierwszej kolejności wykonano testy stabilizowanego termicznie PA46. Parametry procesu były zgodne z tab. 25. Zgodnie z rys. 109, w pierwszym cyklu temperatura w punkcie styku wzrosła od 21,6 do 27,6 °C, a ciśnienie akustyczne mieściło się ok. 88 dBA. Drugi etap spowodował przyrost obu parametrów do maksymalnie 32,7 °C i średnio 91 dBA. W trzecim etapie prędkość 950 obr./min i moment obrotowy 14 Nm, spowodowały dalszy wzrost temperatury do 35,7 °C i 94 dBA. Po zakończeniu testu na roboczej powierzchni zęba zaobserwowano ślady zużycia dogładzającego i ściernego (rys. 110).

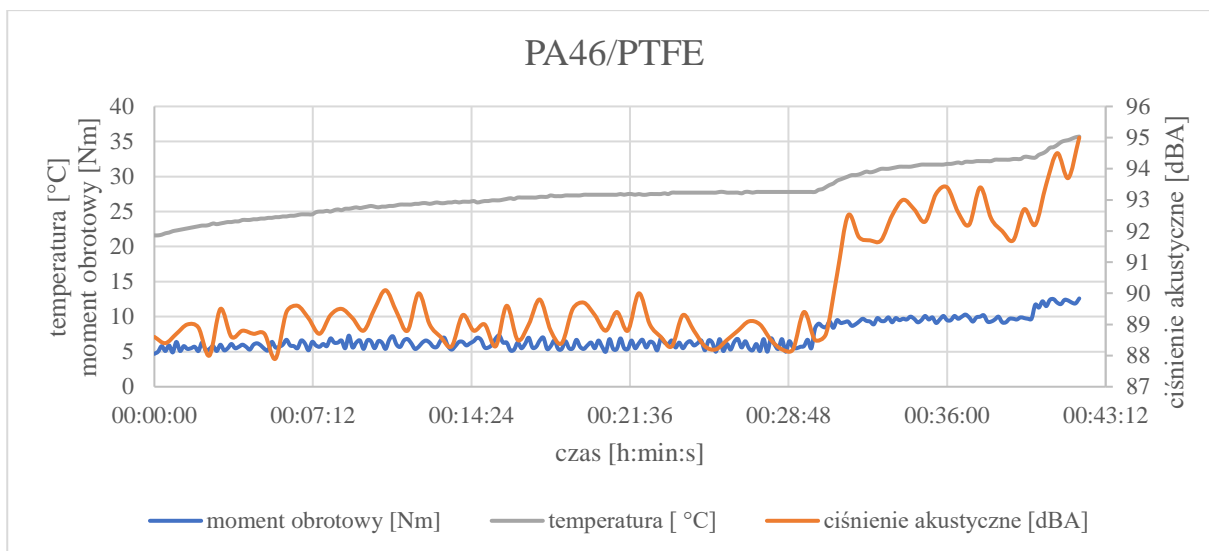


Rys. 109. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA46 o parametrach przedstawionych w tab. 25

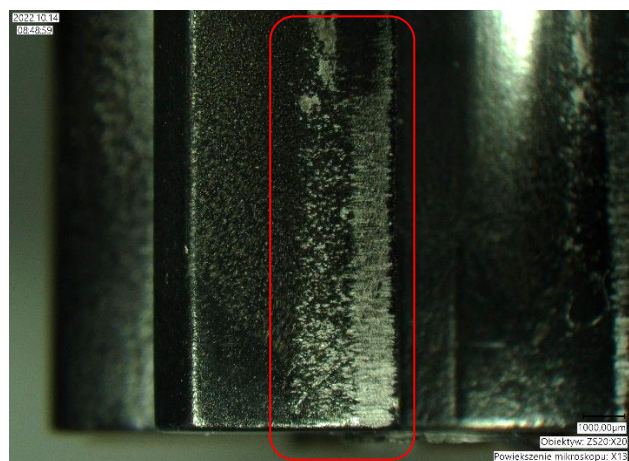


Rys. 110. Widok uszkodzeń zębów PA46 po teście trwałościowym zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25

Ostatnim z materiałów testowanych w tej serii badań był poliamid 4.6 z dodatkiem środka smarnego – PA46/PTFE. Testy PA46/PTFE wykonano zgodnie z tab. 25. Jak pokazuje rys. 111, w cyklu pierwszym temperatura w punkcie styku wzrosła do 27,3 °C, a ciśnienie akustyczne było równe średnio ok. 89 dBA. W drugim etapie przyrost obu parametrów klasował się na poziomie 32,4 °C i średnio 92 dBA. Test zakończył się na wartościach równych 35,3 °C i 95 dBA. W porównaniu do przekładni z PA46, w przypadku PA46/PTFE zauważono nieznaczny wzrost ciśnienia akustycznego, średnio o 1 dBA w każdym z trzech cykli. Jednak mimo tego, po jego zakończeniu na roboczej powierzchni zęba zaobserwowano mniejsze ślady zużycia w porównaniu do PA46. Obserwowano tutaj nieznaczne ślady docierania zębów, zlokalizowanego w okolicy średnicy tocznej (rys. 112).



Rys. 111. Zależność temperatury, ciśnienia akustycznego i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowej przekładni zębatej PA46/PTFE o parametrach przedstawionych w tab. 25



Rys. 112. Widok uszkodzeń zębów PA46/PTFE po teście trwałościowych zgodnym z parametrami przedstawionymi w tab. 25

Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na wyciągnięcie wniosków jakie istotne właściwości powinny mieć tworzywa w założonych warunkach testów. Spośród grupy badanych materiałów wykonano analizę powstałych uszkodzeń roboczej powierzchni zębów, uzyskanych ciśnień akustycznych i temperatur w punkcie styku. Z dalszych badań wyłączono tworzywa sztuczne, które podczas badań wstępnych charakteryzowały się dużym stopniem uszkodzeń lub wzrostem pozostałych dwóch mierzonych parametrów. Aby móc zminimalizować możliwości wystąpienia uszkodzeń trwałościowych polimerowych kół zębatych, poniżej zestawiono ich przyczyny:

- deformacja zębów

Występowała z powodu topienia się warstwy wierzchniej zębów, na skutek gwałtownego przyrostu temperatury przekraczającego temperaturę topnienia materiału (m.in. PA6 - rys. 97). Na skutek nacisku wywieranego na powierzchnię styku, obserwowano stały przyrost ciepła wynikający z kumulacji ciepła w polimerowych zębach. Działo się to w wyniku niskiego przewodnictwa cieplnego niemodyfikowanych poliamidów PA6 i PA66. Zjawisko było dodatkowo potęgowane w wyniku stosunkowo dużej rozszerzalności cieplnej polimerów. W związku ze wzrostem temperatury, zachodził gwałtowny spadek wytrzymałości mechanicznej na rozciąganie, co doprowadziło do ostatecznej plastycznej deformacji zębów.

- Zużycie powierzchni bocznej zęba

W wyniku ścierania się zewnętrznych warstw zęba i tworzących się odprysków, dochodziło do zwiększenia się chropowatości powierzchni i przyspieszenia całego procederu zniszczenia. Obserwowane podczas badań ubytki materiału były zlokalizowane najczęściej w rejonie głowy zębów, gdzie występują wyższe prędkości poślizgu. Dla badanych materiałów zauważono wyraźną zależność, że obecność włókna szklanego w kompozycji, potęguje zużycie ściernie w przypadku suchobieżnych przekładni.

- Wżery w powierzchni bocznej zęba

Były wynikiem zmęczenia materiału w warstwie powierzchniowej na skutek, zachodzących zmiennych naprężeń ścinających. Przy tej samej geometrii przekładni nacisk wywierany na boki zęba zależał głównie od modułu sprężystości koła zębatego, o czym mówi teoria Hertza [98]. Im wyższy moduł sprężystości tym większe naprężenia ścinające wywierane na pracującą powierzchnię. Z tego powodu również zdecydowano się na wyeliminowanie pozycji wzmocnionych włóknem szklanym.

Dodatkowo w każdym z przypadków testowania przekładni wzmocnionych włóknem szklanym odnotowano znaczny wzrost ciśnienia akustycznego, co prawdopodobnie może wynikać z anizotropii skurczu przetwórczego, która będzie powodowała zmianę zarysu zęba i kąta przyporu.

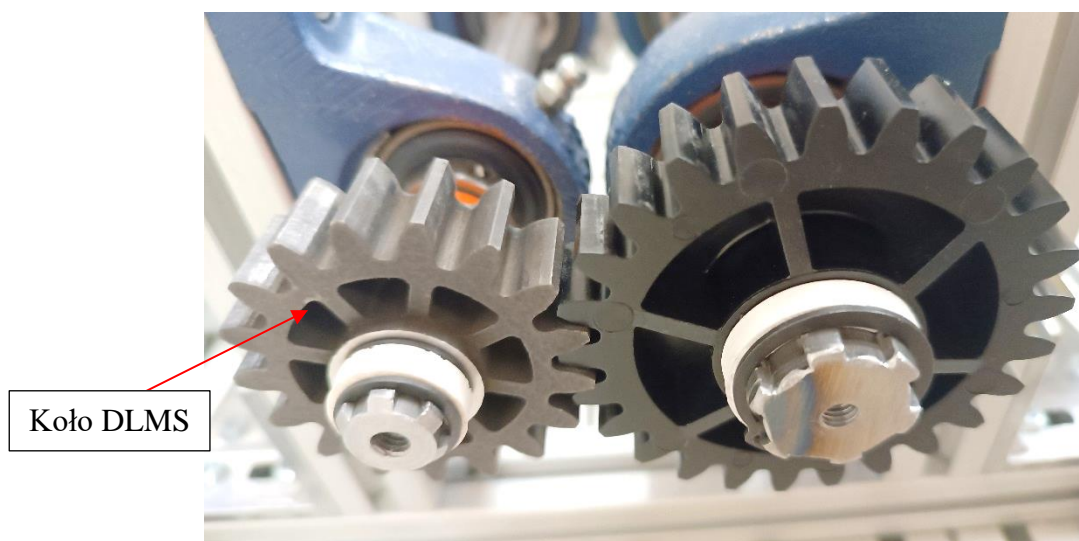
Na podstawie powyższych wniosków, do dalszych badań wytypowano trzy materiały charakteryzujące się najmniejszym zużyciem i najniższymi parametrami temperatury i ciśnienia akustycznego. Były to: PA66/6T/35GF, PA46, PA46/PTRFE.

III.11.2. Określenie wpływu wstępnego docierania korygującego na wytrzymałość trwałościową przekładni

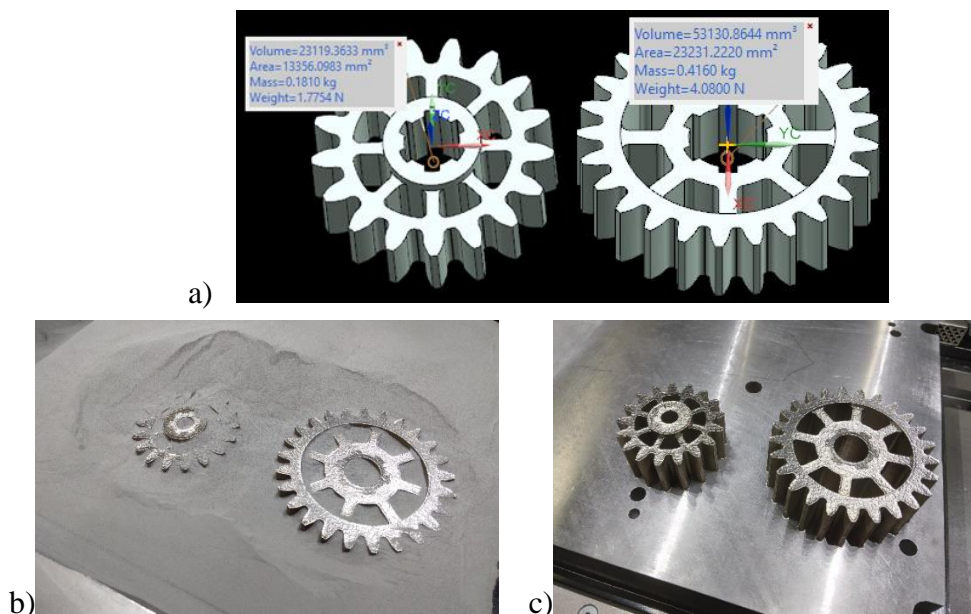
Głównym celem badań było porównaniu trwałości przekładni, a w toku testów zweryfikowano także wpływ skurczu przetwórczego materiałów. Jego oddziaływanie na wyniki trwałości badanych przekładni oceniano poprzez zestawienie dwóch różnych sposobów ułożenia kół zębatach, które przedstawiono na rys. 85 a (wariant 1) i 85 b (wariant 2). Uzyskane w poprzedniej serii wyniki badań, pozwoliły na przyspieszenie procesu dopracowania innowacyjnych kompozycji polimerowych kół zębatach.

Spośród badanych w podrozdziale III.11.1. przekładni, wytypowano trzy materiały, dla których zaobserwowano najmniejsze zużycie powierzchni bocznej zębów. W kolejnej serii badań skupiono się na wpływie zjawiska docierania, na wytrzymałość przekładni polimerowej w układzie, kiedy żebra obu kół zębatach są skierowane w tą samą stronę (wariant 2, rys. 85 b). Starano się także zweryfikować, czy skurcz przetwórczy w badanych niesymetrycznych kołach zębatach, ma wpływ na żywotność trwałościową.

W celu skrócenia czasu docierania powierzchni bocznej koła napędzanego, dla wytypowanych materiałów wprowadzono dodatkowy etap docierania (rys. 113). Proces przeprowadzono z zastosowaniem koła zębatego wykonanego w technologii spiekania proszków metali DMLS, co przedstawiono na rys. 114. Koła wykonano ze spieku proszków metali o chropowatości wynikowej równej $Ra=9,0 \mu m$.

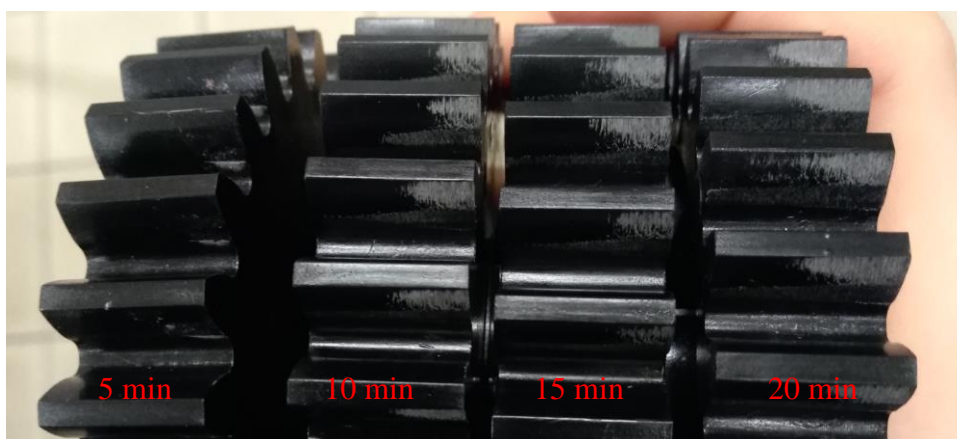


Rys. 113. Etap docierania koła napędzanego z zastosowaniem koła wykonanego metodą DLMS



Rys. 114. Koła zębate wykonane w technologii DMLS: a) model 3D-CAD; b-c) gotowe wyroby po procesie DMLS

Na podstawie eksperymentalnych testów określono parametry docierania wytypowanych polimerowych kół zębatych. Oczekiwany efekt było usunięcie nierówności powierzchni i podniesienie dokładności powierzchni bocznej zębów. Zdecydowano się na niski moment obrotowy 2 Nm i prędkość równą 750 obr./min. Czas docierania został wyznaczony doświadczalnie na podstawie śladu zużycia, dochodzącego do połowy szerokości zęba na wysokości jego średnicy toczonej i ok. $\frac{3}{4}$ szerokości głowy zęba (rys. 115). Na tej podstawie wyznaczono, że czas docierania dla KZ25 będzie wynosił 20 min, natomiast dla KZ17 – 5 min (tab. 28).



Rys. 115. Etapy docierania wytypowanych polimerowych kół zębatych

Tab. 28. Parametry etapu docierania

| Parametr | KZ25 | KZ17 |
|-----------------------------|------|------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 750 | 750 |
| moment obrotowy, Nm | 2,0 | 2,0 |
| czas, min | 20 | 5 |

W trakcie 20-sto minutowego okresu docierania KZ25 rejestrowano temperatury w punkcie styku zębów dochodzące do 28 °C dla PA46 i PA46/PTFE oraz do 40 °C dla PA66/6T/35GF. Ciśnienie akustyczne dochodziło kolejno 97 dBA PA46, PA46/PTFE oraz 104 dBA dla PA66/6T/35GF.

