



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

mgr inż. Mariusz Dębski

PRACA DOKTORSKA

Badania i analiza walcowych elementów maszyn wytwarzanych hybrydowymi metodami szybkiego prototypowania

Promotor: dr hab. inż. Bogdan Kozik, prof. PRz

Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Przeszlowski

Rzeszów 2023

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WPROWADZENIE	7
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA	9
3. CEL I TEZA PRACY ORAZ PLAN BADAŃ	25
4. METODYKA BADAWCZA	27
4.1. Opracowanie i wykonanie próbek badawczych metodą hybrydową.....	27
4.2. Aparatura stosowana do badań	42
5. BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZY WYNIKÓW.....	49
5.1. Dokładność geometryczna próbek.....	49
5.2. Struktura geometryczna powierzchni	62
5.3. Statyczna próba rozciągania	73
5.4. Statyczna próba trzypunktowego zginania	80
5.5. Statyczna próba skręcania	85
5.6. Skaningowa kalorymetria różnicowa	115
6. PODSUMOWANIE	121
LITERATURA	123
STRESZCZENIE	135
ABSTRACT	137

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- ABS – kopolimer akrylonitrylobutadienostyren
- AM – Additive Manufacturing (wytwarzanie przyrostowe)
- BJ – Binder Jetting (spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem)
- CAD – Computer Aided Design (komputerowe wspomaganie projektowania)
- DED – Directed Energy Deposition (ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału)
- DSC – Differential Scanning Calorimetry (skaningowa kalorymetria różnicowa)
- FDM – Fused Deposition Modeling (wyłaczanie warstwowe materiału)
- JM – Jetting Modeling (druk płynnym materiałem)
- MEX – Material Extrusion (wyłaczanie warstwowe materiału)
- MJ – Material Jetting (warstwowy nadruk płynnego materiału)
- PBF – Powder Bed Fusion (selektywne spajanie sproszkowanego materiału)
- PLA – polilaktyd, polikwas mlekowy
- RM – Rapid Manufacturing (szybkie wytwarzanie)
- RP – Rapid Prototyping (szybkie prototypowanie)
- RT – Rapid Tooling (szybkie wytwarzanie oprzyrządowania)
- RTV – Room Temperature Vulcanization (wulkanizacja w temperaturze pokojowej)
- SL – Sheet Lamination (laminacja warstwowa przekrojów)
- SLA – Stereolithography (fotopolimeryzacja objętościowa)
- SLS – Selective Laser Sintering (spajanie proszku dostarczoną energią)
- STL – Stereolithography Language (stereolitograficzny format plików)
- VC – Vacuum Casting (kształtowanie próżniowe)
- VPP – Vat Photopolymerization (fotopolimeryzacja objętościowa)
- 3DP – Three Dimensional Printing (drukowanie trójwymiarowe)
- R_a – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości
- R_q – średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości

R_p – maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości

R_v – maksymalna głębokość wgłębienia profilu chropowatości

R_z – wysokość chropowatości wg 10 punktów

S_a – średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni

S_q – średnie kwadratowe odchylenie powierzchni

S_p – maksymalna wysokość szczytu

S_v – maksymalna wysokość wgłębienia

S_z – wysokość chropowatości wg 10 punktów

T_g – temperatura przejścia szklanego

Δc_p – zmiana ciepła właściwego podczas przejścia szklanego

1. WPROWADZENIE

Szybkie prototypowanie (RP – ang. Rapid Prototyping) jest zbiorem technik wytwarzania pozwalającym na wykonanie modeli fizycznych oraz prototypów bazując na geometrycznym modelu 3D zaprojektowanym w środowisku CAD. Uzyskana geometria zostaje przetworzona w postać zbioru danych poprzez różne formaty wymiany danych, adekwatne dla systemów szybkiego prototypowania. Większość metod przyrostowych opiera się na zasadzie poziomego podziału modelu na warstwy, z których powstaje fizyczny prototyp części. Korzyścią przyrostowego kształtowania jest brak potrzeby stosowania form czy matryc, które są relatywnie drogie, a bardzo często stosowane w procesach produkcyjnych [21].

Rozpowszechnienie technologii RP sprawiło, że niejednokrotnie koszt przyrostowego wytworzenia modeli jest znacznie niższy od wykonania modelu metodami ubytkowymi. Dodatkową zaletą procesów wytwarzania przyrostowego, jest możliwość wykonywania modeli 3D o praktycznie dowolnej geometrii, niemożliwej do uzyskania takimi metodami jak obróbka skrawaniem, czy obróbka elektroerozyjna, przy znacznej redukcji czasu wytwarzania modelu. Skrócenie procesu wdrożenia elementu prototypowego poprzez zastosowanie szybkiego prototypowania daje możliwość wykonywania elementów w systemie JIT (ang. Just In Time), np. w celu utrzymania ruchu na liniach produkcyjnych poprzez wykorzystanie możliwości wykonywania elementów zastępczych bądź odpowiednich narzędzi i oprzyrządowania.

Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych wyodrębnia kilka głównych metod wytwarzania do których należy wytłaczanie warstwowe materiału (MEX – ang. Material Extrusion), fotopolimeryzacja objętościowa (VPP – ang. Vat Photopolymerization), selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF – ang. Powder Bed Fusion), warstwowy nadruk płynnego materiału (MJ – ang. Material Jetting). Wymienione technologie bazują m.in. na tworzeniu łączy pomiędzy cząsteczkami materiału rodzimego w wyniku mieszania się łańcuchów polimerów, jak również w wyniku zjawiska krystalizacji cieczy pod wpływem wiązki lasera (żywice światłoutwardzalne) lub promieniowania UV. Każda z tych technologii charakteryzuje się różnym odwzorowaniem geometrii, jak również uzyskiwaną strukturą powierzchni.

Zakres aplikacji części wytwarzanych przyrostowo nie ogranicza się obecnie do dotychczasowych zastosowań, tj. weryfikacji fizycznej, produkcji demonstratorów, elementów poglądowych czy przestrzennej wizualizacji rozwiązań projektowych. Coraz częściej przyrostowo wytwarzane części są w pełni funkcjonalne. Należą do nich m.in. elementy układów napędowych maszyn, konstrukcji lotniczych, motoryzacyjnych, elektromaszynowych, AGD czy też modele do zastosowań medycznych, architektonicznych, artystycznych itd.

Uzasadnionym jest zatem prowadzenie prac badawczych w zakresie technik przyrostowych, a w szczególności części układów napędowych maszyn obciążonych momentem skręcającym. Przedmiotowe badania dotyczą przede wszystkim materiałów modelowych wykorzystywanych w procesach addytywnych. Prowadzą one do wyznaczania poszczególnych parametrów (właściwości) wytrzymałościowych w oparciu o znormalizowane modele testowe oraz próby wytrzymałościowe realizowane ściśle wg wskazań normy. Opracowana metodyka wytwarzania hybrydowego, będąca obiektem bieżących badań naukowych, skutkuje w dużym stopniu poszerzeniem prowadzonych prac badawczych oraz uzupełnieniem o nowe aspekty metodyki badań czego efektem jest m.in. niniejsza rozprawa doktorska.

Autorska metodyka obejmuje, obok dotychczas prowadzonych badań, analizę definiowania parametrów procesu wytwórczego oraz modyfikację wykorzystywanych metod o nowe funkcje (hybrydowe połączenie metody ekstruzji warstwowej z odlewaniem pod obniżonym ciśnieniem) prowadzące do programowania wytrzymałości wytwarzanych części.

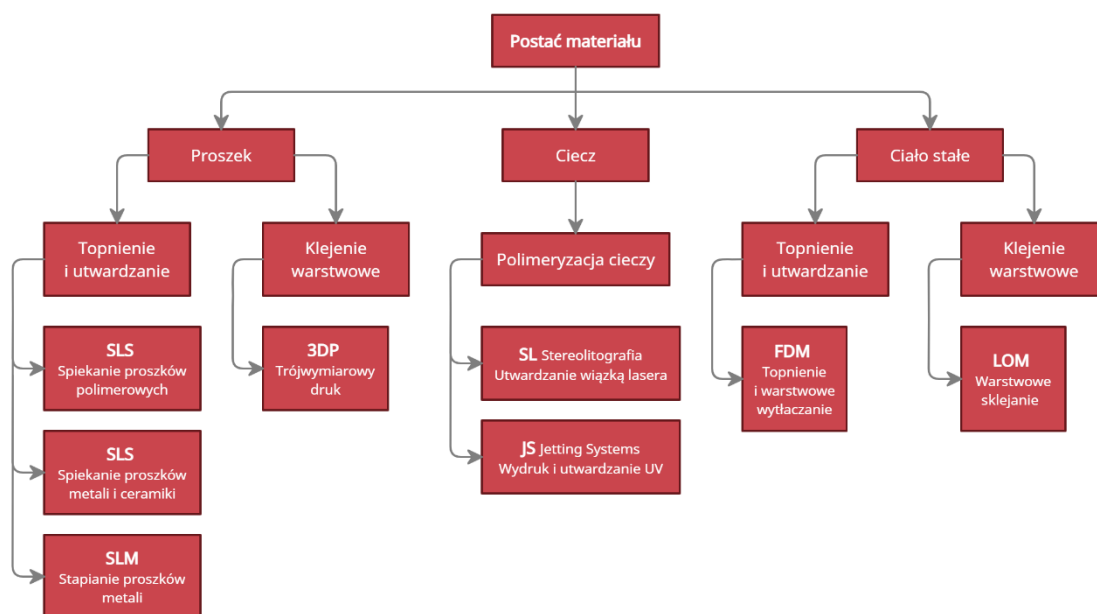
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

Pierwszą z opracowanych metod szybkiego prototypowania była stereolitografia (SLA – ang. Stereolithography) opracowana przez Charlsa Hulla w 1984 roku. Równocześnie dla tej technologii został opracowany format plików geometrycznych pod nazwą „STL”. Format opisuje geometrię modelu, przy użyciu triangulacji powierzchni. Charles Hull po otrzymaniu patentu (1986) założył firmę „3D System”. W następstwie rozwoju i zainteresowania metodą wytwarzania przyrostowego w 1988 roku została opracowana technologia druku uplastycznionym materiałem termoplastycznym (FDM – ang. Fused Deposition Modeling) rozwijana przez firmę Stratasys. W 1992 nastąpił kolejny etap w rozwoju technologii przyrostowej – wynalezienie technologii SLS (ang. Selective Laser Sintering) polegającej na spiekaniu laserem kolejnych warstw materiału nakładanego w postaci proszku. W 1993 roku w Massachusetts Institute Technology (MIT) na podstawie przeprowadzonych prac badawczych opracowano metodę 3DP (ang. Three Dimensional Printing) pozwalającą na uzyskiwanie modeli poprzez nakładanie i przesączenie kolejnych warstw materiału spoiwem. Twórcami tej technologii byli Emanuel “Ely” M. Sachs, John S. Haggerty, Michael J. Cima i Paul A. Williams [38, 56, 66, 108]. Intensywne prace związane z poszukiwaniem nowych technik wytwarzania przyrostowego spowodowały, iż w kolejnych latach powstało wiele nowych urządzeń i technologii szybkiego prototypowania.

Metody addytywne klasyfikuje się przyjmując różne kryteria podziału. Procesy wytwarzania przyrostowego (AM – ang. Additive Manufacturing) można podzielić na trzy odrębne grupy: przyrostowe wytwarzanie prototypów (RP), przyrostowe wytwarzanie prototypowych części maszyn, a także gotowych, w pełni funkcjonalnych wyrobów możliwych do zastosowania jako elementy nośne czy konstrukcyjne maszyn i urządzeń (RM – ang. Rapid Manufacturing) oraz przyrostowe wytwarzanie narzędzi (RT – ang. Rapid Tooling) [67, 123].

Według normy ISO/ASTM 52900:2015 technologie przyrostowe można podzielić na siedem ogólnych kategorii. Klasyfikacja ta dokonywana jest w oparciu o podstawową zasadę działania i obejmuje fotopolimeryzację objętościową (VPP), warstwowy nadruk płynnego materiału (MJ), spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem (BJ – ang. Binder Jetting), selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF), wytłaczanie warstwowe materiału (MEX), ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału (DED –

ang. Directed Energy Deposition) oraz laminowanie arkuszy (SL – ang. Sheet Lamination). Ponadto, w zależności od rodzaju użytego materiału bazowego, techniki RP można podzielić na trzy różne kategorie, tj. na bazie proszku, cieczy oraz ciała stałego (rys. 2.1) [63].



Rys. 2.1. Podział metod szybkiego prototypowania ze względu na stan lub postać materiałów wyjściowych [20]

Technologie przyrostowe na przestrzeni ostatnich lat ewoluowały pod względem różnorodności metod i wykorzystywanych materiałów, w związku z czym znalazły zastosowanie w wielu branżach i dziedzinach, takich jak przemysł motoryzacyjny, lotniczy, medyczny, budowniczy, militarny i spożywczy [17, 33, 86, 110, 128, 135, 151]. Przemysł medyczny zaczął eksperymentować z rozwojem tkanek, narządów i struktur komórkowych wytwarzanych przyrostowo [32, 88]. Dzięki zastosowaniu metod szybkiego prototypowania skraca się czas potrzebny na oprzyrządowanie, a także koszty wykonania prototypów [81, 115].

Jedną z najpopularniejszych i najbardziej rozpowszechnionych technologii druku 3D jest metoda ekstruzji warstwowej. Technika ta pozwala na zastosowanie szerokiego zakresu tworzyw polimerowych, w tym materiałów kompozytowych oraz termoplastów stosowanych w technologii formowania wtryskowego [26, 144]. Ze względu na tanie materiały eksploatacyjne metoda ekstruzji warstwowej znajduje szerokie zastosowanie przy budowie funkcjonalnych prototypów oraz w produkcji małoseryjnej. Ograniczeniami tej technologii jest stosunkowo wysoka w porównaniu do innych metod

anizotropia wytwarzanych elementów [47, 83, 87], długi czas wydruku przedmiotów o większych rozmiarach oraz niezbyt duża dokładność budowanych modeli o wysokiej chropowatości powierzchni, ze względu na efekt schodkowania, konieczność stosowania struktur podporowych i problemy związane ze skurczem materiału [12, 25].

Alternatywą dla wskazanej powyżej techniki modelowania tworzywem termoplastycznym, powszechnie wykorzystywaną obecnie, jest metoda polimeryzacji żywicy światłoutwardzalnej. Znalazła ona bezpośrednie odzwierciedlenie w szeregu technik, tj. SLA, DLP (ang. Digital Light Processing), 3SP (ang. Scan, Spin and Selective Photocure), JM (ang. Jetting Modeling) [16, 139]. W zależności od zastosowanej metody żywica może być utwardzana wiązką lasera, światłem projektora, bądź światłem UV z widma generowanego przez zespół dedykowanych lamp [42, 122]. Techniki przyrostowe bazujące na żywicach fotopolimerowych charakteryzują się wysoką dokładnością odwzorowania geometrii względem modelu 3D CAD oraz łatwością usuwania materiału podporowego. Ciągły rozwój tych metod oraz poszerzanie gamy materiałów pozwala na stosowanie żywic biokompatybilnych, które są coraz częściej wykorzystywane w medycynie, nie tylko w celu przygotowania anatomicznego modelu pacjenta, ale również na protezy, implanty, wzorce tkanek bazowych i indywidualne instrumenty operacyjne [29, 57, 64]. Zastosowanie żywic światłoutwardzalnych często jednak wiąże się z wysoką ceną materiałów eksploatacyjnych w porównaniu do termoplastów stosowanych w metodzie ekstruzji warstwowej [121]. Wytwarzane modele cechują się niską odpornością na złamania oraz niską wytrzymałością termiczną [50].

Współcześnie rozwijana jest również technologia spieku proszków z poliamidów i ze stopów metali. Zaawansowane technologicznie metody umożliwiają wytwarzanie modeli fizycznych o bardzo dobrych właściwościach wytrzymałościowych i wysokiej gęstości [53, 143]. Energia przekazywana przez generator strumienia lasera zapewnia trwale i wytrzymałe wiązania pomiędzy elementarnymi cząstkami proszku. Ze względu na wysoką dokładność procesu spieku oraz dużą powtarzalność przedmiotowa metoda wykorzystywana jest zarówno w procesie prototypowania, jak też wytwarzania części funkcjonalnych [9, 131]. Znalazła zastosowanie między innymi w przemyśle lotniczym (dotyczy zwłaszcza proszków ze stopów metali), samochodowym, elektromaszynowym i innych [71, 94]. Kluczowy problem dla tych technologii stanowi przede wszystkim koszt aparatury wytwórczej jak również materiałów modelowych i eksploatacyjnych oraz niekorzystne konsekwencje szybko postępującego procesu starzenia proszków. Kolejną

wadą techniki spieku jest wysoka porowatość wytwarzanych części oraz zdecydowanie niższa jakość powierzchni w porównaniu do innych metod [2, 52, 152, 158].

Technologie przyrostowe pozwalają na wykonywanie obiektów, których geometria może być o wiele bardziej skomplikowana, niż w przypadku wytwarzania elementów tradycyjnymi metodami. Należy jednak pamiętać, że proces addytywnego wytwarzania wiąże się z pewnymi ograniczeniami, które winno się uwzględnić w procesie projektowania części. Uwarunkowania geometryczne projektowanych modeli zależą przede wszystkim od rodzaju zastosowanego materiału, ograniczeń technologicznych wybranej metody oraz urządzenia drukującego [10, 146]. Zrealizowane dotychczas prace badawcze umożliwiły opracowanie kluczowych parametrów krytycznych dla poszczególnych technik definiujących między innymi: minimalną grubość ścianki, minimalne otwory do wykonania, pasowanie względem współpracujących części, podparcie tzw. mostów, wymiary minimalne niezbędnych otworów drenujących dla pozostałego materiału modelowego (nieprzetworzonego) [114, 145]. Mając na względzie powyższe opracowano wytyczne, które zostały przedstawione w tabeli 2.1. Oczywiście, biorąc pod uwagę doświadczenie operatora danej aparatury możliwa jest znaczna poprawa poszczególnych ograniczeń względem wybranych paramentów. Ma na to wpływ szereg czynników, między innymi: adekwatny dobór parametrów procesu dla konkretnego modelu, ustawienie modelu w obszarze roboczym maszyny, edycja struktury podpierającej oraz uwarunkowania operacji postprocesowych.

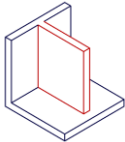
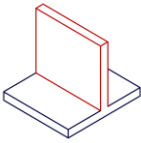
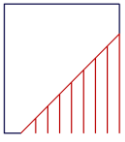
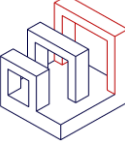
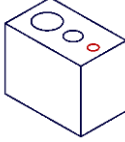
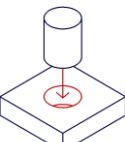
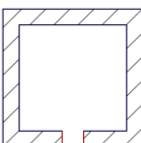
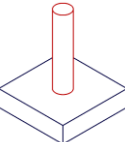
RT to technologia służąca do wytwarzania form i narzędzi, najczęściej na podstawie obiektu uzyskanego metodami RP, przeznaczona do krótkich lub średnich serii prototypowych, informacyjnych lub funkcjonalnych. Ze względu na możliwość zastosowania szerokiej gamy materiałów oraz bezpośredni i szybki sposób wytwarzania procesy RT są istotnym czynnikiem wpływającym na szybki rozwój produktu [98]. Zważywszy na sposób wykorzystania technik RT oraz ich rodzaje trudno jest precyzyjnie je sklasyfikować. W głównej mierze metody RT opierają się na połączeniu procesów szybkiego prototypowania z konwencjonalnymi metodami produkcji narzędzi. Do powszechnie stosowanych w praktyce przemysłowej przyrostowych procesów wytwarzania narzędzi zalicza się formowanie próżniowe w formach silikonowych (VC – ang. Vacuum Casting) oraz napylenie stopami metali modeli wzorcowych. Zastosowanie technik RT w procesach odlewania i wtryskiwania tworzyw sztucznych

pozwała na redukcję kosztów związaną między innymi z wytwarzaniem form i matryc oraz skrócenie czasu prototypowania narzędzi [20, 21].

Odlewanie próżniowe (VC) ze względu na niskie koszty wytwórcze (tańsze materiały i narzędzia) jest szeroko stosowaną metodą wytwarzania oprzyrządowania, w szczególności w produkcji małoseryjnej oraz jednostkowej, pozwalającą na skrócenie czasu wprowadzania na rynek nowych produktów [72, 76]. Metoda ta polega na odlewaniu próżniowym termoutwardzalnych żywic epoksydowych, poliestrowych, poliuretanowych lub wosku w formach wykonanych z żywic silikonowych, a także kompozytów żywic z proszkami metali [75, 156]. Najczęściej stosowanymi narzędziami w procesie VC są formy z kauczuku silikonowego wytwarzane metodą wulkanizacji w temperaturze pokojowej (RTV ang. Room Temperature Vulcanization) poprzez hermetyzację wzorca. Zasadą metody RTV jest odtworzenie geometrii modelu wzorcowego (najczęściej otrzymanego jedną z metod RP) poprzez zamknięcie go dwuskładnikowymi kauczukami silikonowymi [45]. Proces RTV jest zwykle przeprowadzany pod ciśnieniem atmosferycznym, co wiąże się z ryzykiem zapowietrzenia formy w obszarze bezpośredniego kontaktu z powierzchnią modelu bazowego, a to powoduje w efekcie znaczny spadek dokładności procesu odlewania próżniowego [111, 118]. Jednak w celu zapewnienia wysokiej precyzji odwzorowania jakości powierzchni oraz uwarunkowań wymiarowo-kształtowych modelu wzorcowego, bezpośrednio po zalaniu sylikonu technicznego realizowany jest proces odgazowania próżniowego, pozwalający na usunięcie pęcherzyków gazu powstałych podczas mieszania składników silikonowych [99, 153].

Zastosowanie form silikonowych daje możliwość szybkiego wykonania od 1 do 30 sztuk prototypowanego wyrobu o powtarzalnych wymiarach i konkretnych właściwościach fizycznych oraz chemicznych. Wielkość serii w głównej mierze zależy od geometrii modelu oraz właściwości materiału i odlewanej żywicy [149]. Zastosowanie szerokiej gamy żywic dla modeli prototypowych otrzymywanych w procesie VC daje możliwość wytwarzania części z materiałów o właściwościach mechanicznych zbliżonych do właściwości wyrobów wytwarzanych metodą formowania wtryskowego [102].

Tabela 2.1. Uwarunkowania geometryczne projektowanych części dla wybranych metod RP [114]

	MEX	VPP	PBF (polimery)	JM	PBF (metale)
Ścianki wsparte 	0,8 mm	0,5 mm	0,7 mm	1 mm	0,4 mm
Ścianki niewsparte 	0,8 mm	1 mm	X	1 mm	0,5 mm
Podpory 	45°	podpory zawsze wymagane	X	podpory zawsze wymagane	podpory zawsze wymagane
Mosty 	10 mm	X	X	X	2 mm
Otwory 	Ø2 mm	Ø0,5 mm	Ø1,5 mm	Ø0,5 mm	Ø1,5 mm
Części współpracujące 	0,5 mm	0,5 mm	0,3 mm	0,2 mm	X
Otwory drenujące 	X	4 mm	5 mm	X	5 mm
Piny 	3 mm	0,5 mm	0,8 mm	0,5 mm	1 mm

Podstawowe korzyści wynikające z aplikacji techniki odlewania próżniowego to szybka produkcja prototypowych części (gotowe odlewy mogą zostać wykonane nawet w ciągu 48 godzin) oraz niskie koszty wytwarzania, które stanowią 3 – 6% kosztów w stosunku do tradycyjnych form wykorzystywanych w procesie formowania wtryskowego [147]. Dodatkowymi zaletami tej technologii jest wysoka powtarzalność, która pozwala na wytworzenie nawet do kilkudziesięciu modeli z jednej formy oraz możliwość odlewania tożsamej części przy użyciu żywic o różnych właściwościach. Oprócz szeregu zalet procesu VC, dzięki którym technologia ta znalazła szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, elektromaszynowym, medycznym i elektronicznym, technologia odlewania próżniowego posiada również wady. Należą do nich: łatwość powstawania wycieków – tzw. miejscowych „wypływek”, pułapek powietrznych, skurczów odlewniczych, a także niedolewów [73 ,74]. Zapobieganie wyżej wymienionym problemom jest możliwe poprzez odpowiednią regulację i kontrolę ciśnienia procesu oraz adekwatne opracowanie obszaru wstępnego cięcia formy [154]. Przedmiotowe operacje mające na celu eliminację wskazanych problemów technologicznych uwarunkowane są bezpośrednio indywidualnym rozwiązaniem konstrukcyjnym modelu bazowego.

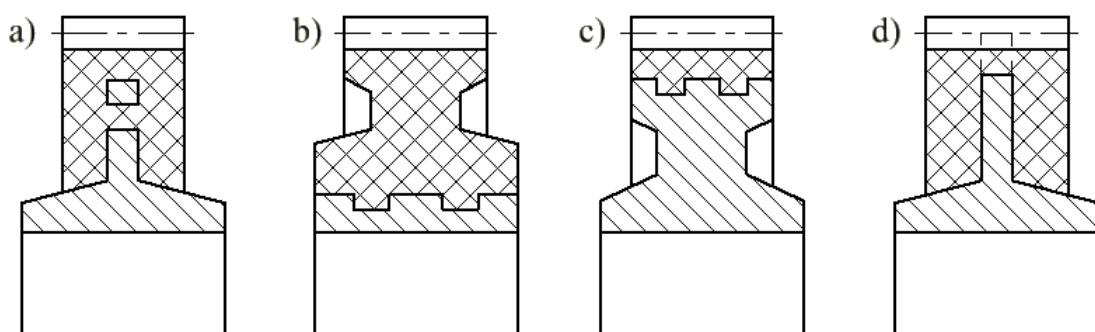
Analizując literaturę można zauważyć, że od kilku dekad na części maszyn i urządzeń stosowane są hybrydowe elementy polimerowo-metalowe. Zasadniczym powodem stosowania tego typu elementów jest dążenie do uzyskania oszczędności materiałowych i energetycznych poprzez obniżenie masy części wykonanych dotychczas z metalu. Integracja tworzywa polimerowego z metalem zachodzi dzięki połączeniom adhezyjnym oraz mechanicznym – części metalowe są wstawiane w miejscach działania dużych obciążeń w elemencie nośnym [59, 61]. Hybrydowe wytwarzanie pozwala łączyć w jednej części korzystne właściwości metali, np. dużą sztywność i wytrzymałość mechaniczną z zaletami tworzyw sztucznych, które przyczyniają się do zmniejszenia masy całkowitej elementu oraz zwiększają jego funkcjonalność i zakres zastosowań [19, 117]. Ze względu na zredukowany czas cyklu produkcyjnego, powtarzalność wymiarów oraz wysokie możliwości automatyzacji procesu produkcji na przestrzeni ostatnich lat powstało wiele odmian hybrydowej technologii wytwarzania elementów polimerowo-metalowych w procesie formowania wtryskowego [105, 127]. W tabeli 2.2 przedstawiono klasyfikację wybranych procesów wytwarzania hybrydowych części polimerowo-metalowych.

Tabela 2.2. Klasyfikacja procesów wytwarzania hybrydowych elementów polimerowo-metalowych

Proces	Produkt wyjściowy	Operacje
Insert	wypraska z obtrzyśniętą zapraską metalową	<ul style="list-style-type: none"> - wkładanie zaprasek metalowych do gniazd formy wtryskowej - zamknięcie formy - wtrysk tworzywa - otwarcie formy - usunięcie wyprasek z formy
Outsert	elementy tworzywowe dotrzyśnięte do płyty metalowej	<ul style="list-style-type: none"> - wkładanie płyty metalowej do formy wtryskowej - zamknięcie formy - wtrysk tworzywa - otwarcie formy - usunięcie wyprasek z formy
PMA (post metal assembly)	elementy hybrydowe polimerowo-metalowe	<ul style="list-style-type: none"> - wtrysk wypraski z tworzywa - montaż z elementem metalowym
MOM (metal over molding)	elementy hybrydowe polimerowo-metalowe	<ul style="list-style-type: none"> - wkładanie zaprasek metalowych do gniazd formy wtryskowej - zamknięcie formy - wtrysk tworzywa - otwarcie formy - usunięcie wyprasek z formy
Metal-GAIM (metal-gas assisted injection molding)	elementy hybrydowe polimerowo-metalowe puste w środku	<ul style="list-style-type: none"> - wkładanie zaprasek metalowych do gniazd formy wtryskowej - zamknięcie formy - wtrysk tworzywa - usunięcie nadmiaru tworzywa za pomocą gazu - otwarcie formy - usunięcie wyprasek z formy
Metal-WAIM (metal-water assisted injection molding)	elementy hybrydowe polimerowo-metalowe puste w środku	<ul style="list-style-type: none"> - wkładanie zaprasek metalowych do gniazd formy wtryskowej - zamknięcie formy - wtrysk tworzywa - usunięcie nadmiaru tworzywa za pomocą wody - otwarcie formy - usunięcie wyprasek z formy

Przykładem hybrydowego wytwarzania części maszyn (szczególnie obciążonych momentem skręcającym) są koła zębate polimerowo-metalowe [97]. Wieniec koła wykonany z polimeru jest w procesie wtryskiwania nakładany na metalową piastę. W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego polimer może być oblewany na metalowej piaście (rys. 2.2a), zalewany w jej zagłębieniach (rys. 2.2b, c) lub natryskiwany na

metalowy korpus zęba (rys. 2.2d). Ostatni sposób zwiększa wytrzymałość zęba na zginanie oraz poprawia odprowadzanie ciepła ze strefy tarcia [120].



Rys. 2.2. Rozwiązania konstrukcyjne kół polimerowo-metalowych

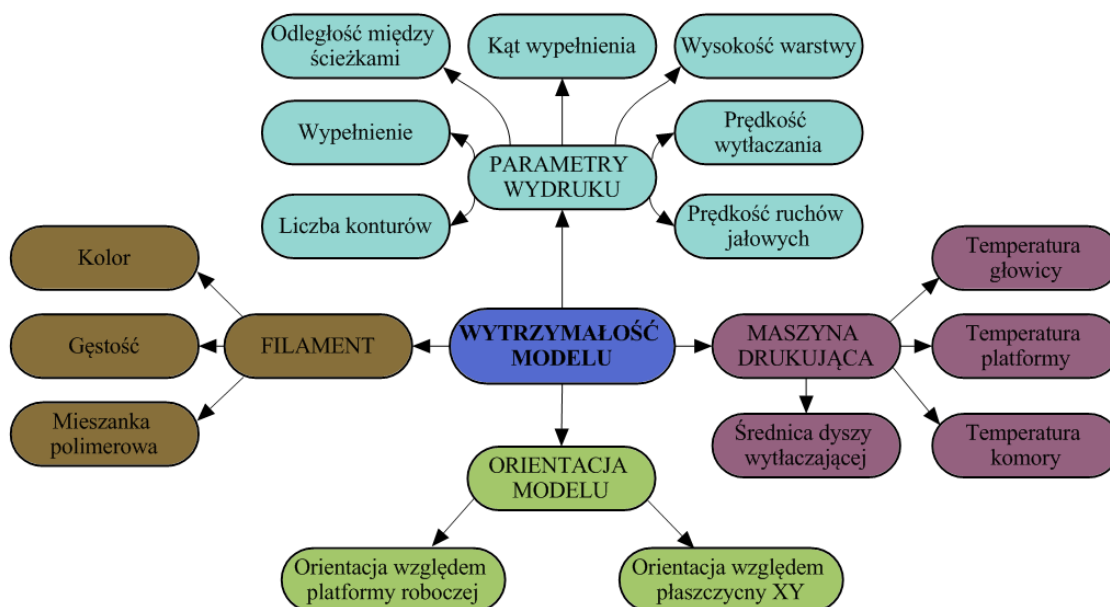
Kolejną stosowaną obecnie metodą hybrydowego wytwarzania jest proces RP/VC z zastosowaniem metalowych wkładek/rdzeni. Proces ten polega na wytworzeniu modelu wzorcowego techniką przyrostową, a następnie opracowaniu adekwatnej formy silikonowej z zastosowaniem elementów ze stopów metali. Finalny produkt wytwarzany jest w procesie odlewania próżniowego dwuskładnikowych żywic poliuretanowych w zaopatrzonej w metalowe elementy formie silikonowej. Proces znajduje powszechną aplikację między innymi w przemyśle komponentów AGD [101, 136]. Innowacyjnym podejściem w przedmiotowym zakresie jest zastosowanie druku przestrzennego do tzw. zabudowy elementów metalowych. Wkładka/rdzeń wykonana w procesie obróbki stopów metali zostaje „zabudowana (zadrukowana)” w przyrostowo realizowanym procesie RP.

Hybrydowe wytwarzanie części maszyn z materiałów modelowych przetwarzanych przyrostowo i elementów metalowych może być realizowane między innymi w procesie modelowania tworzywem termoplastycznym. Pamiętać przy tym należy, iż kształt oraz wymiary metalowego elementu powinny zostać odpowiednio dobrane na etapie projektowania części pod względem uwarunkowań wymiarowo-kształtowych i jakości powierzchni gniazda, celem wytworzenia stabilnej, wytrzymałej konstrukcji. Związane to jest między innymi z rodzajem stosowanego tworzywa termoplastycznego oraz indywidualnymi parametrami procesu wytwarzania [90].

Scharakteryzowana powyżej alternatywna technologia hybrydowa w wymierny sposób ogranicza czas, koszt i aparaturowe zaangażowanie względem dotychczas stosowanych. Kluczowym aspektem aplikacji hybrydowej techniki przyrostowej będzie też poprawa podstawowych parametrów wytrzymałościowych wykonanych części [62].

Możliwa jest również, analogicznie do metody ekstruzji warstwowej, aplikacja innych technik przyrostowych, w tym między innymi spieku proszków polimerowych czy utwardzania optycznie czynnej żywicy. Kluczowym atutem dla technologii ekstruzji warstwowej jest bezpośrednia aplikacja elementu metalowego w procesie budowy modelu. Pozostałe techniki umożliwiają zastosowanie komponentów metalowych w dodatkowej fazie obróbki (konieczność opracowania konstrukcji adekwatnych gniazd).

Technologie wytwarzania przyrostowego umożliwią otrzymywanie skomplikowanych elementów niemożliwych lub nieekonomicznych do wykonania innymi metodami, jednak wciąż stoją przed wyzwaniem, które stwarzają bariery dla ich dalszego zastosowania w dziedzinach inżynierskich. Głównymi ograniczeniami technologii druku 3D jest zmiana wytrzymałości wytwarzanych elementów w stosunku do orientacji modelu w komorze roboczej urządzenia. Na rysunku 2.3 przedstawiono krytyczne parametry wytwarzania obiektów metodą ekstruzji warstwowej wpływające na ich wytrzymałość zmęczeniową.



Rys. 2.3. Krytyczne parametry dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej obiektów wytwarzanych metodą ekstruzji warstwowej [54]

Anizotropia elementów polimerowych wytwarzanych technologiami addytywnymi występuje dla takich metod jak FDM, SLS, DLP i SLA [11, 69, 93, 159]. Najwyższa anizotropia spośród powyżej wymienionych technik przyrostowych charakteryzuje technologię FDM i może wynosić prawie 50% [15, 109]. Dla technologii SLS anizotropia wynosi do około 10%, DLP około 5%, natomiast SLA około 1% [8, 36]. Należy

zaznaczyć, że w przypadku metody SLS anizotropia może nie powodować znaczących zmian w wytrzymałości wytwarzanych części, co jest związane bezpośrednio z parametrami mającymi wpływ na właściwości drukowanych elementów takimi jak moc lasera, grubość warstwy, prędkość wiązki laserowej [15, 36, 58, 93].

Anizotropia materiałów części drukowanych za pomocą metody ekstruzji warstwowej ma znaczny wpływ na ich wytrzymałość [116]. Wynika to bezpośrednio z kierunku wytwarzania, który jest prostopadły (normalny) do płaszczyzny podziału obiektu. W klasycznej metodzie FDM kierunek wytwarzania pozostaje niezmienny w trakcie budowy modelu. Wytrzymałość elementów obniża się w kierunkach obciążeń zbliżonych do kierunku budowy modelu. W związku z tym należy dążyć do takiego ułożenia części w przestrzeni roboczej urządzenia, aby obciążenia przebiegały równoległe do kierunku występowania najdłuższych włókien konturu, a jednocześnie nie były równoległe do kierunku wytwarzania [49, 92, 104, 109]. Natomiast dokładność wymiarowa, szczególnie w przypadku elementów obrotowych, jest najwyższa w kierunku budowanego modelu (oś pionowa). Większa dokładność w kierunku pionowym wynika również z braku konieczności stosowania struktur podporowych. W przypadku wytwarzania brył obrotowych w płaszczyźnie poziomej, w miejscu w którym generowane podpory stykają się z powierzchnią części, dochodzi do zniekształcenia modelu, a tym samym obniżenia dokładności wymiarowej.