W celu oceny wpływu wstępnego docierania testowano przekładnie z wytypowanych tworzyw: PA46, PA46/PTFE i PA66/6T/35GF. Założone warunki testu przedstawiono w tab. 29.

Tab. 29. Parametry przekładni

| Parametr | cykl I | cykl II | cykl III | cykl IV |
|-----------------------------|--------|---------|----------|---------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 500 | 500 | 750 | 950 |
| moment obrotowy, Nm | 2,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| czas, min | 15 | 10 | 10 | 10 |

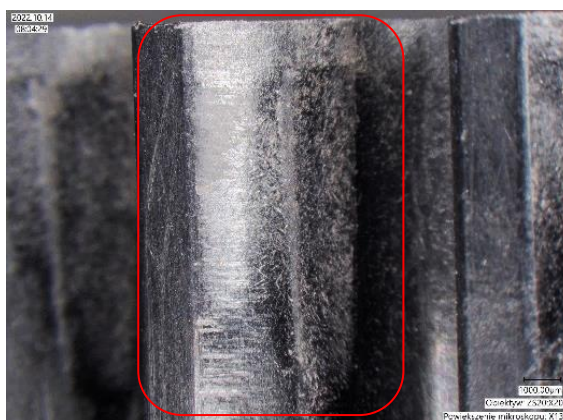
W tab. 30 zestawiono wyniki otrzymane dla testowanych przekładni. Porównano temperaturę i ciśnienie akustyczne uzyskane w teście bez i z dodatkowym etapem docierania, dla parametrów przedstawionych w tab. 28.

Tab. 30. Zestawienie wyników przekładni bez i z dodatkowym docieraniem

| Oznaczenie | wersja wariantu 2 | ciśnienie akustyczne, dBA | temperatura, °C |
|--------------|----------------------|---------------------------|-----------------|
| PA46 | dodatkowe docieranie | 99 | 48,5 |
| | standardowy pomiar | 100 | 51,7 |
| PA46/PTFE | dodatkowe docieranie | 95 | 29,4 |
| | standardowy pomiar | 97 | 32,0 |
| PA66/6T/35GF | dodatkowe docieranie | 106 | 43,5 |
| | standardowy pomiar | 98 | 31,4 |

W przypadku przekładni PA46 i PA46/PTFE wprowadzenie dodatkowego etapu docierania powierzchni bocznej zębów, spowodowało obniżenie temperatury pracy przekładni o ok. 3 °C.

Prawdopodobnie świadczy to o dopasowaniu zębów do koła współpracującego. Również pomiar natężenia dźwięku potwierdza tą tezę. Podobne wyniki zaobserwowano w publikacji [80]. Natomiast zupełnie odwrotne zjawisko zarejestrowano w przypadku kół zębatych wzmocnionych włóknem szklanym, tj. PA66/6T/35GF. W tym przypadku zastosowanie dodatkowego okresu docierania, zaowocowało wzrostem temperatury i ciśnienia akustycznego (z 98 do 106 dBA) oraz wzmożonym wrywaniem materiału z pracującej powierzchni kół zębatych (rys.116). W porównaniu do testów przekładni przedstawionych na rys. 103, 109 i 111, gdzie ułożenie kół zębatych było skierowane w przeciwną stronę (wariant 1), stwierdzono wzrost temperatury w miejscu styku, ciśnienia akustycznego oraz nasilenie się uszkodzeń zmęczeniowo - powierzchniowych na zębach (tab. 30).



Rys. 116. Uszkodzenia kół zębatych PA66/6T/35GF występujące po wstępnym docieraniu (tab. 28) oraz teście trwałościowym (tab. 29)

W przypadku testu przekładni z dodatkowym docieraniem, być może amplifikacja zużycia powierzchni bocznej zębów PA66/6T/35GF była skutkiem obecnych niewidocznych pęknięć powierzchniowych, które powstały podczas formowania wtryskowego, a zostały aktywowane przez działające naprężenia rozciągające w trakcie testów trwałościowych. Obserwacje te pozwoliły na wyeliminowanie kompozytu PA66/6T/35GF z kolejnej serii badań trwałościowych.

III.11.3. Testy trwałościowe przekładni z zastosowaniem hybrydowych kompozycji polimerowych

Na podstawie wyników badań trwałościowych przekładni, opisanych w podrozdziałach III.11.1 i III.11.2, do ostatniej serii testów wytypowano materiały PA46 i PA46/PTFE. Nowe kompozyty zostały przygotowane przy pomocy technologii wytłaczania opisanej

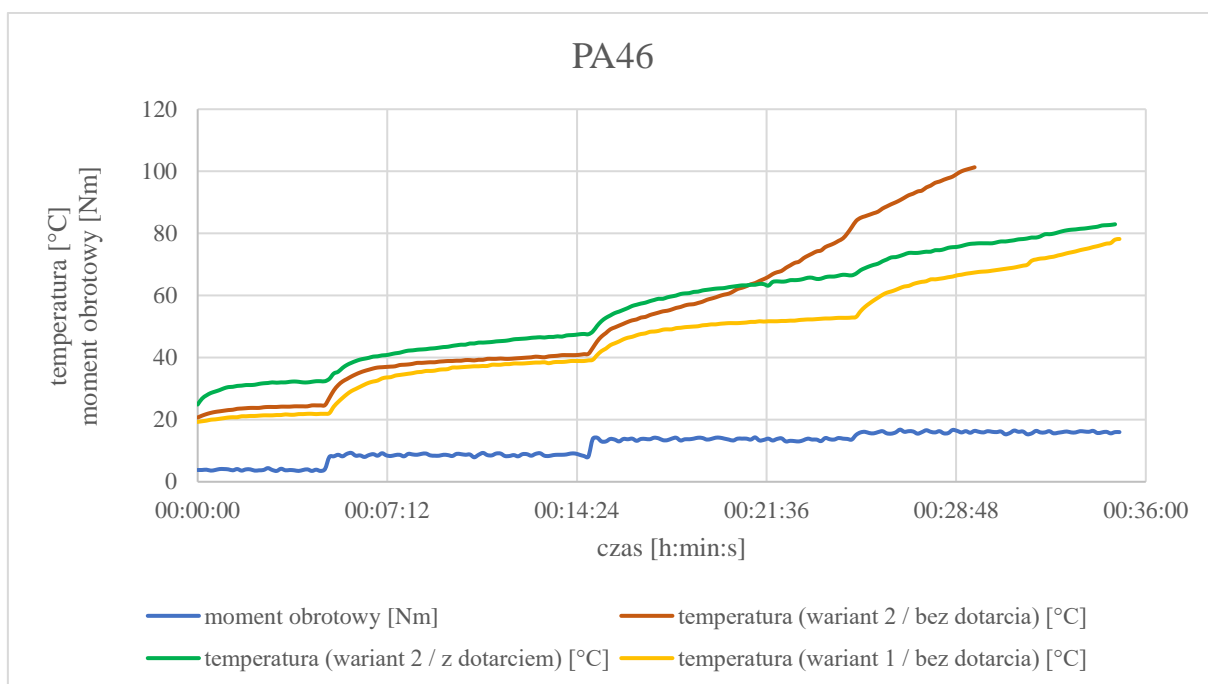
w podrozdziale II.15. Wykonane zostały nowe kompozyty zawierające wielościennie nanorurki węglowe i środek smarny oparty na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylenowych. W zestawionych w tym podrozdziale testach, porównano ułożenie kół zębatych względem siebie oraz wpływ modyfikacji osnowy polimerowej na temperaturę w miejscu styku dla materiałów: PA46, PA46/PTFE, PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM. Aby zachować przejrzystość wykresów, zrezygnowano z naniesienia na nie krzywych ciśnienia akustycznego z uwagi, że dla większości badanych układów miały one zakres od 95 do 97,5 dBA. Parametry pracy przekładni znajdują się w tab. 31.

Tab. 31. Parametry przekładni

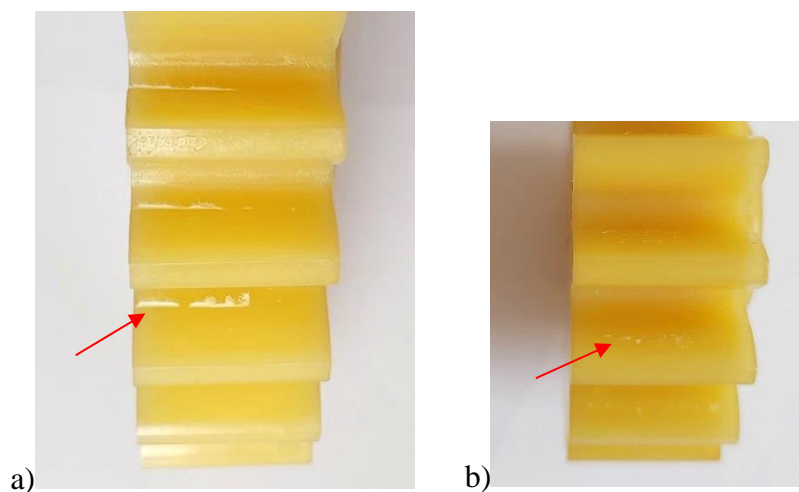
| Parametr | cykl I | cykl II | cykl III | cykl IV |
|-----------------------------|--------|---------|----------|---------|
| prędkość obrotowa, obr./min | 750 | 750 | 750 | 750 |
| moment obrotowy, Nm | 4,0 | 9,0 | 14,0 | 17,0 |
| czas, min | 5 | 10 | 10 | 10 |

Badania rozpoczęto od przetestowania tworzywa PA46 w różnych konfiguracjach ułożenia kół zębatych zgodnie z parametrami z tab. 31. Jak przedstawiono na rys. 117, przekładnie PA46/CNT/SM, charakteryzujące się przeciwnym ustawieniem kół zębatych, różnią się między sobą wynikiem przebiegu testów. W ciągu dwóch pierwszych cykli warianty 1 i 2, w których koła nie zostały wstępnie dotarte, cechowały się podobnym przebiegiem krzywych, a ich temperatura maksymalnie wyniosła od ok. 39 °C (wariant 1) do ok. 41 °C (wariant 2 bez docierania). Po tym samym czasie testu badawczego, przekładnia pracująca w wariantcie 2 i poddana poprzedzającemu właściwe badanie etapowi docierania, charakteryzowała się temperaturą wyższą o już 10 °C. Przełom krzywej przedstawiającej pracę przekładni dla wariantu 2 bez docierania pokazywał niespodziewany, gwałtowny wzrost temperatury rozpoczynający się w połowie III cyklu, przy momencie hamującym równym 14 Nm. Test został przerwany awaryjnie w IV cyklu, na skutek przekroczenia temperatury 100 °C oraz efektów dźwiękowych, świadczących o uszkodzeniu układu badawczego. Na przykładzie tworzywa PA46 obserwowano, że poprzedzający etap docierania powierzchni bocznej zębów usprawnił przekładnię pracującą przy momencie obrotowym w zakresie 14 – 17 Nm. Jednak najlepsze efekty uzyskano dla wariantu 1 bez dodatkowego docierania, gdzie ostatni cykl badawczy zakończył się przy temperaturze równej 78,2 °C. Po zakończeniu testów oba koła zębate posiadały nieznaczne ślady zużycia ściernego, co przedstawiono na rys. 118. Układ, który został zatrzymany awaryjnie, pod koniec pracy charakteryzował się ciśnieniem

akustycznym na poziomie ok. 101 dBA, natomiast pozostałe testy miały tę wartość na poziomie ok. 95 – 96 dBA.



Rys. 117. Zależność temperatury i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowych przekładni zębatych PA46 pracujących zgodnie z parametrami przedstawionymi w tab. 31

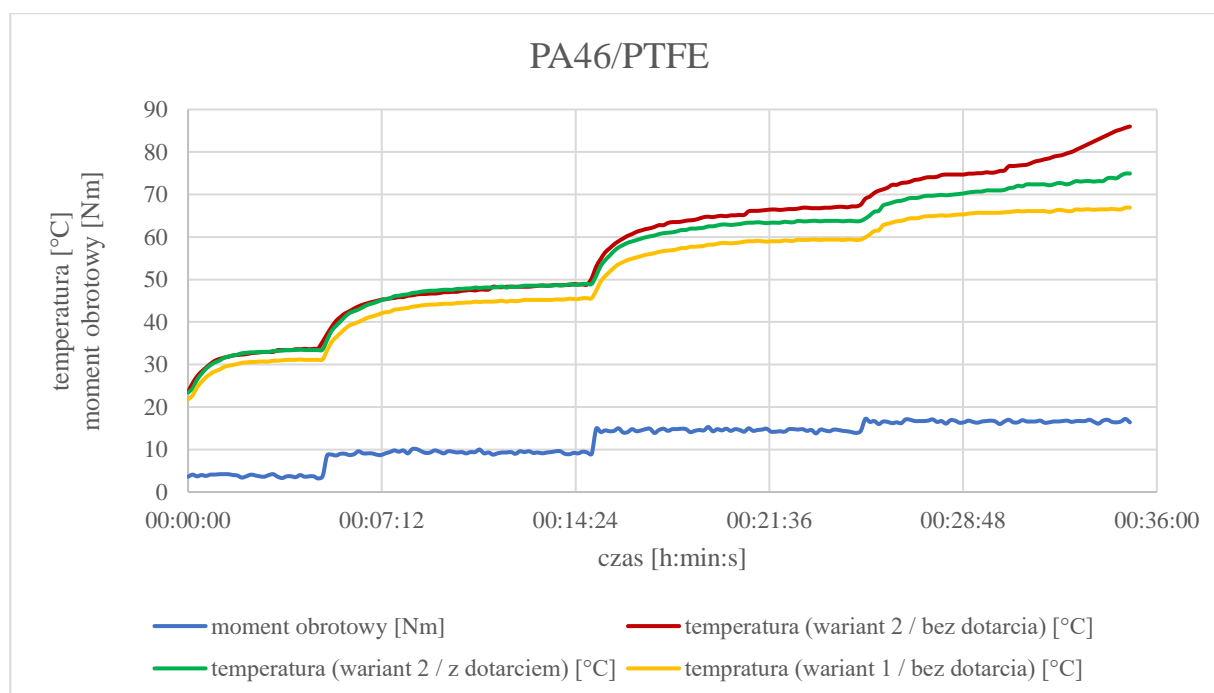


Rys. 118. Uszkodzona powierzchnia boczna zębów po teście trwałościowym, dla kół zębatych ułożonych wg wariantu 1, pracujących zgodnie z parametrami przedstawionymi w tab. 31:

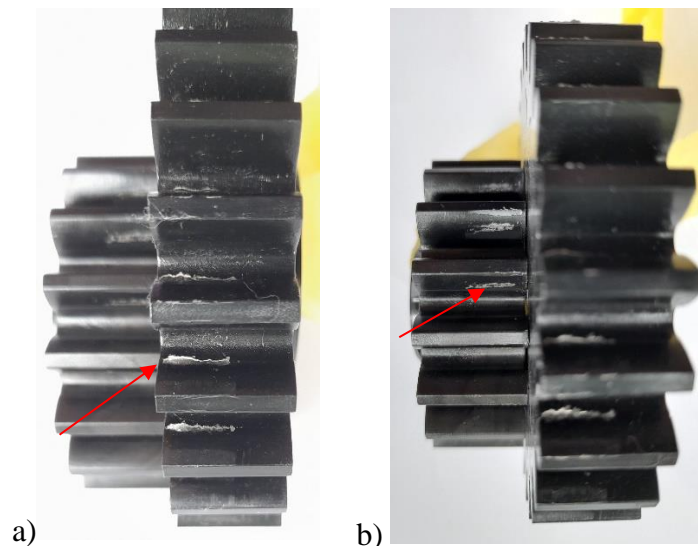
a) KZ25 (PA46); b) KZ17 (PA46)

Jak przedstawiono rys. 119, w przypadku przekładni PA46/PTFE pracującej w wariantcie 2, bez dodatkowego docierania, przedstawiono podobny przebieg przyrostu temperatury jak w przypadku takiego samego ułożenia kół zębatych PA46. Dla badanego układu napędowego

PA46/PTFE również nastąpił nagły przyrost temperatury wynikający z działania nałożonego wyższego momentu hamującego. Natomiast dodatek PTFE w kompozycie PA46/PTFE spowolnił i opóźnił wzrost temperatury, dzięki czemu test zakończył się z maksymalną temperaturą styku równą 86 °C. Etap docierania kół zębatach w wariancie 2, pozwolił na usprawnienie pracy przekładni, obniżenie natężenia dźwięku i temperatury w cyklach III i IV. Najwyższa temperatura jaką zarejestrowano dla tego układu wynosiła 74,9 °C. Układ badawczy, który cechował się najwolniejszym wzrostem temperatury i ciśnienia akustycznego, na skutek nałożonej prędkości i momentu obrotowego, to przekładnia ustawiona wg wariantu 1. Jej ostateczne wyniki temperatury mieściły się w okolicach 67 °C. Koła zębata po teście trwałościowym posiadały ślady zużycia ściernego oraz nieznaczne oznaki łuszczenia się wierzchniej, roboczej powierzchni zębów (rys. 120). W przypadku wszystkich porównywanych przekładni PA46/PTFE (rys. 119) ich maksymalne ciśnienie akustyczne mieściło się w granicach 95 – 96 dBA.



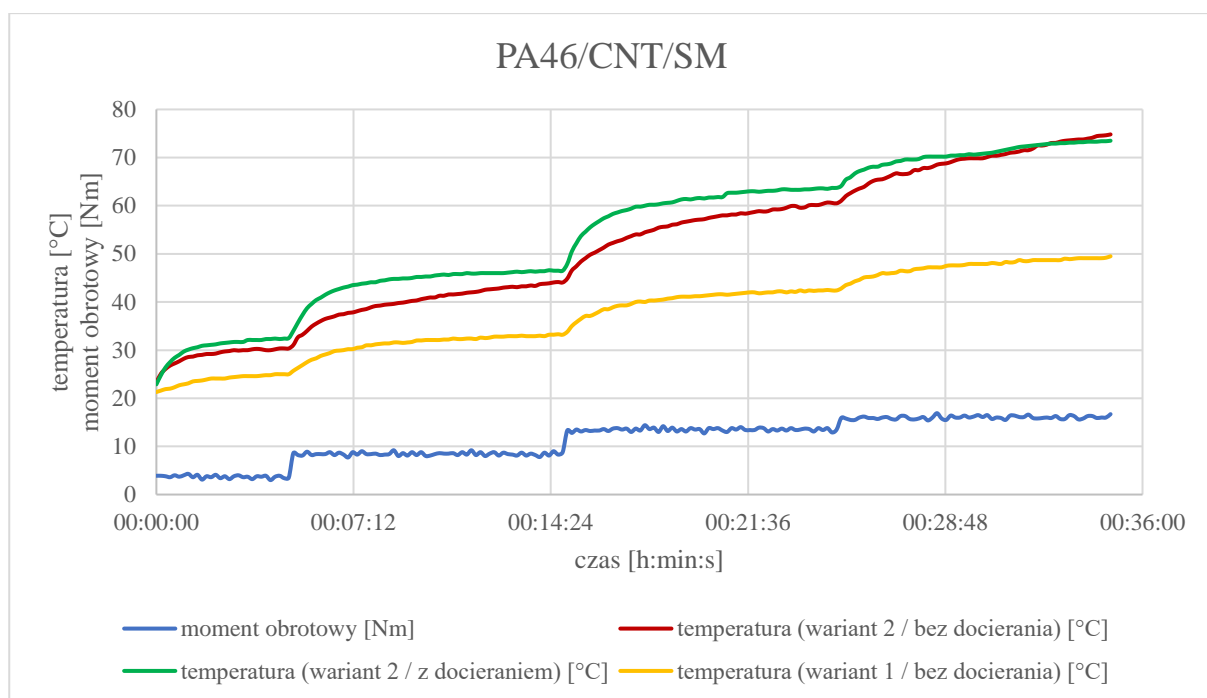
Rys. 119. Zależność temperatury i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowych przekładni zębatach PA46/PTFE pracujących zgodnie z parametrami przedstawionymi w tab. 31



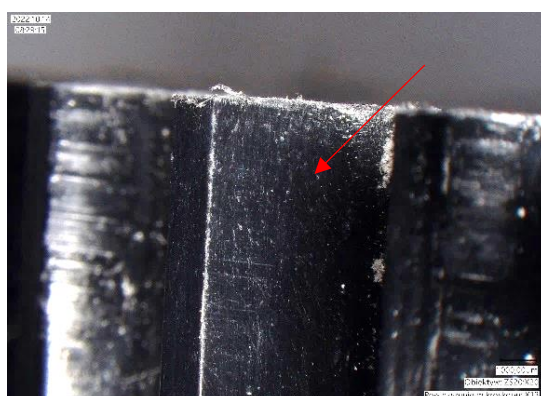
Rys. 120. Uszkodzona boczna powierzchnia zębów po teście trwałościowym, dla kół zębatych ułożonych wg wariantu 1, pracujących zgodnie z parametrami przedstawionymi w tab. 31:

a) KZ25 (PA46/PTFE); b) KZ17 (PA46/PTFE)

Jak przedstawiono na rys 121, w przypadku PA46/CNT/SM dla wariantu 1 bez dodatkowego docierania, w pierwszym etapie temperatura w punkcie styku nieznacznie wzrosła do 25,0 °C. W kolejnych cyklach, przy momencie hamującym równym ok. 9 Nm, nastąpił nieznaczny wzrost temperatury do 33,8 °C, a przy 14 Nm do 49,5 °C. Koła zębate po testach nie posiadały wyraźnych śladów zużycia z wyjątkiem pojedynczych miejsc wskazujących na występowanie zjawiska docierania i zużycia dogładzającego (rys. 122). Jak można zaobserwować na rys. 121, krzywa po przejściu na każdy kolejny wyższy moment hamujący (17 Nm) jest względnie wypłaszczona, co świadczy o poprawnej współpracy stykających się ze sobą powierzchni zębów. Dla przekładni pracujących w ułożeniu kół zębatych zgodnych z wariantem 2, obserwowany jest wzrost temperatury bezpośrednio po uruchomieniu układu napędowego. Porównując przekładnie pracujące w wariacie 2 bez i z dodatkowym docieraniem widoczne jest, że układ napędowy, w którym koła zostały poddane wcześniejszemu docieraniu charakteryzował się mniejszymi przyrostami temperatury. Wraz z każdym następnym wzrostem momentu hamującego powiększała się różnica mierzonej temperatury między przekładniami pracującymi w wariacie 1 (bez docierania), a wariantach 2 (bez i z docieraniem). I tak po zakończeniu 1 cyklu wynosiła ona ok. 7 °C, a dla następnych kolejno przyrastała do: 10, 19 i 24 °C. Po około 31 min pracy, krzywe temperatury przekładni ułożonych wg wariantu 2, przecinały się i oba układy badawcze kończyła test z temperaturą ok. 75 °C. Ciśnienie akustyczne w przypadku porównywanych przekładni PA46/CNT/SM (rys. 121) mieściło się w granicach od 96,0 do 97,5 dBA.



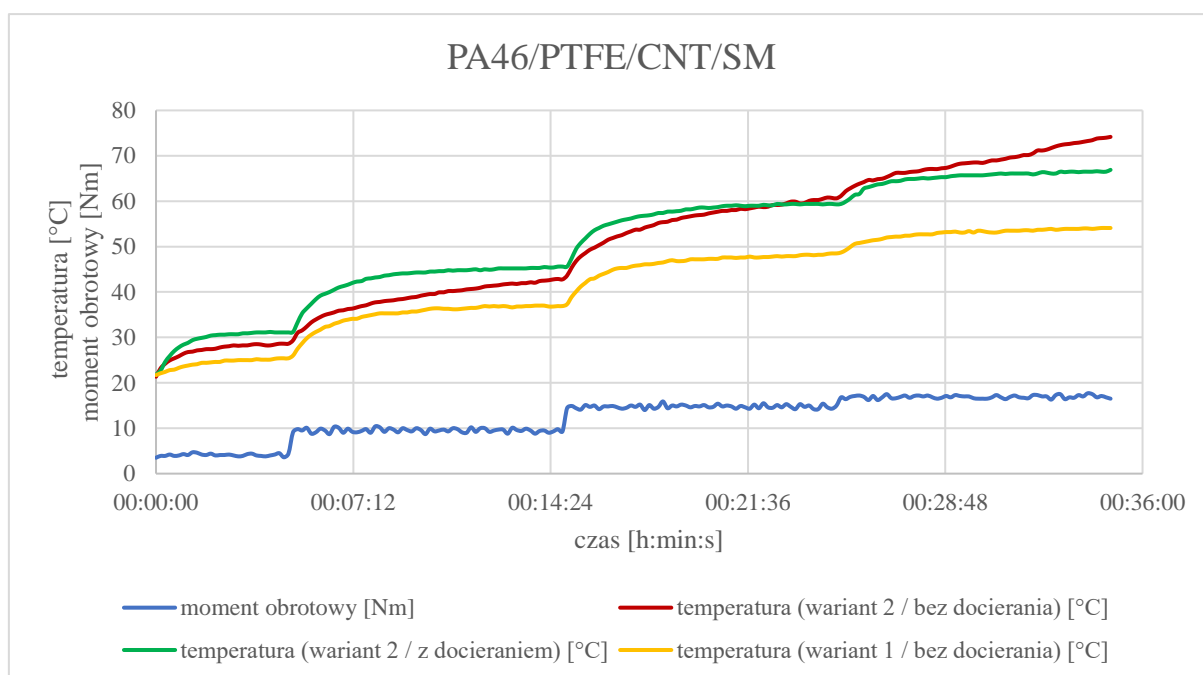
Rys. 121. Zależność temperatury i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowych przekładni zębatych PA46/CNT/SM pracujących zgodnie z parametrami przedstawionymi w tab. 31



Rys. 122. Widok powierzchni zębów PA46/CNT/SM po teście trwałościowym, dla kół zębatych ułożonych wg wariantu 1, pracujących zgodnie z parametrami przedstawionymi w tab. 31

Wyniki przedstawione na rys. 123 wskazują, że w przypadku PA46/PTFE/CNT/SM dla wariantu 1 bez dodatkowego docierania, w pierwszym etapie temperatura w punkcie styku wzrosła do 25,4 °C. Drugi etap charakteryzował się kolejnym wzrostem tego parametru do 36,9 °C. Jest to temperatura wyższa o 3° w porównaniu do analogicznego układu przekładni PA46/CNT/SM. Cykl badawczy zakończył się przy temp 54,1 °C. Oba koła zębate po testach posiadały ślady zużycia porównywalne z tym samym ułożeniem układu w przypadku przekładni PA46/CNT/SM (rys. 122). W przypadku przekładni PA46/PTFE/CNT/SM

pracujących w wariancie 2, czujnik temperatury miejsca styku pary kół zębatach zanotował wzrost temperatury bezpośrednio po uruchomieniu układu napędowego. Jest to analogiczny skok temperatury jak w przypadku PA46/CNT/SM. Dla przekładni PA46/PTFE/CNT/SM pracujących w obu wariantach 2 widoczne jest, że para kół zębatach, która została poddana wcześniejszemu docieraniu, charakteryzuje się mniejszymi przyrostami temperatury w kolejnych cyklach badawczych. Porównując przekładnie pracujące w wariancie 2, w III cyklu zauważono względny szybszy przyrost temperatury styku kół zębatach, które nie zostały poddane wstępnemu docieraniu. Temperatura, przy której zakończył się test tego układu wynosiła 74,2 °C. Natomiast układ napędowy złożony z kół zębatach, których powierzchnia pracująca została uprzednio dotarta, zakończył się w temperaturze badania 66,5 °C. W przypadku wszystkich porównywanych przekładni PA46/CNT/SM (rys. 123) ich maksymalne ciśnienie akustyczne mieściło się w granicach 96,5 – 97,5 dBA.



Rys. 123. Zależność temperatury i momentu obrotowego w funkcji czasu dla polimerowych przekładni zębatach PA46/PTFE/CNT/SM pracujących zgodnie z parametrami przedstawionymi w tab. 31

Podsumowując, ułożenie kół zębatach względem siebie ma istotny wpływ na żywotność przekładni. Wariant 2, w którym koła zębata miały żebra ułożone w tym samym kierunku okazał się najsłabszy pod względem trwałości. Wynika to z niesymetrycznej konstrukcji wtryskiwanych kół zębatach, która wzmaga niejednorodny efekt skurczu przetwórczego i skutkuje brakiem współpracy na całej szerokości zęba. Wstępny etap docierania wpłynął na

obniżenie temperatury styku powierzchni zębów w każdym z cykli badawczych. Stwierdzono, że różnica ta była największa w trakcie działania momentu obciążającego 17 Nm, ponieważ zmiana temperatury wynosiła maksymalnie 18 °C. Na tej podstawie stwierdzono, że podczas docierania doszło do poprawy geometrii powierzchni zębów i w efekcie lepszych warunków zazębiania. W każdym z testowanych przypadków obserwowano, że przekładnie, które charakteryzowały się najwyższą trwałością były ułożone zgodnie z wariantem 1 (tj. żebra kół zębatach znajdowały się w przeciwległych kierunkach). Dzięki takiemu ustawieniu kół zębatach w przekładni, w znacznym stopniu zostały zniwelowane skutki wynikające ze skurczu przetwórczego. Takie ustawienie przekładni wiązało się także z wystąpieniem sił poosiowych przesuwających koła podczas pracy.

Wprowadzenie do struktury PA46 i PA46/PTFE nowych modyfikatorów, tj. wielościennych nanorurek i środka smarnego opartego na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylenowych, zaowocowało znacznym wzrostem wytrzymałości trwałościowej kół zębatach wykonanych z nowoutworzonych kompozytów. Dodatek wielościennych nanorurek węglowych przyczynił się do wzrostu przewodnictwa cieplnego kompozytu, dzięki czemu podczas pracy przekładni w znacznie efektywniejszy sposób dochodziło do odprowadzenia ciepła z strefy zazębienia. Stwierdzenie to znajduje poparcie wynikami innych publikacji badawczych [187]. Drugi z wprowadzonych modyfikatorów wpłynął na zmniejszenie tarcia. Jego działanie mogło zostać dodatkowo zwiększone na skutek synergicznego efektu połączenia środka smarnego SM z nanonapełniaczami węglowymi CNT. Naukowcy w swych pracach [17, 151] potwierdzili, że dodatek węglowego nanonapełniacza zwiększa stabilność dyspersji cząstek środka smarnego, co zapobiega aglomeracji i wpływa na stabilność jednorodnej dyspersji. Wyniki trwałościowych badań przekładni wykonanej z PA46/PTFE/CNT/SM przyniosły takie same wnioski.

W przypadku nowoutworzonego kompozytu z dodatkiem CNT i SM, opartego na PA46 obserwowano spadki temperatury dochodzące do 28,8 °C, dla wariantu 1 w cyklu IV (z temp. 78,0 °C do 49,2 °C). W tym samym punkcie badania, obserwowano mniejsze różnice temperatury dla kompozytów, które już zawierały w swojej strukturze PTFE (z temp. 74,2 °C do 54,9 °C). Ten niespodziewany wynik może świadczyć o niekompatybilności między PTFE, a wprowadzonymi dodatkami CNT i SM. Obecność teflonu w strukturze mogła wpłynąć na zaburzenie wpływu nowo dodanych modyfikatorów na końcową trwałość przekładni wykonanej z PA46/PTFE/CNT/SM. Potwierdzają to zdjęcia SEM zamieszczone w podrozdziale III.4, na których widać słabe połączenie między PTFE, a osnową polimerową PA46. Być może na skutek nałożenia na przekładnię wykonaną z PA46/PTFE/CNT/SM,

odpowiednio wysokiego momentu hamującego, cząstki teflonu oddzieliły się od osnowy polimerowej, co wpłynęło na pogorszenie się końcowych właściwości trwałościowych. O niedostatecznie wysokiej trwałości połączenia między teflonem a poliamidem 4.6, przemawiał także fakt, że już po wtrysku koła zębate wykonane z PA46/PTFE, posiadały ślady przebarwień związanych z wypacaniem się tego smarnego modyfikatora.

Na podstawie przeprowadzonych badań trwałościowych stwierdzono, że kompozycja kompozytowa, która charakteryzuje się najlepszymi wynikami pod kątem wytrzymałości trwałościowej to PA46/PTFE/CNT/SM.