Istotnym czynnikiem powodującym anizotropię materiału, w szczególności anizotropię mechaniczną, jest niewystarczająca adhezja wiązania międzywarstwowego (pomiędzy kolejnymi budowanymi warstwami), będąca konsekwencją braku przetopienia materiału źródłowego [6]. Ekstrudowany materiał szybko schładza się od temperatury topienia do temperatury komory drukarki, co powoduje powstawanie naprężeń wewnętrznych odpowiedzialnych za słabe wiązanie między dwiema sąsiednimi ścieżkami. W związku z tym zasadnym jest stwierdzenie, że wytrzymałość obiektu na granicach warstw jest najniższa [96, 126].

Kolejnym czynnikiem powodującym anizotropię wytwarzanych modeli są szczeliny (pustki) powietrzne, które podczas drukowania tworzą się pomiędzy dwiema sąsiednimi ścieżkami wypełnienia, ścieżką wypełnienia a konturem lub sąsiednimi konturami. Sterowanie parametrami procesu pozwala na zmniejszenie pustych przestrzeni powietrznych, jednak nie można wyeliminować ich całkowicie [44, 48, 157].

Wytwarzanie elementów technologią MEX jest procesem produkcyjnym, na który wpływa wiele parametrów, od których również zależy wytrzymałość mechaniczna części. Do podstawowych parametrów należą [34, 43, 84]:

- Kąt wypełnienia – jest to kierunek nakładanych warstw filamentu w stosunku do platformy roboczej. Jest istotnym parametrem wpływającym na anizotropię mechaniczną. Kąt wypełnienia może przyjmować wartości w zakresie od 0° do 90° . Najczęściej przyjmowanymi wartościami jest 0° , 45° , 90° lub naprzemiennie 0° i 90° . Najniższe właściwości mechaniczne wykazują próbki, których kąt wypełnienia wynosi 90° ze względu, iż obciążenia mechaniczne są przenoszone tylko przez wiązania między warstwami, a nie przez same włókna [104].
- Szerokość ścieżki – jest to szerokość pojedynczej nałożonej ścieżki, która zależy od średnicy końcówki dyszy, prędkości drukowania oraz stosunku prędkości drukowania do prędkości ekstruzji, co określa się „mnożnikiem ekstruzji” [13]. Kalibracja tego parametru jest bardzo ważna dla dokładności części i właściwości mechanicznych. Zwykle waha się od 0,1 – 0,7 mm.
- Wysokość warstwy (grubość warstwy) – jest to wysokość (grubość) każdej osadzonej warstwy w wytwarzanym obiekcie. Wysokość warstwy zależy od średnicy końcówki dyszy. Zwykle waha się od 0,07 do 0,4 mm. Wpływ grubości warstwy na wytrzymałość i inne właściwości mechaniczne wzrasta wraz ze spadkiem grubości warstwy, co prowadzi do wytwarzania modeli o większej liczbie warstw. W konsekwencji zwiększenie liczby warstw prowadzi do nasilenia procesu ponownego nagrzewania poprzednich warstw, poprawiając dyfuzję między nimi oraz zwiększa jakość powierzchni drukowanych obiektów [142].
- Gęstość wypełnienia – opisuje objętość wypełnienia, która zwykle waha się od 20% do 100%. Procent wypełnienia stanowi podstawowy parametr, który znacząco wpływa na właściwości mechaniczne oraz masę wytwarzanych części. Ponadto różne typy i wzory wypełnień mają wpływ na kluczowe właściwości wytrzymałościowe opisane poszczególnymi parametrami [141].
- Liczba konturów (obrysów) – jest to zewnętrzna warstwa, która otacza wewnętrzną strukturę wypełnienia drukowanej części. Zwykle waha się od 1 – 6.
- Prędkość ruchów drukujących – jest miarą objętości polimeru wytłoczonego z końcówki dyszy urządzenia drukującego. Zmiana prędkości posuwu wpływa na szybkość i czas produkcji części [91]. Zwykle waha się od 15 mm/s do 90 mm/s.

- Temperatura ekstruzji – jest definiowana jako temperatura ogrzewania materiału w dyszy podczas procesu wytłaczania. Różni się w zależności od rodzaju materiału i szybkości drukowania [134].

Właściwości mechaniczne elementów wytwarzanych technologią MEX od wielu lat są przedmiotem badań i analiz w wielu ośrodkach naukowo-badawczych oraz laboratoriach przedsiębiorstw przemysłowych. Na podstawie dostępnej literatury można wyodrębnić kilka kierunków prowadzonych badań naukowych odnoszących się do wytrzymałości oraz anizotropii obiektów wytwarzanych metodą ekstruzji warstwowej:

- Badania wpływu parametrów procesu na anizotropię materiałów polimerowych takich jak: kąt wypełnienia [5, 28, 89, 112], wysokość warstwy [7, 54, 70, 82], gęstość wypełnienia [119, 129, 133, 150], prędkość ruchów drukujących [1, 37, 95], geometria wypełnienia [4, 14, 77, 79].
- Badania właściwości mechanicznych materiałów polimerowych wytwarzanych metodą ekstruzji warstwowej na określone rodzaje obciążeń, m.in. wytrzymałości na rozciąganie, zginanie i ściskanie [18, 55, 63, 107, 140].
- Badania dokładności geometrii oraz struktury geometrycznej powierzchni obiektów wytwarzanych metodami szybkiego prototypowania [22, 23, 39, 106], w tym wykończenia powierzchni poprzez zastosowanie obróbki skrawaniem [51, 78, 103, 137].
- Badania wpływu obróbki cieplnej (wyżarzania poprocesowego oraz obróbki cieplnej wewnątrzprocesowej) na właściwości mechaniczne tworzyw termoplastycznych oraz odkształcenia części [27, 40, 65, 85, 113, 124].
- Zastosowanie symulacji numerycznych w oparciu o metodę elementów skończonych do analizy obiektów wytwarzanych metodami addytywnymi [3, 46, 79].
- Analiza wpływu anizotropii w przewodności elektrycznej kompozytów polimerowych wytwarzanych technologiami przyrostowymi z domieszką nanorurek węglowych jedno- i wielościennych [30, 49, 80, 138, 155].
- Wpływ anizotropii termicznej na przewodność i rozszerzalność cieplną polimerów wytwarzanych metodami addytywnymi i kompozytów polimerowych [41, 125, 130, 132].

Dokonana analiza danych literaturowych, z których większość publikowana była na przestrzeni ostatnich lat, wykazała szereg realizowanych badań. Ich celem była poprawa właściwości przyrostowo wytwarzanych modeli przez zastosowanie dodatkowych elementów wpływających na wzrost wytrzymałości oraz definiowanie określonych parametrów procesu wykraczających poza standardowe tryby pracy aparatury domyślnie generowane przez oprogramowanie dedykowane do danej techniki. Stwierdzono przy tym, iż wskazana metodyka nie zapewnia zachowania oczekiwanej dokładności wymiarowo-kształtowej przy zachowaniu np. wytrzymałości na rozciąganie we wszystkich osiach budowanego modelu.

Rozwiązaniem wyżej nakreślonych problemów jest opracowana w Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej hybrydowa technologia wytwarzania prototypów oraz funkcjonalnych części maszyn bazująca na połączeniu metody ekstruzji warstwowej z odlewaniem niskociśnieniowym. Sposób wytwarzania oparty jest o cienkościenną formę wykonaną metodą ekstruzji warstwowej stanowiącą szkielet do uzyskania modelu właściwego, który powstaje w skutek wypełnienia cienkościennej formy polimerem chemoutwardzalnym w technologii odlewania pod obniżonym ciśnieniem.

Zaletami przedstawionego sposobu wytwarzania elementów maszyn metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem w kierunku budowanego modelu (oś Z) jest możliwość sterowania parametrami wytrzymałościowymi danej części. Ponadto takie podejście pozwoli na wytwarzanie elementów o różnych kształtach bez konieczności przygotowywania formy silikonowej stosowanej klasycznie w technologii odlewania pod obniżonym ciśnieniem. Kolejnymi korzyściami płynącymi z zastosowania hybrydowej technologii jest zmniejszenie anizotropii wytwarzanych części przy zachowaniu dokładności wymiarowo-kształtowej oraz skrócenie czasu wytwarzania modeli metodą ekstruzji warstwowej.

Analiza opracowań dotyczących badań wytrzymałości części wytwarzanych technikami przyrostowymi z materiałów modelowych oraz kompozytów hybrydowych uwzględnia przeważnie badania parametrów materiałowych i wytrzymałościowych w oparciu o próbę jednoosiowego rozciągania, zginania i ściskania. Dla elementów wytwarzanych z tworzyw sztucznych tradycyjnymi metodami (np. formowanie wtryskowe) dane uzyskane na podstawie tych badań są wystarczające do określenia

wytrzymałości materiału i aplikacji otrzymanych wyników w procesie projektowania produktu. W przypadku metody ekstruzji warstwowej, ze względu na proces budowy modelu, dane wytrzymałościowe w oparciu o próbki normatywne nie mają bezpośredniego przełożenia na wytrzymałość części maszyn pracujących w różnym zakresie obciążeń, szczególnie obciążeń skręcających. W związku z tym kluczowym jest określenie parametrów wytrzymałości na skręcanie dla elementów wytwarzanych hybrydową technologią łączącą metodę ekstruzji warstwowej z odlewaniem pod obniżonym ciśnieniem. Przyjęte w pracy założenia przewidują poszerzone, niestosowane dotychczas metody wytwarzania części hybrydowymi technikami szybkiego prototypowania.

3. CEL I TEZA PRACY ORAZ PLAN BADAŃ

Celem pracy było opracowanie metodyki wytwarzania elementów maszyn pracujących w zakresie obciążeń skręcających, o zadanej wytrzymałości z zastosowaniem technologii hybrydowych (przyrostowej i odlewniczej). W myśl przyjętych założeń opracowany został proces wytwarzania, który w odróżnieniu od obecnie stosowanych technik hybrydowych umożliwia zarówno wytworzenie modelu rzeczywistego o dedykowanych parametrach wytrzymałościowych, jak również eliminuje konieczność dodatkowego projektowania form silikonowych. Poszczególne etapy opracowania procesu wytwarzania według przyjętej metodyki umożliwiają precyzyjne zdefiniowanie parametrów wytrzymałościowych docelowego wyrobu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia w niniejszej pracy przyjęto następującą tezę: istnieje możliwość zwiększenia wytrzymałości mechanicznej, przy zachowaniu dokładności wymiarowo-kształtowej, obiektów wytwarzanych technologią hybrydową w kierunku budowanego modelu obciążonych głównie momentem skręcającym.

Do weryfikacji postawionej tezy naukowej przyjęto następujący plan badań:

1. Badania statycznej wytrzymałości na rozciąganie i zginanie próbek normatywnych wykonanych metodą ekstruzji warstwowej, technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem oraz opracowaną technologią hybrydową.
2. Badania wytrzymałości na skręcanie walcowych próbek z wielowypustem wykonanych metodą ekstruzji warstwowej, technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem oraz opracowaną technologią hybrydową.
3. Analizę morfologii powierzchni próbek otrzymanych po statycznej próbie skręcania z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego.
4. Przeprowadzenie badań termicznych metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) w celu określenia stopnia krystalizacji polimerów termoplastycznych poddanych obróbce cieplnej.

Ponadto w celu określenia wielkości wpływu dokładności geometrycznej i struktury powierzchni na wytrzymałość badanych części oraz weryfikacji wymiarowo-kształtowej odwzorowania modeli wytworzonych technologią hybrydową wykonano:

- Analizę dokładności geometrycznej próbek przewidzianych do badań wytrzymałości na skręcanie wykonanych metodą ekstruzji warstwowej oraz opracowaną technologią hybrydową przy użyciu bezstykowego skanera optycznego,
- Określenie struktury geometrycznej powierzchni walcowych próbek wykonanych metodą ekstruzji warstwowej w orientacji poziomej i pionowej względem platformy roboczej urządzenia oraz opracowaną technologią hybrydową.

4. METODYKA BADAWCZA

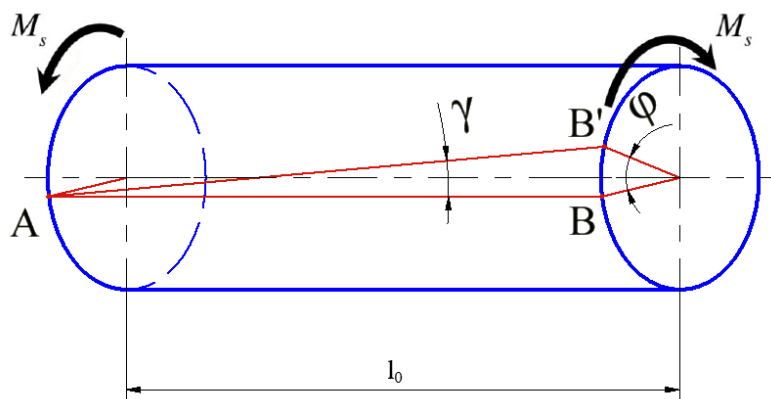
4.1. Opracowanie i wykonanie próbek badawczych metodą hybrydową

Statyczna próba skręcania

Skręcanie pręta obciążonego parą sił P o równych wartościach i przeciwnych zwrotach, działających w płaszczyźnie prostopadłej do osi pręta (w płaszczyźnie przekroju normalnego), podlega czystemu skręcaniu. Powstały stan odkształcenia próbki określa wartość jednostkowego kąta skręcania odniesionego do jej długości pomiarowej [31, 60].

Próba statycznego skręcania, podobnie jak próba jednoosiowego rozciągania, znalazła duże zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Charakterystyczną cechą próby skręcania jest jednakowy rozkład odkształceń i naprężeń na długości próbki aż do momentu zniszczenia kształtki. Wynika to z zachowania praktycznie stałego przekroju i długości pomiarowej próbki podczas próby skręcania, aż do uzyskania złomu, co pozwala na dokładne określenie naprężeń, nawet przy znacznych odkształceniach (nie pojawia się tzw. „szyjka” jak w przypadku próby jednoosiowego rozciągania) [68, 160].

Analizie zostaje poddana próbka o długości l_0 i przekroju kołowym o promieniu r . Pręt jest obciążony na końcach dwoma, równoważącymi się momentami skręcającymi M_s działającymi w płaszczyznach prostopadłych do osi próbki (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Skręcany element o przekroju kołowym

Podczas skręcania próbki o przekroju kołowym naprężenia styczne przedstawia zależność:

$$\tau_s = G \frac{d\varphi}{dx} \rho \quad (4.1)$$

gdzie:

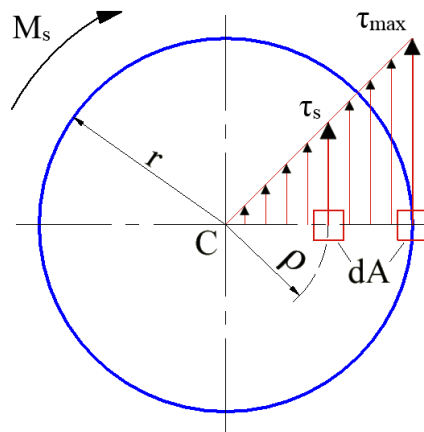
ρ – dowolny promień powierzchni cylindrycznej mniejszy od r ,

φ – kąt skręcenia,

G – moduł sprężystości poprzecznej.

Rozkład naprężeń stycznych τ_s dla pręta kołowego pokazano na rysunku 4.2. Największe naprężenia styczne występują na obwodzie przekroju poprzecznego i są wyrażone wzorem [60]:

$$\tau_{max} = G \cdot r \frac{d\varphi}{dx} \quad (4.2)$$



Rys. 4.2. Rozkład naprężeń stycznych τ_s w elemencie o przekroju kołowym

Siła styczna działająca na element dA wynosi $\tau_s dA$, a moment tej siły względem osi pręta $\tau_s dA \rho$. Rozpatrując stan równowagi elementu o długości dx , obciążonego z lewej strony momentem M_s i elementarnymi siłami wewnętrznymi $\tau_s dA$ z prawej strony, warunek równowagi przyjmuje postać [68]:

$$\int_A \tau_s dA \rho - M_s = 0 \quad (4.3)$$

Wyrażenie (4.1) po podstawieniu na (4.3) ma postać:

$$G \frac{d\varphi}{dx} \int_A \rho^2 dA = M_s \quad (4.4)$$

gdzie

$\int_A \rho^2 dA = J_0$ – biegunowy moment bezwładności przekroju poprzecznego.

Wzór na maksymalne naprężenia styczne można zapisać w postaci:

$$\tau_{max} = \frac{M_s}{W_0} \quad (4.5)$$

gdzie W_0 – wskaźnik wytrzymałości na skręcanie.

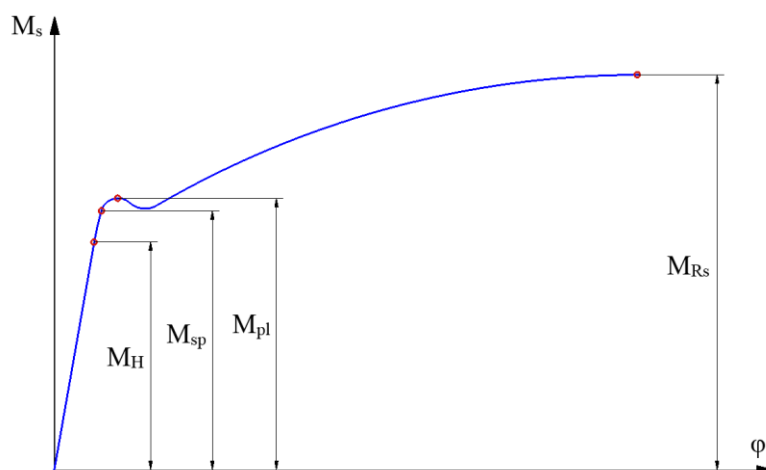
Kąt skręcenia φ elementu o długości l_0 wynosi:

$$\varphi = \frac{M_s l_0}{GJ_0} \quad (4.6)$$

Z kolei kąt odkształcenia postaciowego γ wynosi:

$$\gamma = \frac{\tau_{max}}{G} = \varphi \frac{d_0}{2l_0} \quad (4.7)$$

Podstawowe wielkości charakteryzujące właściwości materiału przy statycznym skręcaniu przedstawiono na wykresie (rys. 4.3) w postaci zależności momentu skręcającego w funkcji kąta skręcenia.



Rys. 4.3. Wykres skręcania próbki z wyraźną granicą plastyczności

Granica proporcjonalności na skręcanie określona jest wzorem:

$$R_{Hs} = \frac{M_H}{W_0} \quad (4.8)$$

gdzie M_H – największa wartość momentu skręcającego, do której obowiązuje prawo Hooke'a.

Naprężenia na granicy sprężystości określa się jako:

$$R_{sp} = \frac{M_{sp}}{W_0} \quad (4.9)$$

gdzie M_{sp} – największa wartość momentu skręcającego odpowiadającego teoretycznej granicy sprężystości.

Granica plastyczności na skręcanie określona jest następującym wzorem:

$$R_{pl} = \frac{M_{pl}}{W_0} \quad (4.10)$$

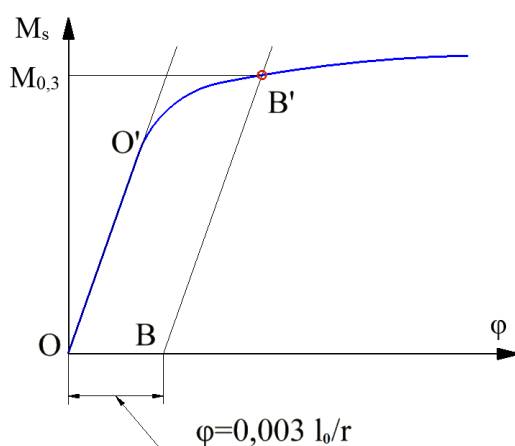
gdzi: M_{pl} – wartość momentu skręcającego odpowiadającego granicy plastyczności.

Wytrzymałość na skręcanie można przedstawić w następujący sposób:

$$R_{ms} = \frac{M_{RS}}{W_0} \quad (4.11)$$

gdzie M_{RS} – wartość momentu skręcającego odpowiadającego doraźnej wytrzymałości na skręcanie.

Dla materiałów nie mających wyraźnej granicy plastyczności wyznaczana jest umowna granica plastyczności. Odpowiada ona naprężeniu, dla którego kąt odkształcenia postaciowego wynosi $\gamma_{pl} = 0,3\%$. Kąt skręcenia dla umownej granicy plastyczności jest obliczany w następujący sposób: $\varphi_{pl} = 0,003l_0/r$. Dla tego kąta wartość momentu skręcającego $M_{0,3}$ można wyznaczyć w sposób graficzny, poprzez poprowadzenie prostej równoległej do odcinka OO' z punktu B. Prosta przecina wykres w punkcie B' wyznaczając przybliżoną wartość umownej granicy plastyczności [60, 160]. Wykres skręcenia dla materiału sprężysto-plastycznego przedstawiono na rysunku 4.4.

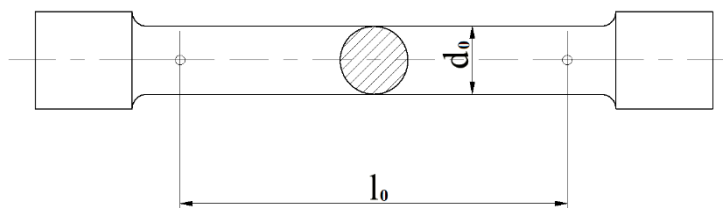


Rys. 4.4. Wykres statycznego skręcenia dla materiału sprężysto-plastycznego

Wartość naprężenia odpowiadającego umownej granicy plastyczności obliczana jest ze wzoru:

$$R_{0,3} = \frac{M_{0,3}}{W_0} \quad (4.11)$$

Statyczną próbę skręcania przeprowadza się zwykle na próbkach o przekroju kołowym (rys. 4.5). Długość pomiarowa l_0 uzależniona jest od średnicy kształtki d_0 [68].



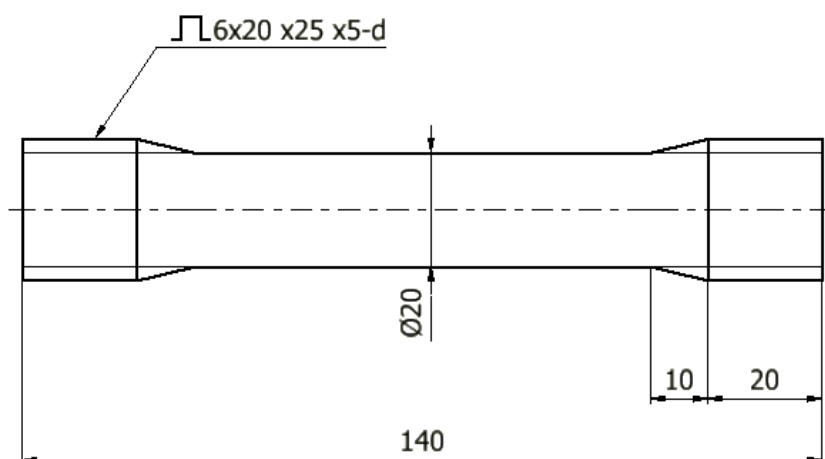
Rys. 4.5. Próbką normatywna do badania na skręcanie (według [68])

Wymiary próbki zwykle wynoszą:

- $d_0 = 10 - 30$ mm,
- $l_0 = (5 - 20)d_0$.

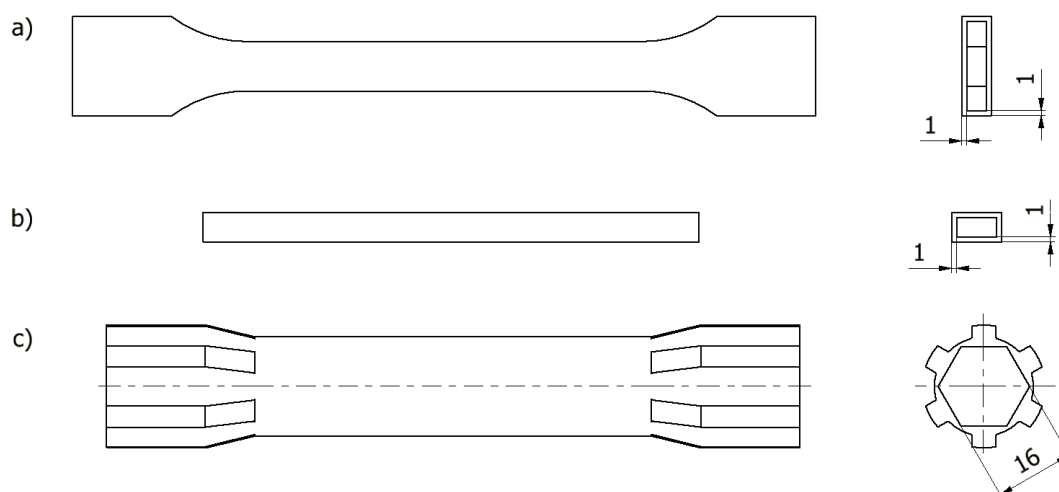
Opracowanie i wykonanie modeli próbek

Modele próbek badawczych oraz wzorców do formy silikonowej zostały zaprojektowane w środowisku Autodesk Inventor Professional. Kształt i wymiary próbek przeznaczonych do badań wytrzymałości na skręcanie (rys. 4.6) zostały przyjęte na podstawie literatury opisującej próbę statycznego skręcania (zalecana długość pomiarowa wynosi 5 – 20 średnic kształtki) oraz badań eksperymentalnych prowadzonych w Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej [24, 35, 100]. Biorąc pod uwagę, iż próbki będą wytwarzane technikami przyrostowymi, w miejscu połączenia wału np. z piastą lub sprzęgłem zastosowano wielowypust. Połączenie wielowypustowe stosowane jest ze względu na większą nośność i równomierność obciążenia, co jest szczególnie istotne w przypadku tworzyw polimerowych. Do badań statycznego rozciągania zastosowano uniwersalną kształtkę typu 1A zgodnie z normą PN-EN ISO 527-2:2012, natomiast w próbie trzypunktowego zginania tworzyw sztucznych próbkę typu 1 wg normy PN-EN ISO 178:2019-06. W obu przypadkach grubości kształtek wynoszą 6 mm.



Rys. 4.6. Próbkę do stanowiskowych badań wytrzymałości na skręcanie

Na rysunku 4.7 przedstawiono wymiary cienkościennych form próbek wytwarzanych autorską technologią hybrydową łączącą metodę ekstruzji warstwowej z odlewaniem niskociśnieniowym.



Rys. 4.7. Kształty i wymiary rdzenia próbek wytwarzanych technologią hybrydową do badań wytrzymałości na: a) rozciąganie, b) zginanie, c) skręcanie

Materiały stosowane w badaniach

Do wytworzenia próbek zastosowano tworzywo termoplastyczne ABS i PLA firmy Spectrum Filaments przetwarzane w technologii MEX oraz odlewane próżniowo żywice chemoutwardzalne PR2000, PR700, PR1819. Żywice te to dwuskładnikowe kompozycje poliuretanowe przeznaczone do szybkiego prototypowania i produkcji krótkich serii części. Pierwszym kryterium doboru wybranych żywic były ich właściwości fizyczne zbliżone do tworzyw termoplastycznych takich jak ABS, PC/PMMA. Na podstawie kart materiałowych można założyć, że żywice chemoutwardzalne posiadają większą

wytrzymałość od tworzyw termoplastycznych przetwarzanych przyrostowo. Kolejnym kryterium związanym z wyborem do odlewania próżniowego żywic poliuretanowych był parametr określany „czasem życia”, który wynosił od 6 do 19 minut w zależności od typu żywicy. Ponadto żywice poliuretanowe cechuje niski skurcz oraz brak substancji lotnych. Właściwości mechaniczne materiałów zostały przedstawione w tabelach 4.1 – 4.5. Jako materiał na model wzorcowy stosowany do wykonania form silikonowych użyto żywice optycznie czynną RGD720 przetwarzaną w technologii PolyJet.

Tabela 4.1. Właściwości mechaniczne tworzywa termoplastycznego PLA [148]

Właściwości mechaniczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie na granicy zerwania	D 882	MPa	53
Wytrzymałość na rozciąganie na granicy plastyczności	D 882	MPa	60
Moduł sprężystości przy rozciąganiu	D 882	GPa	3,5
Wydłużenie przy rozciąganiu	D 882	%	6
Udarność metodą Izoda z karbem	D 256	J/m	16
Wytrzymałość na zginanie	D790	MPa	83
Moduł sprężystości przy zginaniu	D790	MPa	3,8

Tabela 4.2. Właściwości mechaniczne tworzywa termoplastycznego ABS [148]

Właściwości mechaniczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie na granicy plastyczności	ISO 527-1,2	MPa	39
Wydłużenie przy rozciąganiu na granicy zerwania	ISO 527-1,2	%	13
Moduł sprężystości przy rozciąganiu	ISO 527-1,2	MPa	2100
Moduł sprężystości przy zginaniu	ISO 178	MPa	2000
Twardość mierzona wgłębniakiem kulowym	ISO 2039-1	N/mm ²	95
Udarność metodą Izoda, z karbem, 3,2 mm przy 23°C	ISO 180-1A	KJ/m ²	19
Udarność metodą Izoda, z karbem, 3,2 mm przy -30°C	ISO 180-1A	KJ/m ²	10

Tabela 4.3. Właściwości mechaniczne żywicy chemoutwardzalnej PR2000 [149]

Właściwości mechaniczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość
Moduł sprężystości przy zginaniu	ISO 178 : 2011	MPa	2000
Maksymalna wytrzymałość na zginanie	ISO 178 : 2011	MPa	80
Moduł sprężystości przy rozciąganiu	ISO 527-1 : 2012	MPa	1850
Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie	ISO 527-1 : 2012	MPa	57
Wydłużenie przy zerwaniu	ISO 527-1 : 2012	%	5

Tabela 4.4. Właściwości mechaniczne żywicy chemoutwardzalnej PR700 [149]

Właściwości mechaniczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość
Moduł sprężystości przy zginaniu	ISO 178 : 2011	MPa	2300
Maksymalna wytrzymałość na zginanie	ISO 178 : 2011	MPa	80
Moduł sprężystości przy rozciąganiu	ISO 527-1 : 2012	MPa	1800
Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie	ISO 527-1 : 2012	MPa	60
Wydłużenie przy zerwaniu	ISO 527-1 : 2012	%	13

Tabela 4.5. Właściwości mechaniczne żywicy PR1819 chemoutwardzalnej [149]

Właściwości mechaniczne	Metoda testowa	Jednostka	Wartość
Moduł sprężystości przy zginaniu	ISO 178 : 2011	MPa	2100
Maksymalna wytrzymałość na zginanie	ISO 178 : 2011	MPa	80
Moduł sprężystości przy rozciąganiu	ISO 527-1 : 2012	MPa	2100
Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie	ISO 527-1 : 2012	MPa	60
Wydłużenie przy zerwaniu	ISO 527-1 : 2012	%	14

Przygotowanie próbek do badań stanowiskowych

Badania właściwości mechanicznych zostały przeprowadzone dla próbek wytwarzanych w trzech różnych technologiach: metodą ekstruzji warstwowej, technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem oraz opracowaną technologią hybrydową łączącą metodę ekstruzji warstwowej z odlewaniem niskociśnieniowym.

➤ Metoda ekstruzji warstwowej

Próbki do badań wytwarzane metodą ekstruzji warstwowej wykonano na drukarce Prusa i3 MK3 (rys. 4.8) w dwóch konfiguracjach w zależności od ułożenia względem

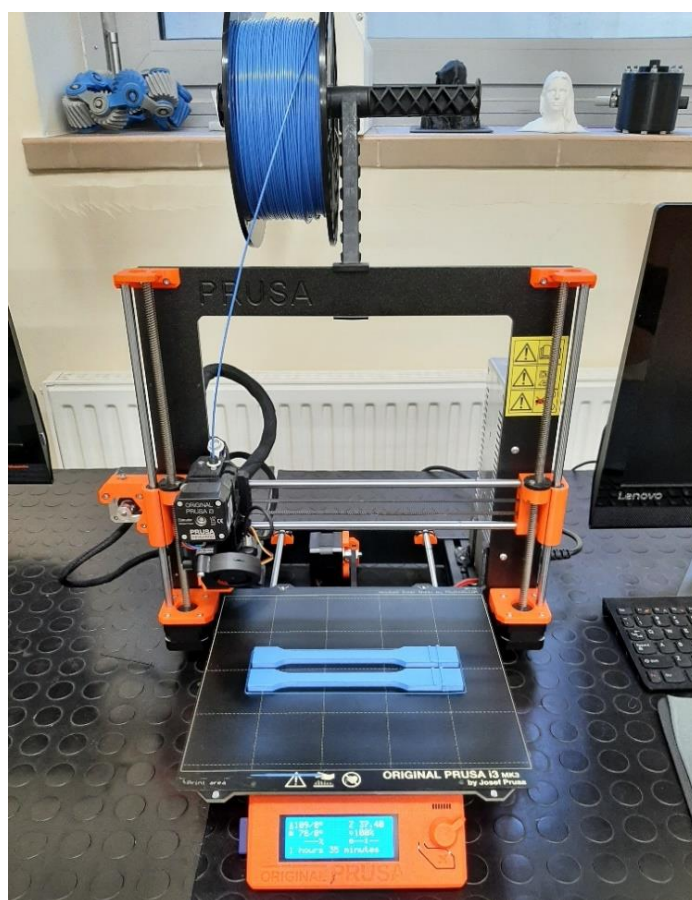
platformy roboczej: pionowym i poziomym. Proces drukowania dla wszystkich modeli charakteryzował się następującymi parametrami podstawowymi:

- naprzemienne ułożenie ścieżek pod kątami 45° i 135°,
- gęstość wypełnienia struktury wewnętrznej – 100%,
- dwa obrisy konturu,
- wysokość warstwy tworzywa 0,2 mm.

Parametry procesu przetwórstwa dla materiału PLA oraz kopolimeru ABS przedstawiono w tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Parametry procesu dla materiałów PLA i ABS.

Nazwa	PLA	ABS
Temp. głowicy	210 °C	255 °C
Temp. stołu roboczego	60 °C	100 °C
Komora	Otwarta	Zamknięta



Rys. 4.8. Urządzenie drukujące Prusa i3 MK3

➤ Odlewanie pod obniżonym ciśnieniem

Wytworzenie próbek badawczych technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem (VC) należy rozpocząć od przygotowania formy odlewniczej. Modele wzorcowe dla sylikonowej formy wykonano na drukarce Object Eden 260V pracującej w technologii PolyJet. Jako materiał modelowy zastosowano żywicę optycznie czynną RGD720 firmy Stratasys. Próbki zostały przygotowane w trybie pracy HQ (ang. High Quality) o wysokości warstwy 0,016 mm. Podpory wygenerowano adekwatnie do wybranej wersji - glossy, w której materiał podporowy występuje tylko tam, gdzie jest konieczny, a powierzchnie, które nie mają styczności z podporami są błyszczące. Po zakończeniu procesu drukowania struktury podpierające zostały wypłukane w komorze ciśnieniowej myjki wodnej. Materiał podporowy usunięto przy użyciu strumienia podgrzanej wody. Ostatnim etapem wykonania wzorca do formy odlewniczej było nałożenie na osuszony element podkładu akrylowego w celu uniknięcia reakcji chemicznej żywicy optycznie czynnej z sylikonem.

Przygotowane modele wzorcowe zostały zamocowane w skrzynkach formierskich wykonanych z polimetakrylanu metylu. Następnie wymieszano sylikon SILASTIC RTV-4234-T4 z utwardzaczem w stosunku 10:1 i pojemnik z mieszaniną umieszczono w komorze próżniowej w celu usunięcia pęcherzyków powietrza. Skrzynki formierskie zalano wstępnie odgazowanym sylikonem, który ponownie trafił do komory próżniowej, aby odpowietrzyć formę (usunąć pęcherzyki powietrza z powierzchni modeli wzorcowych). Sieciowanie sylikonu odbywało się w warunkach temperatury pokojowej.

W przypadku próbek przeznaczonych do badań w statycznej próbie rozciągania i zginania zastosowano formy otwarte z układem przelewowym zapewniającym uzyskanie wymaganej grubości kształtki. Dla próbek skręcanych wykonano formę dzieloną, którą po procesie sieciowania sylikonu rozcięto wzdłuż płaszczyzny podziału.

Żywice chemoutwardzalne zostały odlane zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w kartach produktu. Początkowy proces odlewania dla wszystkich trzech żywic przebiegał następująco:

- odmierzenie do pojemników dwóch składników żywicy w odpowiednich proporcjach,
- rozgrzanie formy sylikonowej do temperatury 70 °C,

- umieszczenie formy oraz pojemników ze składnikami żywicy w komorze próżniowej (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Komora do odlewania próżniowego

Kolejny etap postępowania był zależny od rodzaju żywicy chemoutwardzalnej. W przypadku żywicy PR2000 jej składniki pozostawiono w warunkach próżni przez 10 minut, a następnie połączono je ze sobą. Proces mieszania trwał 2 minuty, po czym zalano formę silikonową. W celu utwardzenia żywicy forma silikonowa była wygrzewana w piecu przez 60 minut w temperaturze 70 °C.

Składniki żywicy PR700 oraz rozgrzaną formę umieszczono w próżni przez 10 minut (analogicznie do PR2000). Połączone komponenty (izocyjanian i polioliol) były mieszane przez 1 minutę, po czym w komorze ustawiono ciśnienie na poziomie 100 hPa i zalano formę silikonową, którą następnie wygrzewano w temperaturze 70 °C przez 45 minut. Po rozformowaniu próbki zostały dotwardzane w temperaturze 120 °C przez 120 minut.

Składniki żywicy PR1819 po dziesięciominutowym procesie usuwania pęcherzyków powietrza były mieszane przez 3 minuty, a następnie wlane do formy silikonowej. Po wygrzewaniu formy przez 180 minut w temperaturze 70 °C rozformowane próbki były dotwardzane przez 16 godzin w temperaturze 100 °C.

Z próbek otrzymanych technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem, zostały mechanicznie usunięte układy zalewowe oraz powstałe wypłytki (rys. 4.10). Na powierzchni próbek nie zauważono żadnych nieciągłości, pęcherzy, czy też niedolewów.



Rys. 4.10. Próbkki do badań wytrzymałości na skręcanie

➤ Hybrydowa technologia wytwarzania części

Cienkościenna forma próbek do badań wytrzymałości na skręcanie została wykonana w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia. Próbkki do badań wytrzymałości na rozciąganie i zginanie zostały ułożone poziomo na platformie roboczej urządzenia, ze względu na kierunkowe działanie naprężeń. Dodatkowym czynnikiem wyboru położenia poziomego był aspekt ekonomiczny – skrócenie czasu wydruku o ok. 50%. Podstawowe parametry procesu drukowania były takie same jak w przypadku próbek wytwarzanych wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej.

Próbkki do badań zostały zaprojektowane w sposób dający możliwość ich połączenia z układami zalewowymi. Takie podejście pozwala na próżniowe odlewanie kilku próbek w jednym cyklu (rys. 4.11). Proces odlewania przebiegał analogicznie do próbek wytwarzanych wyłącznie technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem. Układy zalewowe zostały usunięte mechanicznie.



Rys. 4.11. Próbkę połączone z układem zalewowym umieszczone w komorze do odlewania próżniowego

Opis wykonania próbek jako element badań do opracowania metodyki hybrydowego wytwarzania części

Wytwarzanie elementów maszyn wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej wiąże się z pewnymi ograniczeniami, do których należy między innymi niski stosunek wytrzymałości mechanicznej w odniesieniu do dokładności wymiarowo-kształtowej dla części osiowosymetrycznych. W związku z tym została opracowana hybrydowa technologia wytwarzania elementów, która polega na połączeniu metody ekstruzji warstwowej z odlewaniem pod obniżonym ciśnieniem. Sylikonowa forma (stosowana w metodzie odlewania pod obniżonym ciśnieniem) zostaje zastąpiona cienkościenną formą (o geometrii wytwarzanego elementu) wykonaną metodą ekstruzji warstwowej. Następnie w procesie odlewania próżniowego forma zostaje wypełniona żywicą chemoutwardzalną. W przypadku części przeznaczonych do wytwarzania przyrostową technologią hybrydową główny tok projektowania nie ulega zmianie, ale należy uwzględnić modyfikację tego procesu ze względu na wyrób końcowy, którym jest cienkościenna forma. Metodykę opisującą wytwarzanie części maszyn technologią hybrydową można podzielić na cztery zasadnicze etapy:

1. Projektowanie części na podstawie którego zostanie wyeksportowana trójwymiarowa geometria stanowiąca element bazowy końcowego wyrobu:

- opracowanie modelu bryłowego 3D CAD, uwzględniając:
 - ✓ naddatki na obróbkę mechaniczną (wykańczającą, odcięcie układów zalewowych),
 - ✓ tolerancje wymiarów,
 - ✓ zastosowane tworzywo polimerowe,
 - ✓ parametry oraz ograniczenia procesu przyrostowego,
 - ✓ ułożenie części w komorze roboczej urządzenia,
- opracowanie cienkościennej formy uwzględniając wytyczne w zależności od geometrii obiektu:
 - ✓ dla części nie będących bryłami obrotowymi wytwarzanych przyrostowo w płaszczyźnie poziomej należy umieścić żebra wewnątrz geometrii, które pozwolą na uzyskanie górnej powłoki zewnętrznej wytwarzanego modelu przy zachowaniu dokładności wymiarowo-kształtowej,
 - ✓ dla smukłych elementów wytwarzanych pionowo względem platformy roboczej urządzenia należy zaprojektować stopy (które w końcowym procesie zostaną mechanicznie usunięte) zapobiegające odrywaniu się materiału od platformy roboczej urządzenia,
 - ✓ dla elementów osiowosymetrycznych wytwarzanych pionowo względem platformy roboczej urządzenia jako kształt wypełnienia zaleca się rdzeń o przekroju wielokąta (sześciokąta, ośmiokąta), co jest związane z brakiem możliwości obrócenia się cienkościennej formy względem wypełnienia, ze względu na niedostateczną adhezję między materiałami,
 - ✓ dla wypełnienia, którego przekrój rdzenia jest kołem, zaleca się umieścić wstawki blokujące możliwość obrotu pomiędzy rdzeniem, a formą,
 - ✓ dla części, która będzie wypełniona dwiema żywicami, należy uwzględnić minimalną grubość ścianki oddzielającej żywice lub dodatkowo połączyć ją z powłoką formy wykonując przy tym otwory umożliwiające przepływ żywicy,
- opracowanie układów zalewowych (połączonych z częścią lub uwzględnienie miejsc w których zostaną zamontowane),
- export danych do formatu STL,

- obróbka lub naprawa danych (weryfikacja siatki trójkątów).

2. Wykonanie cienkościennej formy oraz ewentualnych układów zalewowych metodą ekstruzji warstwowej:

- konwersja geometrii modelu,
- umieszczenie modelu w wirtualnej komorze urządzenia,
- ustawienie parametrów procesu przyrostowego, uwzględniając:
 - ✓ brak generowania struktur podporowych w miejscach przeznaczonych do wypełnienia żywicą chemoutwardzalną,
 - ✓ sterowanie parametrami w celu ograniczenia szczelin powietrznych,
- generowanie kodu do urządzenia drukującego,
- uruchomienie procesu,
- obróbka postprocesowa.

3. Wypełnienie formy żywicą chemoutwardzalną w procesie odlewania próżniowego pod obniżonym ciśnieniem oraz przeprowadzenie obróbki cieplnej części:

- wygrzanie cienkościennej formy,
- odmierzenie składników żywicy chemoutwardzalnej w odpowiednich proporcjach,
- odgazowanie oraz połączenie składników żywicy w komorze próżniowej,
- wypełnienie cienkościennej formy,
- wygrzewanie wypełnionej żywicą chemoutwardzalną części w warunkach określonych dla zastosowanej żywicy.

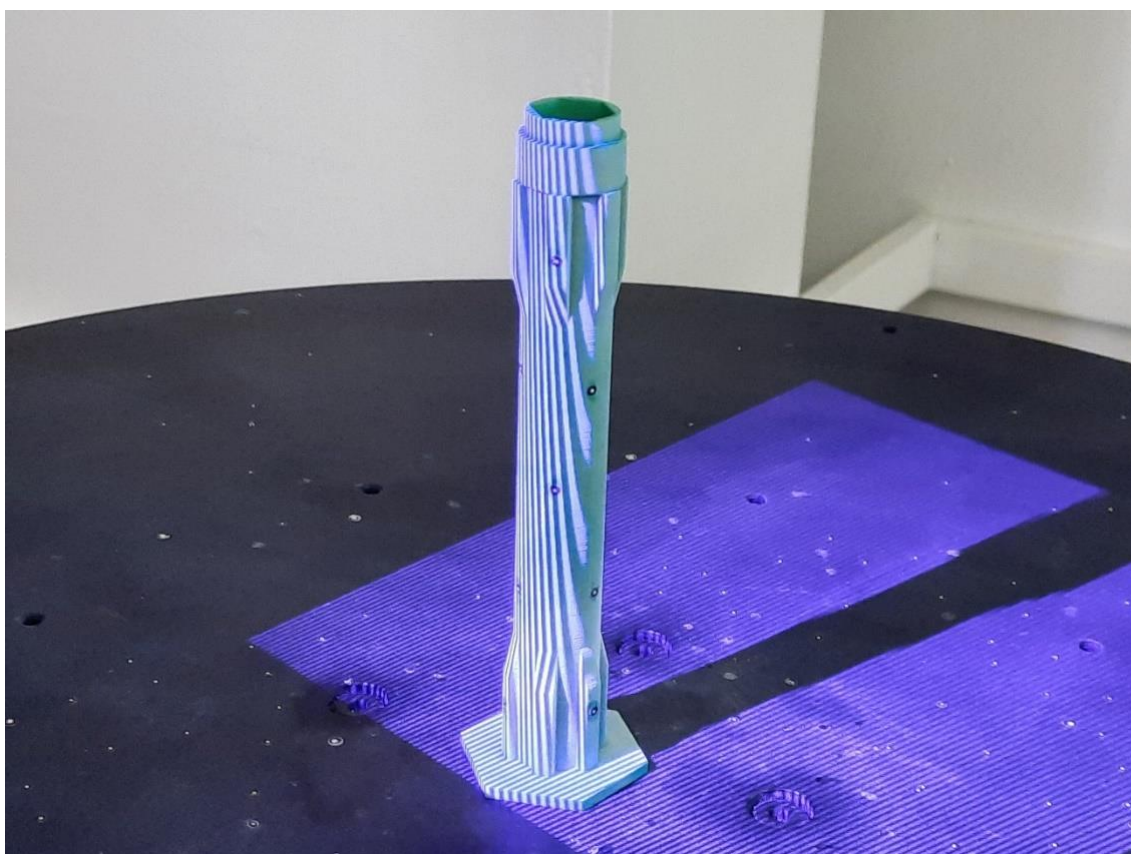
4. Obróbka mechaniczna części po zakończeniu procesu.

Biorąc pod uwagę przedstawioną metodykę wytwarzania części maszyn technologią hybrydową można zauważyć, że w przypadku punktu trzeciego oraz czwartego wytwarzanie części w głównej mierze zależy od wytycznych podanych przez producenta żywic oraz od metody odlewania pod obniżonym ciśnieniem. Jednakże na etapie projektowania należy uwzględnić parametry wygrzewania wstępnej formy oraz sieciowania żywicy w odniesieniu do temperatury mięknięcia tworzywa polimerowego. Nieodpowiednio dobrane tworzywo polimerowe może spowodować odkształcenie cienkościennej formy, a co za tym idzie pogorszenie dokładności wymiarowo-kształtowej wytwarzanej części.

4.2. Aparatura stosowana do badań

Badania dokładności geometrycznej próbek

Analiza dokładności geometrycznej wykonanych próbek została wykonana na podstawie pomiarów bezdotykowego systemu optycznego ATOS II Triple Scan. Skaner z grupy Triple Scan pracuje w technologii Bluelight (opiera się na wykorzystaniu światła niebieskiego) z matrycami rejestrującymi wyniki pomiarów o rozdzielczości 5 Mpx. W celu precyzyjnego odwzorowania geometrii powierzchnia modeli badawczych pokryta została powłoką antyrefleksyjną oraz znacznikami (rys. 4.12). Porównanie danych zeskanowanego obiektu z modelem CAD przeprowadzono w oprogramowaniu GOM Inspect Suite 2020.



Rys. 4.12. Próbką pokryta powłoką antyrefleksyjną oraz znacznikami

Badania struktury geometrycznej powierzchni próbek

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni wykonano za pomocą profilometru TalyScan 150 firmy Taylor Hobson z końcówką o promieniu zaokrąglenia igły pomiarowej 2 μm (rys. 4.13). W procesie oceny topografii powierzchni ustawiono krok próbkowania w osi X i Y na wartość minimalną równą 5 μm . Pojedynczy mierzony

obszar miał wymiary 3 mm x 3 mm. Podczas pomiaru zastosowano najmniejszą dostępną prędkość pomiaru 2000 $\mu\text{m/s}$. W oparciu o analizowaną powierzchnię, dobrano średni zakres pomiaru głowicy. Głowica podczas wykonania pomiaru jednego zarysu nie była podnoszona przed wykonaniem kolejnego. Zabieg ten pozwolił na uniknięcie wprowadzenia niepotrzebnych oscylacji podczas wykonywania pomiaru. Obróbkę danych pomiarowych mierzonych powierzchni przeprowadzono w programie MountainsLab Premium.



Rys. 4.13. Profilometr 3D Talyscan 150

Badanie wytrzymałości w statycznej próbie rozciągania

Styczna próba rozciągania została wykonana zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 527-2:2012, pt. „Tworzywa sztuczne. Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu”. Badanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy INSTRON model 5967 (rys. 4.14) z prędkością rozciągania 5 mm/min.



Rys. 4.14. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 5967

Badanie wytrzymałości w statycznej próbie trzypunktowego zginania

Właściwości wytrzymałościowe w próbie 3-punktowego zginania określono zgodnie z normą PN-EN ISO 178:2019-06, pt. „Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości przy zginaniu”. Do badań użyto maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5967. Prędkość zginania podczas pomiaru wynosiła 2 mm/min.

Badanie wytrzymałości na skręcanie

Wytrzymałość w statycznej próbie skręcania została wyznaczona w oparciu o skonstruowane stanowisko badawcze (rys. 4.15) wyposażone w silnik, system przekładni, układ sterowania, czujnik momentu i kontroli ruchu (enkoder), układ

pomiarowy oraz rejestrator wyników połączony z komputerem. Wymuszenie momentu skręcającego realizowane jest za pomocą silnika elektrycznego i przekładni ślimakowych o łącznym przełożeniu 1:1800. Za rejestrację wyników badań odpowiada czujnik momentu statycznego podłączony do rejestratora firmy Mecmesin oraz autorskie oprogramowanie zapewniające możliwość ciągłego zapisu danych w postaci wartości momentu skręcającego w funkcji przemieszczenia kąowego. Prędkość obrotowa wału wymuszającego obciążenie wynosiła 0,5 obr/min.



Rys. 4.15. Maszyna do badań wytrzymałości na skręcanie

Badania morfologii powierzchni złomów

Badania morfologii powierzchni przelomów po procesie badań wytrzymałości wykonano za pomocą mikroskopu stereoskopowego KERN OZL-466. Zastosowano dziesięcio- i czterdziestokrotne powiększenie.

Badania termiczne metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC)

Badania cieplne wykonano na kalorymetrze przepływowym DSC 214 Polyma firmy Netzsch (rys. 4.16). Próbkę umieszczono w aluminiowych tyglach o czystości 99,5% i pojemności 40 μ l. Podczas pomiaru mierzono różnicę między natężeniem przepływu

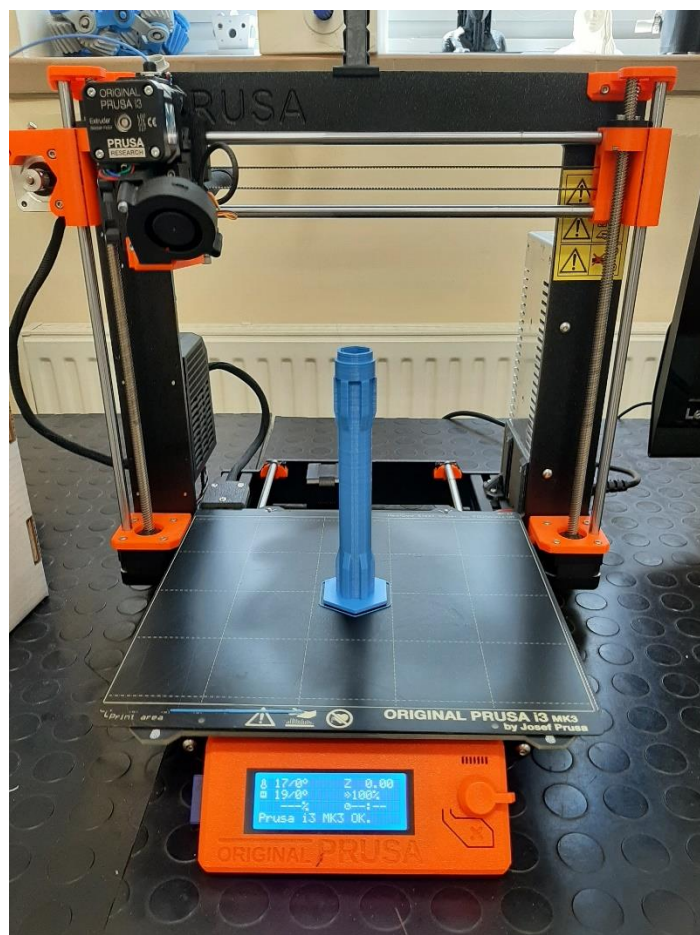
ciepła z otoczenia do tygla z próbką i do pustego tygla w funkcji czasu. Próbka badawcza i pusty tygiel były poddane temu samemu programowi temperaturowemu. Najpierw układ nagrzewano do temperatury 220 °C z szybkością 5K/min, a następnie chłodzono do temperatury 25 °C z szybkością 20 K/min. Pomiary prowadzono w atmosferze azotu o natężeniu przepływu 40 ml/min w komorze grzewczej i 60 ml/min w otoczeniu komory grzewczej.



Rys. 4.16. Kalorymetr przepływowy DSC 214 Polyma

Otrzymywanie próbek do badań

Do wytworzenia próbek metodą ekstruzji warstwowej została użyta maszyna Prusa i3 MK3. Urządzenie charakteryzuje się otwartą przestrzenią roboczą i układem ekstruzji typu „Direct”. Na rysunku 4.17 pokazano ww. drukarkę 3D, natomiast w tabeli 4.7 przedstawiono charakterystykę wybranych parametrów urządzenia.



Rys. 4.17. Urządzenie drukujące Prusa i3 MK3

Tabela 4.7. Parametry procesu dla materiałów PLA i ABS.

Przestrzeń robocza	250 x 210 x 210 mm
Wysokość warstwy	0.05 – 0.35 mm
Dysza	domyślnie 0.4 mm
Średnica filamentu	1.75 mm
Obsługiwane materiały	Szeroka gama termoplastów, wliczając w to PLA, PETG, ASA, ABS, PC (poliwęglan), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (polipropylen), elastyczne, nGen, Nylon, domieszkowane włóknem węglowym, Woodfill
Maksymalna prędkość jałowa	200+ mm/s
Maksymalna temperatura dyszy	300 °C
Maksymalna temperatura stołu	120 °C

Proces wytwarzania form silikonowych, próbek otrzymanych technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem oraz technologią hybrydową realizowany był na maszynie do odlewania ciśnieniowego Schüchl UHG-400 Easy (rys. 4.18). Modele wzorcowe dla form silikonowych wykonano metodą PolyJet na drukarce Object Eden 260V.

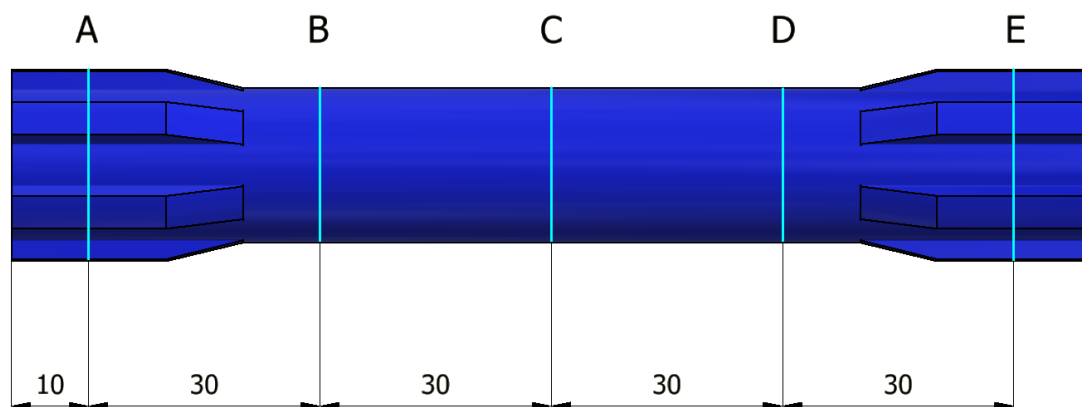


Rys. 4.18. Komora do odlewania próżniowego Schüchl UHG-400 Easy

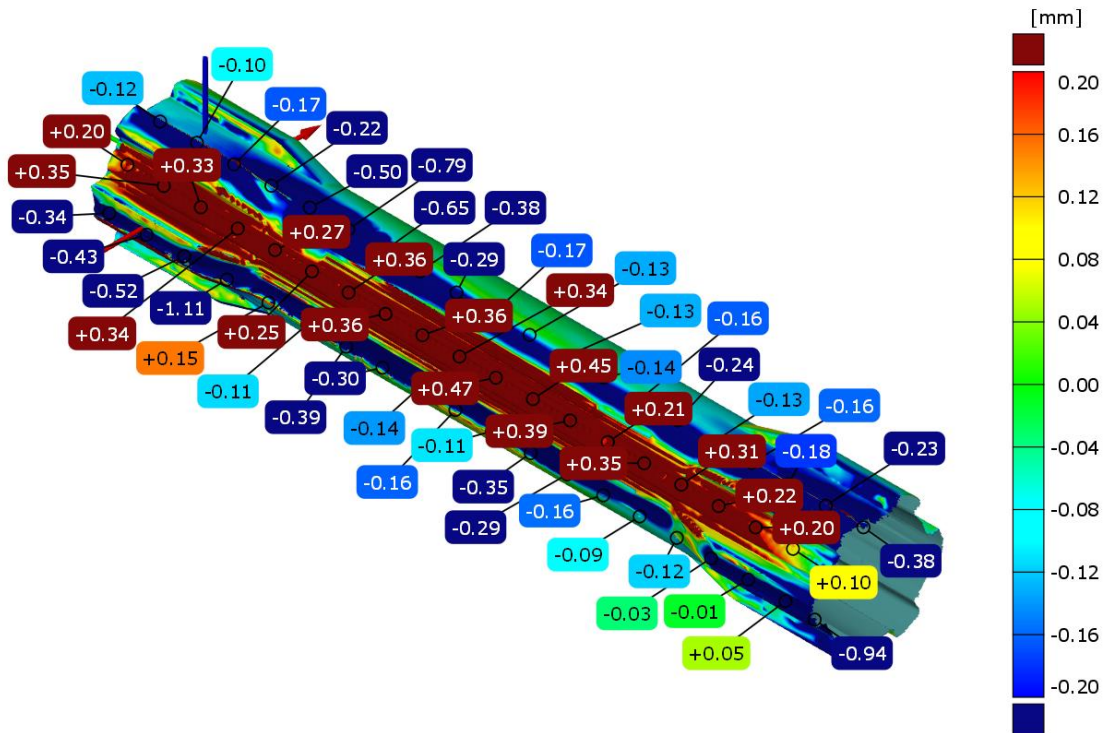
5. BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZY WYNIKÓW

5.1. Dokładność geometryczna próbek

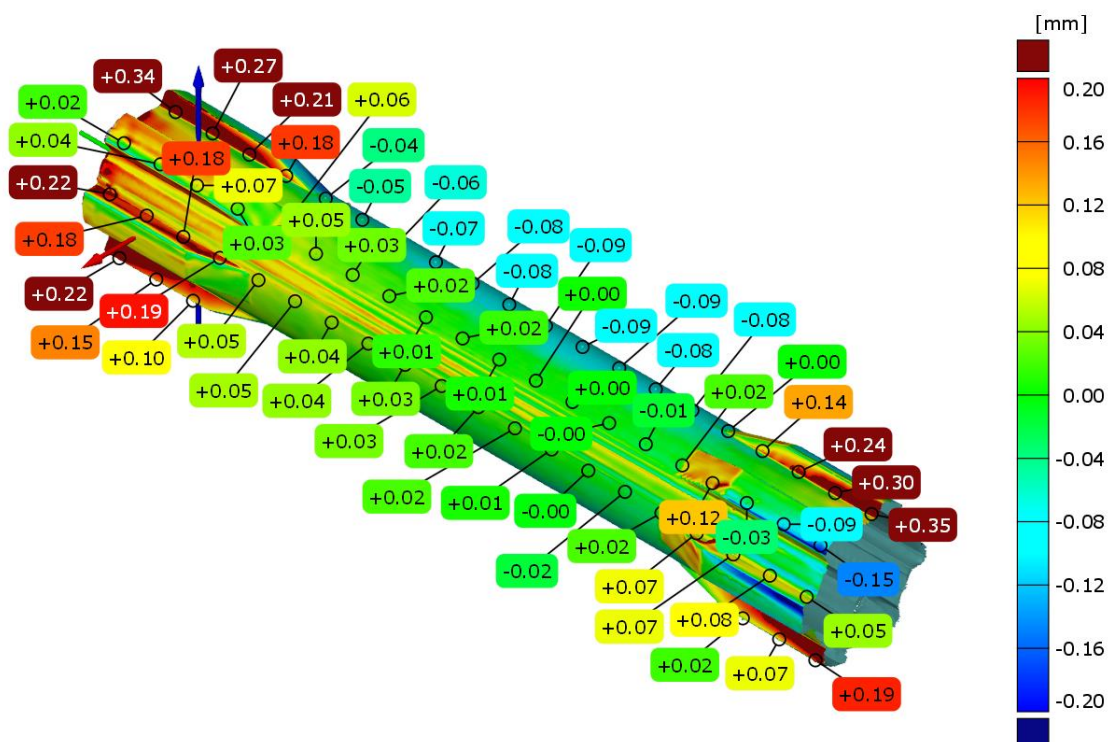
Analizę dokładności geometrycznej przeprowadzono dla próbek przeznaczonych do badań wytrzymałości na skręcanie. Badanie miało na celu weryfikację wymiarowo-kształtową odwzorowania modeli wytworzonych technologią hybrydową w stosunku do próbek wykonanych metodą ekstruzji warstwowej. W pierwszej kolejności badania wykonano dla próbek wytworzonych technologią MEX z kopolimeru ABS oraz PLA ułożonych pionowo i poziomo względem platformy roboczej urządzenia. W celu określenia rzeczywistej geometrii wytworzonych elementów wykonano analizy globalne dla całej powierzchni oraz dla przekrojów zdefiniowanych na ich podstawie. Miejsca pomiaru określają przekroje przedstawione na rysunku 5.1 – dwa w części z wielowypustem oraz trzy dla części walcowej. Ze względu na liczbę ilustracji oraz zbliżone wyniki pomiarów dla części próbek przedstawiono tylko reprezentatywne przykłady. Wyniki analiz pokazano na rysunkach 5.2 – 5.18.



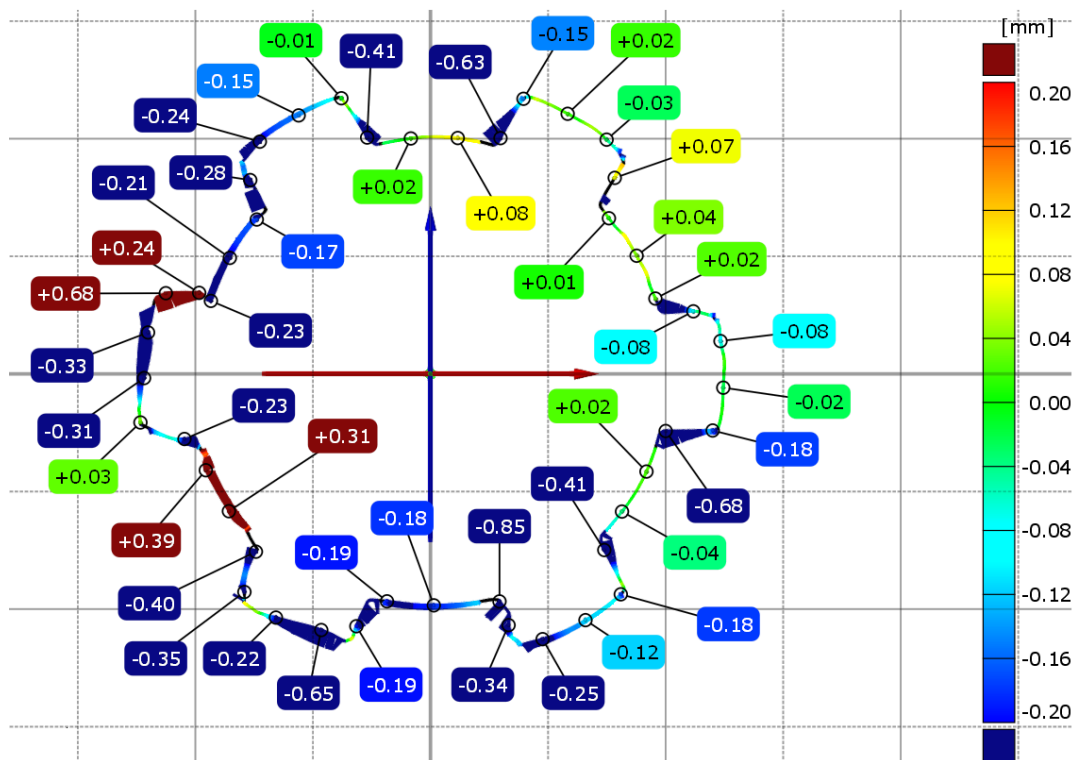
Rys. 5.1. Miejsca pomiarów przekrojów zdefiniowanych do analizy globalnej



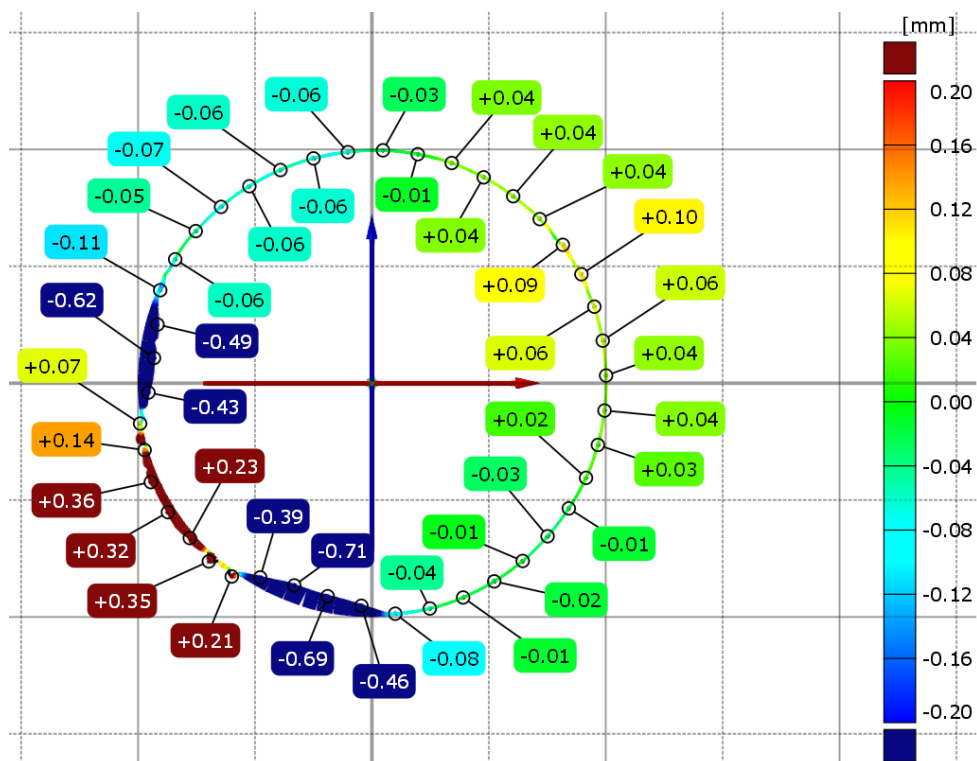
Rys. 5.2. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia – widok od strony powierzchni przylegania próbki do stołu roboczego



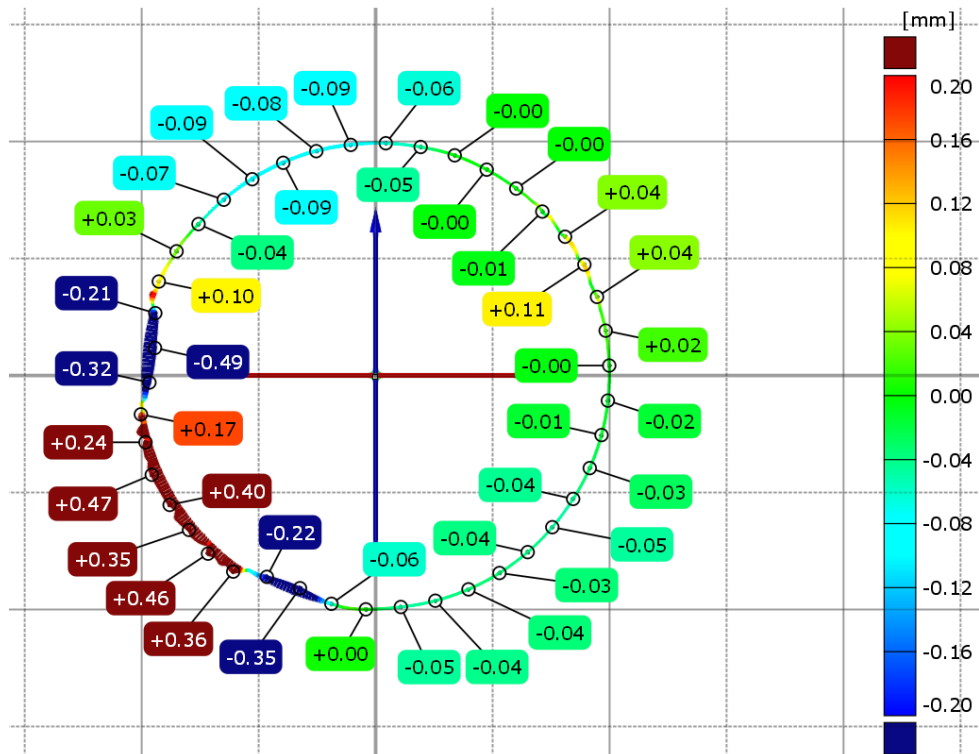
Rys. 5.3. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia – widok od strony części walcowej próbki w okolicy tworzącej najbardziej oddalonej od stołu roboczego



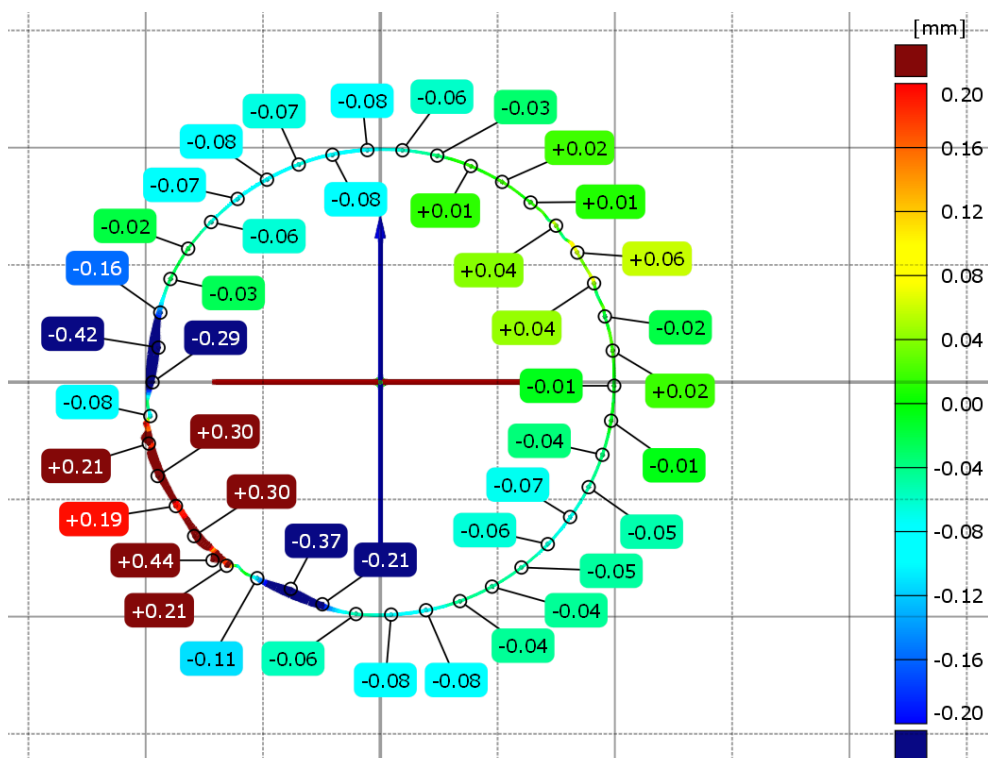
Rys. 5.4. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju A próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia