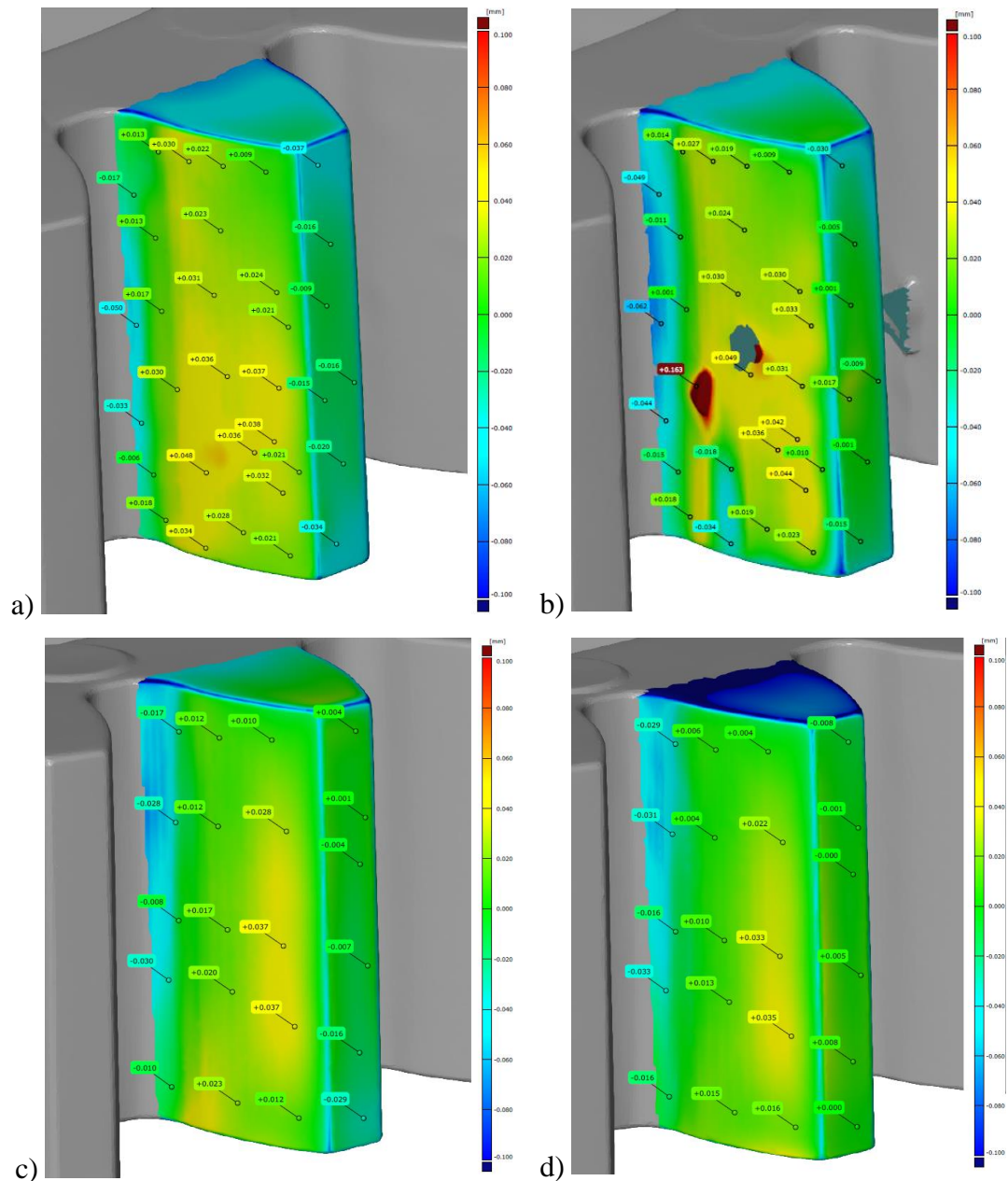
III.12. Analiza geometrii zębów KZ25 i KZ17 po testach trwałościowych

Po testach trwałościowych przeprowadzono analizę zmiany powierzchni zębów, które są newralgicznymi elementami geometrii kół zębatach. Ich pomiar wykonano zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale II.12. W celu wyboru reprezentatywnych obszarów geometrii zastosowano procedurę polegającą na ograniczeniu fragmentów analizowanych powierzchni. Dzięki temu otrzymano bardziej wnikliwą mapę tych newralgicznych obszarów. Analizę odchyłek badanej powierzchni wykonano dla trzech zębów spośród kół zębatach PA46, PA46/PTFE, PA46/CNT/SM oraz PA46/PTFE/CNT/SM, które były testowane w podrozdziale III.11.3. Zużycie zostało określone poprzez pomiar powierzchni współpracującej przed i po teście badawczym, z uwzględnieniem deformacji wynikających z pełzania materiału oraz zmian zachodzących na skutek zużycia ściernego. Ze względu na podobny obraz wyników, porównano powierzchnie reprezentatywnych zębów KZ25 i KZ17, które podczas testów przekładni były ustawione wg wariantu 1 lub 2.

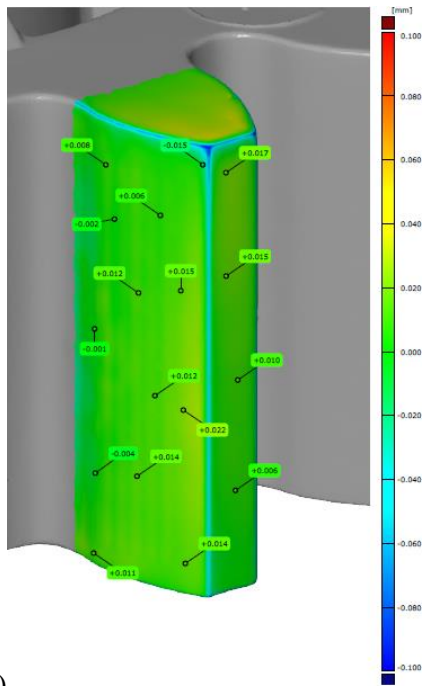
Rys. 124 a oraz 124 b, przedstawiają mapy odchyłek na współpracującej bocznej powierzchni zęba, pracującej wg wariantu 2. Wybrany do pomiaru ząb (rys. 124 a), mierzony przed badaniem trwałościowym, cechował się występowaniem dodatnich odchyłek zlokalizowanych w na całej długości średnicy tocznej oraz w głowie zęba, bliżej strony formowanej przez płaską matrycę gniazda formującego. Odchyłki w tych obszarach uzyskują maksymalną wartość +0,048 mm. Na rys. 124 b ten sam ząb po teście trwałościowym, cechuje się zmienionym zakresem odchyłek w wyżej opisanym rejonie. W okolicy średnicy tocznej pojawiło się zużycie powierzchni o wielkości -0,034 mm. W centralnym rejonie zęba widoczne są także dwa miejsca występowania dodatnich odchyłek powierzchni o wartości +0,163 mm. Na rys. 124 b podczas analizy stwierdzono niewielkie brakujące elementy geometrii modelu.

Na rys. 124 c i 124 d widoczne są geometrie przedstawiające dokładność zęba przed i po teście trwałościowym wykonanym zgodnie z wariantem 1. Na rys. 124 c zaobserwowano lokalne różnice geometrii w rejonie głowy zęba i niewielkim odcinku średnicy tocznej. Różnice te wynoszą do +0,037 mm. Po testach przekładni stwierdzono że geometria powierzchni bocznej zęba znacznie zbliżyła się do wzorca. Siatka zęba KZ25 (PA46/PTFE/CNT/SM) nie uwidoczniła śladów zużycia powierzchni współpracującej.

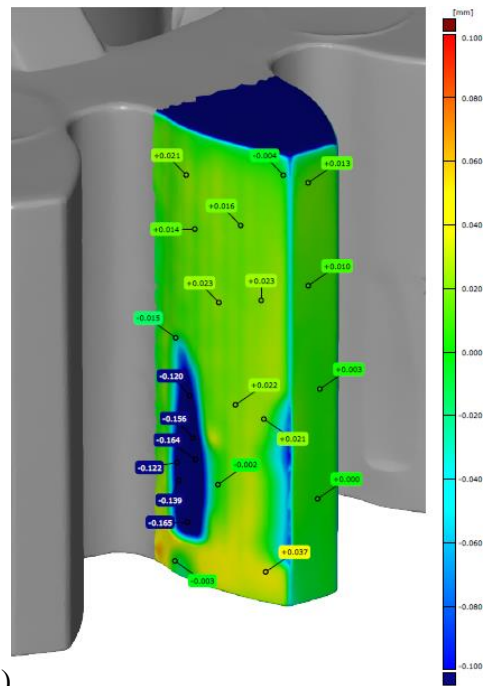
Przed i po testach trwałościowych przekładni PA46/PTFE/CNT/SM zmierzono obszar lokalnych odchyłek powierzchni zęba KZ17. Na rys. 125 b widoczny jest znaczny ubytek powierzchni w okolicy średnicy tocznej (-0,165 mm), powstały na skutek zużycia ściernego podczas testu wykonanego wg wariantu 2. Kolejne miejsce ubytków powierzchni jest zlokalizowane w okolicy współpracującej strony wierzchołka zęba. Porównując lokalne geometrie KZ17 przedstawione na rys. 125 c i d, w przypadku zęba po testach trwałościowych stwierdzono zmniejszenie się zakresu odchyłek w obszarze głowy i średnicy tocznej. Wyjątkiem jest rejon stopy zęba, gdzie po badaniu pojawił się ubytek materiału wynoszący -0,038 mm.



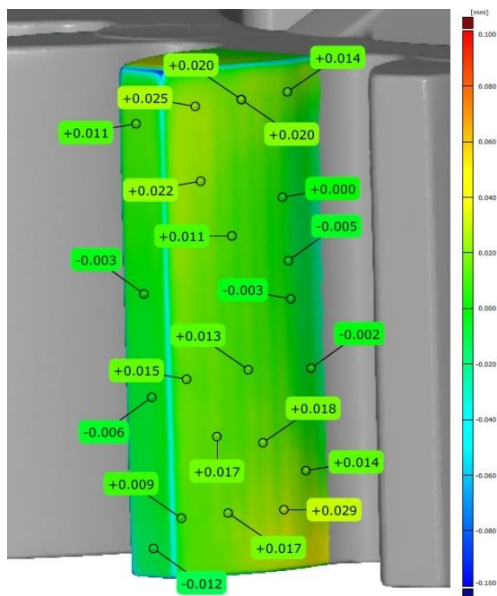
Rys. 124. Lokalna analiza dokładności odwzorowania geometrii nominalnych modeli zęba w kole KZ25 (PA46/PTFE/CNT/SM), ze zdefiniowanymi punktami inspekcyjnymi siatki: a) strona współpracująca przed badaniem trwałościowym zgodnym z wariantem 2 (bez wstępnego docierania), b) strona współpracująca po badaniu trwałościowym zgodnym z wariantem 2 (bez wstępnego docierania), c) strona współpracująca przed badaniem trwałościowym zgodnym z wariantem 1 (bez wstępnego docierania), d) strona współpracująca po badaniu trwałościowym zgodnym z wariantem 1 (bez wstępnego docierania)



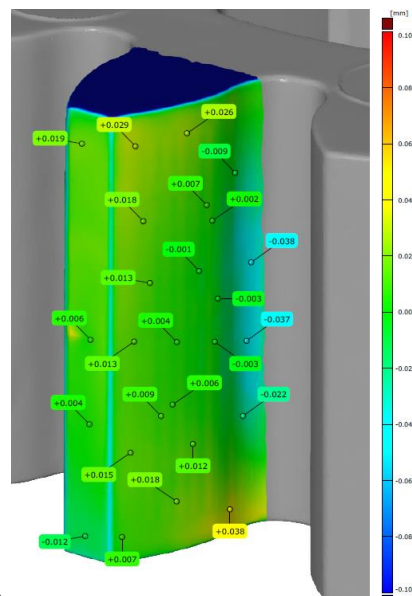
a)



b)



c)



d)

Rys. 125. Lokalna analiza dokładności odwzorowania geometrii nominalnych modeli zęba w kole KZ17 (PA46/PTFE/CNT/SM), ze zdefiniowanymi punktami inspekcyjnymi siatki: a) strona współpracująca przed badaniem trwałościowym zgodnym z wariantem 2 (bez wstępnego docierania), b) strona współpracująca po badaniu trwałościowym zgodnym z wariantem 2 (bez wstępnego docierania), c) strona współpracująca przed badaniem trwałościowym zgodnym z wariantem 1 (bez wstępnego docierania), d) strona współpracująca po badaniu trwałościowym zgodnym z wariantem 1 (bez wstępnego docierania)

Lokalna analiza dokładności odwzorowania mierzonych geometrii KZ25 i KZ17, potwierdza wyniki zużycia przekładni uzyskane w testach przeprowadzanych na stanowisku do badania trwałości. Koła zębate ułożone podczas testu trwałościowego, w sposób kompensujący skurcz przetwórczy (wariant 1) charakteryzują się wyraźnie mniejszym zużyciem powierzchni współpracującej zęba (rys. 124 c – d; 125 c – d).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach pracy wytypowano i otrzymano materiały kompozytowe na osnowie poliamidowej, pod kątem otrzymywania elementów maszyn (kół zębatach). Określono właściwości mechaniczne oraz strukturalne znormalizowanych próbek, a także porównano wyniki pomiarów współrzędnościowych i badań trwałościowych kół zębatach, otrzymanych metodą formowania wtryskowego. Opracowano materiały kompozytowe na osnowie poliamidu 4.6 z dodatkiem wytypowanych modyfikatorów: nanonapełniaczy węglowych oraz środka smarnego, opartego na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylenowych. Zbadano także wpływ innych napełniaczy poprawiających właściwości użytkowe przekładni zębatach: włókna szklanego oraz środków smarnych tj. teflonu. Do badań wybrano jednostopniową przekładnię zębatą, składającą się z dwóch kół zębatach o geometriach uwydatniających wpływ skurczu przetwórczego. Na potrzeby niniejszej pracy wykonano formę wtryskową z wymiennymi wkładkami formującymi wytypowane koła zębatach.

Na podstawie analizy AMI przeprowadzono symulacje wypełnienia gniazd formujących KZ25 i KZ17 oraz rozmieszczenie punktów wtrysku. Rozpatrywane układy wlewowe gorąco i zimnokanałowe, miały nieznaczny wpływ na przemieszczanie się strugi uplastycznionego tworzywa w gniazdach formujących koła zębatach. Względy konstrukcyjne, jakościowe i ekonomiczne zdecydowały o wyborze układu zimnokanałowego. Symulacja ułożenia włókna szklanego ukazała jego dezorientację, wynikającą ze złożonej geometrii koła zębatach. Określono miejsca, w których włókna układają się kierunku równoległym lub prostopadłym do przepływu uplastycznionego czoła tworzywa polimerowego. Stwierdzono, że układ włókien w poszczególnych zębach wieńca jest niepowtarzalny, co najprawdopodobniej może skutkować niejednorodną wytrzymałością poszczególnych zębów. Orientacja wzmocnienia na wierzchołkach zębów pokazuje, że ich ułożenie może być powodem do szybszego zużycia się przekładni. Analiza linii łączenia ukazała, że są one głównie rozmieszczone w pobliżu piasty koła zębatach i nie będą mieć wpływu na wyniki wytrzymałości trwałościowej przekładni. Symulacja rozkładu skurczu objętościowego pozwoliła na określenie miejsc największego skurczu objętościowego zlokalizowanego w rejonie wrębów i czołowych powierzchni wieńca zębatach. Natomiast wierzchołki zębów i żebra cechowały się najmniejszą podatnością na skurcz. Stwierdzono, że geometria koła zębatach, układ wlewowy i rodzaj zastosowanego materiału, mają wpływ na ostateczny wynik skurczu objętościowego.

Wytypowane geometrie kół zębatach przystosowano pod kątem otrzymywania w technologii wtryskiwania. Określono miejsca występowania deformacji wynikających

z nierównomiernego skurczu i zdecydowano się na wprowadzenie zróżnicowanych naddatków technologicznych, równoważących wpływ skurczu objętościowego. Stwierdzono, że dokładnie ustalenie lokalnego skurczu, nie jest możliwe ze względu na charakter właściwości materiałów termoplastycznych. Wprowadzono zaokrąglenia i pochylenia elementów ścian czołowych kół zębatych, niwelujące ryzyko ich zdeformowania, podczas odformowania z gniazda formy wtryskowej. Omówiono także układy wlewowy, chłodzenia i wypychaczowi.

Przeprowadzenie rzeczywistych testów procesu wtrysku, potwierdziło równomierne wypełnianie się gniazd formujących koła zębate. Przedstawiono napotkane problemy produkcyjne i proces optymalizacji parametrów wtryskowych w celu otrzymania elementu pozbawionego wad przetwórczych.