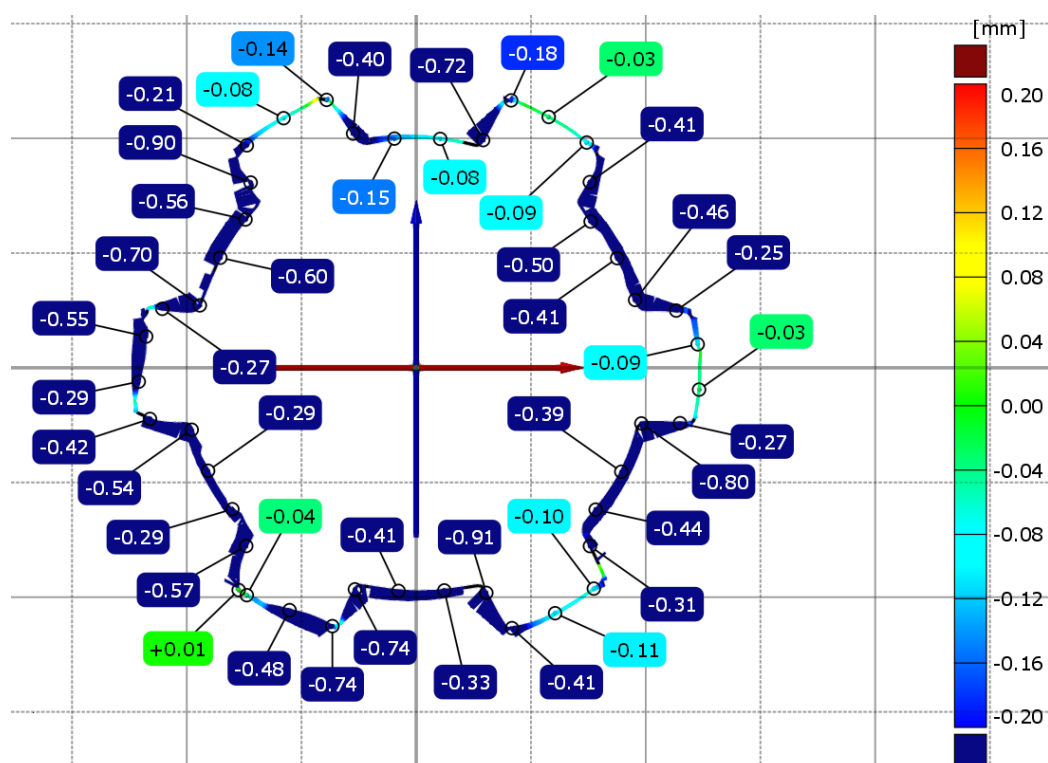
Rys. 5.5. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju B próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia



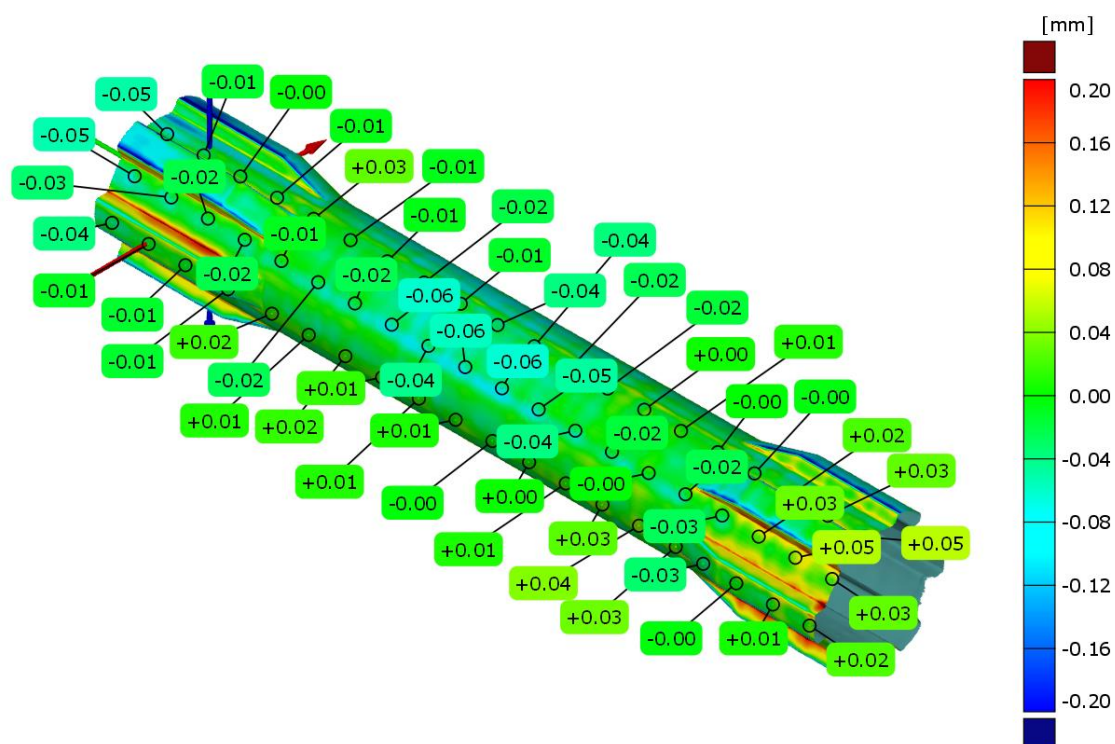
Rys. 5.6. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju C próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia



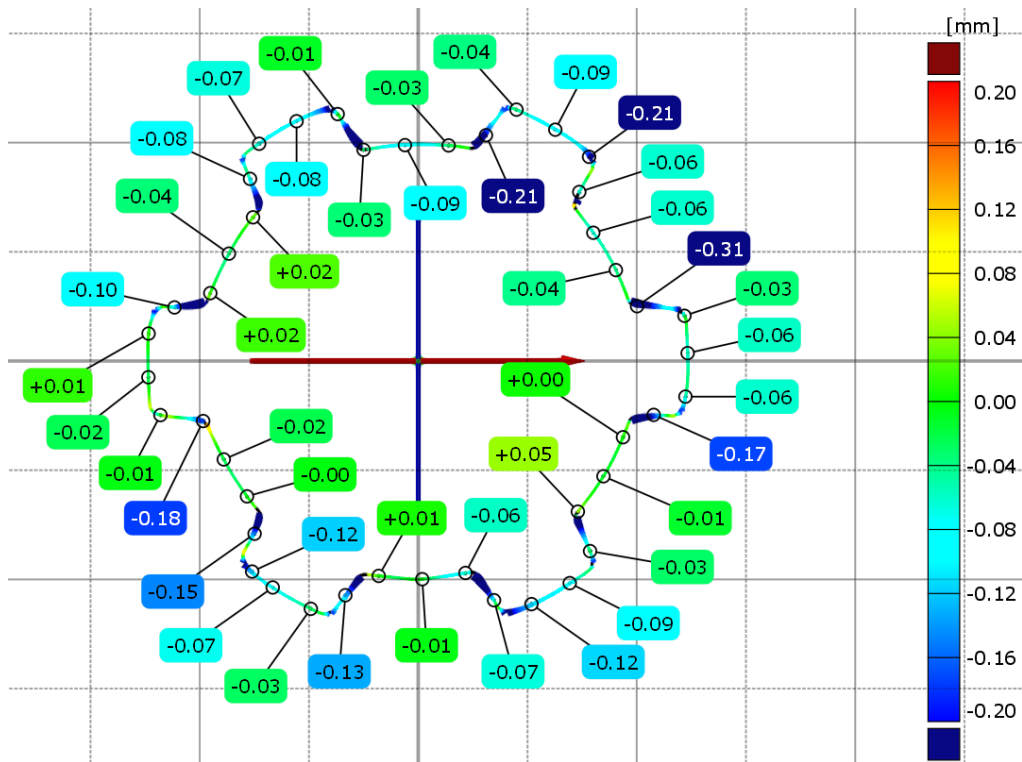
Rys. 5.7. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju D próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia



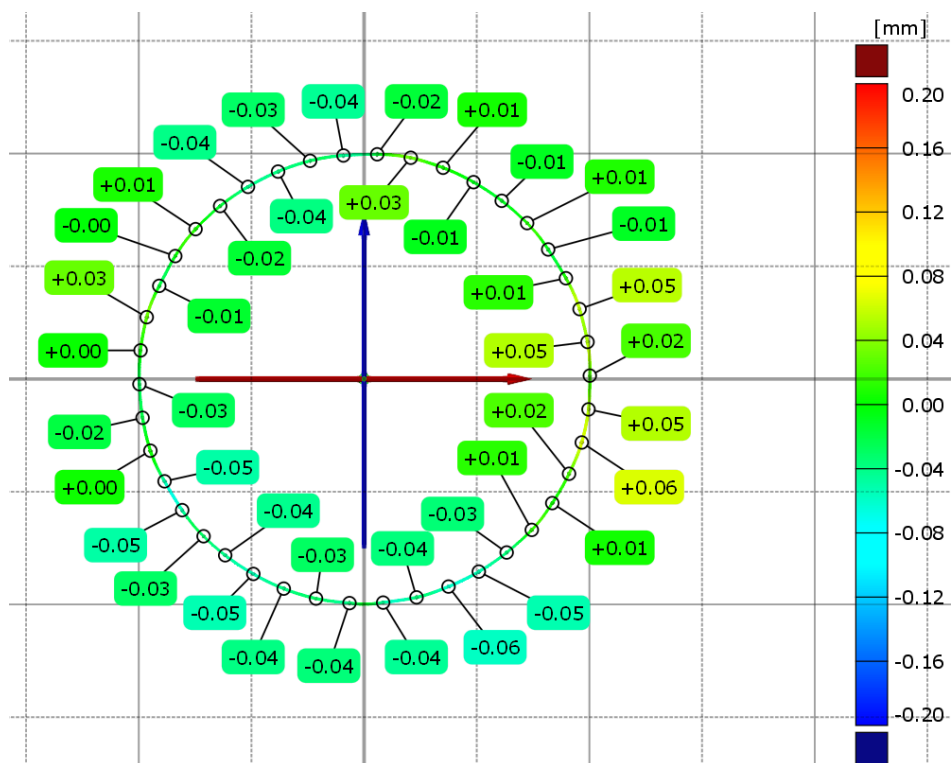
Rys. 5.8. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju E próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia



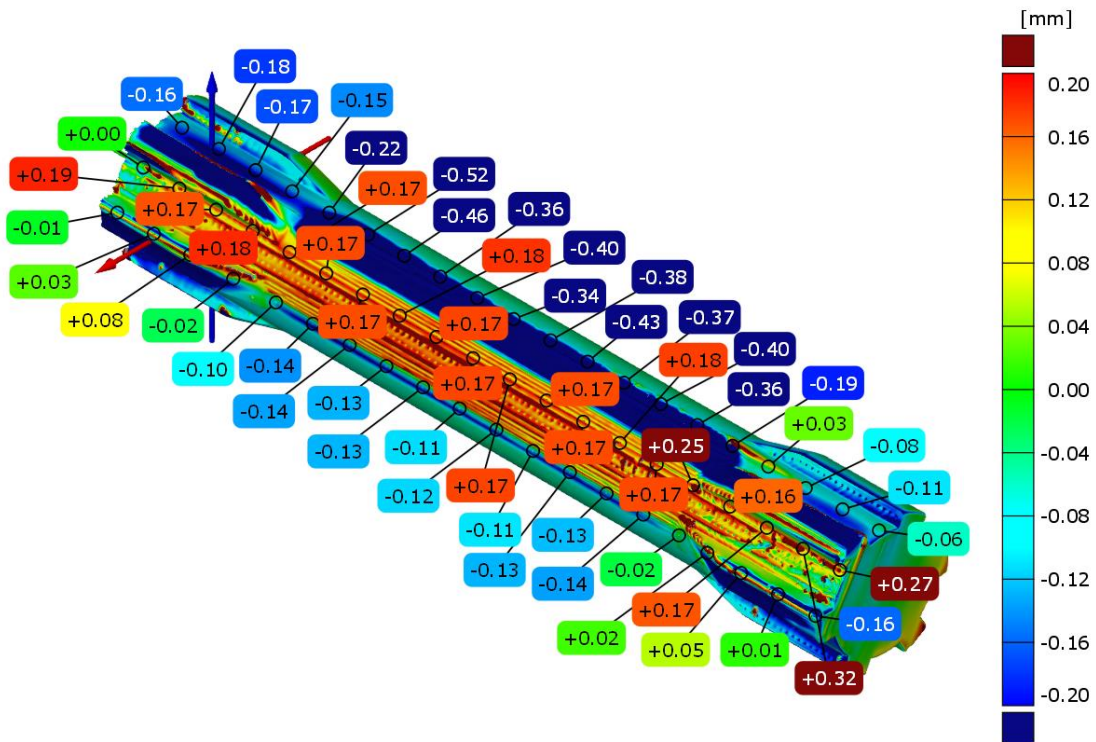
Rys. 5.9. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia



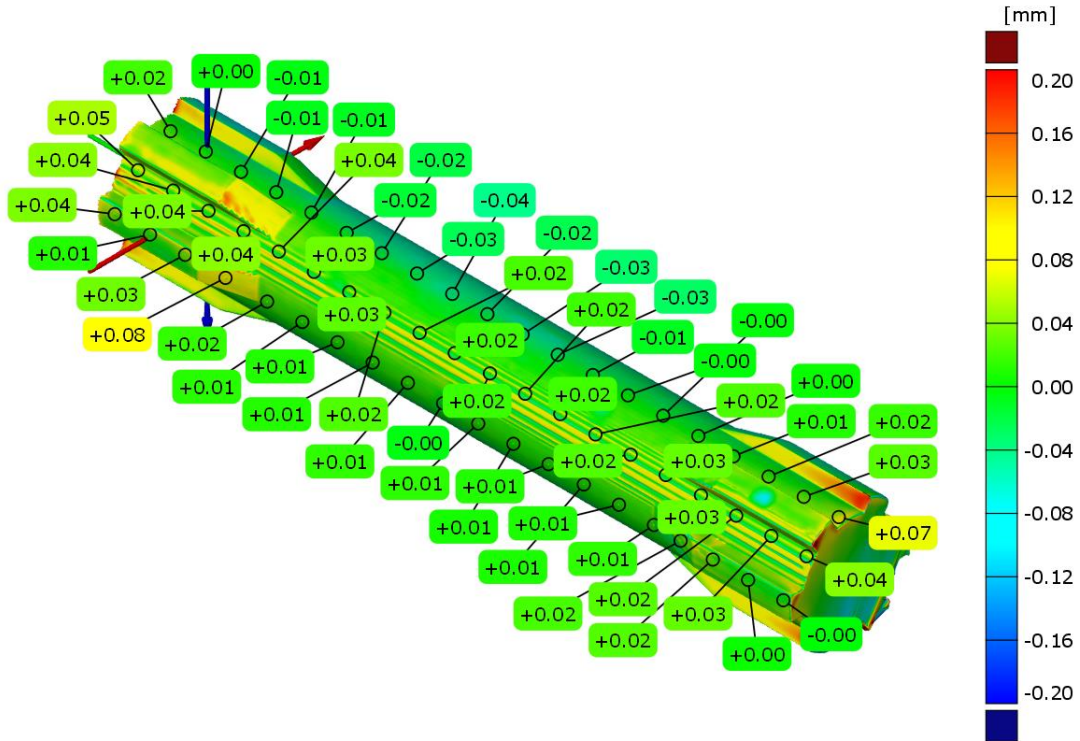
Rys. 5.10. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju A próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia



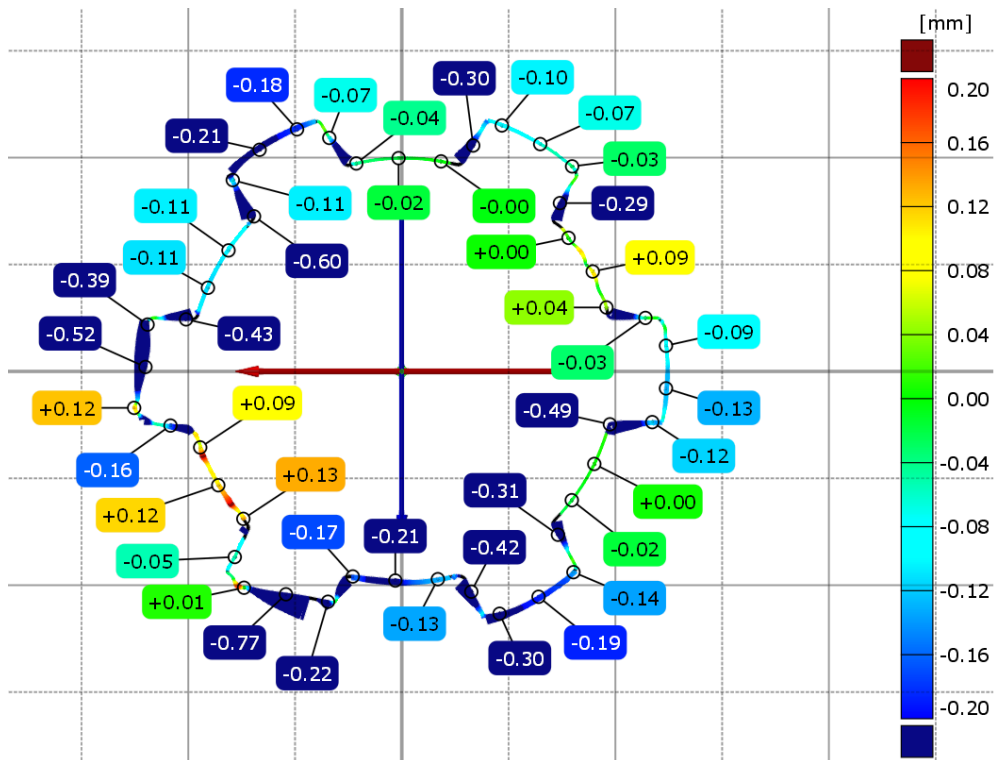
Rys. 5.11. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju C próbki z kopolimeru ABS wykonanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia



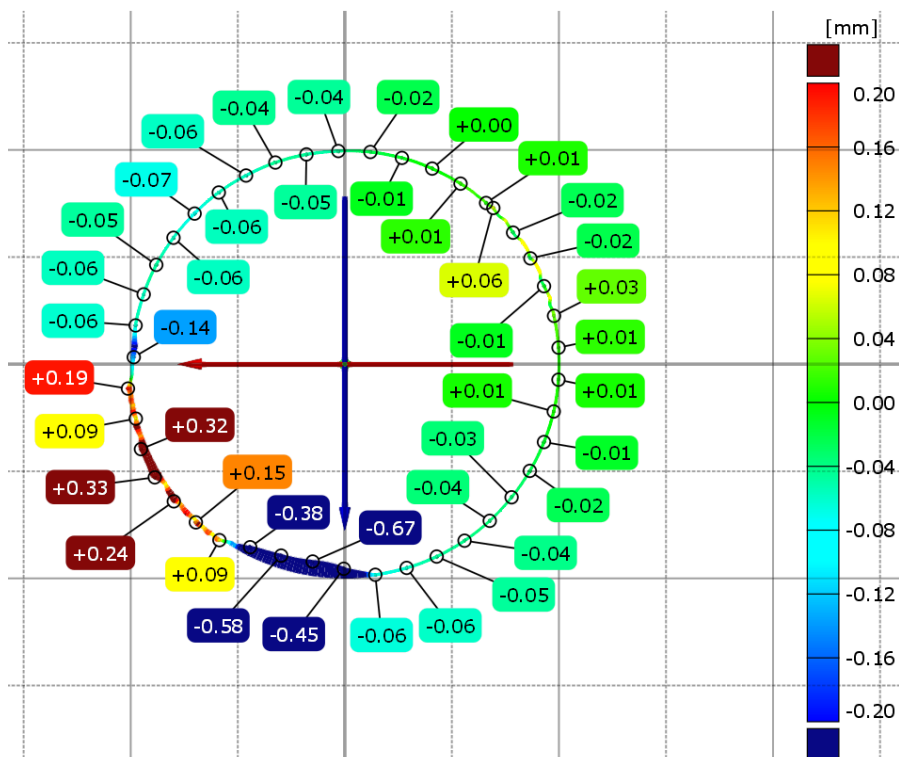
Rys. 5.12. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z polilaktydu wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia – widok od strony powierzchni przylegania próbki do stołu roboczego



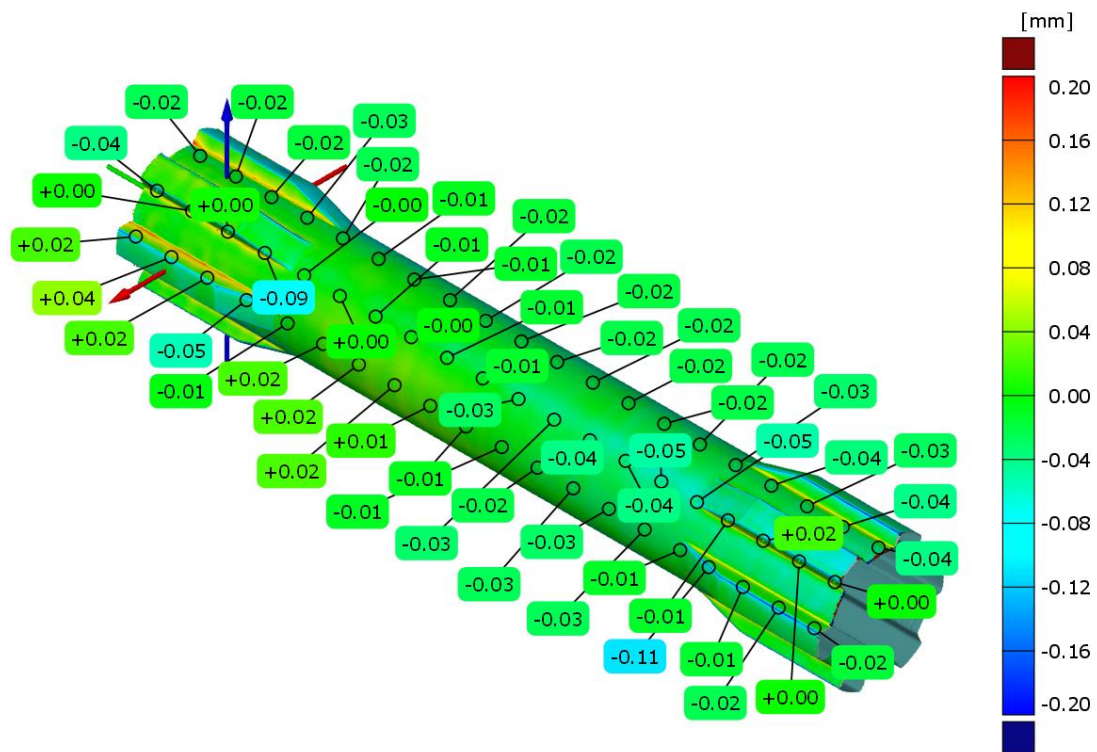
Rys. 5.13. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z polilaktydu wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia – widok od strony części walcowej próbki w okolicy tworzącej najbardziej oddalonej od stołu roboczego



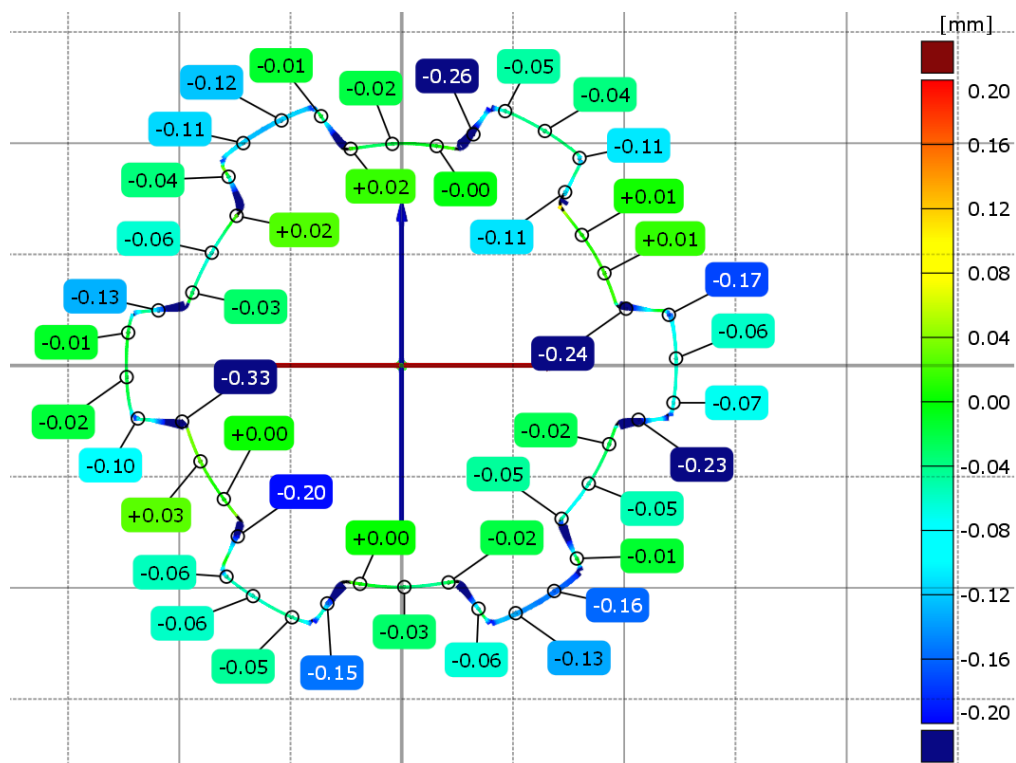
Rys. 5.14. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju A próbki z polilaktydu wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia



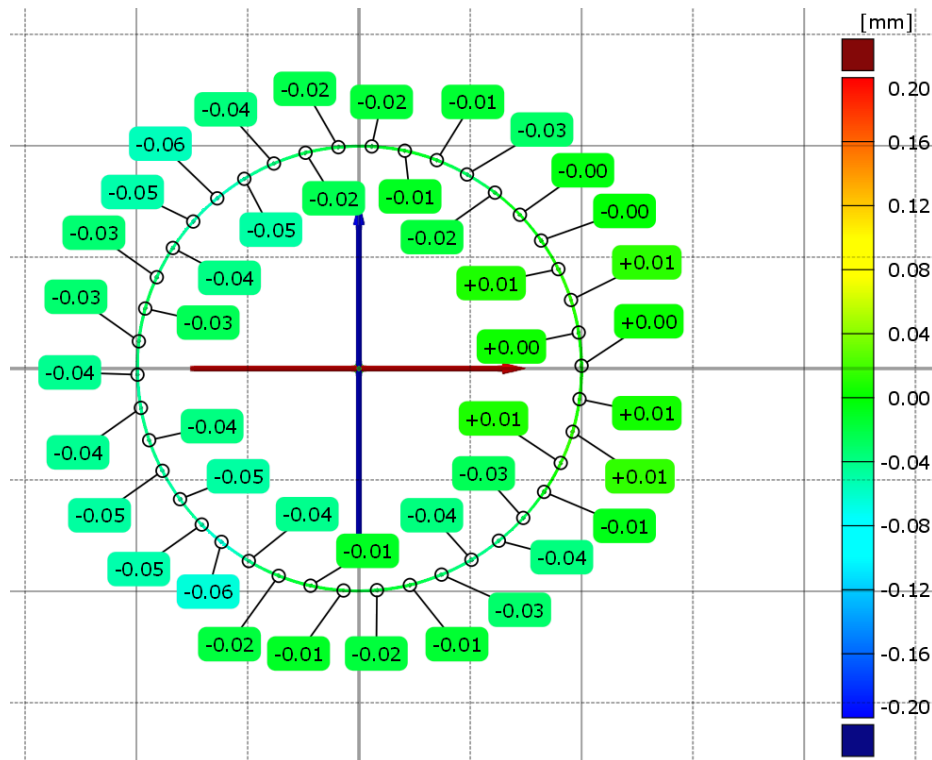
Rys. 5.15. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju C próbki z polilaktydu wykonanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia



Rys. 5.16. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z polilaktytu wykonanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia



Rys. 5.17. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju A próbki z polilaktytu wykonanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia



Rys. 5.18. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju C próbki z polilaktydu wykonanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia

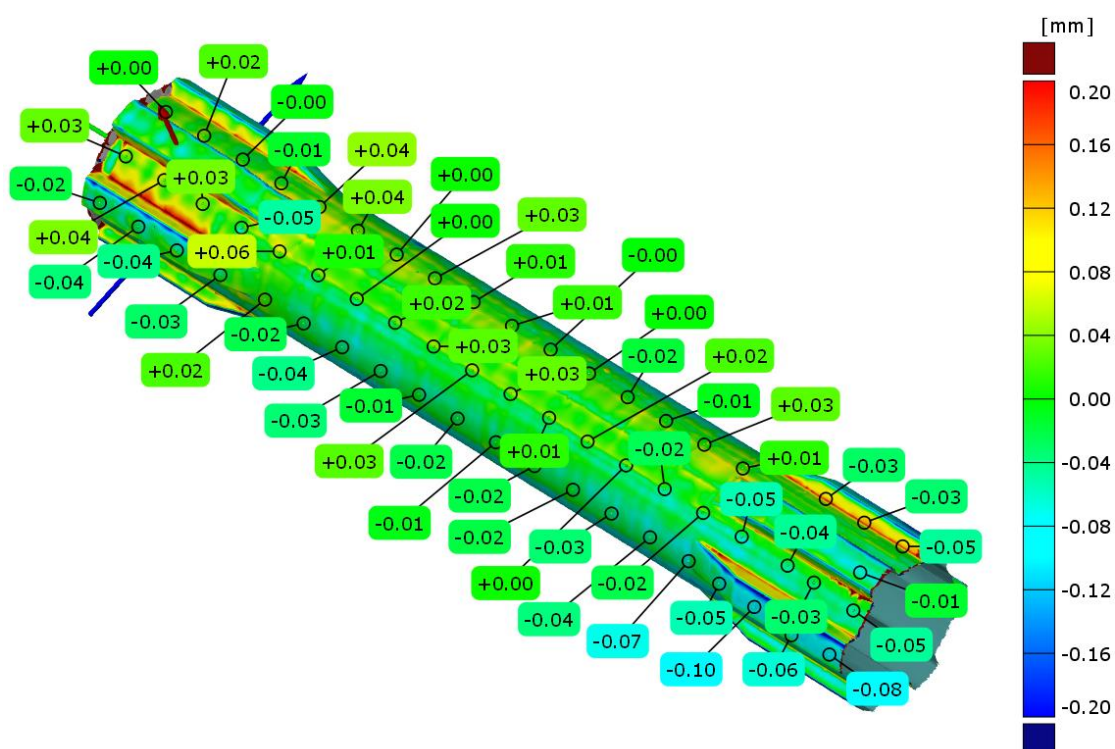
Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, że sposób orientacji modelu ma istotny wpływ na uzyskiwaną dokładność wymiarową. W odniesieniu do próbek wykonanych poziomo względem platformy roboczej urządzenia można stwierdzić, że geometria jest najbardziej zniekształcona w miejscu styku elementu ze stołem roboczym oraz z generowanymi podporami. W przypadku próbek wykonanych z kopolimeru ABS wartości odchyłek dla części walcowej próbki wynoszą od -0,79 mm do +0,47 mm, natomiast dla polilaktydu od -0,52 mm do +0,25 mm. Istotnym jest fakt, iż wraz z kolejnymi warstwami budowanego modelu dokładność części walcowej próbek rośnie. Dla części walcowej z wielowypustem odchyłki geometrii są na tyle duże (szczególnie dla kopolimeru ABS od -0,90 mm do +0,68 mm), że uniemożliwiają poprawne pasowanie połączenia wielowypustowego.

Próbki wytworzone w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia cechują się dużo większą dokładnością geometryczną o regularnych odchyłkach na całym obwodzie. Dla części walcowej próbek wykonanych z kopolimeru ABS wartości odchyłek wynoszą $\pm 0,06$ mm, natomiast dla modeli wykonanych z polilaktydu od -0,06 mm do +0,01 mm. W przypadku części walcowej z wielowypustem największe odchyłki geometrii można zaobserwować w miejscach zaokrąglenia wielowypustu. Jest to

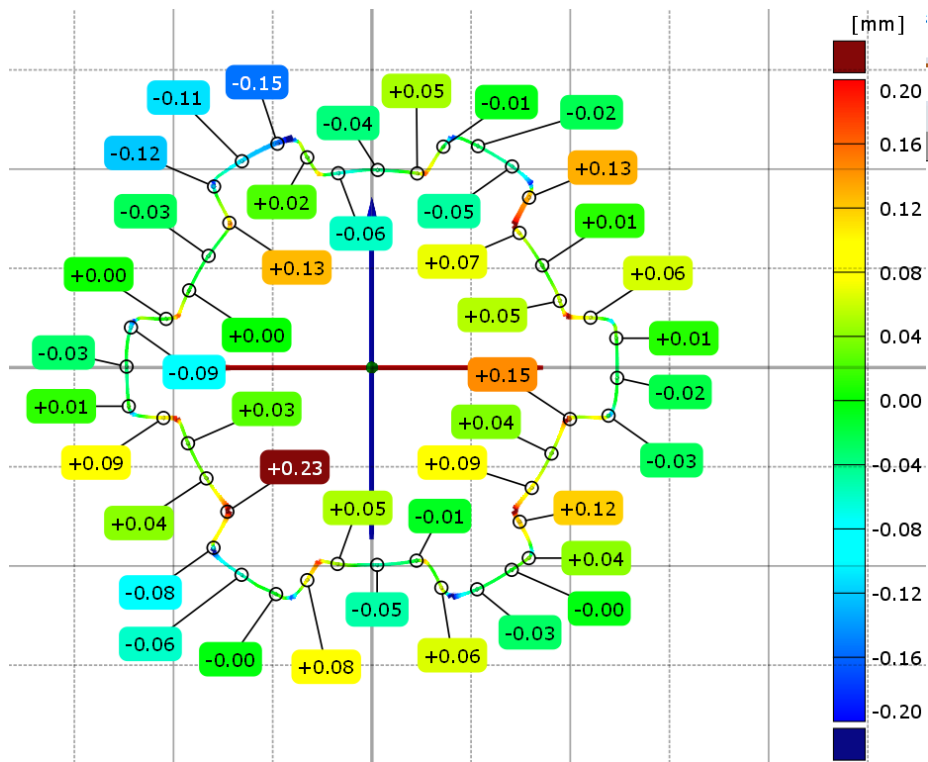
związane z ograniczeniami metody ekstruzji warstwowej, dla której ostre krawędzie oraz niewielkie zaokrąglenia między ścianami są obarczone błędem wykonania.

Analizując mapy odchyłek dokładności geometrycznej można stwierdzić, iż próbki wykonane z polilaktydu charakteryzują się większą dokładnością odwzorowania modelu w stosunku do takich samych próbek wykonanych z kopolimeru ABS.

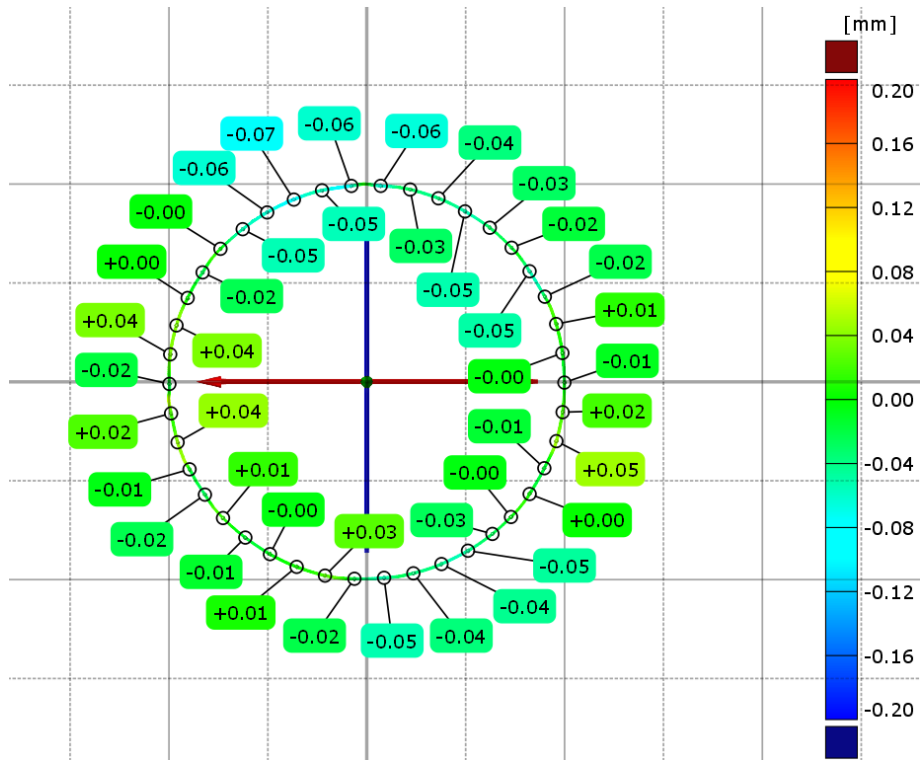
Następnie badania przeprowadzono dla próbek wytworzonych technologią hybrydową. Ze względu na zbliżone wyniki pomiarów przedstawiono tylko reprezentatywne przykłady dla próbek wypełnionych żywicą PR1819, których cienkościennej forma została wykonana z kopolimeru ABS oraz polilaktydu. Wyniki przedstawiono na rysunkach 5.19 – 5.24.



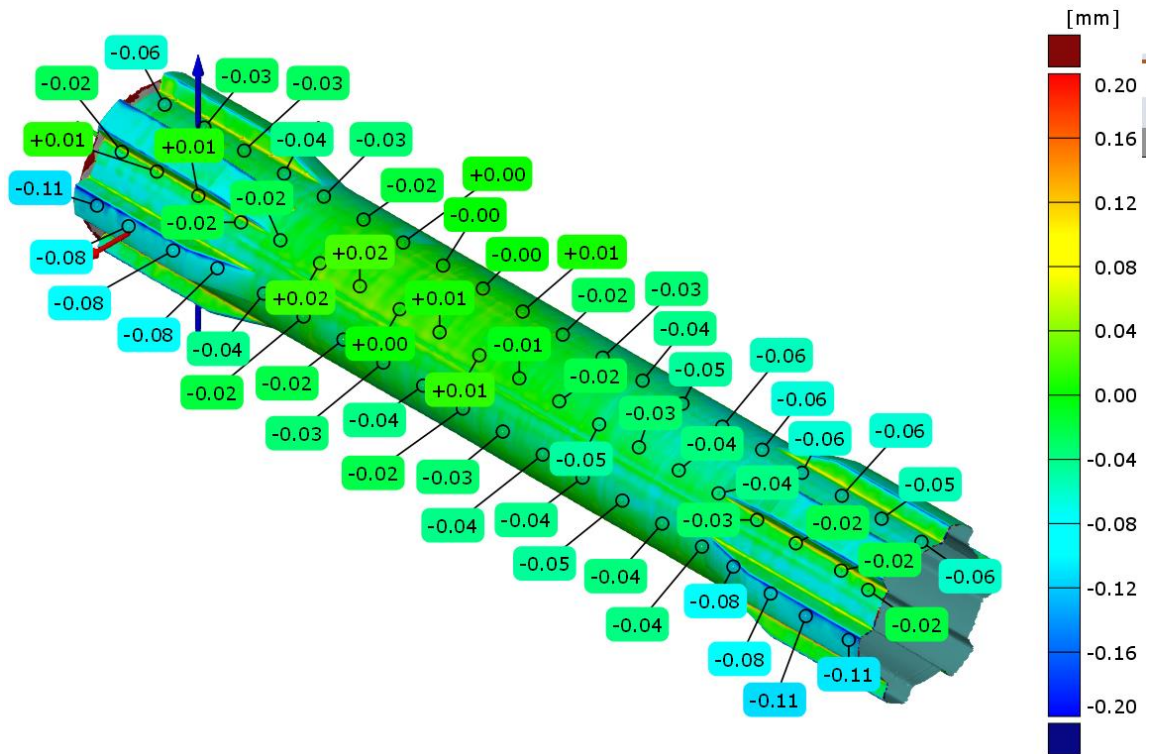
Rys. 5.19. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR1819



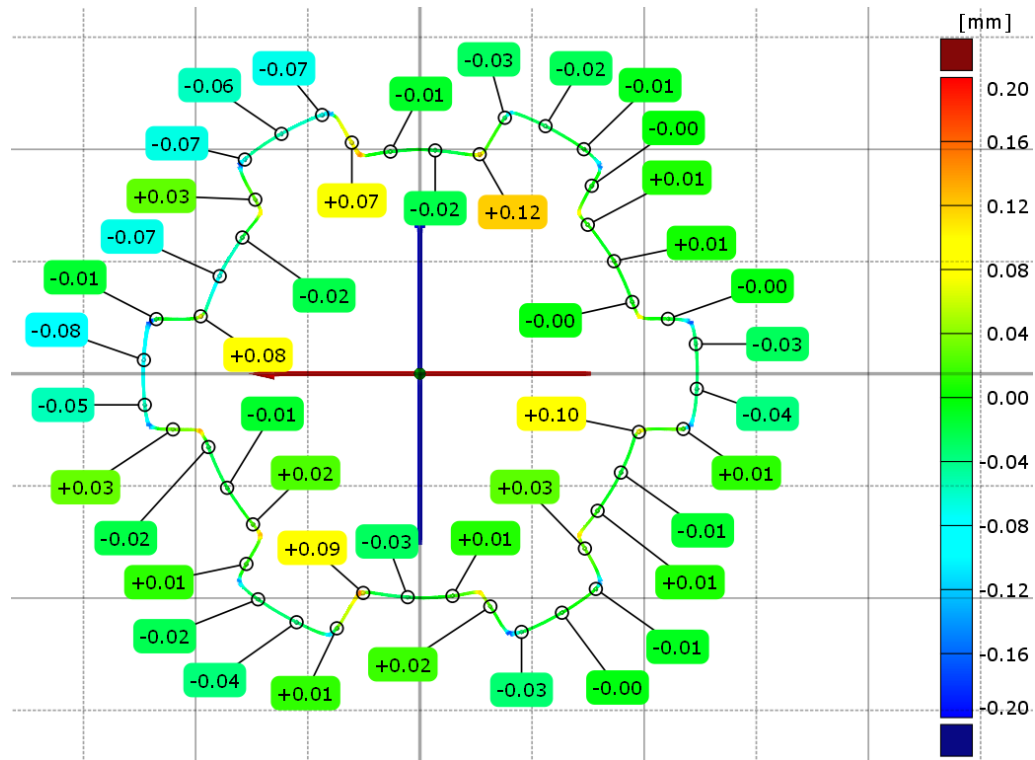
Rys. 5.20. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju A próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR1819



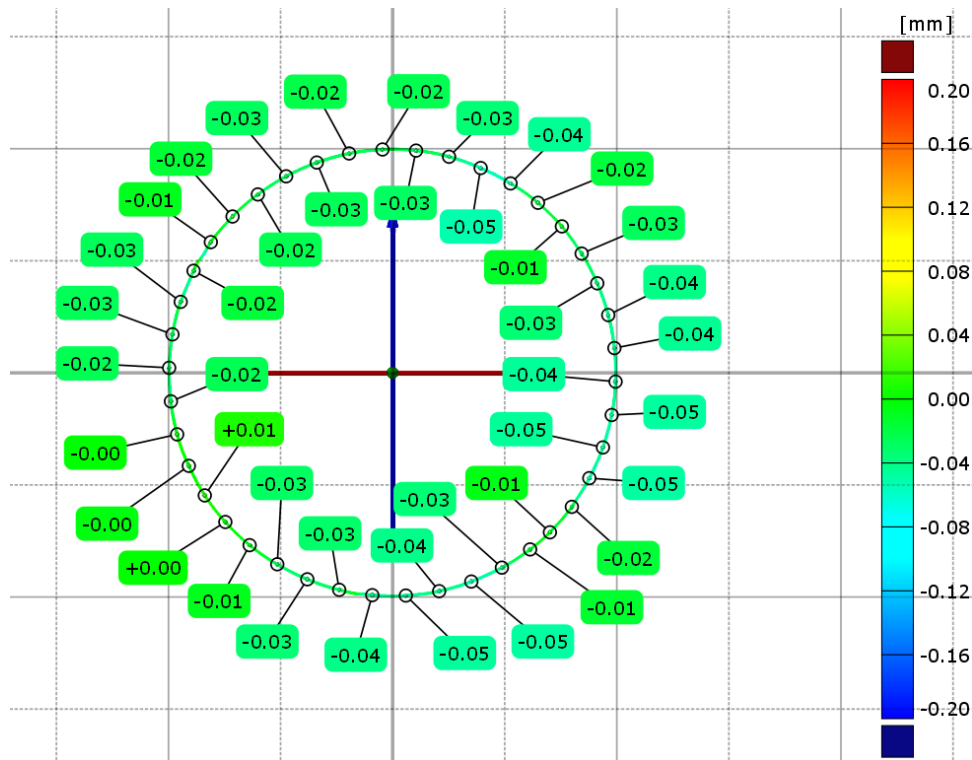
Rys. 5.21. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju C próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR1819



Rys. 5.22. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR1819



Rys. 5.23. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju A próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR1819



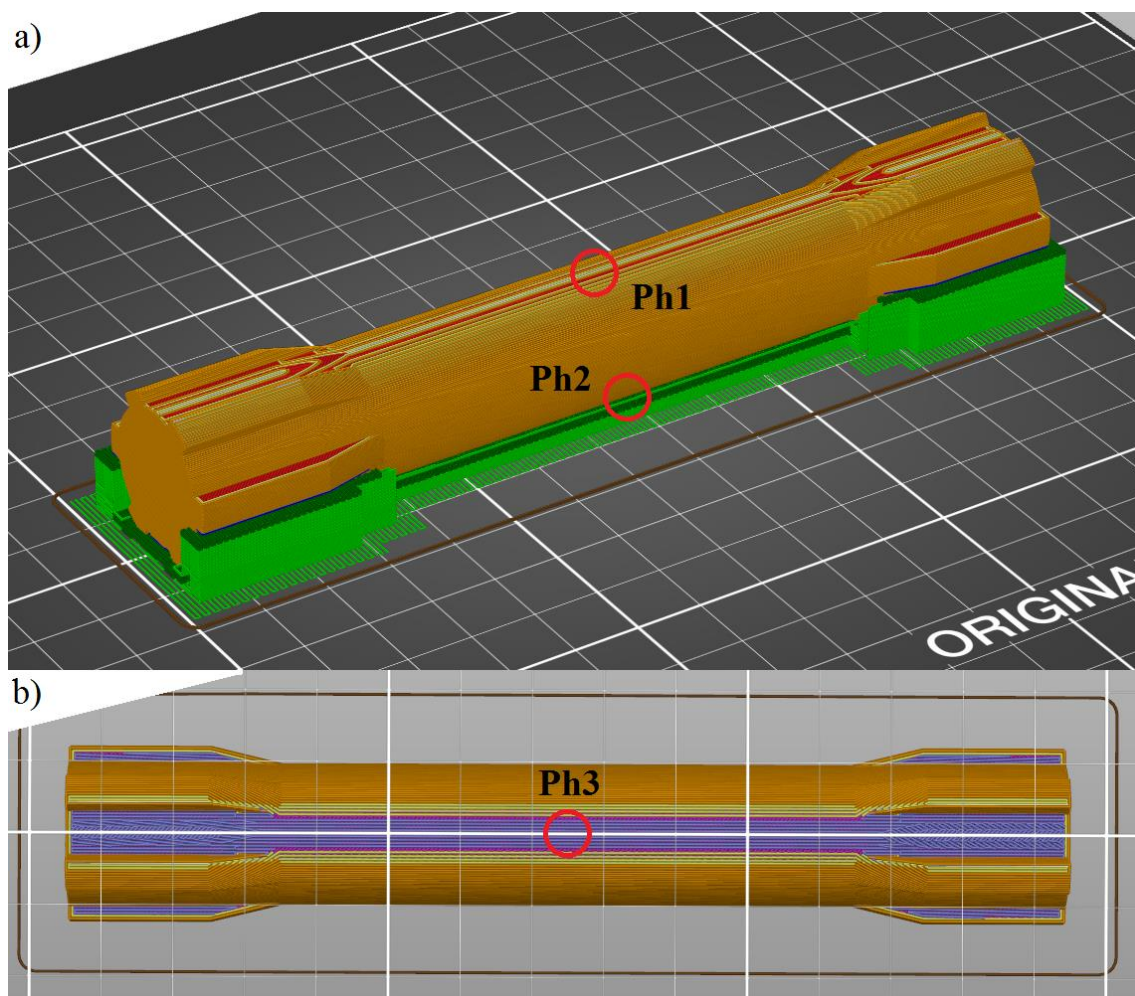
Rys. 5.24. Mapa odchyłek dokładności geometrycznej w miejscu przekroju C próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR1819

Analizując mapy odchyłek dokładności geometrycznej próbek wytworzonych technologią hybrydową można stwierdzić, że odwzorowanie modeli, których cienkościenna forma została wykonana z tworzywa polimerowego ABS i PLA, nie uległa pogorszeniu dokładności geometrycznej w stosunku do próbek wykonanych metodą ekstruzji warstwowej w ułożeniu pionowym względem komory roboczej urządzenia. Wartości odchyłek dla części walcowej próbek wykonanych z kopolimeru ABS wynoszą od -0,07 mm do +0,05 mm, natomiast dla modeli wykonanych z polilaktydu od -0,05 mm do +0,01 mm. Analogicznie jak w przypadku próbek wykonanych pionowo względem platformy roboczej urządzenia największe odchyłki geometrii można zaobserwować w miejscach zaokrąglenia wielowypustu.

5.2. Struktura geometryczna powierzchni

Analizie poddano wybrane parametry chropowatości powierzchni 2D oraz 3D próbek walcowych wykonanych technologią hybrydową oraz metodą ekstruzji warstwowej w zależności od ułożenia względem platformy roboczej: pionowym i poziomym. Pomiary zostały przeprowadzone w trzech miejscach dla każdej próbki. W przypadku próbek wytwarzanych w położeniu poziomym pomiary wykonano na części walcowej próbki

w okolicy tworzącej najbardziej oddalonej od platformy roboczej (Ph1), powierzchni styku boku elementu z materiałem podporowym (Ph2) oraz powierzchni przylegania próbki do stołu roboczego (Ph3) – miejsca pomiarów przedstawiono na rysunku 5.25. Dla modeli badawczych wytwarzanych w położeniu pionowym wykonano trzy pomiary (Pv1, Pv2, Pv3) dla jednej próbki w połowie jej długości – rozmieszczone co 120° lub w miejscach, które wykazywały defekty powierzchni (Pd1 – rys. 5.36).

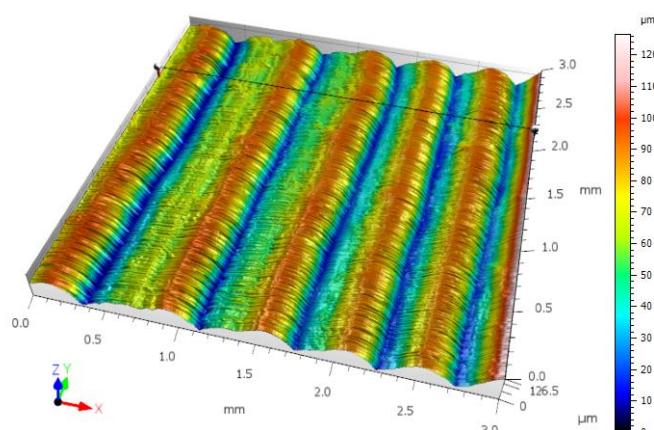


Rys. 5.25. Obszary pomiaru struktury geometrycznej powierzchni próbek: a) widok izometryczny, b) widok powierzchni przylegania próbki do stołu roboczego

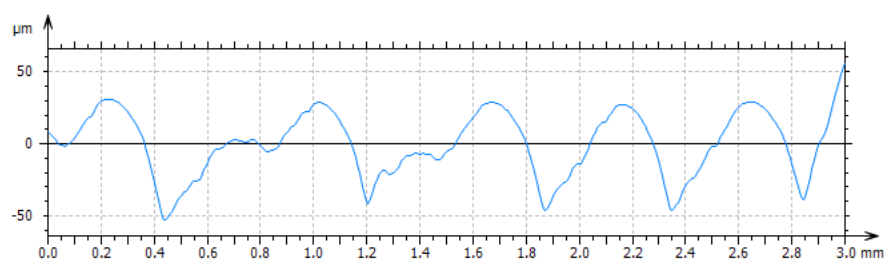
W pierwszej kolejności analizie zostały poddane próbki wykonane z kopolimeru ABS. Uzyskane wartości wybranych parametrów chropowatości 3D oraz 2D przedstawiono w tabeli 5.1 i 5.2. Parametry powierzchni w postaci profilu chropowatości oraz trójwymiarowych widoków izometrycznych powierzchni pokazano na rysunkach 5.26 – 5.37.

Tabela 5.1. Wybrane parametry chropowości powierzchni próbek wykonanych z kopolimeru ABS ułożonych poziomo względem platformy roboczej urządzenia

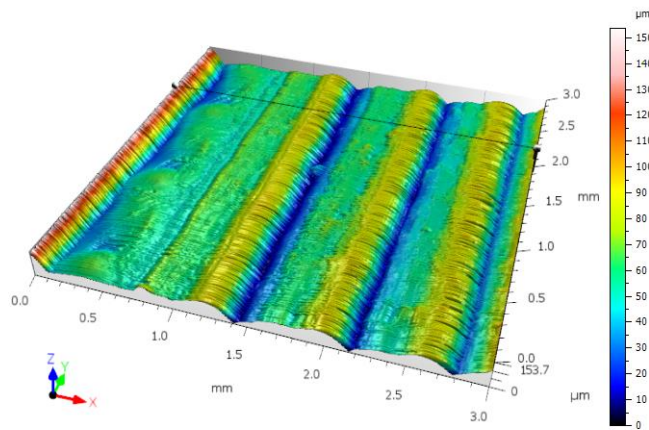
Parametr 3D	Wartość [μm]			Średnia
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	
S_a	19,9	15,6	23,2	19,6
S_q	23,9	21,0	31,3	25,4
S_p	64,4	93,1	127,0	94,8
S_v	62,1	60,5	147,3	90,0
S_z	126,5	153,7	274,3	184,8
Parametr 2D				
R_a	13,9	12,0	19,0	15,0
R_q	17,0	16,2	23,6	18,9
R_p	23,8	34,2	41,3	33,1
R_v	38,6	38,9	52,9	43,5
R_z	62,4	73,1	94,2	76,6



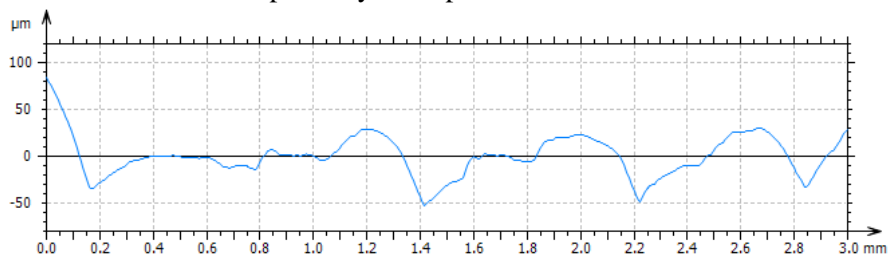
Rys. 5.26. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z kopolimeru ABS w położeniu poziomym dla pomiaru Ph1



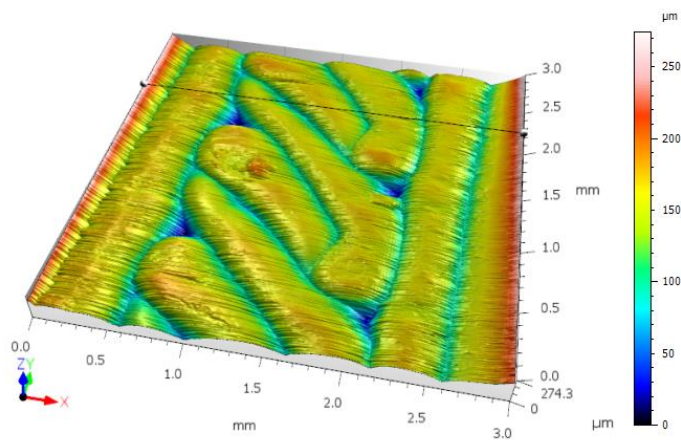
Rys. 5.27. Profil powierzchni badanej próbki z kopolimeru ABS w miejscu pomiaru Ph1



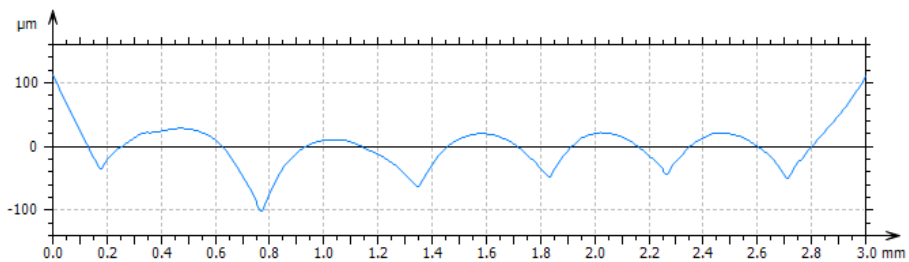
Rys. 5.28. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z kopolimeru ABS w położeniu poziomym dla pomiaru Ph2



Rys. 5.29. Profil powierzchni badanej próbki z kopolimeru ABS w miejscu pomiaru Ph2



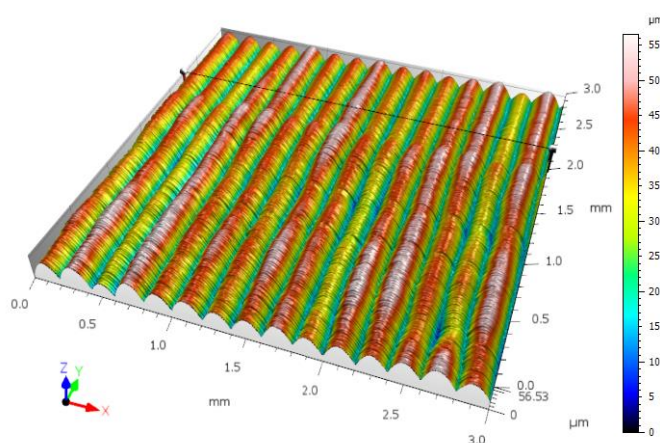
Rys. 5.30. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z kopolimeru ABS w położeniu poziomym dla pomiaru Ph3



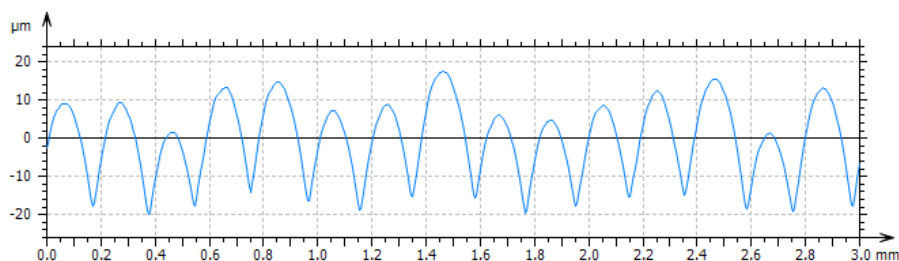
Rys. 5.31. Profil powierzchni badanej próbki z kopolimeru ABS w miejscu pomiaru Ph3

Tabela 5.2. Wybrane parametry chropowości powierzchni próbek wykonanych z kopolimeru ABS ułożonych pionowo względem platformy roboczej urządzenia

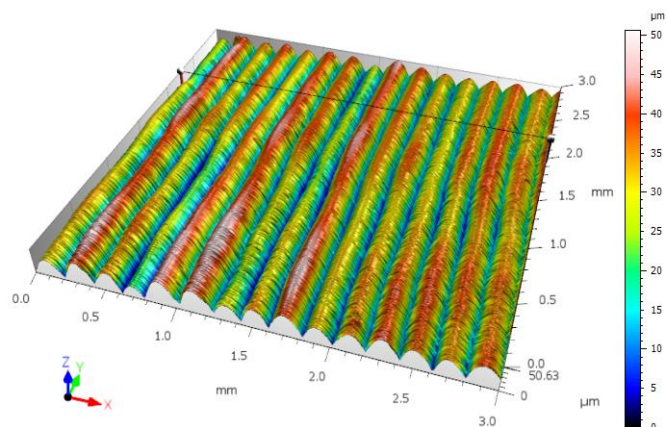
Parametr 3D	Wartość [μm]			Średnia
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	
S_a	8,4	8,0	8,6	8,3
S_q	10,0	9,6	10,3	10,0
S_p	21,4	24,1	36,8	27,5
S_v	35,1	26,5	29,7	30,4
S_z	56,5	50,6	66,6	57,9
Parametr 2D				
R_a	7,4	7,2	7,8	7,5
R_q	8,7	8,6	9,2	8,8
R_p	12,8	13,8	13,9	13,5
R_v	17,5	17,1	18,4	17,7
R_z	30,3	30,9	32,4	31,2



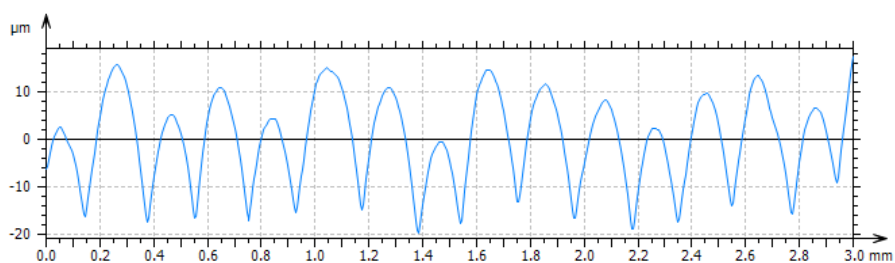
Rys. 5.32. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z kopolimeru ABS w położeniu pionowym dla pomiaru Pv1



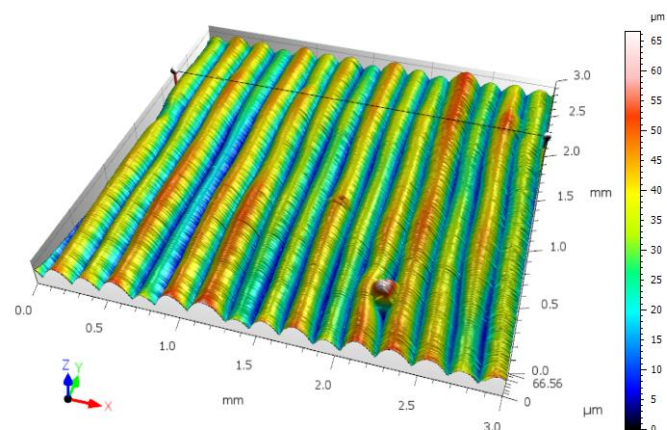
Rys. 5.33. Profil powierzchni badanej próbki z kopolimeru ABS w miejscu pomiaru Pv1



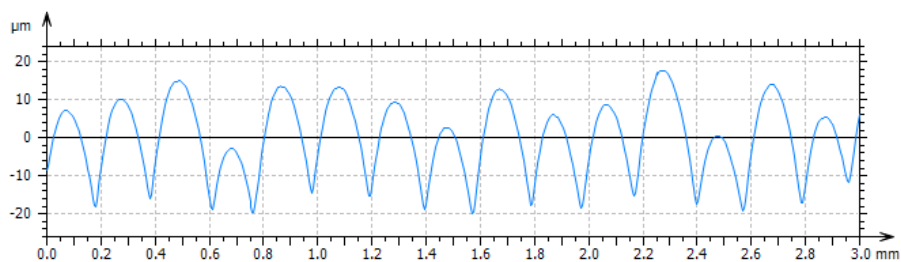
Rys. 5.34. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z kopolimeru ABS w położeniu pionowym dla pomiaru Pv2



Rys. 5.35. Profil powierzchni badanej próbki z kopolimeru ABS w miejscu pomiaru Pv2



Rys. 5.36. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z kopolimeru ABS w położeniu pionowym dla pomiaru Pd1



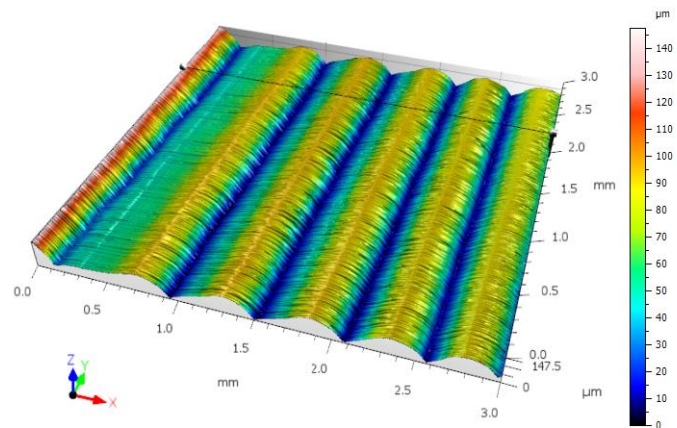
Rys. 5.37. Profil powierzchni badanej próbki z kopolimeru ABS w miejscu pomiaru Pd1

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników stwierdzono, że dla próbek w położeniu pionowym względem platformy roboczej struktura powierzchni odpowiada regularnemu profilowi, z typowym kształtem uzyskanym dla ścian bocznych, gdy poszczególne warstwy filamentu nie są pochylone podczas procesu drukowania. Na profilu powierzchni można zaobserwować zaokrąglone wzniesienia i ostre wgłębienia, natomiast szerokość pomiędzy wzniesieniami odpowiada zastosowanej wysokości warstwy. W przypadku próbek wytwarzanych poziomo względem platformy roboczej urządzenia uzyskane profile powierzchni stają się bardziej nieregularne, łącząc wzniesienia krawędzi filamentu z płaskimi obszarami pomiędzy nimi (rys. 5.26 i 5.28). Można zaobserwować, że położenie poziome próbek prowadzi do większej odległości między wzniesieniami oraz wzrostu wybranych parametrów chropowatości względem próbek ułożonych pionowo.

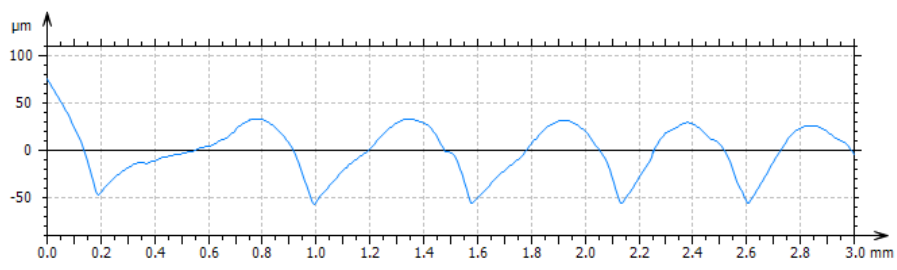
Następnie przeprowadzone zostały badania dla próbek wykonanych z polilaktydu. W tabeli 5.3 i 5.4 przedstawiono wybrane parametry chropowatości 3D oraz 2D dla uzyskanych wyników, natomiast na rysunkach 5.38 – 5.45 pokazano profile chropowatości oraz trójwymiarowe widoki izometryczne powierzchni. W przypadku próbek ułożonych pionowo względem platformy roboczej urządzenia przedstawiono tylko reprezentatywne wyniki dla pomiaru pierwszego.

Tabela 5.3. Wybrane parametry chropowatości powierzchni próbek wykonanych z polilaktydu ułożonych poziomo względem platformy roboczej urządzenia

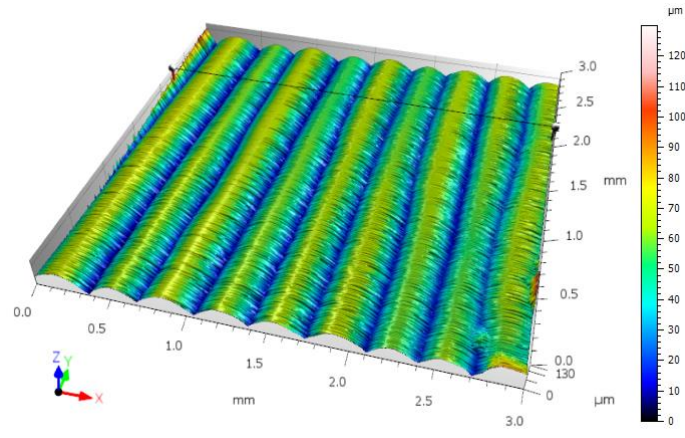
Parametr 3D	Wartość [μm]			Średnia
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	
S_a	22,5	14,3	28,3	21,7
S_q	26,8	16,8	37,1	26,9
S_p	87,3	83,2	111,9	94,2
S_v	60,2	46,8	263,0	123,3
S_z	147,5	130,0	374,9	217,5
Parametr 2D				
R_a	16,9	12,9	18,0	15,9
R_q	21,2	15,4	22,4	19,7
R_p	36,2	19,9	40,3	32,1
R_v	48,1	35,0	52,4	45,2
R_z	84,4	54,9	92,7	77,3



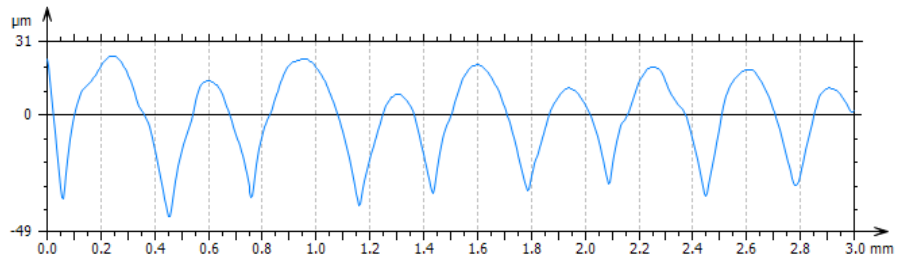
Rys. 5.38. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z polilaktydu w położeniu pionowym dla pomiaru Ph1



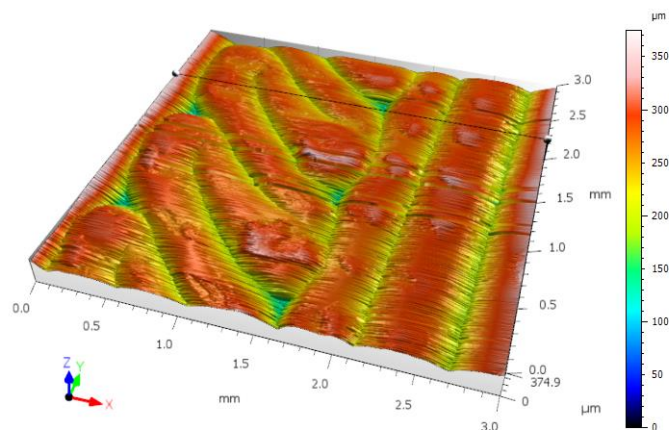
Rys. 5.39. Profil powierzchni badanej próbki z polilaktydu w miejscu pomiaru Ph1



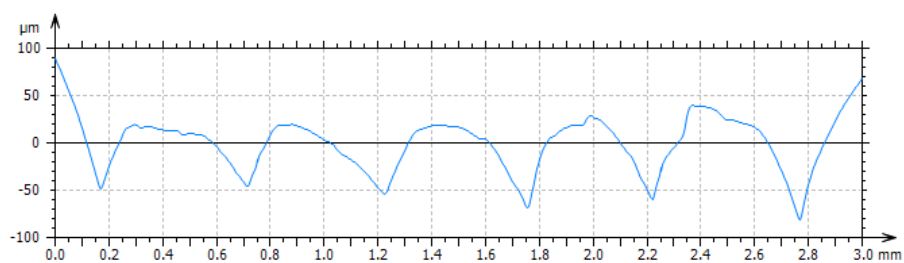
Rys. 5.40. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z polilaktydu w położeniu pionowym dla pomiaru Ph2



Rys. 5.41. Profil powierzchni badanej próbki z polilaktydu w miejscu pomiaru Ph2



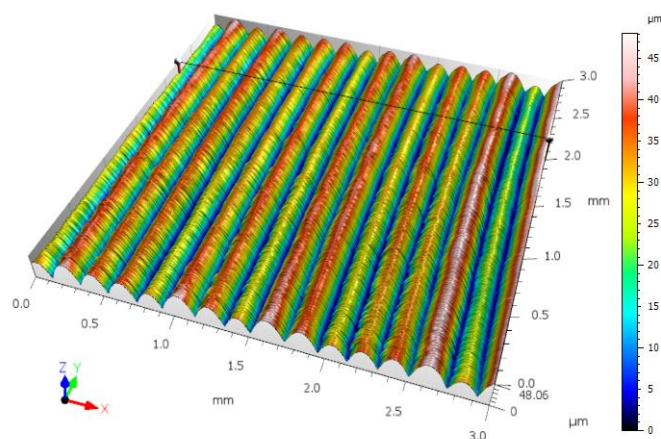
Rys. 5.42. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z polilaktydu w położeniu pionowym dla pomiaru Ph3



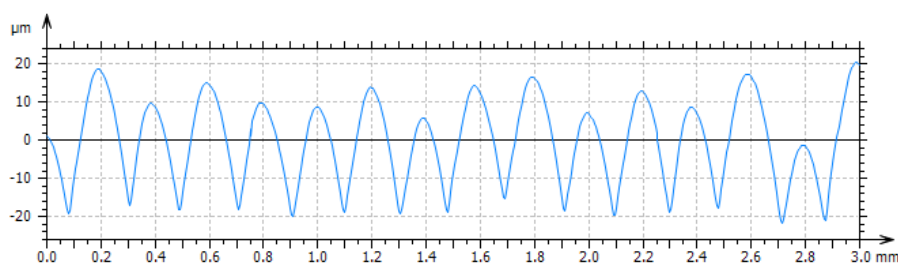
Rys. 5.43. Profil powierzchni badanej próbki z polilaktydu w miejscu pomiaru Ph3

Tabela 5.4. Wybrane parametry chropowatości powierzchni próbek wykonanych z polilaktydu ułożonych pionowo względem platformy roboczej urządzenia

Parametr 3D	Wartość [μm]			Średnia
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	
S_a	9,1	8,9	9,0	9,0
S_q	10,7	10,5	10,7	10,7
S_p	24,4	28,4	28,8	27,2
S_v	23,7	25,9	24,6	24,8
S_z	48,1	54,3	53,4	51,9
Parametr 2D				
R_a	8,6	8,4	8,3	8,4
R_q	10,0	9,8	9,9	9,9
R_p	15,5	16,7	17,9	16,7
R_v	18,8	18,5	18,7	18,6
R_z	34,3	35,2	36,5	35,4



Rys. 5.44. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z polilaktydu w położeniu pionowym dla pomiaru Pv1



Rys. 5.45. Profil powierzchni badanej próbki z polilaktydu w miejscu pomiaru Pv1

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że profile chropowatości powierzchni próbek wykonanych z polilaktydu w ułożeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia są identyczne jak w przypadku tych samych próbek wykonanych z kopolimeru ABS. Wynika to z faktu, iż realizacja budowy modelu była taka sama dla każdego z materiałów. W przypadku próbek wytwarzanych poziomo względem platformy roboczej urządzenia nie występują płaskie obszary między kolejnymi wzniesieniami, pomimo większej odległości między grzbietami. Analogicznie do kopolimeru ABS można zaobserwować wzrost wybranych parametrów chropowatości próbek ułożonych poziomo względem położenia pionowego.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania dla próbek wytworzonych technologią hybrydową. Ze względu na zbliżone wyniki pomiarów w tabeli 5.5 i 5.6 przedstawiono średnie wartości wybranych parametrów chropowatości 3D oraz 2D. Na rysunkach 5.46 i 5.47 pokazano reprezentatywne wyniki parametrów powierzchni w postaci profilu chropowatości oraz trójwymiarowego widoku izometrycznego powierzchni dla próbki wykonanej z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR1819.