Za pomocą analizy dokładności geometrycznej gniazd formujących wykonanej przy pomocy skanera optycznego, określono poprawność kształtowo – wymiarową, względem nominalnych modeli CAD. Dla KZ25 stwierdzono występowanie dodatnich odchyłek stali, w obrębie wewnętrznego obrysu wieńca i elementach formujących żebra. W obrębie zarysu zębów, stwierdzono lokalne odchylenia mierzonych powierzchni w zakresie od -0,05 do +0,03 mm dla KZ25 oraz od -0,02 do +0,02 mm dla KZ17. Jakość wykonania tego obszaru miała bezpośredni wpływ na jakość pracy i tempo zużycia testowanych w późniejszych badaniach przekładni zębatych. Analizy dokładności odwzorowania czołowych geometrii kół zębatych wskazywały na liczne miejsca deformacji w porówniu do modeli CAD. W przypadku KZ25 wykonanych z materiałów PA6 i PA6T/6I/30GF, stwierdzono dodatnie odchyłki powierzchni czołowych zębów, położonych na końcu drogi płynięcia tworzywa. Stwierdzono różnice globalnych odchyłek powierzchni, spowodowanych faktem, że do gniazda formy wtryskiwano tworzywa charakteryzujące się różnym skurczem objętościowym. Równomierny skurcz wzdłużny i poprzeczny materiału PA46 przełożył się na jednorodność odchyłek w obrębie powierzchni czołowych KZ25 i KZ17. Przyczyną licznych niezgodności mierzonych powierzchni kół zębatych, był fakt, że gniazda formy wtryskowej zostały zaprojektowane dla konkretnego tworzywa zawierającego 45 % włókna szklanego. Z uwagi na charakter podjętego problemu badawczego zdecydowano się na wtrysk materiałów polimerowych o zmiennym zakresie skurczu objętościowego. Stwierdzono, że niejednorodna orientacja włókna szklanego w kole zębatym, ma wpływ na anizotropię skurczu, która utrudnia uzyskanie zadowalającej dokładności odwzorowania rzeczywistej geometrii do nominalnego modelu CAD.

W ramach niniejszej pracy przy pomocy maszyny współrzędnościowej określono klasy dokładności składowych geometrycznych zęba: zarysu, podziałki, bicia promieniowego, grubości i topografii. Analiza tych parametrów uszeregowiała koła w 12 klasie dokładności lub

poza znormalizowaną skalą. Zgodnie z literaturą, polimerowe koła zębate otrzymane w procesie formowania wtryskowego najczęściej mieszczą się w zakresie między 10, a 12 klasą dokładności wg normy ISO 1328. Dla wykonanych pomiarów stwierdzono, że jedną z przyczyn powodujących różnice między rzeczywistym kształtem zęba, a jego nominalnym zarysem, jest nierównomierny skurcz. Pomiary wykazały, że w obrębie wierzchołka zęba skurcz jest mniejszy niż w obszarze stopy, co wpłynęło na pogorszenie klasy dokładności zarysów zębów. Składowe pomiary podziałki i linii zęba charakteryzowały się względnie ustabilizowanymi wynikami dokładności i osiągały 9 klasę. W związku z tym stwierdzono, że przeprowadzenie ponownej serii pomiarów z wprowadzeniem skorygowanego kąta zarysu, wpłynęłoby na uzyskanie wyższej klasy dokładności mierzonych kół zębatach. Na niskie wyniki dokładności współrzędnościowej na wpływ fakt, że wszystkie koła zębate zostały formowane przy pomocy takich samych geometrii gniazda, które miało skurcz założony względem konkretnego tworzywa. W przypadku polimerowych przekładni zębatach, niezadowalający wynik dokładności wykonania wieńca zębatego, jest rekompensowany obszarem kontaktu współpracujących zębów, wychodzącym poza linię styku. Wynika to z właściwości lepkosprężystych materiałów polimerowych i odkształceń profilu zębów podczas pracy przekładni.

W ramach przeprowadzonych badań opracowano autorskie stanowisko badawcze, którego głównym celem było porównanie trwałości przekładni zębatach, wykonanych z różnych materiałów polimerowych i kompozytowych. W toku badań zweryfikowano również wpływ skurczu przetwórczego na żywotność testowanych układów napędowych. Program cykli badawczych został opracowany eksperymentalnie. Zastosowano stałą odległość luzu międzyzębnego, wynikającą z rozszerzalności cieplej polimerów i zmiennego skurczu mającego wpływ na dokładność współrzędnościową kół zębatach.

Określono warunki brzegowe przekładni zębatach wykonanych z niemodyfikowanych PA6 i PA66. Przeprowadzone testy pozwoliły na porównanie właściwości wytrzymałości trwałościowej wytypowanych materiałów. Badania prowadzono w warunkach prędkości obrotowej w zakresie 500 – 950 obr./min. W przypadku polimerów PA6 i PA66 obserwowano gwałtowny skok wzrostu temperatury w trakcie zwiększania oddziałujących naprężeń na powierzchnię zęba. Z uwagi na zmiany zarysu zębów, pogorszeniu uległy warunki współpracy, co skutkowało zwiększeniem się luzu międzyzębnego. Doprowadziło to do wzrostu obciążeń dynamicznych i pogłębiania się zjawiska zużycia przekładni. Dla przekładni zębatej otrzymanej z materiałów nienapełnionych obserwowano liczne przyczyny jej zużycia: ścierne, topnienie się, deformacje i złamania zębów. Niektóre testy przerywano awaryjnie w powodu zniszczenia

przekładni i temperatury pracy dochodzącej do nawet ok. 180 °C. Warto zaznaczyć, że moment obrotowy wynosił wtedy 9 Nm.

Topienie się wierzchniej powierzchni bocznej i deformacje zębów, następowały, gdy temperatura pracy zęba zbliżała się do wartości mięknięcia wg Vicat'a. Niskie przewodnictwo cieplne polimerów prowadziło do jego punktowej kumulacji w obrębie zębów. Zjawisko było potęgowane przez właściwości rozszerzalności cieplnej polimerów. Wzrost temperatury przekładał się na gwałtowny spadek wytrzymałości mechanicznej, która uniemożliwiała dalszą pracę przekładni zębatej.

Przekładnie wykonane z materiałów wzmocnionych włóknem szklanym (tj. PPA/35GF, PA6T/6I/30GF, PA66/6T/35GF PA66/6T/50GF PA66/PTFE/30GF), charakteryzowały się wyższą wytrzymałością trwałościową, w porównaniu do standardowych polimerów, badanych w identycznych warunkach. Obserwowano zwiększony poziom ciśnienia akustycznego w zestawieniu z materiałami niewzmocnionymi. Przypuszczano, że wpływ na to mogły mieć nie tylko parametry testu, ale geometria zębów wynikająca z anizotropii skurczu dla tworzyw wzmocnionych. Wzrost temperatury i tarcia podczas testu układów napędowych, przyczynił się do zużycia ściernego, przypaleń i kruszenia się powierzchni wierzchniej zębów. Zauważono, że obecność włókna szklanego, wzmacnia ilość odprysków podczas ścierania się zewnętrznych warstw zęba. Skutkowało to zwiększeniem się chropowatości powierzchni współpracujących. Zauważono, że wżery, będące wynikiem zmęczenia materiału w warstwie powierzchniowej. Wyższy moduł sprężystości materiałów z zawartością włókna szklanego, skutkował wzrostem naprężeń ścinających działających na powierzchnię zęba.

Dla trzech wytypowanych materiałów PA46, PA46/PTFE oraz PA66/6T/35GF, charakteryzujących się najwyższą trwałością w poprzednich seriach, zbadano wpływ skurczu przetwórczego i wstępnego docierania powierzchni bocznej zęba. Oddziaływanie skurczu na trwałość przekładni oceniono poprzez dwa sposoby ułożenia kół zębatych. W wariancie 1, żebra niesymetrycznych kół zębatych były skierowane w przeciwną stronę, natomiast w wariancie 2 – w tym samym kierunku. Wstępne docieranie przeprowadzono przy pomocy kół zębatych wykonanych metodą spiekania proszków metali DMLS. Dla materiałów PA46 i PA46/PTFE ten dodatkowy etap poskutkowało obniżeniem się temperatury pracy o 3 °C, podczas docelowego badania. Świadczyło to o lepszym dopasowaniu się zębów dwóch współpracujących kół. W przypadku PA66/6T/35GF odnotowano przeciwny efekt, czyli wzrost temperatury i zużycia ściernego.

Na podstawie otrzymanych wyników badań, wytypowano materiały charakteryzujące się najlepszą wytrzymałością trwałościową w dotychczasowych testach – PA46 i PA46/PTFE.

Przy pomocy technologii wytłaczania, otrzymano dwa nowe hybrydowe kompozyty polimerowe zawierające wielościennie nanorurki węglowe i środek smarny oparty na kwasach tłuszczowych, kwasie oktakozanowym i estrach etylenowych.

W ostatniej serii badań porównano dwa warianty ułożenia względem siebie kół zębatych oraz wpływ modyfikacji osnowy polimerowej na trwałość przekładni, która została wykonana z materiałów: PA46, PA46/PTFE, PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM.

Koła zębate ułożone tak, że ich żebra były skierowane w tym samym kierunku, charakteryzowały się najszybszym zużyciem, co wynikało z niesymetrycznej geometrii elementu napędowego i braku współpracy między zębami. Wraz ze wzrostem momentu hamującego, zwiększała się także delta temperatury między układem pracującym w wariancie 2 bez i z dodatkowym docieraniem. Takie ułożenie kół wykazuje negatywny wpływ skurczu wymagającego kompensacji na etapie projektowania przekładni.

W tych samych parametrach prędkości i momentu obrotowego, przekładnie pracujące wg wariantu 1, charakteryzowały się najniższym wzrostem temperatury, w przypadku każdego z badanych materiałów: PA46, PA46/PTFE, PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM. Wynikało to z kompensacji skurczu przetwórczego wtryskiwanych kół zębatych.

Modyfikacja materiałów PA46 i PA46/PTFE, pod wpływem wprowadzenia do struktury CNT i SM, zapocentowała znacznym wzrostem trwałości nowych przekładni. Wynikało to ze wzrostu ilości ciepła odprowadzanego z zęba i zmniejszenia się tarcia, pomiędzy współpracującymi powierzchniami.

Przekładnia z PA46/CNT/SM charakteryzowała się w IV cyklu, temperaturą niższą o 28,8 °C w porównaniu do PA46 (PA46 – 78,0 °C; PA46/CNT/SM - 49,2 °C). Różnica w tym samym punkcie badania dla układu kół zębatych z PA46/PTFE/CNT/SM wynosiła tylko 19,3 °C (PA46/PTFE – 74,2 °C; PA46/PTFE/CNT/SM – 54,9 °C). Stwierdzono, że tak duża rozbieżność mogła wynikać z niekompatybilności PTFE do CNT i SM. Wynikiem tego było ograniczenie pełnych możliwości modyfikacji przez wprowadzone dodatki.

W wyniku przeprowadzenia czterech serii trwałościowych badań przekładni zębatej, wytypowano kompozyt charakteryzujący się najmniejszym zużyciem i najniższym uzyskanym przyrostem temperatury styku. Jest to PA46/CNT/SM. Podczas 35 minutowego testu, gdy ułożenie kół było zgodne z wariantem 1, prędkość obrotowa wynosiła 750 obr./min, a zmienny moment hamujący wynosił do 17 Nm, uzyskano wzrost temperatury do 49,2 °C.

W ostatnim z badań przeprowadzono lokalną analizę dokładności odwzorowania geometrii nominalnych modeli zęba po testach trwałościowych pracujących wg wariantu 1 i 2. Dla wariantu 1 stwierdzono, że doszło do wygładzenia się nierówności w obszarze głowy

i średnicy tocznej, a wyniki mierzonej siatki po testach, jest bliższy modelowi nominalnemu. W przypadku wariantu 2 obserwowano ubytek powierzchni w obrębie średnicy tocznej i w rejonie wierzchołka zęba.

Dodatkowo przeprowadzone w ramach pracy, badania dotyczące opracowania nowej grupy materiałów kompozytowych stosowanych w przemyśle automotive, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wprowadzenie do matrycy polimerowej włókna szklanego spowodowało znaczący wzrost odporności na dynamiczne pękanie (udarności Charpy'ego z karbem) badanych kompozytów. Natomiast dodatek PTFE przyczynił się do spadku tego parametru o około 12 %. Obecność wielościennych nanorurek węglowych w osnowie polimerowej, wpłynęła pozytywnie na zwiększenie udarności o ok. 11,5 %, dla otrzymanych kompozytów PA46/CNT/SM oraz PA46/PTFE/CNT/SM. Efekt ten uzyskano dzięki odpowiednim warunkom homogenizacji nanorurek, które charakteryzują się rozwiniętą powierzchnią właściwą w kompozytach eksfoliowanych (PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM), a co za tym idzie wzrost adhezji nanonapełniacz-osnowa polimerowa;
- uzyskano poprawę modułu Younga i naprężenia zrywającego dla kompozytów zawierających włókno szklane. Obserwowano, że parametry te rosły wraz ze stopniem napełnienia, z wyjątkiem pozycji PA66/PTFE/30GF, która mimo wysokiego modułu sprężystości, charakteryzowała się niższą od spodziewanej, wartością naprężenia zrywającego. Dodatek nanorurek węglowych poprawił sztywność kompozytów o ok. 4,8 %. Stało się tak, ponieważ CNT mają zdolność do poprawy wiązań międzyfazowych i podniesienia poziomu krystalizacji w matrycy polimerowej;
- obecność w kompozycie dodatku PTFE, zaowocowała nieznacznym spadkiem trzech mierzonych parametrów wytrzymałościowych;
- zawartość włóknistego wzmocnienia w osnowie poliamidowej spowodował wzrost twardości w skali Shore'a D. Analogicznie tak jak w przypadku własności wytrzymałościowych i udarnościowych, zaobserwowano nieznaczny spadek twardości dla kompozytów zawierających teflon. Natomiast badana twardości hybrydowych kompozytów zawierających dodatek CNT i SM (PA46/CNT/SM i PA46/PTFE/CNT/SM) nieznacznie uległa
- mikrostruktura badanych kompozytów obserwowana przy pomocy SEM, potwierdziła równomierny rozkład napełniaczy i nanonapełniaczy w osnowie polimerowej. Dla kompozytu PA6T/6I/30GF zaobserwowano niską kompatybilność połączenia między włóknem szklanym

a osnową PA6. Przełożyło się to na obserwowany spadek badanych własności mechanicznych i trwałościowych dla tego kompozytu. Stwierdzono brak aglomeratów CNT i SM.

- kompozyty z dodatkiem wielościennych nanorurek węglowych nie wykazywały obecności aglomeratów. Dodatek kompatybilizatora i CNT podczas wytłaczania, wpłynął na bardzo dobrą homogenizację środka smarnego w matrycy polimeru.

Uzyskane wyniki badań pozwolą na przyspieszenie procesu dopracowania kół zębatych otrzymanych z innowacyjnych kompozycji polimerowych, stosowanych w branży motoryzacyjnej. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano materiał, który ma duże możliwości zastosowania w niektórych elementach stosowanych w branży automotive. W szczególności dotyczy to układów napędowych o geometrii analizowanej w ramach niniejszych badań, narażonych na zmienne warunki pracy oraz wysokie momenty obrotowe (do 17 Nm), w odniesieniu do większości kół zębatych wykonanych z materiałów polimerowych. Opracowanie i scharakteryzowanie właściwości mechanicznych i trwałościowych wytypowanej przekładni zębatej, wykonanej z kompozytu PA46/CNT/SM, pozwoliło na uzupełnienie wiedzy, dotyczącej przyczyn zapobiegania awarii polimerowych układów napędowych. Wyniki tych badań zostają wykorzystane w pracach rozwojowych firmy Splast, związanych z wysokoprecyzyjnymi elementami konstrukcyjnymi z branży motoryzacyjnej.