Tabela 5.5. Wybrane parametry chropowatości powierzchni próbek wykonanych technologią hybrydową z kopolimeru ABS

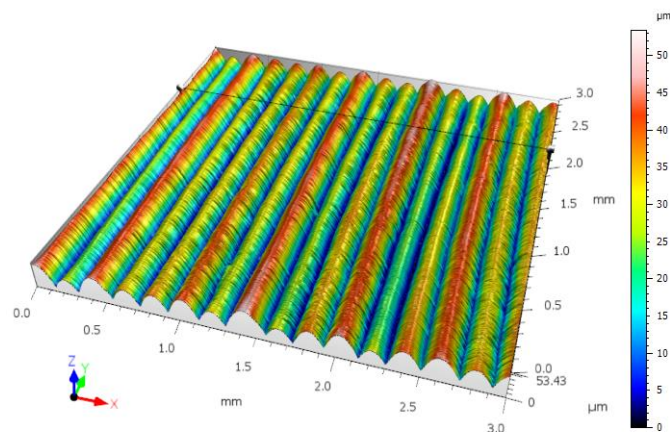
Parametr 3D	Wartość [μm]		
	ABS/K1	ABS/K2	ABS/K3
S_a	8,5	8,9	8,2
S_q	9,9	10,4	10,1
S_p	28,2	29,0	29,4
S_v	29,9	33,3	30,5
S_z	58,1	62,0	60,0
Parametr 2D			
R_a	7,3	7,1	7,7
R_q	9,1	8,8	9,4
R_p	13,8	13,5	14,1
R_v	17,9	17,4	18,2
R_z	30,1	32,3	31,7

gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819

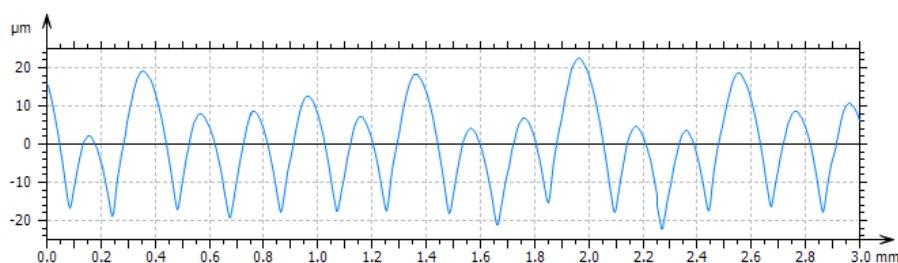
Tabela 5.6. Wybrane parametry chropowatości powierzchni próbek wykonanych technologią hybrydową z polilaktydu

Parametr 3D	Wartość [μm]		
	PLA/K1	PLA/K2	PLA/K3
S_a	9,5	9,4	9,2
S_q	10,6	11,1	10,8
S_p	27,4	25,3	29,2
S_v	25,2	23,9	24,8
S_z	55,1	49,3	53,4
Parametr 2D			
R_a	8,4	8,5	8,2
R_q	9,7	9,6	10,1
R_p	14,9	16,2	17,7
R_v	19,6	19,3	18,8
R_z	35,2	33,2	36,3

gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819



Rys. 5.46. Widok izometryczny powierzchni próbki wykonanej z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR1819 dla pomiaru pierwszego



Rys. 5.47. Profil powierzchni badanej próbki w miejscu pomiaru pierwszego

Na podstawie obserwacji otrzymanych wyników profili chropowatości powierzchni próbek wykonanych technologią hybrydową można stwierdzić, że wybrane parametry chropowatości powierzchni 2D oraz 3D nie uległy zmianie w stosunku do próbek wykonanych metodą ekstruzji warstwowej ułożonych pionowo względem komory roboczej urządzenia. Związane jest to bezpośrednio z procesem wytwarzania cienkościennych formy, który był identyczny jak w przypadku próbek wykonanych metodą ekstruzji warstwowej. Na profilach powierzchni można zaobserwować regularny kształt, którego zaokrąglone wzniesienia i ostre wgłębienia odpowiadają założonej w procesie przyrostowym wysokości warstwy.

5.3. Statyczna próba rozciągania

Wyniki z próby rozciągania próbek wykonanych z kopolimeru ABS wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią hybrydową przedstawiono w tabeli 5.7 i 5.8. Na ich podstawie obliczono wartości średnie oraz odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. Otrzymane wyniki dla reprezentatywnych pomiarów zostały przedstawione na rysunku 5.48 w postaci zależności naprężenia w funkcji odkształcenia.

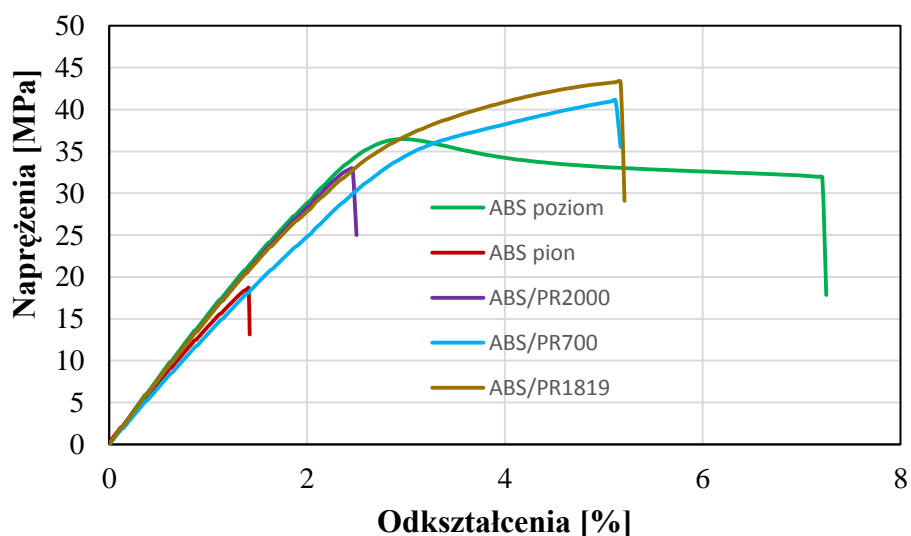
Tabela 5.7. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla kopolimeru ABS w orientacji poziomej i pionowej względem platformy roboczej urządzenia

	Napężenie [MPa]		Odkształcenie [%]	
	ABS pion	ABS poziom	ABS pion	ABS poziom
Próbka 1	18,7	36,5	1,4	7,2
Próbka 2	18,4	35,6	1,4	6,9
Próbka 3	19,1	36,2	1,5	6,8
Próbka 4	18,6	37,4	1,3	7,7
Próbka 5	18,2	35,6	1,5	7,6
Średnia	18,6	36,3	1,4	7,2
Odchylenie standardowe	0,3	0,7	0,1	0,4
Wsp. zmienności	1,5	1,8	4,2	4,9

Tabela 5.8. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla hybrydowego zastosowania kopolimeru ABS z żywicami chemoutwardzalnymi

	Napężenie [MPa]			Odkształcenie [%]		
	ABS/K1	ABS/K2	ABS/K3	ABS/K1	ABS/K2	ABS/K3
Próbka 1	32,9	41,1	43,3	2,5	5,2	5,2
Próbka 2	32,7	41,1	44,1	2,4	4,8	4,9
Próbka 3	31,8	40,8	43,7	2,7	4,6	5,4
Próbka 4	32,6	41,6	42,8	2,5	5,4	4,7
Próbka 5	33,1	41,4	43,0	2,6	5,3	5,1
Średnia	32,6	41,2	43,4	2,6	5,1	5,1
Odchylenie standardowe	0,5	0,3	0,4	0,1	0,3	0,2
Wsp. zmienności	1,4	0,7	1,0	4,4	6,1	4,9

gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819



Rys. 5.48. Wykres statycznej próby rozciągania dla próbek wykonanych z kopolimeru ABS metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią hybrydową

Próbki wykonane metodą ekstruzji warstwowej z kopolimeru ABS w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia posiadały najniższą wytrzymałość na rozciąganie wynoszącą średnio 18,6 MPa. Jest to związane z kierunkowym działaniem obciążenia skierowanym równoległe do budowy warstw modelu, dla którego adhezyjna forma połączenia kolejnych warstw uplastycznionego materiału charakteryzuje się niską wytrzymałością. W przypadku próbek wykonanych w położeniu poziomym można zaobserwować dwukrotny wzrost wytrzymałości oraz najwyższe wydłużenie przy zerwaniu. Wzrost naprężeń oraz odkształceń wynika z ułożenia modelu w komorze roboczej urządzenia. Próbka wykonana w położeniu poziomym posiada dwa obrysy konturu (nici materiału ułożone są zgodnie z kierunkiem obciążenia) oraz naprzemienne wypełnienie pod kątami 45° i 135°, które wywołuje złożony stan naprężeń wewnątrz obiektu niesprzyjający rozwarstwieniu się próbki.

W przypadku próbek wypełnionych żywicami chemoutwardzalnymi PR700 oraz PR1819 można zaobserwować wzrost wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do próbek wykonanych wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej. Po przekroczeniu umownej granicy plastyczności w obu przypadkach dochodzi do wzrostu siły rozciągającej, a naprężenia przy zerwaniu wynosiły średnio 41,2 MPa oraz 43,4 MPa. Modele badawcze wypełnione żywicą PR2000 cechowały się mniejszą wytrzymałością w stosunku do próbek wytworzonych poziomo względem platformy roboczej urządzenia. Przebieg krzywej rozciągania jest charakterystyczny dla ciał kruchych (zerwanie nastąpiło przed osiągnięciem granicy plastyczności).

Wyniki badań dla próbek wykonanych z polilaktydu przedstawiono w tabeli 5.9 i 5.10. Wykres zależności naprężenia w funkcji odkształcenia dla pomiarów reprezentatywnych pokazano na rysunku 5.49.

Analogicznie do kopolimeru ABS próbki wykonane z polilaktydu w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia charakteryzowały się najniższą wytrzymałością na rozciąganie oraz najniższym wydłużeniem przy zerwaniu. Wytrzymałość na rozciąganie próbek wynosiła średnio 29,9 MPa. W przypadku próbek ułożonych poziomo można zaobserwować wzrost wytrzymałości na rozciąganie, która wynosiła średnio 48,6 MPa. Przebieg krzywej rozciągania świadczy o plastycznych cechach badanego tworzywa w danym kierunku wytwarzania.

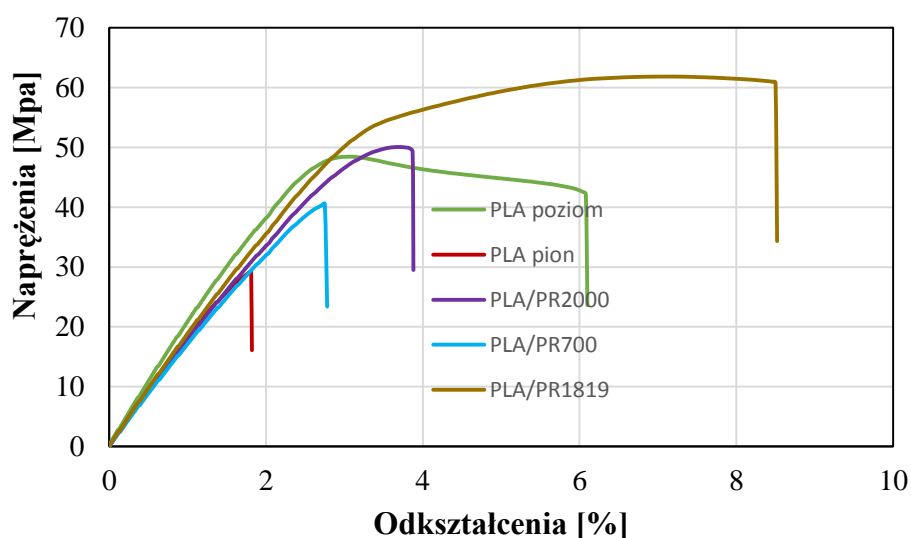
Tabela 5.9. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla polilaktydu w orientacji poziomej i pionowej względem platformy roboczej urządzenia

	Napężenie [MPa]		Odkształcenie [%]	
	PLA pion	PLA poziom	PLA pion	PLA poziom
Próbka 1	29,3	48,5	1,8	6,1
Próbka 2	30,2	49,6	1,9	6,5
Próbka 3	31,4	47,8	1,9	5,8
Próbka 4	28,8	48,3	1,8	5,7
Próbka 5	30,0	48,7	1,9	6,2
Średnia	29,9	48,6	1,9	6,1
Odchylenie standardowe	0,9	0,6	0,1	0,3
Wsp. zmienności	2,9	1,2	2,5	4,7

Tabela 5.10. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla hybrydowego zastosowania polilaktydu z żywicami chemoutwardzalnymi

	Napężenie [MPa]			Odkształcenie [%]		
	PLA/K1	PLA/K2	PLA/K3	PLA/K1	PLA/K2	PLA/K3
Próbka 1	50,1	40,6	61,9	3,9	2,8	8,5
Próbka 2	49,8	39,5	60,4	3,5	3,0	7,5
Próbka 3	50,0	41,9	62,5	3,5	3,0	8,2
Próbka 4	49,2	41,2	60,9	3,6	3,0	7,7
Próbka 5	49,5	40,7	61,5	3,8	2,8	8,0
Średnia	49,7	40,8	61,4	3,6	2,9	8,0
Odchylenie standardowe	0,3	0,8	0,7	0,2	0,1	0,4
Wsp. zmienności	0,7	1,9	1,2	4,7	3,3	4,5

gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819



Rys. 5.49. Wykres statycznej próby rozciągania dla próbek wykonanych z polilaktydu metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią hybrydową

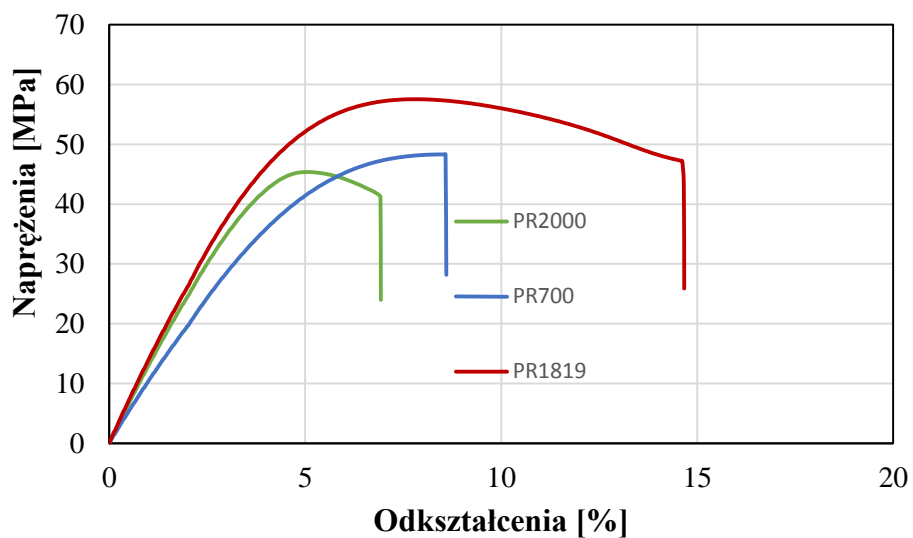
Próbki wypełnione żywicą PR2000 posiadały zbliżoną wytrzymałość do modeli badawczych ułożonych poziomo względem platformy roboczej urządzenia, przy czym bezpośrednio po przekroczeniu granicy plastyczności nastąpiło zerwanie próbek. Dla próbek wypełnionych żywicą PR1819 wytrzymałość na rozciąganie wynosiła średnio 61,4 MPa, natomiast średnie odkształcenie przy zerwaniu 8%. Istotnym jest fakt, że w przypadku wypełnienia próbek żywicą PR700 wytrzymałość na rozciąganie była mniejsza od próbek wykonanych z polilaktydu w ułożeniu poziomym, co wskazuje na odwrotne zachowanie w stosunku do tych samych próbek wykonanych z kopolimeru ABS.

W tabeli 5.11 przedstawiono wyniki badań dla próbek wykonanych z żywic chemoutwardzalnych. Rysunek 5.50 ilustruje zależności naprężenia w funkcji odkształcenia dla pomiarów reprezentatywnych.

Tabela 5.11. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla żywic poliuretanowych wytworzonych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem

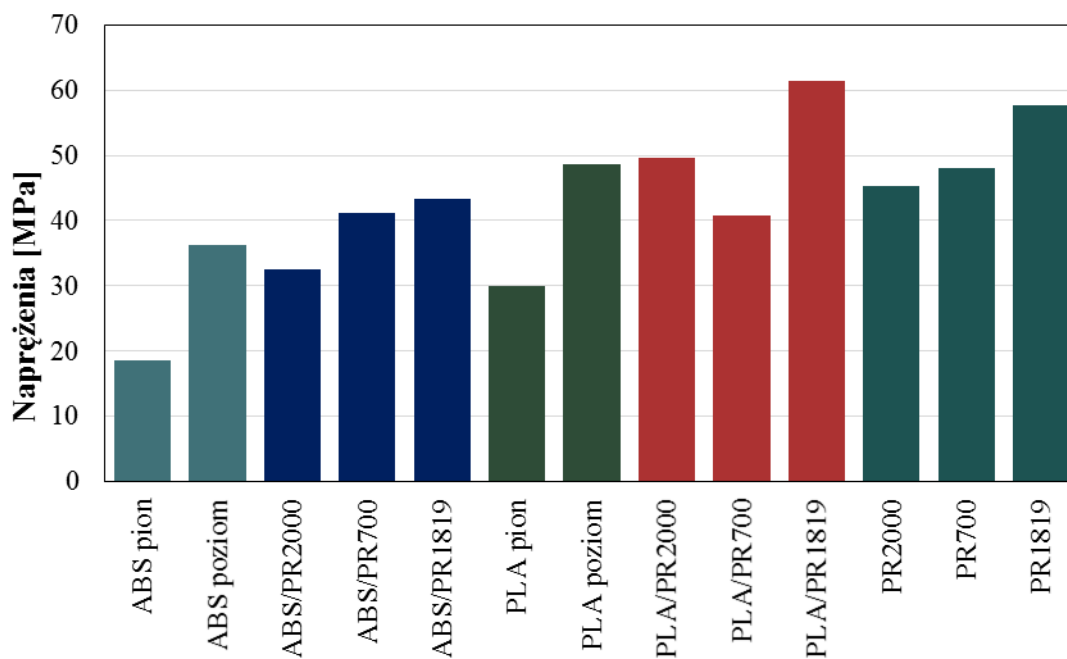
	Naprężenie [MPa]			Odkształcenie [%]		
	PR2000	PR700	PR1819	PR2000	PR700	PR1819
Próbka 1	45,4	48,3	57,5	6,9	8,6	14,7
Próbka 2	45,0	48,4	57,3	7,6	9,6	15,0
Próbka 3	45,5	48,0	58,8	7,3	8,9	16,1
Próbka 4	44,3	47,6	56,2	7,5	8,0	14,6
Próbka 5	46,2	47,9	58,4	7,8	8,2	15,7
Średnia	45,3	48,0	57,7	7,5	8,7	15,2
Odchylenie standardowe	0,6	0,3	0,9	0,3	0,6	0,6
Wsp. zmienności	1,4	0,6	1,5	4,1	6,6	3,9

Analizując przebieg krzywej rozciągania żywicy PR700 można zaobserwować łagodnie narastające odkształcenie, które świadczy o braku występowania wyraźnej granicy plastyczności. Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie wynosi 48 MPa. W przypadku próbek wykonanych z żywic PR2000 i PR1819 po przekroczeniu granicy plastyczności dochodzi do spadku siły rozciągającej i zerwania próbek. Cechy plastyczne żywicy PR1819 potwierdza szeroki zakres plastyczności – odkształcenie przy zerwaniu wynosi średnio 15,2%. Dla żywicy PR2000 można zaobserwować znacznie mniejszy zakres, w którym zachodzi trwałe odkształcenie plastyczne – odkształcenie przy zerwaniu jest o około 50 % mniejsze w stosunku do żywicy PR1819.

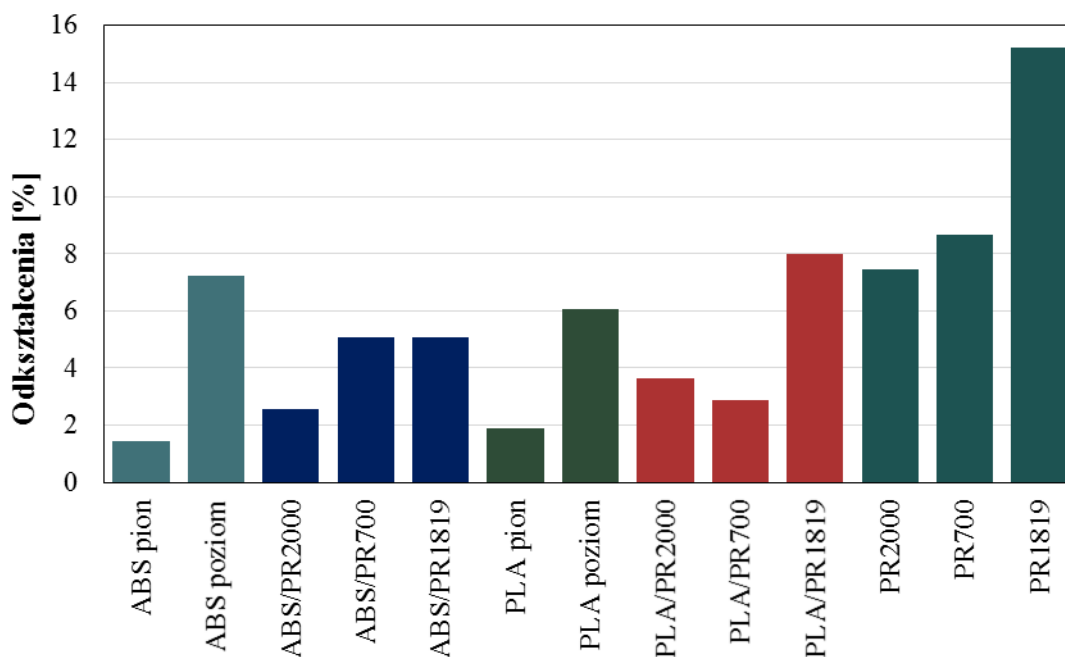


Rys. 5.50. Wykres statycznej próby rozciągania dla próbek wykonanych z żywic chemoutwardzalnych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem

Na rysunkach 5.51 i 5.52 przedstawiono zestawienia wartości średnich naprężeń rozciągających oraz odkształceń przy zerwaniu dla każdego badanego wariantu.



Rys. 5.51. Średnie wartości naprężeń rozciągających dla każdego badanego wariantu



Rys. 5.52. Średnie wartości odkształcenia przy zerwaniu dla każdego badanego wariantu

Badania eksperymentalne wykazały, że próbki wykonane hybrydową technologią odnotowują wzrost naprężeń rozciągających o ok. 75 – 133% w stosunku do próbek wykonanych z kopolimeru ABS w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia. Odpowiednio dla polilaktydu wzrost ten wynosił ok. 36 – 105%. Próbki wypełnione żywicami PR700 i PR1819, których cienkościenna forma została wykonana z kopolimeru ABS posiadały o 13% i 19% większe wartości naprężeń rozciągających od próbek wykonanych w położeniu poziomym, natomiast dla żywicy PR2000 można zaobserwować spadek o 11%. W przypadku cienkościennej formy wykonanej z polilaktydu wzrost wartości naprężeń rozciągających o 2% i 26% odnotowują modele badawcze wypełnione żywicami PR2000 i PR1819, natomiast spadek o 16% widoczny jest dla żywicy PR700.

Odnosząc wyniki badań próbek wykonanych technologią hybrydową do materiału bazowego (żywic chemoutwardzalnych) dla cienkościennej formy wykonanej z kopolimeru ABS można zaobserwować spadek wytrzymałości na rozciąganie. Średnie wartości naprężeń stanowią ok. 72 – 85% wartości materiału bazowego. Dla cienkościennej formy wykonanej z polilaktydu spadek naprężeń w stosunku do materiału bazowego wynosi ok. 15% dla żywicy PR700, natomiast próbki wypełnione żywicami PR2000 i PR1819 odnotowują wzrost o ok. 10% i 6%.

Odkształcenie przy zerwaniu próbek wykonanych technologią hybrydową jest mniejsze w stosunku do modeli badawczych wykonanych w położeniu poziomym względem platformy roboczej urządzenia oraz odlewanych metodą VC, pomijając próbkę z polilaktydu wypełnioną żywicą PR1819 dla której można zaobserwować wzrost wartości odkształcenia o ok. 31% w odniesieniu do próbek w położeniu poziomym.

5.4. Statyczna próba trzypunktowego zginania

W tabeli 5.12 i 5.13 przedstawiono wyniki z próby statycznego zginania próbek wykonanych z kopolimeru ABS wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią hybrydową. Podano naprężenia zginające oraz odkształcenie przy zginaniu dla maksymalnego obciążenia. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych wykreślono zależności naprężenia w funkcji odkształcenia dla reprezentatywnych pomiarów (rys. 5.53).

Tabela 5.12. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla kopolimeru ABS w orientacji poziomej i pionowej względem platformy roboczej urządzenia

	Naprężenie [MPa]		Odkształcenie [%]	
	ABS pion	ABS poziom	ABS pion	ABS poziom
Próbka 1	44,7	71,3	2,8	5,9
Próbka 2	45,2	69,7	3,0	6,2
Próbka 3	43,9	71,2	2,7	5,7
Próbka 4	44,3	73,2	2,9	6,3
Próbka 5	45,0	71,5	2,9	5,8
Średnia	44,6	71,4	2,8	6,0
Odchylenie standardowe	0,5	1,1	0,1	0,2
Wsp. zmienności	1,1	1,6	3,8	3,9

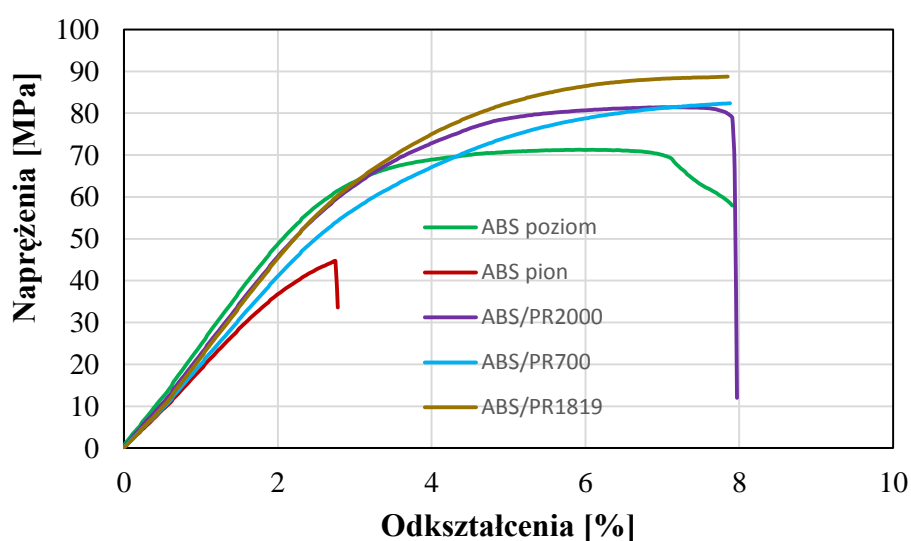
Na podstawie przebiegów krzywych zależności naprężenia zginającego w funkcji odkształcenia (rys. 5.53) można stwierdzić, że próbki wypełnione żywicami chemoutwardzalnymi PR700 i PR1819 nie wykazują maksimum naprężeń zginających, ani nie ulegają złamaniu przed osiągnięciem umownej strzałki ugięcia (próbki odkształciły się plastycznie). W przypadku próbek wykonanych z kopolimeru ABS w ułożeniu poziomym względem platformy roboczej urządzenia kształtka osiąga maksimum naprężeń, ale nie ulega złamaniu przed osiągnięciem umownej strzałki ugięcia (próbki zaczęły pękać). Dla próbek wypełnionych żywicą PR2000 kształtki wykazują maksimum naprężeń zginających, a następnie ulegają złamaniu przed osiągnięciem umownej strzałki ugięcia. Niskie wartości naprężeń i odkształceń próbek

wykonanych z kopolimeru ABS w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia spowodowane są prostopadłym działaniem obciążenia do kierunku ułożenia warstw modelu, co powoduje, że naprężenia są przenoszone wyłącznie przez połączenia między warstwami.

Tabela 5.13. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla hybrydowego zastosowania kopolimeru ABS z żywicami chemoutwardzalnymi

	Naprężenie [MPa]			Odształcenie [%]		
	ABS/K1	ABS/K2	ABS/K3	ABS/K1	ABS/K2	ABS/K3
Próbka 1	81,5	82,4	88,6	7,0	7,9	7,8
Próbka 2	78,8	81,3	87,8	6,0	7,9	7,9
Próbka 3	79,2	81,0	89,3	6,6	7,8	7,9
Próbka 4	80,9	81,3	88,3	7,1	7,9	7,8
Próbka 5	81,3	82,8	88,9	6,4	7,9	7,9
Średnia	80,3	81,7	88,5	6,6	7,9	7,9
Odchylenie standardowe	1,1	0,7	0,5	0,4	0,1	0,1
Wsp. zmienności	1,4	0,9	0,6	6,0	0,4	0,6

gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819



Rys. 5.53. Wykres statycznej próby zginania dla próbek wykonanych z kopolimeru ABS metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią hybrydową

Wyniki badań z próby trzypunktowego zginania dla próbek wykonanych z polilaktydu przedstawiono w tabeli 5.14 i 5.15. Przebiegi krzywych zależności naprężenia zginającego w funkcji odkształcenia dla reprezentatywnych pomiarów pokazano na rysunku 5.54.

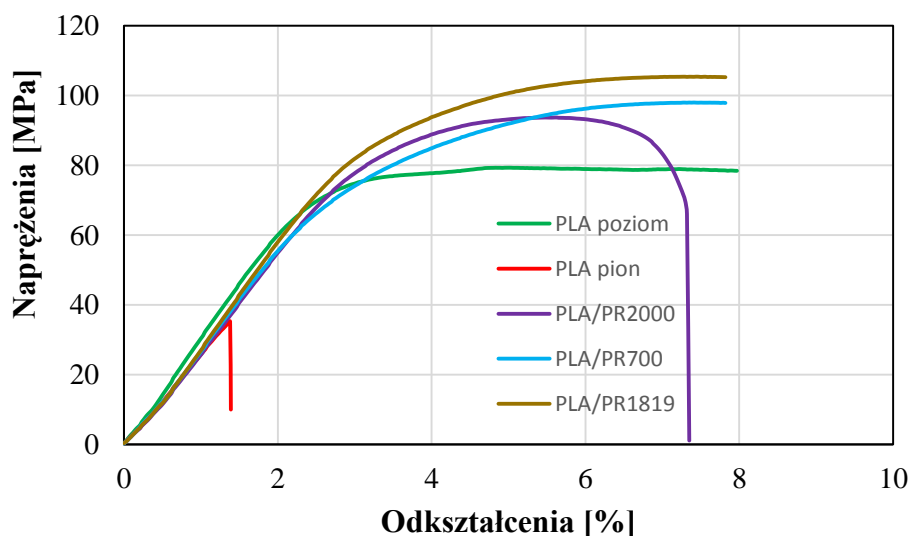
Tabela 5.14. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla polilaktydu w orientacji poziomej i pionowej względem platformy roboczej urządzenia

	Napężenie [MPa]		Odkształcenie [%]	
	PLA pion	PLA poziom	PLA pion	PLA poziom
Próbka 1	35,3	79,3	1,4	5,0
Próbka 2	33,9	78,1	1,4	5,4
Próbka 3	34,7	80,0	1,3	5,3
Próbka 4	35,8	78,9	1,5	4,9
Próbka 5	34,3	79,5	1,4	5,1
Średnia	34,8	79,2	1,4	5,1
Odchylenie standardowe	0,7	0,7	0,1	0,2
Wsp. zmienności	2,0	0,8	3,9	3,0

Tabela 5.15. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla hybrydowego zastosowania polilaktydu z żywicami chemoutwardzalnymi

	Napężenie [MPa]			Odkształcenie [%]		
	PLA/K1	PLA/K2	PLA/K3	PLA/K1	PLA/K2	PLA/K3
Próbka 1	93,7	98,0	105,4	5,6	7,4	7,4
Próbka 2	91,9	99,2	106,9	5,2	7,7	7,7
Próbka 3	90,9	97,1	103,5	5,1	7,3	7,0
Próbka 4	92,7	96,7	104,6	5,4	7,2	7,2
Próbka 5	94,3	98,6	106,2	5,5	7,5	7,6
Średnia	92,7	97,9	105,3	5,4	7,4	7,4
Odchylenie standardowe	1,2	0,9	1,2	0,2	0,1	0,3
Wsp. zmienności	1,3	0,9	1,1	3,9	1,9	3,5

gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819



Rys. 5.54. Wykres statycznej próby zginania dla próbek wykonanych z polilaktydu metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią hybrydową

Analizując otrzymane wyniki z próby trzypunktowego zginania, można zaobserwować że przebiegi krzywych próbek wypełnionych żywicami PR700 oraz PR1819 mają zbliżony kształt jak w przypadku zginania próbek, których cienkościenna forma została wykonana z kopolimeru ABS, natomiast w obu przypadkach kształtki osiągają maksimum naprężeń zginających. Należy tutaj podkreślić, że próbki których cienkościenna forma została wykonana z polilaktydu posiadały większą wytrzymałość. Ze względu na identyczny proces realizacji budowy modelu próbki wykonane z polilaktydu w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia, tak jak w przypadku kopolimeru ABS, charakteryzowały się najniższą wytrzymałością na zginanie. Próbki wypełnione żywicą PR2000 oraz wykonane z polilaktydu w położeniu poziomym wykazują maksimum naprężeń zginających, przy czym kształtki wypełnione żywicą uległy złamaniu przy odkształceniu którego wartość wynosi około 7,35%, natomiast próbki wykonane tylko z tworzywa były w początkowej fazie procesu pęknięcia.

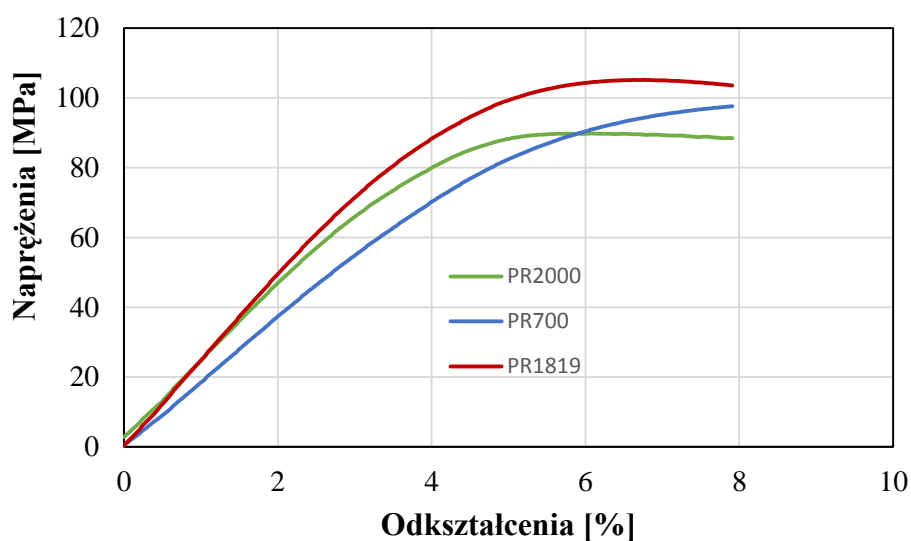
Tabela 5.16 przedstawia wyniki badań dla próbek wykonanych z żywic chemoutwardzalnych. Natomiast na rysunku 5.55 pokazano zależności naprężenia w funkcji odkształcenia dla pomiarów reprezentatywnych.