LITERATURA

- [1] Abbasnezhada, N.; Khavandib, A.; Fitoussia, J.; Arabib; H.; Shirinbayana; M.; Tcharkhtchia; A. (2018). In fluence of loading conditions on the overall mechanical behavior of polyether-ether-ketone (PEEK). *International Journal of Fatigue*, 109, 83 - 92, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.12.010>
- [2] Adesanya, A.; Abdulkareem, A.; Adesina, L. M. (2020). Predicting extrusion process parameters in Nigeria cable manufacturing industry using artificial neural network. *Heliyon*, 6 (7), e04289, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04289>
- [3] Ageyeva, T.; Horváth, S.; Kovács J. G. (2019). In-Mold Sensors for Injection Molding: On the Way to Industry 4.0. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19, <http://dx.doi.org/10.3390/s19163551>
- [4] AGMA 2001-D04. Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, 2004
- [5] Al Rashid, A.; Ikram, H.; Koç, M. (2022). Additive manufacturing and mechanical performance of carbon fiber reinforced Polyamide - 6 composites. *Materials Today: Proceedings*, 62, 6359 - 6363, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.339>
- [6] Al-Furjan, M. S. H.; Shan, L.; Shen, X.; Zarei, M. S.; Hajmohammad, M. H.; Kolahchi, R. (2022). A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced rolymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 2930 - 2959, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.008>
- [7] Ali, I.; Basheer, A. A; Kucherova, A.; Memetov, N.; Pasko, T.; Ovchinnikov, K.; Tkachev, A. (2019). Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids*, 251 - 266, doi:10.1016/j.molliq.2019.01.113
- [8] Alishahi, E.; Shadlou, S.; Doagou-R, S.; Ayatollahi, M.R. (2013). Effects of Carbon Nanoreinforcements of Different Shapes on the Mechanical Properties of Epoxy-Based Nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 298, 670 - 678, <https://doi.org/10.1002/mame.201200123>
- [9] Andrei, L.; Andrei, G.; Epureanu, A.; Birsan, I. G. (2006). Synthesis and analysis of plastic curved facewidth spur gears. In *Proceedings of the National Tribology Conference*, 8, 8 - 16, <https://www.scribd.com/document/451220328/SYNTHESIS-AND-ANALYSIS-OF-PLASTIC-CURVED-FACEWIDTH-SPUR-GEARS>
- [10] Bahadur, S.; Polineni, V. K. (1996). Tribological studies of glass fabric-reinforced polyamide composites filled with CuO and PTFE. *Wear*, 200, 95 - 104. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07327-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07327-9)

- [11] Bahloul, A.; Doghri, I; Adam, L. (2021). Linking a phase field model for polymer crystallization to full-field micromechanical simulations of semi-crystalline polymers. *Computational Materials Science*, 199, 110685, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110685>
- [12] Basavaraj, E.; Ramaraj, B.; Lee, J. H. (2013). Microstructure, thermal, physico-mechanical and tribological characteristics of molybdenum disulphide - filled polyamide 66/carbon black composites. *Polymer Engineering and Science*, 53, 1676 - 1686. <https://doi.org/10.1002/pen.23428>
- [13] Basavaraj, E.; Ramaraj, B.; Lee, J. H. (2013). Siddaramaiah, Polyamide 6/carbon black/molybdenum disulphide composites: Friction, wear and morphological characteristics. *Materials Chemistry and Physics*, 138 (2 - 3), 658 - 665, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.12.035>
- [14] Bely, V.A.; Sviridenok, A.I.; Petrokovets, M.I.; Savkin, V.G.; Granville-Jackson, P. (1982). *Friction and Wear in Polymer Based Materials*. Pergamon Press, 34 - 54, ISBN 978-0-08-025444-9
- [15] Berer, M.; Major, Z.; Pinter, G. (2013). Elevated pitting wear of injection molded polyetheretherketone (PEEK) rolls. *Wear*, 297, 1052 - 1063, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.062>
- [16] Berer, M.; Tscharnuter, D.; Pinter, G. (2015). Dynamic mechanical response of polyetheretherketone (PEEK) exposed to cyclic loads in the high stress tensile regime. *International Journal of Fatigue*, 80, 397 - 405, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.06.026>
- [17] Bojarska, Z.; Kopytowski, J.; Mazurkiewicz-Pawlicka, M.; Bazarnik, P.; Gierlotka, S.; Rozen, A.; Makowski, Ł. (2021). Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties. *Tribology International*, 160, 106999, 1 – 12, <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106999>
- [18] Borkowski, K. (2015). Przemysł tworzyw sztucznych - materiałów XXI wieku, *Mechanik*, 4; 278 - 282; DOI: 10.17814/mechanik.2015.4.158
- [19] Bravo, A.; Koffi, D.; Toubal, L.; Erchiqui, F. (2015). Life and damage mode modeling applied to plastic gears. *Engineering Failure Analysis*, 58, 113 - 133. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.040>
- [20] Brinson, H. F.; Brinson, L. C. (2015). *Introduction. W: Polymer Engineering Science and Viscoelasticity*. Springer, Boston, MA., 15 - 67, DOI: 10.1007/978-1-4899-7485-3_1

- [21] Cathelin, J.; Letzelter, E.; Guingand, M.; Vaujany, J. P.; Chazeau, L. (2013). Experimental and Numerical Study of a Loaded Cylindrical PA66 Gear. *Journal of Mechanical Design*, 135, 041007. 1 - 7, <https://doi.org/10.1115/1.4023634>
- [22] Černe, B.; Duhovnik, J.; Tavčar, J. (2019). Semi-analytical flash temperature model for thermoplastic polymer spur gears with consideration of linear thermo-mechanical material characteristics. *J. Comput. Des. Eng.*, 6, 617 - 628. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.03.001>
- [23] Černe, B.; Lorber, R.; Duhovnik, J.; Tavčar, J. (2020). Influence of temperature and strain rate-dependent viscoplastic properties of polyoxymethylene on the thermo-mechanical response of a steel-polyoxymethylene spur gear pair. *Materials today communications*, 25, 101078, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101078>
- [24] Chai, B.; Eisenbart, B.; Nikzad, M.; Fox, B. L.; Blythe, A.; Blanchard, P.; Dahl, J. (2021). Simulation-based optimisation for injection configuration design of liquid composite moulding processes: A review. *Composites Part A-applied Science and Manufacturing*, 149, 106540, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106540>
- [25] Cheng, X. (2013). *Nanostructures: fabrication and applications*. Woodhead Publishing Limited, <https://doi.org/10.1533/9780857098757.348>
- [26] Dearn, K. D.; Hoskins, T.; Andrei, L.; Walton, D. (2013). Lubrication Regimes in High-Performance Polymer Spur Gears. *Advances in Tribology*, 2013, 1 - 9, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/987251>
- [27] Dengel, B. (2021). Finding the ideal materials for gears. *Raw Materials Coating & Finishing*, 27 - 30; <https://gearsolutions.com/media/uploads/2021/01/0121-F1.pdf>
- [28] DIN 3990-1:1987-12 - Calculation of Load Capacity of Cylindrical Gears, Introduction and General Influence Factors. Standard, 1987
- [29] Djukic, S.; Bocahut, A.; Bikard, J.; Long D. R. (2020) Mechanical properties of amorphous and semi-crystalline semi-aromatic polyamides. *Heliyon*, 6(4), e03857, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03857
- [30] DuPont Zytel PLS95G35DH1 BK549; Produkt Information; <https://www.ulprospector.com/plastics/en/datasheet/219367/zytel-plus-pls95g35dh1-bk549>
- [31] DuPont Zytel PLS95G50DH2 BK261; Produkt Information; <https://www.ulprospector.com/plastics/en/datasheet/138643/zytel-plus-pls95g50dh2-bk261>
- [32] Düzcükoğlu, H. (2009). Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity. *Tribology International*, 42, 1146 - 1153, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.03.009>

- [33] Dziubek, T. (2019). Egzemplifikacja możliwości zwiększenia dokładności geometrycznie złożonych części maszyn wytwarzanych z zastosowaniem wybranych metod addytywnych, 31 - 50, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, ISBN 978-83-7934-292-1
- [34] Evans, S.M.; Keogh, P.S. (2019). Wear mechanisms in polyoxymethylene spur gears. *Wear*, 428 - 429, 356 - 365, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.027>
- [35] Fejdyś, M.; Łandwijt, M. (2010). Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe. *Techniczne Wyroby Włókiennicze*, 18, 1/2, 12 - 22, bwmetal.element.baztech-article-LOD7-0030-0001
- [36] Feng, Q.; Zou, S.; Li, H.; Dou, M.; Huang, F. (2020). Review of Polymer Self-lubricating Coatings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 526, DOI 10.1088/1755-1315/526/1/012077
- [37] Folgar, F.; Tucker, C.L. (1984). Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 3, 98 - 119. DOI: 10.1177/073168448400300201
- [38] Franke R.; Lehmann, D.; Kunze, K. (2007). Tribological behaviour of new chemically bonded PTFE polyamide compounds. *Wear*, 262 (3 - 4), 242 - 252, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.05.001>
- [39] Frącz, W.; Janowski, G. (2019). Ocena wpływu wyboru modelu mikromechanicznego na prognozowanie orientacji włókien oraz właściwości mechaniczne kompozytu WPC. *Scientific Letters of Rzeszow University of Technology – Mechanics*, DOI:10.7862/rm.2019.01
- [40] Friedrich, K. (2018). Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 1 (1), 3 - 39, <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>
- [41] Friedrich, K.; Zhang, Z.; Schlarb, A. K. (2005). Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 65, 2329 - 2343, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.028>
- [42] Friedrich, K.; Abdulhakim, A. A. (2013). Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Appl Compos Mater*, 107 - 128; DOI 10.1007/s10443-012-9258-7
- [43] Furlan, K. P.; Mello, J. D.; Klein, A. N. (2018). Self-lubricating composites containing MoS₂: A review. *Tribology International*, 120, 280 - 298, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.033>

- [44] Garcia - Gonzalez, D.; Rusinek, A.; Jankowiak, T.; Arias, A. (2015). Mechanical impact behavior of polyether-ether-ketone (PEEK). *Composite Structures*, 124, 88 - 99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.061>
- [45] Gasparina, A. L.; Corsoa, L. L.; Tentardinib, E. K.; Reis Nunes, R. C.; Camargo Forted, M. M.; Oliveirae R. V. (2012). Polyamide Worm Gear: Manufacturing and Performance. *Materials Research*, 15 (3), 483 - 489, DOI: 10.1590/S1516-14392012005000056
- [46] Gim, J.; Turng, L. (2022). A review of current advancements in high surface quality injection molding: Measurement, influencing factors, prediction, and control. *Polymer Testing*, 115, 10771, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107718>
- [47] Global Thermoplastic Composites Market to 2027: Trends, Opportunities and Competitive Analysis. Market Research Report, 2022, ID: 5691857
- [48] Gnatowski, A.; Gołębski, R.; Sikora, P. (2020). Analysis of the Impact of Changes in Thermomechanical Properties of Polymer Materials on the Machining Process of Gears. *Polymers*, 13, <https://dx.doi.org/10.3390/polym13010028>
- [49] Gordon, D. H.; Kukureka, S. N. (2009) The wear and friction of polyamide 46 and polyamide 46/aramid-fibre composites in sliding-rolling contact, *Wear* 267, 669 - 678, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.11.026>
- [50] Grellmann, W.; Langer, B. (2013). Methods for Polymer Diagnostics for the Automotive Industry. *Materials Testing*, 55, 17 - 22, <https://doi.org/10.3139/120.110403>
- [51] Gruin, I. (2003). *Materiały polimerowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN; 16 - 142, ISBN: 978-83-0114-005-2
- [52] Guevara - Morales, A.; Figueroa - López, U. (2014). Residual stresses in injection molded products. *Journal of Materials Science*, 49, 4399 – 4415, DOI:10.1007/s10853-014-8170-y
- [53] Gupta, K. K.; Laubscher, R. F.; Jain, N. K. (2017). Advanced Gear Manufacturing and Finishing: Classical and Modern Processes, 28 - 29, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804460-5.00001-8>
- [54] Hałasa E.; Heneczowski M. (2007). *Wprowadzenie do inżynierii termoodpornych materiałów polimerowych*. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, ISBN: 9788371994630
- [55] Hasl, C.; Liu, H.; Oster, P.; Tobie, T.; Stahl, K.; Getriebebau, F. F. (2017). Method for calculating the tooth root stress of plastic spur gears meshing with steel gears under consideration of deflection-induced load sharing. *Mechanism and Machine Theory*, 111, 152 - 163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.01.015>

- [56] Hasl, Ch.; Illenberger Ch.; Oster P.; Tobie T.; Stahl, K. (2018). Potential of oil-lubricated cylindrical plastic gears. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 12 (1), <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0016>
- [57] Hassan, H.H. (2013). An experimental work on the effect of injection molding parameters on the cavity pressure and product weight. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 675 - 686, DOI 10.1007/s00170-012-4514-4
- [58] Homik, W.; Połowniak, P. (2012). *Podstawy Konstrukcji Maszyn. Wybrane zagadnienia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 153 – 209, ISBN: 978-83-7199-764-8
- [59] Hoskins, T.; Dearn, K. D.; Kukureka, S. N.; Walton, D. A. (2011). Acoustic noise from polymer gears – A tribological investigation. *Materials & Design*, 32 (6), 3509 - 3515, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.041>
- [60] Hoskins, T.J.; Dearn, K.D.; Chen, Y.K.; Kukureka, S.N. (2014). The wear of PEEK in rolling–sliding contact - Simulation of polimer gear applications. *Wear*, 309, 35 - 42, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.09.014>
- [61] Humienny, R.; Postawa, P.; Stachowiak, T. (2016). Optymalizacja kształtu wypraski poprzez analizę rozkładu temperatury na powierzchni wypraski z wykorzystaniem pomiarów termowizyjnych. *Przetwórstwo Tworzyw*, 22, 5 (173), 421 - 427, http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-5f697516-4390-428d-9dbb-da9980dcf134/c/Humienny_Optymalizacja_PT_2016_5.pdf
- [62] ISO 1328-1:1995 - Cylindrical Gears—ISO System of Accuracy—Part 1: Definitions and Allowable Values of Deviations Relevant to Corresponding Flanks of Gear Teeth. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1995
- [63] ISO 1328-1:2013 - Cylindrical gears - ISO system of flank tolerance classification - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth, 2013
- [64] ISO 6336-1:2006 - Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 1: Basic Principles, Introduction and General Influence Factors, Standard, 2006
- [65] ISO 6336-3:2019, Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears - Part 3: calculation of Tooth Bending Strength, 2019
- [66] Jeng, C. C.; Chen, M. (2000). Flexural Failure Mechanism in Injection Molded Carbon Fiber/PEEK Composites. *Composites Science and Technology*, 60, 1863 - 1872, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00076-2)
- [67] Jindal, P.; Yadav, R. N.; Kumar, N. (2017). Dynamic Mechanical Characterization of PC/MWCNT Composites under Variable Temperature Conditions. *Iranian Polymer Journal*, 26 (6), 445- 452, <https://doi.org/10.1007/s13726-017-0533-1>

- [68] Józwik, J.; Tofil, A.; Banaszek, M.; Kuric, I. (2012). Wybrane aspekty obróbki skrawaniem polimerowych kompozytów włóknistych i oceny chropowatości powierzchni. 15, 205 - 220, http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPL2-0028-0021/c/httpnt_pollub_plpdfnr1521.pdf
- [69] Kapelevich, A. L.; McNamara, T. (2005). Direct Gear Design for Automotive Applications. SAE Technical Paper 2005-01-1817, <https://doi.org/10.4271/2005-01-1817>
- [70] Karami, P.; Salkhi Khasraghi, S.; Hashemi, M.; Rabiei, S.; Shojaei, A. (2019). Polymer/nanodiamond composites - a comprehensive review from synthesis and fabrication to properties and applications. *Advances in colloid and interface science*, 269, 122 - 151, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.04.006>
- [71] Karami, P.; Shojaei, A. (2017). Improvement of dry sliding tribological properties of polyamide 6 using diamond nanoparticles. *Tribology International*, 115, 370 - 377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.003>
- [72] Karger-Kocsis, J.; Zhang, Z. (2005). Structure–property relationships in nanoparticle/semi-crystalline thermoplastic composites. *Mechanical properties of polymers based on nanostructure and morphology*, CRC Press, 547 - 596
- [73] Karthik, K.; Rajamani, D.; Manimaran, A.; Udayaprakash, J. (2021). Evaluation of tensile properties on Glass/Carbon/Kevlar fiber reinforced hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1655 - 1660, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.049>
- [74] Kästner, M.; Obst, M.; Brummund, J.; Thielsch, K.; Ulbricht, V. (2012). Inelastic material behavior of polymers - Experimental characterization, formulation and implementation of a material model. *Mechanics of Materials*, 52, 40 - 57, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.04.011>
- [75] Kazmer, D. O. (2016). *Injection Mold Design Engineering, Second Edition*, 291 - 324, ISBN 978-1-56990-570-8
- [76] Khanam, P. N.; AlMaadeed, M. A.; Ouederni, M.; Harkin-Jones, E.; Mayoral, B.; Hamilton, A.R.; Sun, D. (2016). Melt processing and properties of linear low density polyethylene-graphene nanoplatelet composites. *Vacuum*, 130, 63 - 71, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.04.022>
- [77] Kim G. H.; Lee J. W.; Seo T. I. (2013). Durability Characteristics Analysis of Plastic Worm Wheel with Glass Fiber Reinforced Polyamide. *Materials (Basel)*, 10, 6 (5), 1873 - 1890, doi: 10.3390/ma6051873