Tabela 5.16. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla żywic poliuretanowych wytworzonych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem

	Naprężenie [MPa]			Odkształcenie [%]		
	PR2000	PR700	PR1819	PR2000	PR700	PR1819
Próbka 1	89,8	97,6	105,2	6,1	7,9	6,6
Próbka 2	88,2	97,9	106,4	6,3	7,9	6,7
Próbka 3	87,3	96,7	104,9	6,2	7,8	6,5
Próbka 4	89,0	96,2	107,0	6,3	7,8	6,8
Próbka 5	90,3	97,1	106,9	6,4	7,9	6,8
Średnia	88,9	97,1	106,1	6,3	7,9	6,7
Odchylenie standardowe	1,1	0,6	0,9	0,1	0,1	0,2
Wsp. zmienności	1,2	0,6	0,8	2,1	0,5	2,0

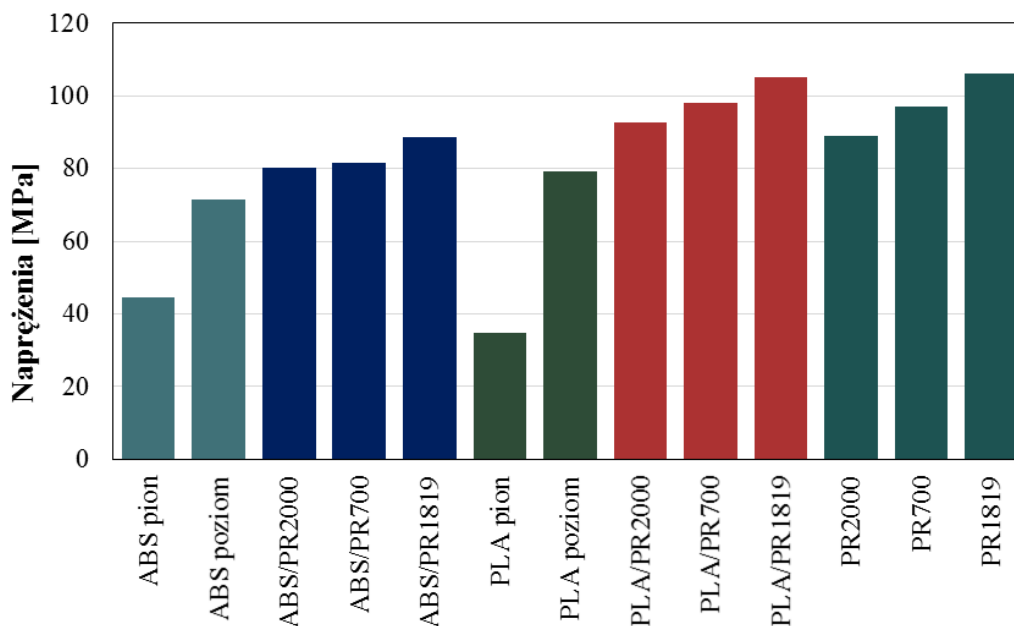
W wyniku analizy próbek wykonanych z żywic chemoutwardzalnych: PR2000, PR700 oraz PR1819 można stwierdzić jednoznacznie, że we wszystkich przypadkach kształtki nie ulegają złamaniu przed osiągnięciem umownej strzałki ugięcia, natomiast próbki odlane z żywicy PR700 nie wykazują maksimum naprężeń zginających. Spośród kształtek wykonanych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem najwyższą

wytrzymałością przy zginaniu odznaczają się próbki wykonane z żywicy PR1819, dla których maksymalne naprężenia wynoszą średnio 106,1 MPa.



Rys. 5.55. Wykres statycznej próby rozciągania dla próbek wykonanych z żywic chemoutwardzalnych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem

Na rysunku 5.56 przedstawiono zestawienie wartości średnich naprężeń zginających przy maksymalnym obciążeniu dla każdego badanego wariantu.



Rys. 5.56. Średnie wartości naprężeń zginających przy maksymalnym obciążeniu dla każdego badanego wariantu

Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałości na zginanie można zaobserwować wzrost naprężeń zginających próbek wytworzonych technologią hybrydową o ok. 80 – 98% w stosunku do modeli badawczych wytwarzanych

z kopolimeru ABS pionowo względem platformy roboczej urządzenia oraz o ok. 12 – 24% dla próbek w położeniu poziomym. W przypadku cienkościennych formy wykonanej z polilaktydu dla próbek wypełnionych żywicami chemoutwardzalnymi odnotowano wzrost naprężeń zginających o ok. 166 – 202% względem położenia pionowego oraz o ok. 17 – 33% względem położenia poziomego próbek wytwarzanych metodą ekstruzji warstwowej.

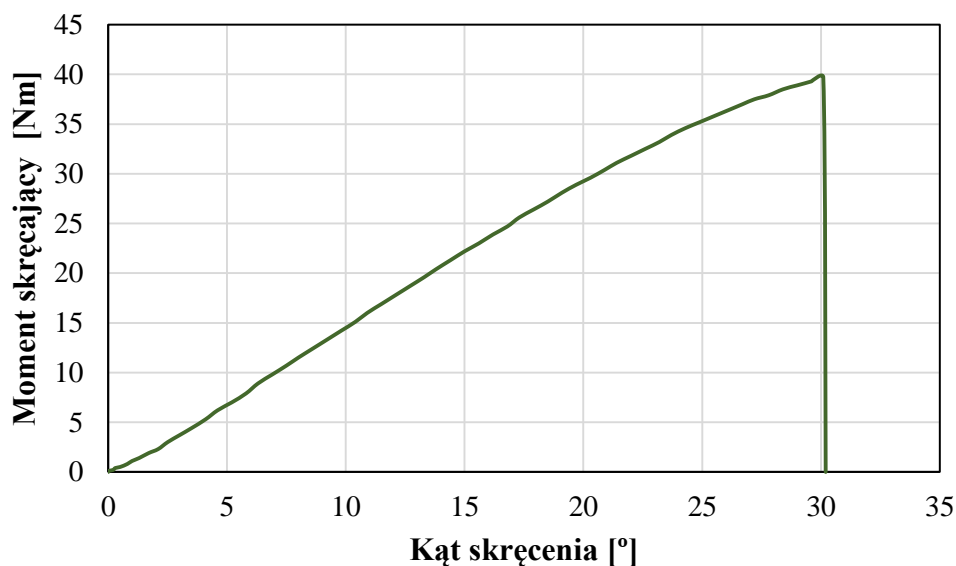
Średnie wartości naprężeń zginających próbek, których cienkościenna forma została wykonana z kopolimeru ABS stanowią ok. 83 – 90% wartości materiału bazowego (żywic chemoutwardzalnych). Natomiast w przypadku wykonania formy z polilaktydu wartości naprężeń zginających są zbliżone do próbek wykonanych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem – $\pm 4\%$ wartości bazowej.

5.5. Statyczna próba skręcania

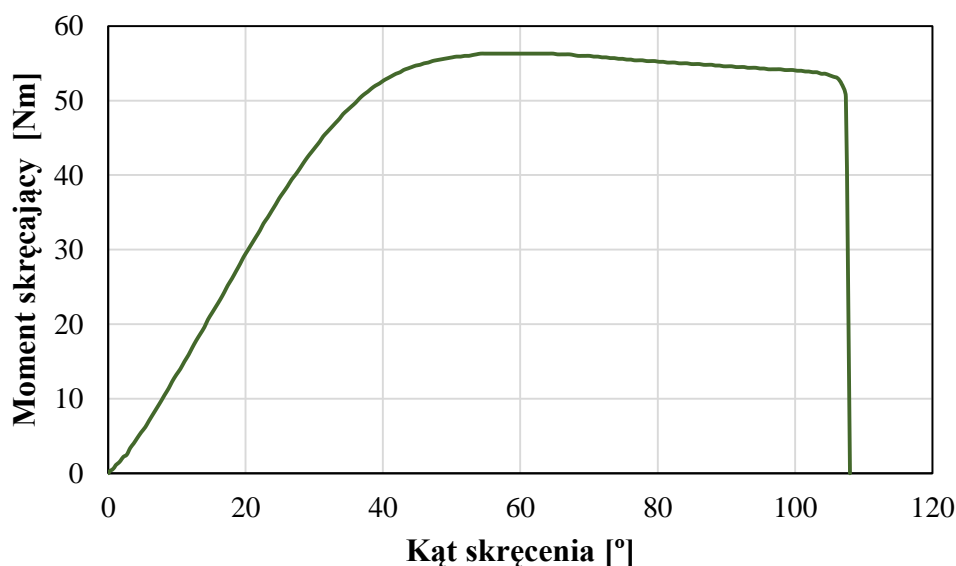
W pierwszym etapie zostały przeprowadzone badania wytrzymałości na skręcanie próbek wykonanych z kopolimeru ABS ułożonych pionowo i poziomo względem platformy roboczej urządzenia. Próbki zostały wytworzone wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej. Wyniki ze statycznej próby skręcania przedstawiono w tabeli 5.17. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartości średnie oraz odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. Przebiegi krzywych momentu skręcającego w funkcji kąta skręcenia przedstawiono na rysunkach 5.57 i 5.58.

Tabela 5.17. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla kopolimeru ABS w orientacji poziomej i pionowej względem platformy roboczej urządzenia

	Moment skręcający [Nm]		Kąt skręcenia [°]	
	ABS pion	ABS poziom	ABS pion	ABS poziom
Próbka 1	39,7	56,3	30,1	107,4
Próbka 2	37,8	54,2	29,3	105,2
Próbka 3	38,5	55,1	31,2	108,7
Próbka 4	39,1	55,6	30,7	104,8
Próbka 5	38,2	54,3	29,5	106,1
Średnia	38,7	55,1	30,2	106,4
Odchylenie standardowe	0,7	0,8	0,7	1,4
Wsp. zmienności	1,7	1,4	2,4	1,4



Rys. 5.57. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z kopolimeru ABS otrzymanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia



Rys. 5.58. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z kopolimeru ABS otrzymanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia

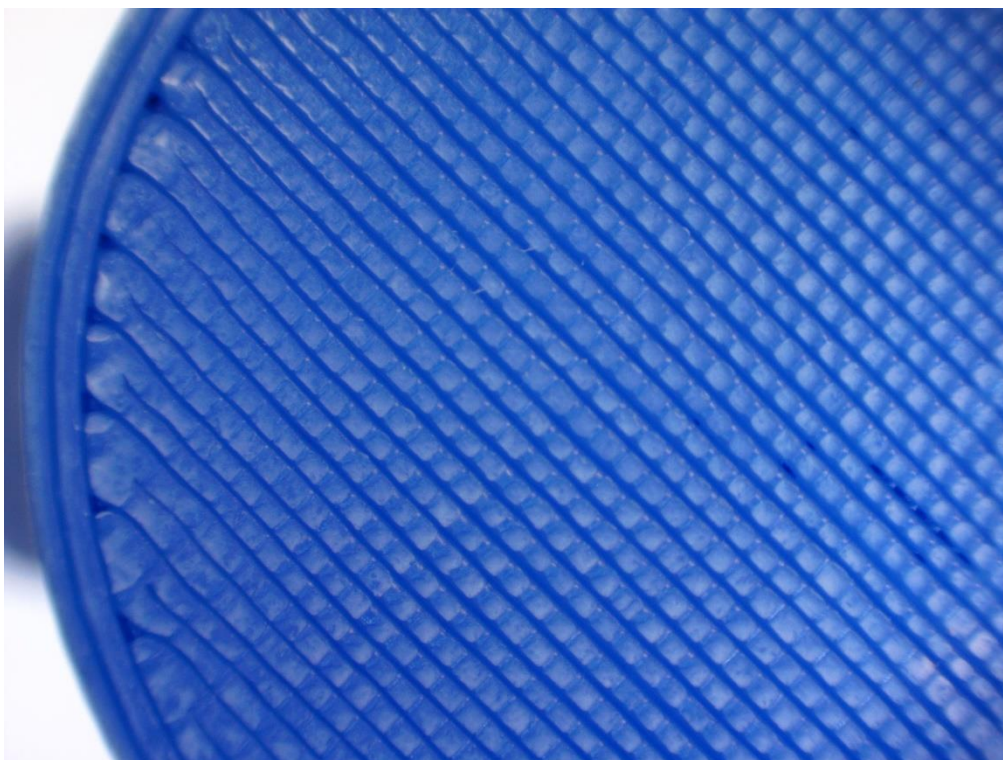
Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że przeprowadzone badania wytrzymałości na skręcanie potwierdzają tezę obniżania się wytrzymałości elementów wytwarzanych metodą ekstruzji warstwowej w kierunkach obciążeń zbliżonych do kierunku budowy modelu.

Analizując przebieg krzywej zależności momentu skręcającego od kąta skręcania można stwierdzić, że dla próbek wykonanych z kopolimeru ABS otrzymanych w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia krzywa posiada cechy

charakterystyczne dla materiału sprężysto-kruchego. Wynika to z faktu braku występowania granicy plastyczności na skutek działania maksymalnych naprężeń rozciągających (spowodowanych skręcaniem) skierowanych prostopadle do ułożenia warstw modelu, prowadzących do zniszczenia próbki, które uniemożliwia odkształcenie plastyczne. Średnia wartość momentu skręcającego dla tych próbek wynosiła $38,7 \pm 0,7$ Nm przy całkowitym kącie skręcenia $30,2 \pm 0,7^\circ$.

Następnie badaniom zostały poddane próbki wykonane w położeniu poziomym względem platformy roboczej urządzenia. Na podstawie otrzymanych wyników można zaobserwować zachowanie się próbki jak ciała sprężysto-plastycznego. Cechy plastyczne materiału potwierdza szeroki zakres plastyczności w przedziale kąta skręcenia od 35° do 106° . Analizując przebieg krzywej skręcania można zaobserwować łagodnie narastające odkształcenie charakterystyczne dla materiałów bez wyraźnej granicy plastyczności, w związku z czym naprężenie wywołujące w tworzywie umownie przyjęte odkształcenie względne określa się jako umowną granicę plastyczności. Po przekroczeniu umownej granicy plastyczności dochodzi do trwałego odkształcenia plastycznego (nieodwracalnego przemieszczenia się warstw), które jest określane jako płynięcie materiału. Średnia wartość maksymalnego momentu skręcającego wynosiła $55,1 \pm 0,8$ Nm przy kącie skręcenia około 60° , natomiast doraźna wytrzymałość na skręcanie odpowiadała obciążeniu wynoszącemu około 50 Nm, przy całkowitym kącie skręcenia $106,4 \pm 1,4^\circ$.

Dla otrzymanych, po statycznej próbie skręcania, przelomów próbek zostały przeprowadzone badania morfologii powierzchni przy dziesięcio- i czterdziestokrotnym powiększeniu za pomocą mikroskopu stereoskopowego. Wyniki z otrzymanych badań przedstawiono na rysunkach 5.59 – 5.62.



Rys. 5.59. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS otrzymanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.60. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS otrzymanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia przy czterdziestokrotnym powiększeniu



Rys. 5.61. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS otrzymanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.62. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS otrzymanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia przy czterdziestokrotnym powiększeniu

Analiza morfologii powierzchni przełomu próbki wytworzonej z kopolimeru ABS w pionowym położeniu względem platformy roboczej urządzenia świadczy o występowaniu kruchego pęknięcia, co potwierdza wyniki obserwacji badań wytrzymałości na skręcanie. Przedstawiony na rysunkach 5.59 i 5.60 przełom posiada strukturę warstwowo-komórkową, bez widocznych śladów zabielenia próbki. Ze względu na charakter pęknięcia, który wystąpił na łączeniu warstw, można zaobserwować przełom łupliwy. Jest to związane bezpośrednio z kierunkiem ułożenia ścieżek, których powierzchnia jest zorientowana prostopadle do kierunku przyłożonego obciążenia oraz niskiej wytrzymałości na granicach warstw spowodowanej adhezyjnym przywieraniem uplastycznionego materiału.

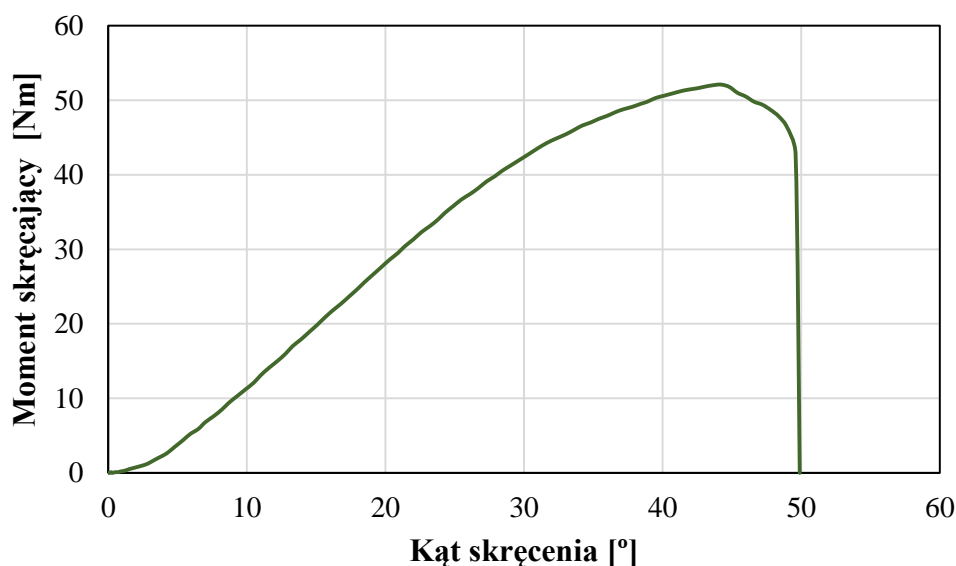
W przypadku próbek wytworzonych z kopolimeru ABS w położeniu poziomym względem platformy roboczej urządzenia można stwierdzić, że zmiana orientacji ułożenia modelu w komorze ma istotny wpływ na rodzaj otrzymanego przełomu. Analiza przełomu wskazuje na schodkowe rozdzielanie się warstw, w związku z czym propagacja pęknięcia jest bezpośrednio związana ze sposobem wypełnienia modelu – naprzemiennego ułożenia ścieżek pod kątami 45° i 135° . Zabielenie powierzchni o dużej chropowatości oraz rozsunięcie warstw świadczy o plastycznym pęknięciu próbki, co jest zbieżne z otrzymanymi rezultatami badań przeprowadzonych w statycznej próbie skręcania.

W kolejnym etapie doświadczeń badaniom poddano próbki, których cienkościenna forma została wykonana z kopolimeru ABS, a na wypełnienie zastosowano żywice chemoutwardzalne: PRC1819, PR2000, PR700. Wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 5.18. Zależność momentu skręcającego w funkcji kąta skręcenia przedstawiono na rysunkach 5.63 – 5.65.

Tabela 5.18. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla hybrydowego zastosowania kopolimeru ABS z żywicami chemoutwardzalnymi

	Moment skręcający [Nm]			Kąt skręcenia [°]		
	ABS/K1	ABS/K2	ABS/K3	ABS/K1	ABS/K2	ABS/K3
Próbka 1	52,1	54,9	52,9	49,6	120,2	40,6
Próbka 2	53,1	55,6	54,2	50,2	123,5	41,1
Próbka 3	53,9	56,4	53,6	49,1	119,4	40,9
Próbka 4	54,0	55,9	53,9	50,4	122,1	41,5
Próbka 5	52,9	56,2	54,8	50,8	118,5	41,7
Średnia	53,2	55,8	53,9	50,0	120,7	41,2
Odchylenie standardowe	0,7	0,5	0,6	0,6	1,8	0,4
Wsp. zmienności	1,3	0,9	1,2	1,2	1,5	1,0

gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819

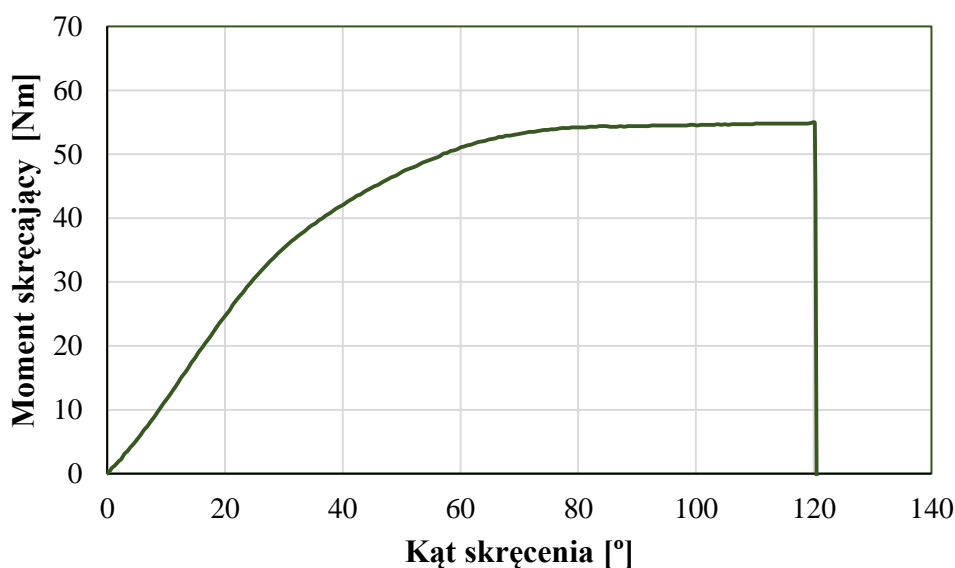


Rys. 5.63. Wykres statycznej próby skręcenia dla próbki z kopolimeru ABS wypełnionej żywicą poliuretanową PR2000

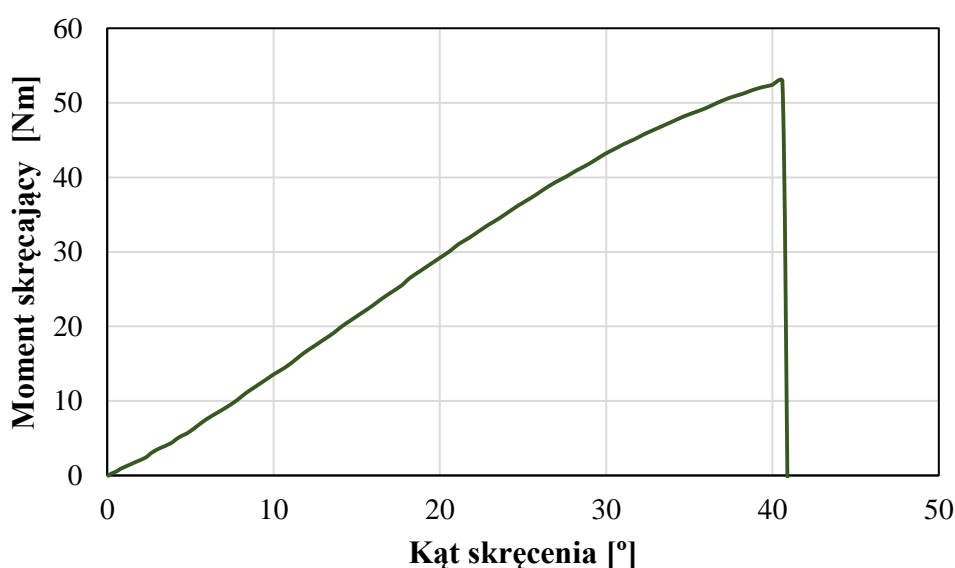
Zastosowanie opracowanej technologii łączenia polimerów termoplastycznych z polimerami chemoutwardzalnymi potwierdza tezę zwiększenia wytrzymałości modeli badawczych wytworzonych metodą hybrydową, w stosunku do próbek wykonywanych w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej.

Badaniom zostały poddane próbki wypełnione żywicą poliuretanową PR2000. Analizując przebieg krzywej skręcenia można zaobserwować przegięcie charakterystyczne dla ciał plastycznych oraz granicę plastyczności, której towarzyszy

trwale odkształcenie. Granica plastyczności nie występuje tak wyraźnie ze względu na nierównomierność rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym próbki (odkształcenia plastyczne pojawiają się najpierw w zewnętrznej warstwie próbki). Nieduży zakres, w którym zachodzi trwałe odkształcenie plastyczne świadczy o znacznie mniejszej plastyczności w porównaniu do próbek wykonanych z kopolimeru ABS wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej w poziomym położeniu względem platformy roboczej urządzenia. Średnia wartość maksymalnego momentu skręcającego wynosiła $53,2 \pm 0,7$ Nm, przy całkowitym kącie skręcenia $50 \pm 0,6^\circ$.



Rys. 5.64. Wykres statycznej próby skręcenia dla próbki z kopolimeru ABS wypełnionej żywicą poliuretanową PR700



Rys. 5.65. Wykres statycznej próby skręcenia dla próbki z kopolimeru ABS wypełnionej żywicą poliuretanową PR1819

W następnym etapie doświadczeń badaniu skręcania poddano próbki wypełnione żywicą chemoutwardzalną PR700. Producent deklaruje, że materiał posiada właściwości zbliżone do kopolimeru ABS, co potwierdza przebieg zależności momentu skręcającego od kąta skręcenia charakterystyczny dla ciał sprężysto-plastycznych. W przypadku zastosowania żywicy PR700 jako wypełnienia modelu badawczego zaobserwowano znacznie większą zdolność do ulegania nieodwracalnym odkształceniom w stosunku do żywicy PR2000 o czym świadczy szeroki zakres plastyczności. Należy tutaj podkreślić, że przebieg krzywej skręcania (łagodnie narastające odkształcenie) oraz otrzymane w próbie wartości pokrywają się z wynikami statycznej próby skręcania otrzymanymi dla próbek z kopolimeru ABS wykonanych w poziomym położeniu względem platformy roboczej urządzenia. Warto zwrócić uwagę na fakt, że wartość maksymalnego momentu skręcającego po przekroczeniu umownej granicy plastyczności jest stała aż do momentu zniszczenia próbki i wynosi $55,8 \pm 0,5$ Nm, przy całkowitym kącie skręcenia $120,7 \pm 2^\circ$.

W ostatnim etapie wykonano badania próbek wypełnionych żywicą PR1819. Przebieg krzywej skręcania oraz brak występowania granicy plastyczności jest charakterystyczny dla materiału sprężysto-kruchego. Średnia wartość maksymalnego momentu skręcającego wynosiła $53,9 \pm 0,6$ Nm, przy maksymalnym kącie skręcenia $41,2 \pm 0,4^\circ$.

Na rysunkach 5.66 – 5.71 przedstawiono wyniki badań morfologii powierzchni dla próbek wytworzonych z kopolimeru ABS wypełnionego żywicami poliuretanowymi.

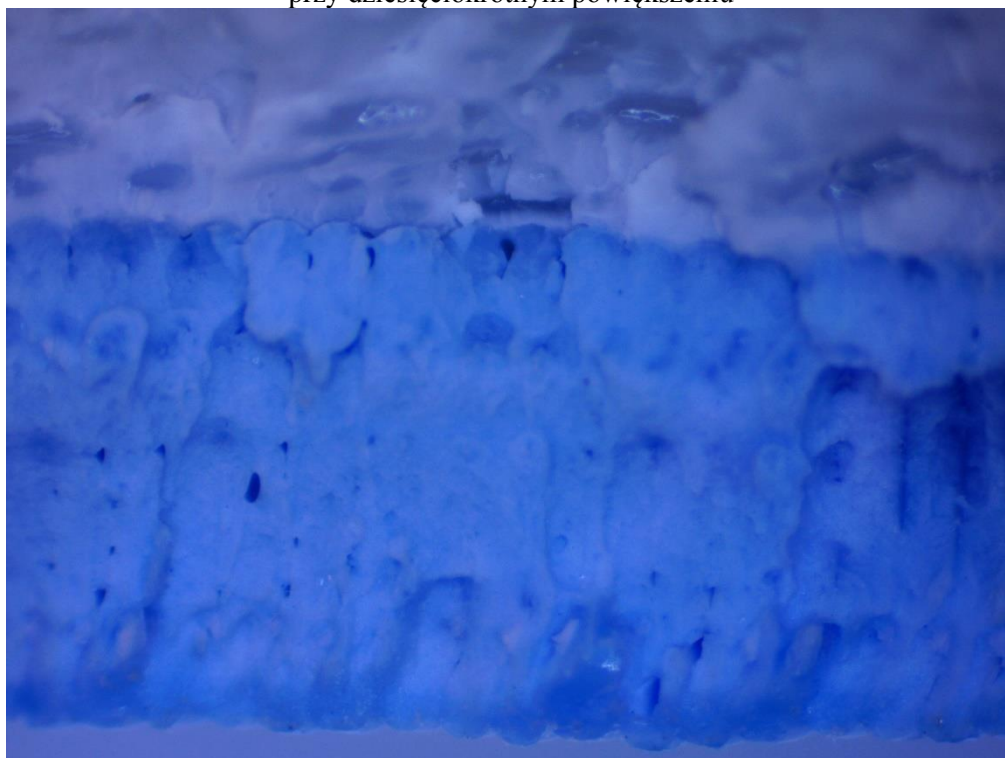
Analizę powierzchni przełomów próbek po skręcaniu, wypełnionych żywicami chemoutwardzalnymi, należy przeprowadzić osobno dla stosowanych w procesie wytwarzania materiałów: kopolimeru ABS z którego został wykonany cienkościenny model badawczy oraz żywiec polimerowych. W pierwszym przypadku można zaobserwować zabielenie powierzchni oraz zlanie się warstw filamentu (całkowite dla próbek wypełnionych żywicą PR2000 oraz częściowe dla PR1819) co świadczy o tworzeniu się ciągłego przełomu.

Morfologia powierzchni żywic PR700 oraz PR1819 jest pozbawiona wyraźnych śladów odkształcenia plastycznego w związku z czym otrzymany przełom jest charakterystyczny dla pęknięcia kruchego (łupliwego). Odmienne zachowanie można zaobserwować w przypadku żywicy PR2000, dla której przełom w skali makroskopowej charakteryzuje się jedwabistą powierzchnią o małej chropowatości. Jest to związane

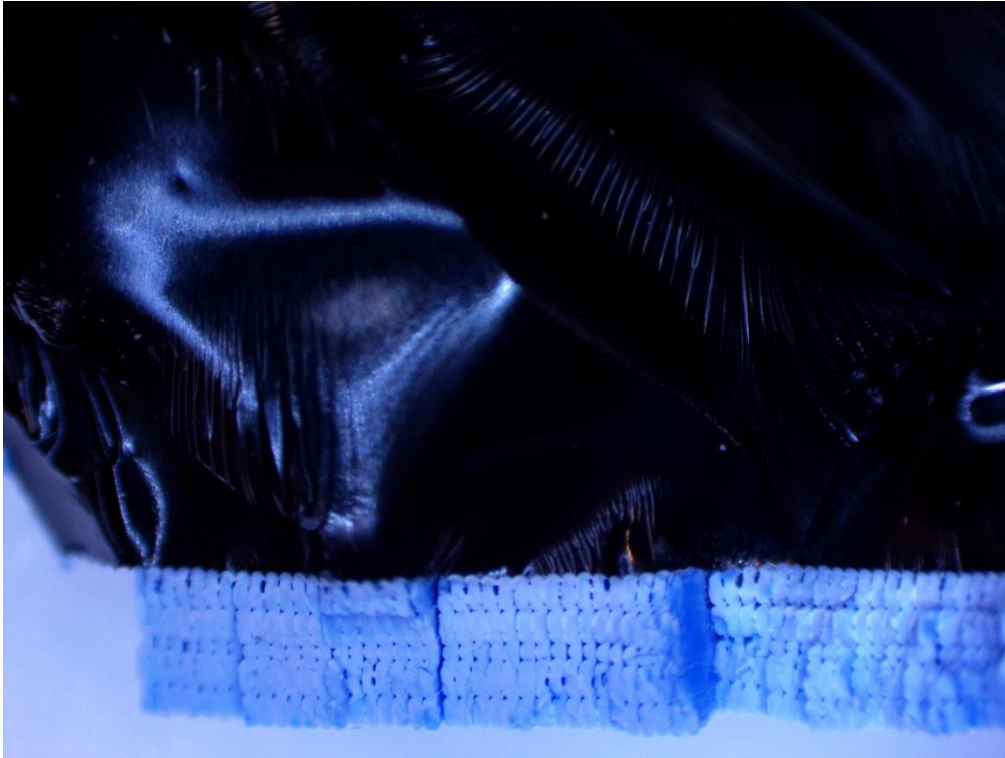
bezpośrednio z intensywnym odkształceniem plastycznym i akumulacją energii odkształcenia w materiale.