- [78] Kościuszko, A.; Marciniak, D.; Sykutera, D. (2021). Post-Processing Time Dependence of Shrinkage and Mechanical Properties of Injection-Molded Polypropylene. *Materials*, 14, 22, <https://dx.doi.org/10.3390/ma14010022>
- [79] Kowalska, B. (2007). Injection molding contraction and p-v-T relation. *Polimery*, 52 (4), 280 – 285, DOI:10.14314/polimery.2007.280
- [80] Kozik, B. (2019). Dwudrożne przekładnie zębate, wykonane metodami szybkiego prototypowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, ISBN: 978-83-7934-302-7
- [81] Kurokawa, M.; Uchiyama, Y.; Nagai, S. (1999). Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone. *Tribology International*, 32 (9), 491 - 497, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00078-X)
- [82] Li, H.; Wang, J.; Gao, S.; Chen, Q.; Peng, L.; Liu, K.; Wei, X. (2017). Superlubricity between MoS₂ Monolayers. *Advanced Materials*, 29, <https://doi.org/10.1002/adma.201701474>
- [83] Li, J. (2009). Mechanical properties of a polyamide 6-reinforced PTFE composite. *Mech. Compos. Mater.*, 45, 287 - 292, <https://doi.org/10.1007/s11029-009-9083-8>
- [84] Li, J. (2011). The Effect of PTFE on the Mechanical and Friction and Wear Properties of GF/PA6 Composites. *Advanced Materials Research*, 284 - 286, 2370 - 2373, DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.284-286.2370
- [85] Li, W.; Wood, A.; Weidig, R.; Mao, K. (2011). An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements. *Wear*, 271, 2176 - 2183, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.019>
- [86] Liang, X.; Zuo, M. J.; Feng, Z. (2018). Dynamic modeling of gearbox faults: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 852 - 876, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.05.024>
- [87] Lindholm, P.; Qin, J. (2013). Evaluation of mechanical and thermal stresses in polymer gear teeth through simulation approach, *Appl. Mech. Mater.*, 302, 468 - 473, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.302.468>
- [88] Lizama-Camara, Y. A.; Pinna, C.; Lu, Z. Y.; Blagdon, M. (2019). Effect of the injection moulding fibre orientation distribution on the fatigue life of short glass fibre reinforced plastics for automotive applications. *Procedia CIRP*, 85, 255 - 260, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.010>
- [89] Lu, Z.; Liu, H.; Zhu, C.; Song, H.; Yu, G. (2019). Identification of failure modes of a PEEK-steel gear pair under lubrication. *International Journal of Fatigue*, 125, 342 - 348, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.04.004>

- [90] Lu, Z.; Liu, H.; Wei, P.; Zhu, C.; Xin, D.; Shen, Y. (2020). The effect of injection molding luncker defect on the durability performance of polymer gears. *International Journal of Mechanical Sciences*, 180 (15), 105665, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105665>
- [91] Ma, H.; Suonan, A.; Zhou, J.; Yuan, Q.; Liu, L.; Zhao, X.; Lou, X.; Yang, C.; Li, D.; Zhang, Y. (2021). PEEK (Polyether-ether-ketone) and its composite materials in orthopedic implantation. *Arabian Journal of Chemistry*, 14 (3), 102977, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102977>
- [92] Maltby, A. (2005). Internal lubricants yield multiple benefits in injection moulding. *Plastics, Additives and Compounding*, 7, 28 - 31, [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(05\)70487-6](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(05)70487-6)
- [93] Mao, K. (2007). A new approach for polymer composite gear design. *Wear*, 262, 432 - 441, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.06.005>
- [94] Mao, K.; Langlois, P.; Hu, Z.; Alharbi, K.A.; Xu, X.; Milson, M.; Li, W.; Hooke, C. J.; Chetwynd, D.G. (2015). The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears. *Wear*, 332, 822 - 826. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.084>
- [95] Mao, K.; Li, W.; Hooke, C.; Walton, D. (2009). Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears. Paper presented at 17th International Conference on Wear of Materials, 639 - 645, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.10.005>
- [96] Mao, K.; Li, W.; Hooke, C.; Walton, D. (2010). Polymer gear surface thermal wear and it's performance prediction. *Tribology International*, 43 (1 - 2), 433 - 439, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.07.006>
- [97] Matkovič, S.; Kalin, M. (2021). Effects of slide-to-roll ratio and temperature on the tribological behaviour in polymer-steel contacts and a comparison with the performance of real-scale gears. *Wear*, 477, 203789, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203789>
- [98] Matkovič, S.; Pogačnik, A.; Kalin, M. (2021). Wear-coefficient analyses for polymer-gear life-time predictions: A critical appraisal of methodologies. *Wear*, 480 - 481, 203944, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203944>
- [99] McKeen, L. (2015). 6 - Polyamides (Nylons), The Effect of Creep and Other Time Related Factors on Plastics and Elastomers (Third Edition). *Plastics Design Library*, 247 - 320, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35313-7.00006-7>
- [100] Melick, I. H. (2007). Tooth-Bending Effects in Plastic Spur Gears Influence on load sharing, stresses and wear, *Gear Technol.* 24 (7), 58–66, Corpus ID:138484752
- [101] Meng, F.; Huang, F.; Guo, Y.; Chen, J.; Chen, X.; Hui, D.; He, P.; Zhou, X.; Zhou, Z. (2017). In situ intercalation polymerization approach to polyamide-6/graphite nanoflakes for

enhanced thermal conductivity. *Composites Part B-engineering*, 117, 165 - 173, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.02.043>

[102] Meng, H.; Sui, G.; Xie, G. Y.; Yang, R. (2009). Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition. *Composites Science and Technology*, 69 (5), 606 - 611, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.12.004>

[103] Mochalin, V. N.; Gogotsi, Y. (2015). Nanodiamond–polymer composites, *Diamond & Related Materials*, 58, 161 - 171, <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2015.07.003>

[104] Moghadam, A. D.; Omrani, E.; Menezes, P. L.; Rohatgi, P. K. (2015). Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene – A review. *Composites Part B-engineering*, 77, 402 - 420, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.014>

[105] Mohamed, O. A.; Masood, S. H.; Bhowmik, J. L. (2013). Experimental Investigations of Process Parameters Influence on Rheological Behavior and Dynamic Mechanical Properties of FDM Manufactured Parts. *Materials and Manufacturing Processes*, 31 (15), 1983- 1994, <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1127955>

[106] Mori, S.; Iwata, H. (1996). Relationship between tribological performance of liquid crystals and their molecular structure. *Tribology International*, 29, 35 - 39, [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00032-Y](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00032-Y)

[107] Nie W. Z. (2011). The effect of carbon nanotubes on the tribological behaviors of PEEK composites. *Adv Mater Res*, 295 - 297, 140 - 143, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.295-297.140>

[108] Nyholm, N.; Espallargas, N. (2023). Functionalized carbon nanostructures as lubricant additives - A review. *Carbon*. 201, 1200 - 1228, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.10.035>

[109] Ochęduszek K. (1985). *Koła zębate. Konstrukcja. Tom I*, WNT, ISBN: 9788363623043

[110] Ogorodnyk, O.; Lyngstad, O. V.; Larsen, M.; Martinsen, K. (2019). Application of feature selection methods for defining critical parameters in thermoplastics injection molding. *Procedia CIRP*. 81, 110 - 114, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.020>

[111] Oleksy M. (2014). *Technologia Rapid Prototyping hybrydowych nanokompozytów polimerowych stosowanych na koła zębate*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, ISBN 978-83-7199-957-7

[112] Oleksy, M. (2019). *Materiały polimerowe stosowane na elementy maszyn*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 12 - 16, ISBN 978-83-7934-284-6

- [113] Oleksy, M.; Budzik, G.; Bolanowski, M.; Paszkiewicz, A. (2021). Industry 4.0 Part II. Conditions in the area of production technology and architecture of IT system in processing of polymer materials. *Polimery*, 64 (5), 348 – 352, <https://doi.org/10.14314/polimery.2019.5.5>
- [114] Oleksy, M.; Budzik, G.; Sanocka-Zajdel, A.; Paszkiewicz, A.; Bolanowski, M.; Oliwa, R.; Mazur, Ł. (2021). Industry 4.0, processing of polymer materials, integrated information systems. *Polimery*, 63 (7 - 8), 531 - 535, <https://doi.org/10.14314/polimery.2018.7.7>
- [115] Ostrowska-Czubenko, J.; Pieróg, M.; Gierszewska, M. (2016). Modyfikacja chitozanu - krótki przegląd. *Wiadomości Chemiczne*, ISSN 0043-5104, e-ISSN 2300-0295
- [116] Pachorkar, P.; Singh, G.; Agarwal, N.; Srivastava, A. K. (2022). Multi response optimization of injection moulding process to reduce sink marks and cycle time. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.172>
- [117] Padhan, M.; Marathe, U.; Bijwe, J. (2020). Tribology of Poly(etherketone) composites based on nano-particles of solid lubricants. *Composites Part B-engineering*, 201, 108323, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108323>
- [118] Patpatiya, P.; Shastri, A.; Sharma, S.; Chaudhary, K.; Bhatnagar, V. (2022). ANN-predictive modeling and GA-optimization for minimizing dimensional tolerance in Polyjet Additive Manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 320 - 339, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.05.004>
- [119] Pearson, A.; Duncan, M.; Hammami, A. Naguib, H. E. (2022). Interfacial adhesion and thermal stability of high-density polyethylene glass fiber composites. *Composites Science and Technology*, 227, 109570, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109570>
- [120] Pervaiz, S.; Qureshi, T. A.; Kashwani, G.; Kannan, S. (2021). 3D Printing of Fiber-Reinforced Plastic Composites Using Fused Deposition Modeling: A Status Review. *Materials*, 14, <https://doi.org/10.3390/ma14164520>
- [121] Pikhurov, D. V.; Zuev, V. V. (2016). The Study of Mechanical and Tribological Performance of Fulleroid Materials Filled PA 6 Composites. *Lubricants*, 4 (2), 13, <https://doi.org/10.3390/lubricants4020013>
- [122] Pilipović, A.; Valentan, B.; Šercer, M. (2016). Influence of SLS processing parameters according to the new mathematical model on flexural properties. *Rapid Prototyping Journal*, 22, 258 – 268, <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2014-0092>
- [123] Pogacnik, A.; Kupec, A.; Kalin, M. (2017). Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*, 378, 17 - 26, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.118>

- [124] Pogacnik, A.; Tavčar, J. (2015). An accelerated multilevel test and design procedure for polymer gears. *Materials & Design*, 65, 961 - 973, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.016>
- [125] Prospekty informacyjne firmy Biesterfeld: Optymalizacja czasu wtrysku - cz. 1
- [126] Proy, J.; Massa, F.; Notta-Cuvier, D.; Lauro, F.; Tison, T.; Spingler, G. (2021). Integrating fibers and injection molding process variability in short-natural-fiber-reinforced thermoplastics behavior: A review. *Materials Today Communications*, 29, 102785, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102785>
- [127] Rabek J. (2013). *Współczesna wiedza o polimerach*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 6 - 12, 92 - 93, ISBN-13: 978-83-01-19245-7
- [128] Radzevich S.; Dudley D. W. (2002). *Handbook of Practical Gear Design*. Rozdział 1. CRC Press, Boca Raton, ISBN 9780367649029
- [129] Radzevich S. (2013). *Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis*. CRC Press, 3 - 34, ISBN 9781032318578
- [130] Rajak, D. K.; Pagar, D. D.; Menezes, P. L.; Linul, E. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers*, 11 (10), 1667, <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
- [131] Rajesh, J.; Bijwe, J.; Tewari, U. S. (2002). Abrasive wear performance of various polyamides. *Wear*, 252, 769 - 776, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00039-X)
- [132] Ravi, N.; Shanmugam, M.; Bheemappa, S.; Gowripalan, N. (2020). Influence of reinforcement on tribological properties of friction stir welded glass fiber reinforced polyamide 66. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 1052 - 1063, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.068>
- [133] Regis, M.; Lanzutti, A.; Bracco, P.; Fedrizzi, L. (2018). Wear behavior of medical grade PEEK and CFR PEEK under dry and bovine serum conditions. *Wear*, 408 - 409, 86 - 95, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.005>
- [134] Rezende Locatel, W.; Mohabeer, C.; Laurenti, D.; Schuurman, Y.; Guilhaume, N. (2022). Co-pyrolysis of beech wood and polyamide-6: Effect of HZSM-5 catalyst on the properties of pyrolysis oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 167, 105696; ISSN 0165-2370, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105696>
- [135] Roda-Casanova V.; Sanchez-Marin F. (2019). A 2D finite element based approach to predict the temperature field in polymer spur gear transmissions. *Mech Mach Theory*, 133, 195 - 210, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.019>

- [136] Schneider, T. (2019) Lightweight construction: First composite gearbox housing with layer-optimized organo sheeting weighs 30% less than a comparable aluminum component. *Reinforced Plastics*, 63 (1), 40 - 45, <https://doi.org/10.1016/j.repl.2017.11.018>
- [137] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R. (2004). Damage Mechanisms in Injection Molded Unreinforced, Glass and Carbon Reinforced Nylon 66 Spur Gears. *Applied Composite Materials* 11, 377 - 397, <https://doi.org/10.1023/B:ACMA.0000045313.47841.4e>
- [138] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R. (2006). Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears. *Polymer Testing*, 25 (1), 56 - 62, [doi:10.1016/j.polymertesting.2005.09.005](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.09.005)
- [139] Sercer, M.; Raos, P. (2007). *Joining of Plastics and Composites. Welding Engineering and Technology. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Oxford, ISBN 978-1-905839*
- [140] Seydibeyoğlu, M. Ö.; Dođru, A.; Kandemir, M. B.; Aksoy, Ö. (2020). Lightweight Composite Materials in Transport Structures. 110 – 113, DOI:10.1201/9780429244087-5
- [141] Siddiqui, M.S.; Pogacnik, A.; Kalin, M. (2022). Influence of load, sliding speed and heat-sink volume on the tribological behaviour of polyoxymethylene (POM) sliding against steel. *Tribology International*. 178, 108029, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108029>
- [142] Siemiński, P.; Budzik, G. (2015). *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D. Wydawnictwo: Politechnika Warszawska, 2015, 18 – 21, ISBN: 978-83-7814-255-3*
- [143] Singh P. K.; Saini R. (2022). Static analysis of epoxy resin and carbon fibre composite spur gear. *Materials Today: Proceedings*. 50 (5), 2443 - 2449, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.289>
- [144] Singh, P. K.; Siddhartha; Singh, A. K. (2018). An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears. *Tribology International*, 118, 264 - 272, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.007>
- [145] Singh, S.; Yadav, Y. K.; Siddhartha, Chandra, A. (2021). Exploration on Wear Characteristics: Performance of Gears of Polyamide 66. 581–589, w: Muzammil, M., Chandra, A., Kankar, P.K., Kumar, H. (eds) *Recent Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer*, https://doi.org/10.1007/978-981-15-8704-7_71
- [146] Skoć A.; Świtoński E. (2022). *Przekładnie zębate. Zasady działania. Obliczenia geometryczne i wytrzymałościowe, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1-47, 311 - 333, ISBN: 9788301189006*
- [147] Snyder L. (2010). At the “PEEK” of the Polymer Food Chain, *Gear Technology*, 26-28, www.geartechology.com/ext/resources/issues/0610x/victrex.pdf?1633054859

- [148] Sobczyk, M.; Oleksy, M.; Budzik, G.; Oliwa, R.; Stącel, M.; Majcherczyk, H. (2020). Polymers in Gearbox Production, *Polimery*, 11 - 12, 749, <https://doi.org/10.14314/polimery.2020.11.1>
- [149] Sobolewski B.; Budzik G.; Dziubek T. (2017). Analiza rozwiązań konstrukcyjnych kół zębatych o zmniejszonej masie. *Autobusy*, 37 - 39
- [150] Solanki, B.S.; Singh, H.; Sheorey, T. (2022). Effect of injection molding cycle time on shrinkage and weight of manufactured polymer gear. *Materials Today: Proceedings*, 62, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.430>
- [151] Song, H.; Li, N.; Li, Y.; Min Ch.; Wang, Z. (2012). Preparation and tribological properties of graphene/poly(ether ether ketone) nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 47, 6436 - 6443, DOI 10.1007/s10853-012-6574-0
- [152] Steward, R. (2011). Thermoplastic composites – recyclable and fast to proces. *Reinforced Plastics*, 55 (3), 22 - 28, [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(11\)70073-X](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(11)70073-X)
- [153] Subhani, T.; Shaffer, M. S.; Boccaccini, A. R. (2013). Carbon nanotube (CNT) reinforced glass and glass-ceramic matrix composites. *Woodhead Publishing*, 208 - 256, <https://doi.org/10.1533/9780857093493.2.208>
- [154] Subhani, T.; Latif, M.; Ahmad, I.; Rakha, S. A.; Ali, N.; Khurram, A. A. (2015). Mechanical performance of epoxy matrix hybrid nanocomposites containing carbon nanotubes and nanodiamonds. *Materials & Design*, 87, 436 - 444, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.059>
- [155] Sun, L. H.; Yang, Z. G.; Li, X. H. (2008). Mechanical and tribological properties of polyoxymethylene modified with nanoparticles and solid lubricants. *Polym Eng Sci*; 48, 1824 – 1832, <https://doi.org/10.1002/PEN.21150>
- [156] Suryatal, B. K.; Sarawade, S. S.; Deshmukh, S. P. (2021). Fabrication of medium scale 3D components using stereolithography system for rapid prototyping. *Journal of King Saud University: Engineering Sciences*, 35, 40 - 45, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.012>
- [157] Szlezynger W. (1998). *Tworzywa sztuczne - Tom 1. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*, 275 - 299
- [158] Szlezyngier W. (1996). *Tworzywa sztuczne - tom 2. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*, s. 593-666. ISBN:9788375860702
- [159] Teixeira, D. S.; Giovanela, M.; Gonella, L. B.; Crespo, J. D. (2013). Influence of flow restriction on the microstructure and mechanical properties of long glass fiber-reinforced polyamide 6.6 composites for automotive applications. *Materials & Design*, 47, 287 - 294, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.030>

- [160] ThermoFlow 636. Johns Manville, www.jm.com/content/dam/jm/global/en/engineered-products/EP-documents/Product_Data_Sheets/Fibers/Chopped_Strands/Europe/Thermoflow_636.pdf
- [161] ThermoFlow 672. Johns Manville, www.jm.com/content/dam/jm/global/en/engineered-products/EP-documents/Product_Data_Sheets/Fibers/Chopped_Strands/Europe/ThermoFlow_672.pdf
- [162] Thirugnanam, A.; Sathish, J.; Rakesh, L. (2014). Contact analysis of spur gear using composite material (NYLO CAST). Middle - East Journal of Scientific Research, 20, 966 - 968, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.08.114144
- [163] Touri, M.; Kabirian, F.; Saadati, M.; Ramakrishna, S.; Mozafari, M. (2019). Additive Manufacturing of Biomaterials – The Evolution of Rapid Prototyping. Advanced Engineering Materials, 21 (2), 1800511, <https://doi.org/10.1002/adem.201800511>
- [164] Treffler, B. (2005). Impact of lubricants on processing behaviour of U-PVC. Plastics, Rubber and Composites, 34 (3), 143 - 147, DOI:10.1179/174328905X55506
- [165] Trivedi, D. N.; Rachchh, N. V. (2021). Graphene and its application in thermoplastic polymers as nano-filler - A review. Polymer. 240, 124486, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.124486>
- [166] Tsou, H.; Huang, C.; Zhao, T.; Wang, Z. (2022). Design and validation of sensor installation for online injection molding sidewall deformation monitoring. Measurement, 205, 112200, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112200>
- [167] Tworzywa sztuczne - standardowe zagadnienia. Prospekty firmy Wadimplast. Pozyskane w dniu 28.09.2021
- [168] Urbas, U.; Zorko, D.; Vukašinić, N.; Černe, B. (2022). Comprehensive Areal Geometric Quality Characterisation of Injection Moulded Thermoplastic Gears. Polymers, 14, <https://doi.org/10.3390/polym14040705>
- [169] VDI 2736, Thermoplastic Gear Wheels. VDI Richtlinien, VDI-Verlag GmbH, Dusseldorf, 2014
- [170] Vynckier, A.; Lin, H.; Zeitler, J. A.; Willart, J. F.; Bongaers, E.; Voorspoels, J. F.; Remon, J.P.; Vervaet, C. (2015). Calendering as a direct shaping tool for the continuous production of fixed-dose combination products via co-extrusion. European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics: official journal of Arbeitsgemeinschaft für Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V, 96, 125 - 131, <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2015.07.023>

- [171] Wafiuddin, G.; Idris, D.; Mohamad, D.; Helmi, S. A.; Parlaungan, S. J.; Aziz, A.; Ali, I.; (2017). A review on failure characteristics of polymer gear, MATEC Web Conf, 90, 10, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179001029>
- [172] Wang, J.; Mao, Q.; Jiang, N.; Chen, J. (2022). Effects of Injection Molding Parameters on Properties of Insert-Injection Molded Polypropylene Single-Polymer Composites. *Polymers*, 14, 23, <https://doi.org/10.3390/polym14010023>
- [173] Wright, N.; Kukureka, S. N. (2001). Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears. *Wear*, 251, 1567 - 1578, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00793-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00793-1)
- [174] Wu, C.; Xu, F.; Wang, H.; Liu, H.; Yan, F.; Ma, C. (2023). Manufacturing Technologies of Polymer Composites - A Review. *Polymers*, 15 (3), <https://doi.org/10.3390/polym15030712>
- [175] Wypych, G. (2012). PA-4,6 polyamide-4,6. *Handbook of Polymers*, 203 - 206, <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50067-9>
- [176] Wypych, G. (2012). PA-6 polyamide-6. *Handbook of Polymers*, 209 - 214, <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50069-2>
- [177] Wypych, G. (2012). PA-6,6 polyamide-6,6. *Handbook of Polymers*, 215 - 220, <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50070-9>
- [178] Wypych, G. (2012). PEEK polyetheretherketone. *Handbook of Polymers*. 353 - 358, <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50108-9>
- [179] Wypych, G. (2012). POM polyetheretherketone. *Handbook of Polymers*, 473 - 478, <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50143-0>
- [180] Wypych, G. (2012). PPA polyphthalamide. *Handbook of Polymers*, 496 - 498, <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-47-8.50147-8>
- [181] Xuanzhe, L.; Xishuang, J.; Chengyang, Z.; Siyu, C. (2020). Polyether Ether Ketone (PEEK) Properties and Its Application Status. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 453, 012080, doi:10.1088/1755-1315/453/1/012080
- [182] Yan, X.; Cao, S. (2018). Structure and interfacial shear strength of polypropylene-glass fiber/carbon fiber hybrid composites fabricated by direct fiber feeding injection molding, *Composite Structures*, 185, 362 - 372, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.037>
- [183] Yang, L.; Thomason, J. L. (2010). Interface strength in glass fibre-polypropylene measured using the fibre pull-out and microbond methods, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 41, 1077 - 1083, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.005>
- [184] Yaragalla, S.; Zahid, M.; Panda, J. K.; Tsagarakis, N. J.; Cingolani, R.; Athanassiou, A. (2021). Comprehensive Enhancement in Thermomechanical Performance of Melt-Extruded

- PEEK Filaments by Graphene Incorporation. *Polymers*, 13 (9), 1425, <https://doi.org/10.3390/polym13091425>
- [185] Ye, J.; Burriss, D. L.; Xie, T. (2016). A Review of Transfer Films and Their Role in Ultra-Low-Wear Sliding of Polymers. *Lubricants*, 4, 4, doi:10.3390/lubricants4010004
- [186] You, Y. L.; Li, D. X.; Si, G. J.; Deng, X. (2014). Investigation of the influence of solid lubricants on the tribological properties of polyamide 6 nanocomposite, *Wear*, 311, 57 - 64, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.018>
- [187] Yu, F.; Deng, H.; Zhang, Q.; Wang, K.; Zhang, Ch.; Chen, F.; Fu, Q. (2013). Anisotropic multilayer conductive networks in carbon nanotubes filled polyethylene / polypropylene blends obtained through high speed thin wall injection molding. *Polymer*, 54 (23), 6425 - 6436, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.09.047>
- [188] Yu, Z.; Wang, X.; Wu, D. (2017). Mechanical properties, impact fracture behavior, and morphology of long-polyimide-fiber-reinforced poly(butylene terephthalate) composites. *Journal of Composite Materials*, ;51 (24), 3425 – 3439, DOI:10.1177/0021998316687031
- [189] Zawistowski, H.; Frenkler, D. (2016). Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych. *PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych*, 1, 11-79, ISBN 978-83-933992-2-2
- [190] Zawistowski, H.; Zięba, S. (2015). Ustawianie Procesu Wtryskiwania Tworzyw Termoplastycznych. *Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych*, 33 - 67, 138 - 197, ISBN: 978-83-933992-1-5
- [191] Zhang, R.; Li Z.; Qiuyu Sun Q.; Yu, G.; Wang, X.; Wu, L. (2022). Design and characterization of the carbon fiber tube reinforced polymer composite for full ocean depth submersibles. *Composites Science and Technology*, 217, 109074 <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109074>
- [192] Zhou, L.; Fu, J.; He, Y. (2020). A Review of 3D Printing Technologies for Soft Polymer Materials. *Advanced Functional Materials*, 30 (28), 2000187, <https://doi.org/10.1002/adfm.202000187>
- [193] Zhou, S.; Wu, Y.; Zou, H.; Liang, M.; Chen, Y. (2021). Tribological properties of PTFE fiber filled polyoxymethylene composites: The influence of fiber orientation. *Composites Communications*, 28, 100918, <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100918>
- [194] Zorko, D.; Kulovec, S.; Duhovnik, J.; Tavcar, J. (2019). Durability and design parameters of a Steel/PEEK gear pair, *Mechanism and Machine Theory*, 140, 825 - 884, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.07.001>
- [195] www.3d-nano.com/pl/catalogue/nanorurki-weglowe-wieloscienne/. dnia (14.09.2022)

- [196] www.gestra.com//media/gestra/international/documents/pl/dbl/dbl_850597_00_pa46-pa47-pa48-mpa46-mpa47-mpa48_pl.ashx?rev=ef8cc158ee59403d83b880122e21dc71. dnia (10.02.2023)
- [197] www.help.autodesk.com/view/MFC/2018/ENU/. dnia (17.05.2023)
- [198] www.przetworstwo-tworzyw.splast.com.pl/produkcja/motoryzacja/. dnia (22.01.2023)
- [199] www.techform.pl/oferta/srodki-rozdzielajace. dnia (04.11.2022)
- [200] www.waykenrm.com/blogs/peek-material-and-properties/. dnia (12.02.2023)

STRESZCZENIE

Celem pracy pt. „Hybrydowe materiały kompozytowe stosowane na elementy maszyn w branży automotive”, było opracowanie innowacyjnych materiałów kompozytowych stosowanych do produkcji kół zębatach, otrzymywanych metodą wtryskiwania oraz zbadanie ich właściwości użytkowych, pod kątem zastosowania w branży motoryzacyjnej.

Praca zawiera przegląd literaturowy, w ramach którego przedstawiono charakterystykę wybranych materiałów polimerowych: POM, PA 6, PA 6.6, PA 4.6, PPA oraz PEEK, stosowanych do otrzymywania przekładni zębatach. W ramach tego rozdziału opisano metody modyfikacji właściwości mechanicznych tworzyw sztucznych, przy pomocy takich dodatków jak: włókna szklane lub węglowe, środki smarne oraz nanonapełniacze węglowe. Scharakteryzowano również technologię formowania wtryskowego oraz omówiono czynniki procesowe i konstrukcyjne, mające wpływ na parametry wytrzymałościowe, jakościowe i użytkowe konstrukcyjnych elementów formowanych wtryskowo. Przeanalizowano także różnice pomiędzy kołami zębatymi wykonanymi z materiałów polimerowych i metalowych, stosowanych w branży motoryzacyjnej.

W ramach niniejszej pracy zbadano właściwości mechaniczne oraz strukturalne wytypowanych poliamidów i ich kompozytów. Na podstawie otrzymanych wyników, wytypowano do dalszych badań dwa materiały polimerowe na osnowie poliamidu 4.6. Do badań wytrzymałości trwałościowej zastosowano jednostopniową przekładnię, składającą się z dwóch kół zębatach o liczbie zębów 17 i 25, module 2 mm i kącie przyporu 20°. Przedstawiono symulacje analizy wypełnienia gniazd formujących, orientacji włókien, miejsc linii łączenia i rozkładu skurczu objętościowego. Omówiono wybrane elementy konstrukcji gniazd formujących oraz przystosowania modeli kół zębatach do procesu formowania wtryskowego. Wskazano rzeczywiste problemy produkcyjne, które napotkano podczas serii nadzorowanych wtrysków kół zębatach oraz omówiono proces optymalizacji parametrów wtryskowych w celu otrzymania pożądanego elementu. Określono odchyłki geometrii kół zębatach oraz ich klasy dokładności wg normy DIN 3962.

Badania własne dotyczyły również prac projektowych i konstrukcyjnych nad autorskim stanowiskiem badawczym, którego głównym celem było porównanie trwałości testowanych przekładni zębatach. Założonymi parametrami pomiaru były prędkość obrotowa, moment hamujący i czas pracy przekładni. Miernikami wytrzymałości badanych kół zębatach był wzrost temperatury powierzchni współpracującej zęba oraz wytwarzane ciśnienie akustyczne. Ustalono trwałościowe warunki brzegowe dla kół zębatach wykonanych z niemodyfikowanych PA6 i PA66. Omówiono rodzaje zużycia zębów i przyczyny awarii badanych układów napędowych, wykonanych z materiałów modyfikowanych włóknem szklanym oraz teflonem. Spośród testowanych przekładni zębatach wytypowano trzy materiały PA46, PA46/PTFE oraz PA66/6T/35GF, dla których zbadano wpływ skurczu przetwórczego i zjawisko wydłużonego docierania powierzchni bocznej zęba. Etap dodatkowego docierania przeprowadzono przy pomocy kół zębatach otrzymanych metodą spiekania proszków metali DMLS. Na podstawie uzyskanych wyników badań, wytypowano materiały charakteryzujące się najlepszą wytrzymałością trwałościową w dotychczasowych testach – PA46 i PA46/PTFE. W celu poprawy właściwości mechanicznych PA46/PTFE, z wykorzystaniem technologii wytłaczania otrzymano nowe hybrydowe kompozyty polimerowe, mające w swojej strukturze wielościenne

nanorurki węglowe i organiczny środek smarny. Po zakończeniu serii badań wytrzymałości trwałościowej, wytypowano przekładnię zębatą wykonaną z kompozytu PA46/CNT/SM, charakteryzującą się nieznacznym zużyciem bocznej powierzchni zębów i najniższym przyrostem temperatury ich styku. Uzyskane wyniki badań pozwolą na przyśpieszenie procesu dopracowania innowacyjnych kompozycji polimerowych kół zębatych. Wyniki testów zostają wykorzystane w pracach rozwojowych firmy Splast, związanych z wysokoprecyzyjnymi elementami konstrukcyjnymi z branży motoryzacyjnej.

ABSTRACT

The aim of the work entitled "Hybrid composite materials used for machine elements in the automotive industry", was the development of innovative composite materials used for the production of gears, obtained by injection, and testing their functional properties for use in the automotive industry.

The literature review presents the characteristics of selected materials: POM, PA 6, PA 6.6, PA 4.6, PPA and PEEK, as well as their previous research results focusing on polymer toothed gears. This chapter describes the methods of modifying the mechanical properties of plastics using such additives as: glass or carbon fibers, lubricants and carbon nanofillers. Injection molding technology was also characterized and process and design factors affecting strength, quality and performance parameters of structural injection molded elements were discussed. Differences between gears made of polymer and metal materials used in the automotive industry were also analyzed.

As part of this work, a number of mechanical and structural properties were obtained for selected polyamides and their composites. Based on the obtained results, two proprietary composite materials based on polyamide 4.6 were developed. For durability tests, a single-stage gear was selected, consisting of two gears with the number of teeth 17 and 25, module 2 mm and pressure angle 20°. Simulations of the analysis of the filling of molding cavities, fiber orientation, places of joining lines and volumetric shrinkage distribution were presented. Selected elements of the construction of molding cavities and the adaptation of gear wheel models to the injection molding process are discussed. The actual production problems encountered during a series of supervised injections of gears were indicated and the process of optimizing the injection parameters in order to obtain the desired element was discussed. Deviations of gear geometry and their accuracy classes according to DIN 3962 were determined.

An original test stand was developed, the main purpose of which was to compare the durability of the tested gears. The assumed measurement parameters were rotational speed, braking torque and gear operation time. The strength of the tested gears was measured by the increase in the temperature of the tooth's mating surface and the generated sound pressure. Durability boundary conditions for gears made of unmodified PA6 and PA66 were established. Types of tooth wear and causes of failure of the tested drive systems made of materials modified with glass fiber and Teflon were discussed. Among the tested gears, three materials PA46, PA46/PTFE and PA66/6T/35GF were selected, for which the impact of processing shrinkage and the phenomenon of prolonged lapping of the tooth side surface were examined. The additional lapping stage was carried out using gears obtained by sintering DMLS metal powders. On the basis of the test results obtained, the materials characterized by the best durability strength in the previous tests were selected - PA46 and PA46/PTFE. Using the extrusion technology, two new hybrid polymer composites based on PA46 and PA46/PTFE were obtained. In order to improve the mechanical properties of PA46/PTFE, new hybrid polymer composites were obtained using the extrusion technology, with multi-walled carbon nanotubes and an organic lubricant in their structure. After completing four series of durability strength tests, a toothed gear made of PA46/CNT/SM composite was selected, characterized by a slight wear of the side surface of the teeth and the lowest increase in their contact temperature.

The obtained research results will allow to accelerate the process of refining innovative compositions of polymer gears. The test results are used in the development work of Splast, related to high-precision structural elements in the automotive industry.