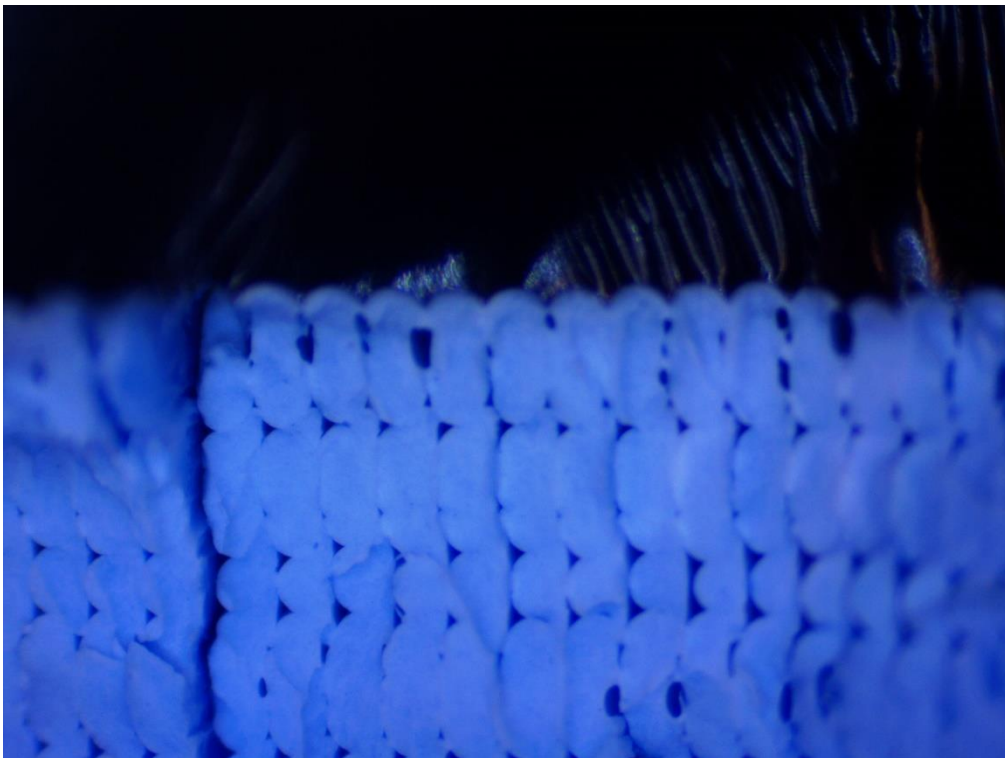
Rys. 5.66. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR2000 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



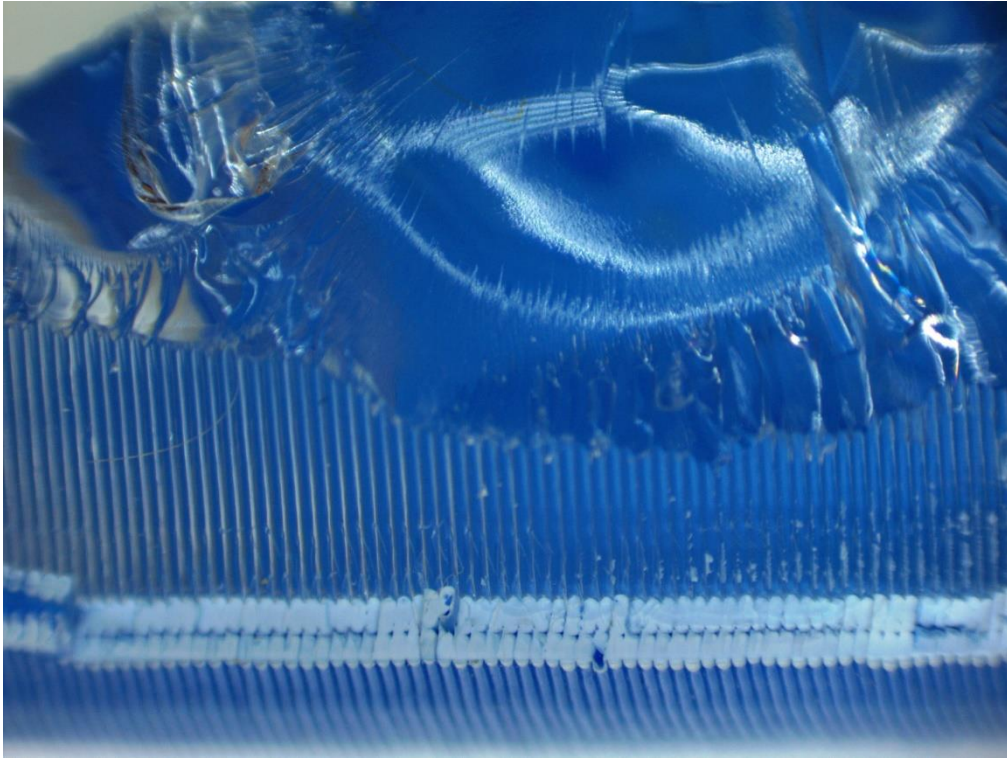
Rys. 5.67. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR2000 przy czterdziestokrotnym powiększeniu



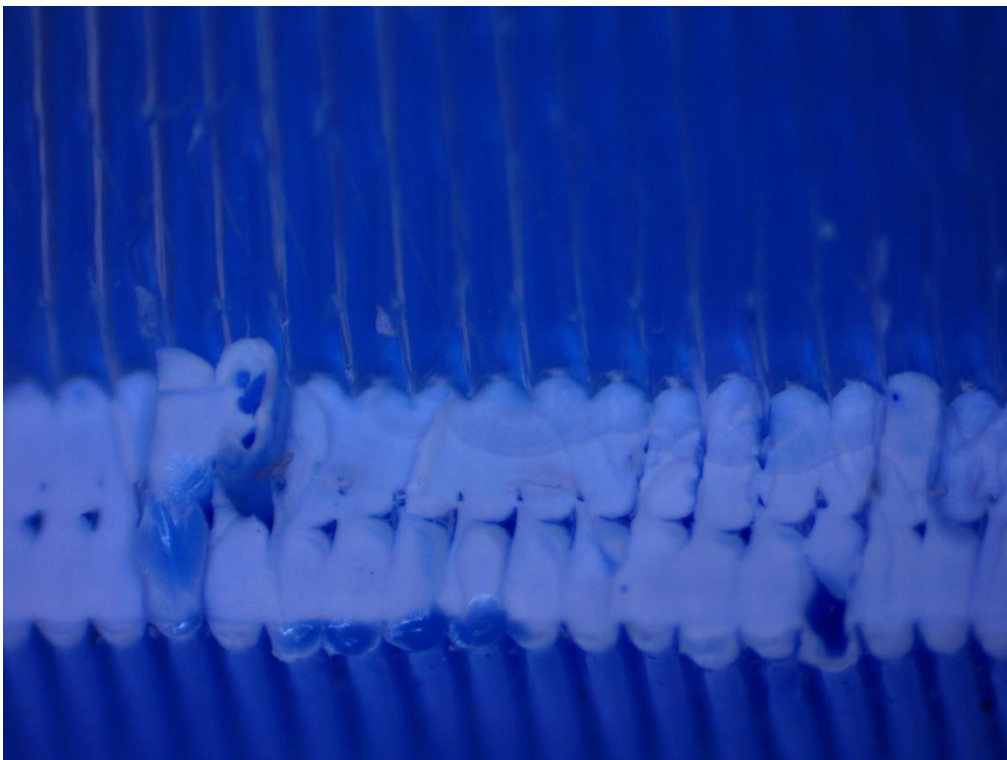
Rys. 5.68. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR700 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.69. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR700 przy czterdziestokrotnym powiększeniu



Rys. 5.70. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR1819 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



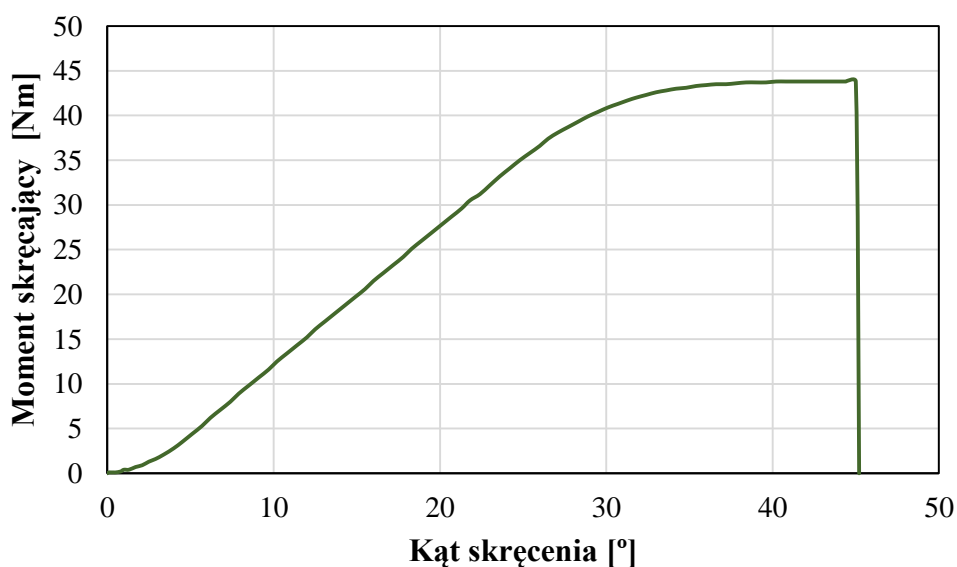
Rys. 5.71. Widok przełomu próbki z kopolimeru ABS i żywicy poliuretanowej PR1819 przy czterdziestokrotnym powiększeniu

Zaobserwowano również, że w przypadku żywicy poliuretanowej PR2000 oraz PR700 polimer termoplastyczny ulega zniszczeniu wzdłuż linii pęknięcia żywicy chemoutwardzalnej, co świadczy o dobrym łączeniu się tych materiałów w procesie sieciowania żywicy.

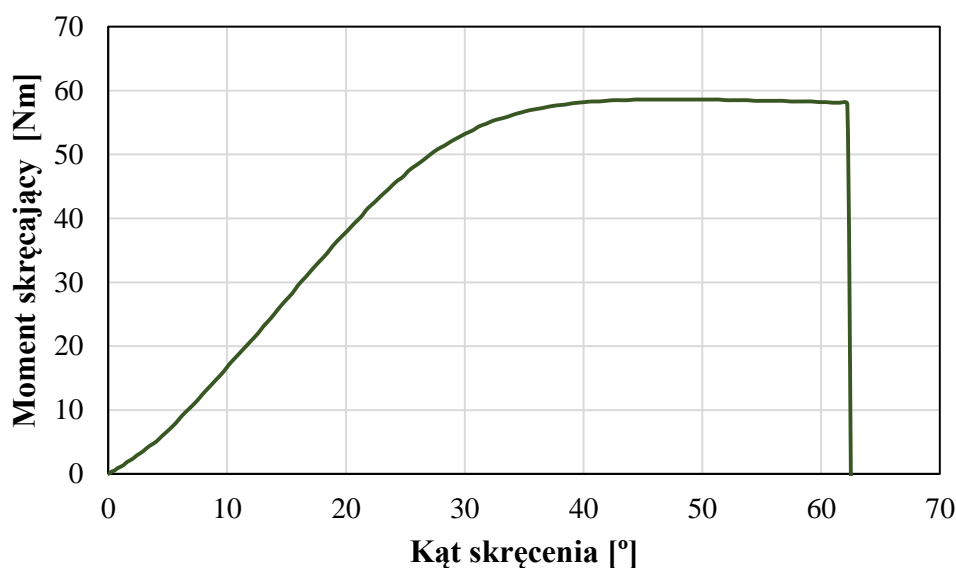
W następnym etapie badania skręcania zostały poddane próbki z polilaktydu, wytworzone wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej, w ułożeniu pionowym i poziomym względem platformy roboczej urządzenia. Wyniki z przeprowadzonych badań zostały przedstawione w tabeli 5.19 oraz na rysunkach 5.72 i 5.73.

Tabela 5.19. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla polilaktydu w orientacji poziomej i pionowej względem platformy roboczej urządzenia

	Moment skręcający [Nm]		Kąt skręcenia [°]	
	PLA pion	PLA poziom	PLA pion	PLA poziom
Próbka 1	43,8	58,6	45,0	62,2
Próbka 2	44,2	56,2	44,5	61,5
Próbka 3	43,1	56,9	45,6	62,0
Próbka 4	42,9	57,3	44,9	60,9
Próbka 5	43,5	56,5	44,8	61,1
Średnia	43,5	57,1	45,0	61,5
Odchylenie standardowe	0,5	0,8	0,4	0,5
Wsp. zmienności	1,1	1,5	0,8	0,8



Rys. 5.72. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z polilaktydu otrzymanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia



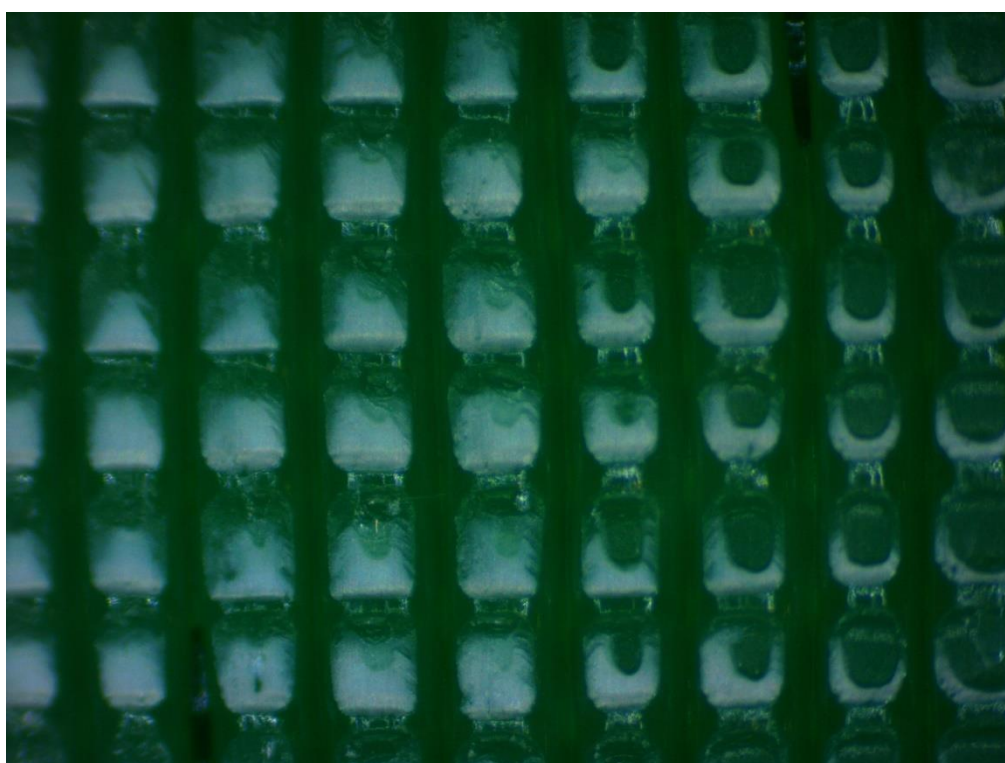
Rys. 5.73. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z polilaktydu otrzymanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia

Na podstawie otrzymanych wyników badań próbek wykonanych z polilaktydu można stwierdzić, że niezależnie od położenia modeli badawczych względem platformy roboczej urządzenia (poziome i pionowe) krzywe przebiegu skręcania miały taki sam kształt, a różniły się wyłącznie zmierzonymi wartościami momentu skręcającego i kąta skręcenia. W obu przypadkach przebieg krzywej jest charakterystyczny dla materiałów sprężystych, jak i plastycznych, natomiast maksymalny przenoszony moment skręcający osiągnięty po przekroczeniu umownej granicy plastyczności utrzymywał się na stałym poziomie do chwili zniszczenia próbki. Porównując otrzymane wyniki do próbek wytwarzanych z kopolimeru ABS należy zwrócić uwagę na dwa istotne fakty. Próbki wytwarzane w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia z polilaktydu posiadały większą wytrzymałość w stosunku do kopolimeru ABS, co świadczy o lepszych właściwościach adhezyjnych uplastycznionego materiału na granicach łączonych warstw. Natomiast w przypadku próbek wytworzonych w położeniu poziomym można zaobserwować znacznie mniejszy zakres plastyczności materiału. Średnia wartość momentu skręcającego dla próbek otrzymanych w położeniu pionowym wynosiła $43,5 \pm 0,5$ Nm przy całkowitym kącie skręcenia $45 \pm 0,4^\circ$ oraz odpowiednio $57,1 \pm 0,8$ Nm i $61,5 \pm 0,5^\circ$ dla próbek w położeniu poziomym.

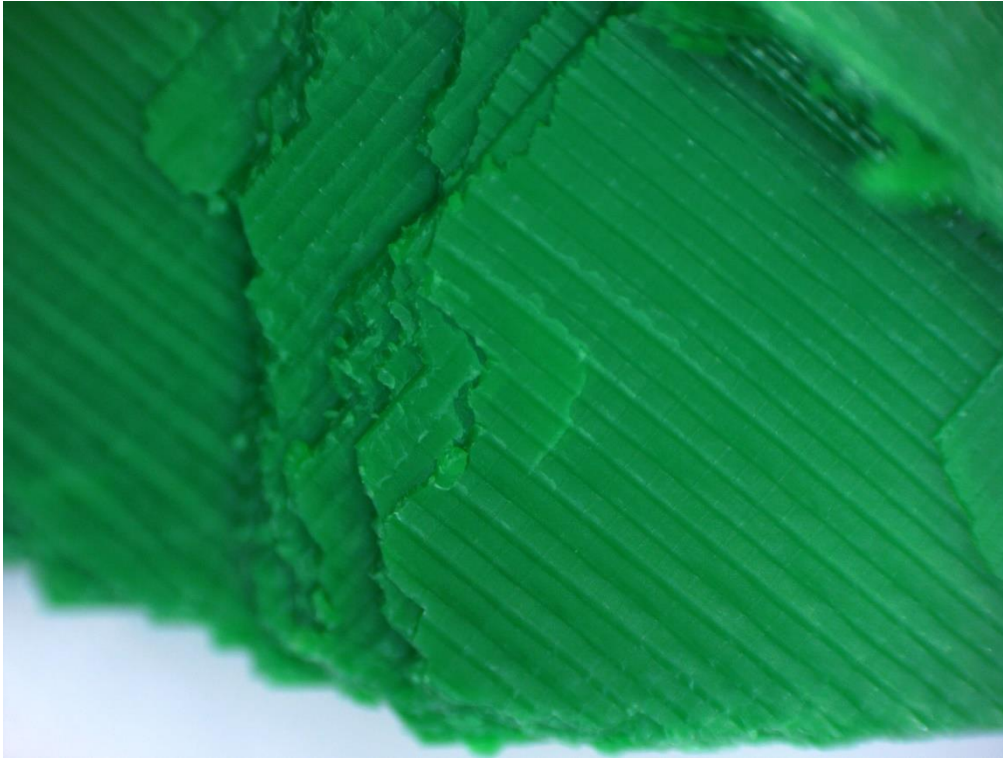
Wyniki badań morfologii powierzchni próbek wykonanych z polilaktydu przedstawiono na rysunkach 5.74 – 5.77.



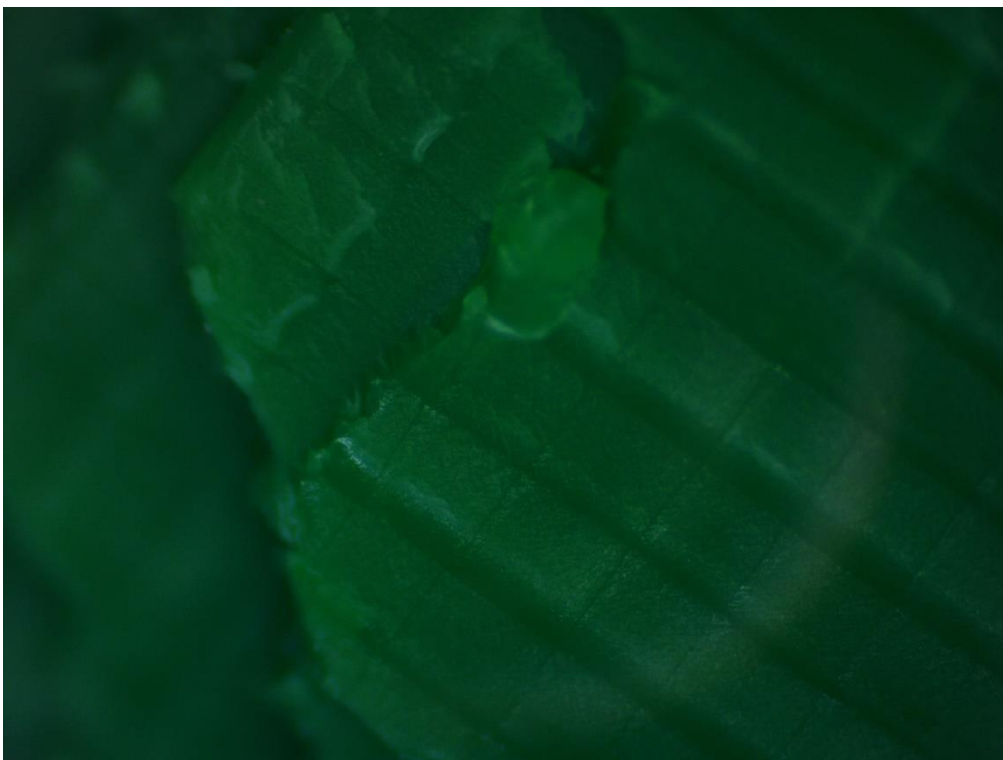
Rys. 5.74. Widok przełomu próbki z polilaktydu otrzymanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.75. Widok przełomu próbki z polilaktydu otrzymanej w orientacji pionowej względem platformy roboczej urządzenia przy czterdziestokrotnym powiększeniu



Rys. 5.76. Widok przełomu próbki z polilaktydu otrzymanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.77. Widok przełomu próbki z polilaktydu otrzymanej w orientacji poziomej względem platformy roboczej urządzenia przy czterdziestokrotnym powiększeniu

Analizując powierzchnię przelomu próbki wytworzonej z polilaktydu w pionowym położeniu względem komory roboczej urządzenia zaobserwowano podobną, jak w przypadku kopolimeru ABS, strukturę warstwowo-komórkową, bez widocznych śladów zabielenia próbki. Przebieg krzywej na wykresie statycznej próby skręcania wskazywał, że po przekroczeniu umownej granicy plastyczności doszło do trwałego odkształcenia plastycznego, natomiast otrzymany przelom łupliwy na powierzchni łączenia warstw świadczy o kruchym pękaniu badanej próbki.

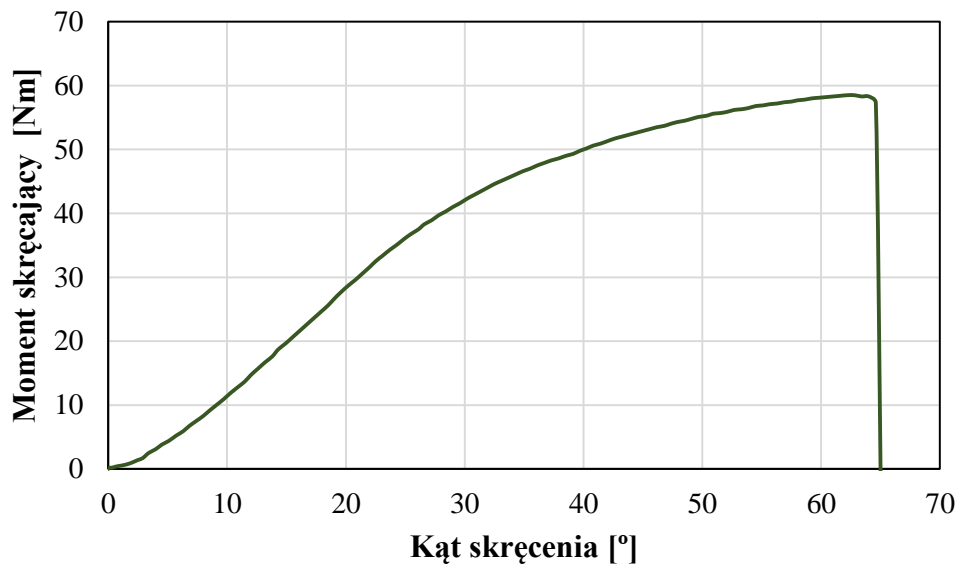
Przelom próbek wytworzonych z polilaktydu w położeniu poziomym względem platformy roboczej urządzenia wskazuje na schodkowe rozdzielanie się warstw, tak jak to miało miejsce w przypadku takich samych próbek wykonanych z kopolimeru ABS. Natomiast powierzchnia warstw posiada ostre krawędzie charakterystyczne dla kruchego pęknięcia. W miejscu przelomu nie zaobserwowano rozsuwania się komórek warstw. Spostrzeżenia te nie potwierdzają rezultatów badań otrzymanych w statycznej próbie skręcania.

W tabeli 5.20 zaprezentowano wyniki z przeprowadzonych badań wytrzymałości na skręcanie. Na rysunkach 5.78 – 5.80 przedstawiono wykresy zależności momentu skręcającego w funkcji kąta skręcenia dla próbek z polilaktydu wypełnionego żywicami poliuretanowymi.

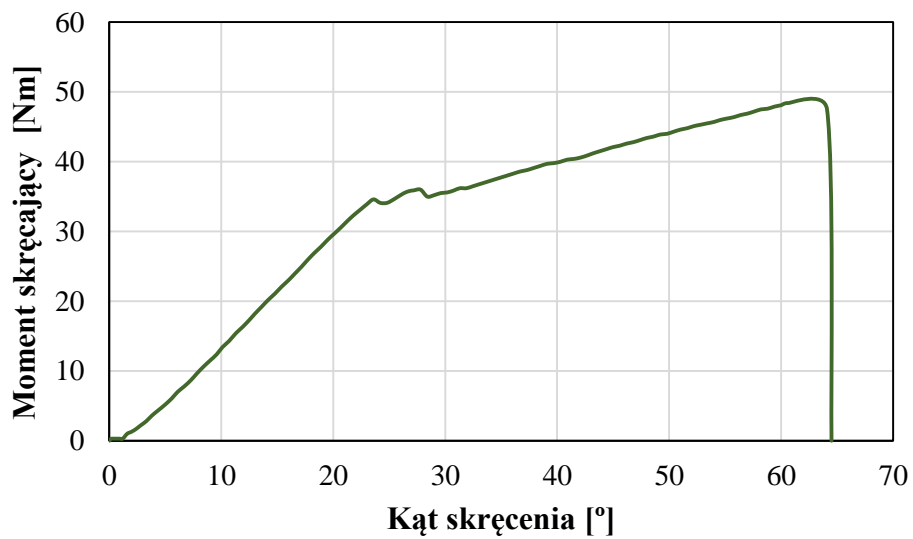
Tabela 5.20. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla hybrydowego zastosowania polilaktydu z żywicami chemoutwardzalnymi

	Moment skręcający [Nm]			Kąt skręcenia [°]		
	PLA/K1	PLA/K2	PLA/K3	PLA/K1	PLA/K2	PLA/K3
Próbka 1	58,5	48,5	66,2	64,6	64,1	84,0
Próbka 2	58,2	47,2	65,5	65,1	62,8	83,2
Próbka 3	59,6	48,1	66,8	64,2	64,2	84,5
Próbka 4	59,9	47,5	64,9	65,8	63,4	84,2
Próbka 5	59,7	48,8	66,4	65,4	64,5	85,1
Średnia	59,2	48,0	66,0	65,0	63,8	84,2
Odchylenie standardowe	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6
Wsp. zmienności	1,2	1,2	1,0	0,9	1,0	0,7

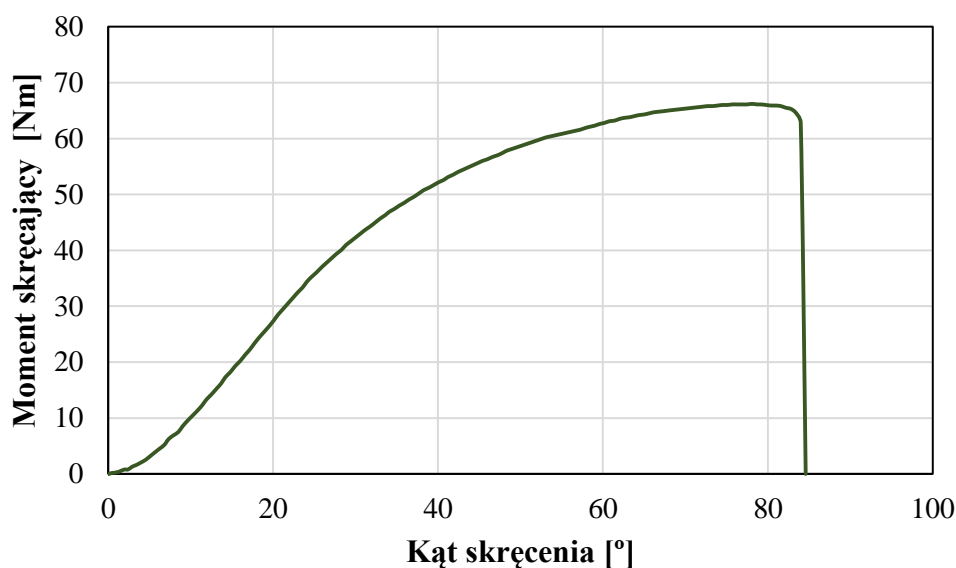
gdzie: K1 – żywica PR200, K2 – PR700, K3 – PR1819



Rys. 5.78. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z polilaktydu wypełnionej żywicą poliuretanową PR2000



Rys. 5.79. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z polilaktydu wypełnionej żywicą poliuretanową PR700

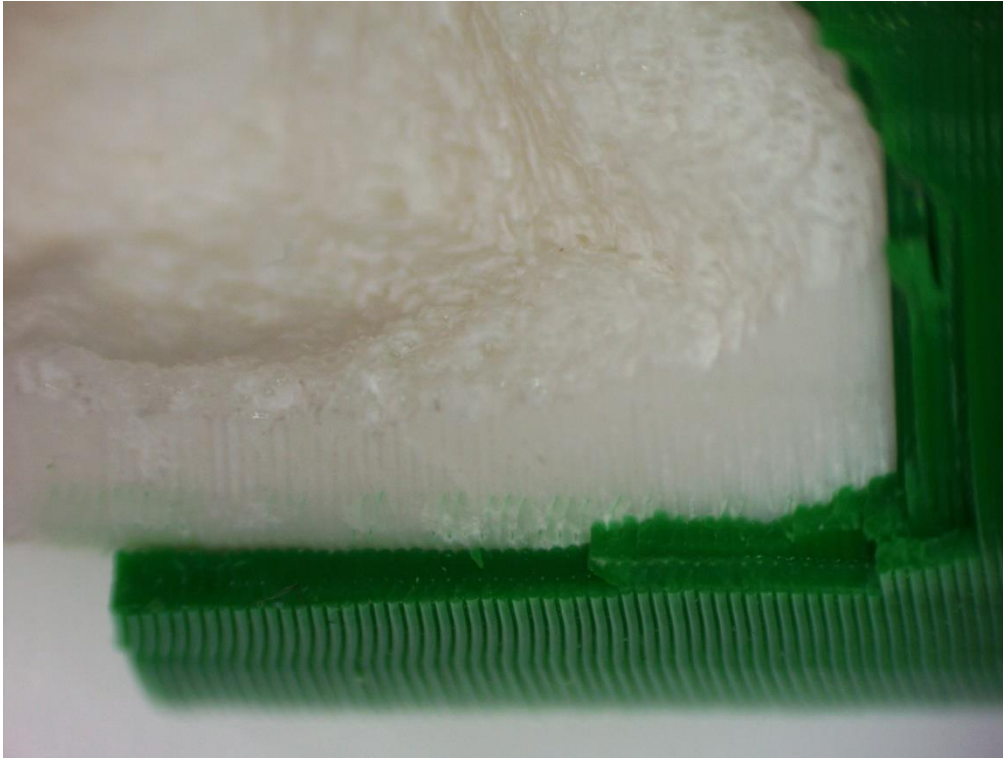


Rys. 5.80. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z polilaktydu wypełnionej żywicą poliuretanową PR1819

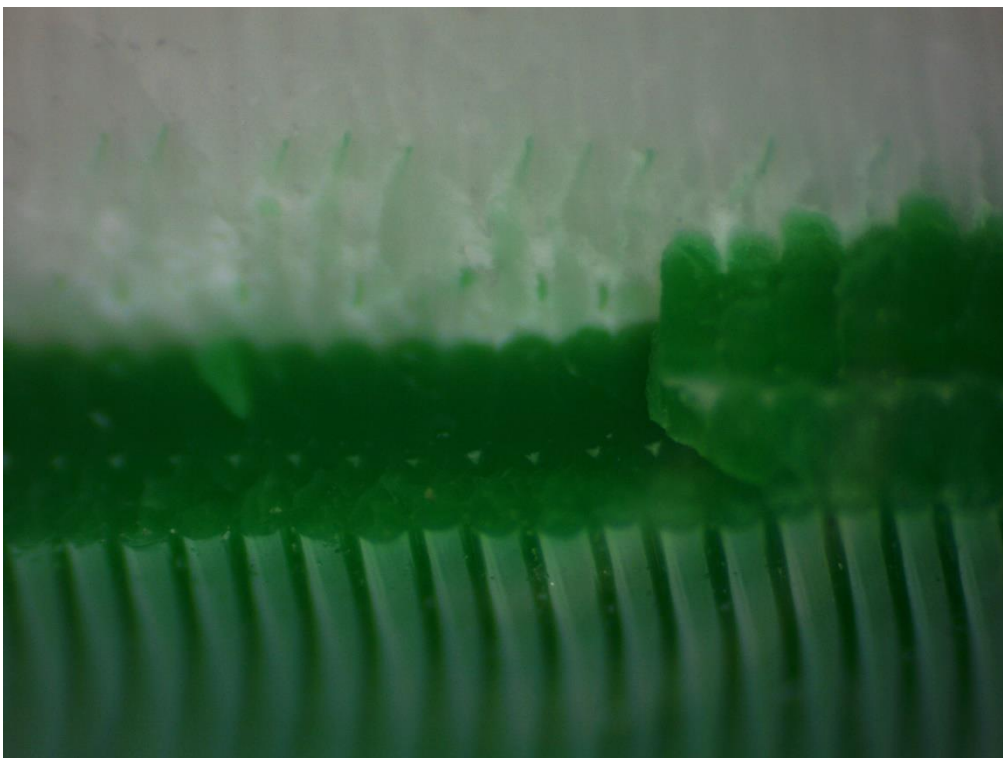
Na podstawie uzyskanych wyników badań skręcania dla modeli badawczych wypełnionych żywicami PR2000 oraz PR1819 można stwierdzić zachowanie się próbek jak ciał sprężysto-plastycznych. Świadczy o tym charakterystyczne dla ciał plastycznych przebiegi znajdujące się na krzywej momentu skręcania powodujące trwałe odkształcenie plastyczne podczas naprężenia. Wartość momentu skręcającego dla próbek wypełnionych żywicą chemoutwardzalną PR2000 wynosiła $52,9 \pm 0,7$ Nm przy całkowitym kącie skręcenia $65 \pm 0,6^\circ$ oraz $66 \pm 0,7$ Nm dla geometrii wypełnionej żywicą PR1819 dla kąta skręcenia $84,2 \pm 0,6^\circ$.

Odmienne zachowanie natomiast można zaobserwować w przypadku próbek wypełnionych żywicą PR700. Przebieg krzywej skręcania oraz obserwacja próbki po zniszczeniu świadczy o niskich właściwościach adhezyjnych wykorzystanej żywicy chemoutwardzalnej w stosunku do polilaktydu. Na przedstawionym na rysunku 5.79 wykresie zależności momentu skręcającego w funkcji kąta skręcenia można zaobserwować, że do pęknięcia próbki dochodzi dwukrotnie. W pierwszej kolejności uszkodzeniu uległa cienkościenna forma wykonana z tworzywa termoplastycznego przy wartości momentu skręcającego około 34 Nm. Natomiast zniszczenie rdzenia próbki nastąpiło przy kącie skręcenia $63,8 \pm 0,6^\circ$ dla momentu skręcającego równego $48 \pm 0,6$ Nm.

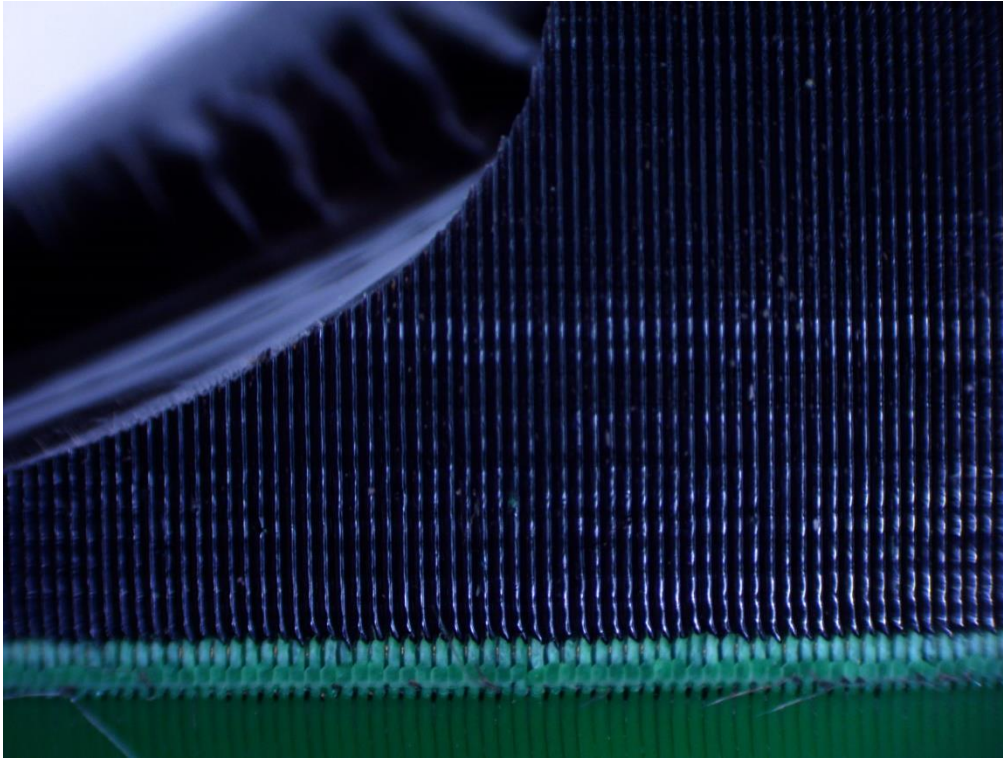
Morfologię powierzchni próbek wytworzonych z polilaktydu wypełnionego żywicami poliuretanowymi przedstawiono na rysunkach 5.81 – 5.86.



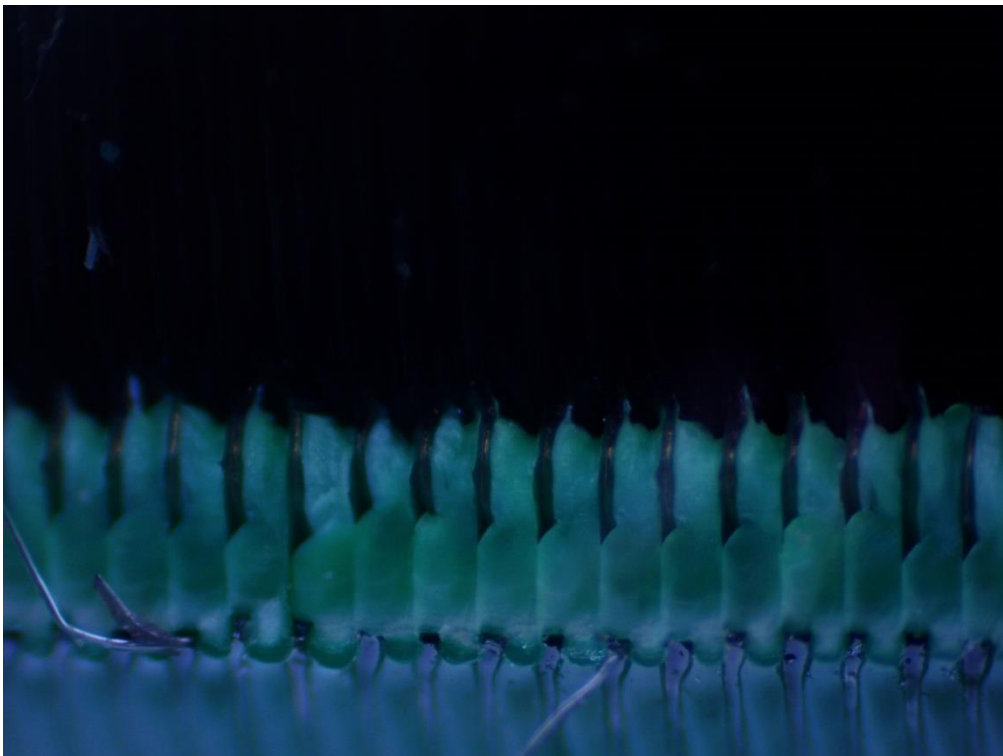
Rys. 5.81. Widok przełomu próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR2000 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.82. Widok przełomu próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR2000 przy czterdziestokrotnym powiększeniu



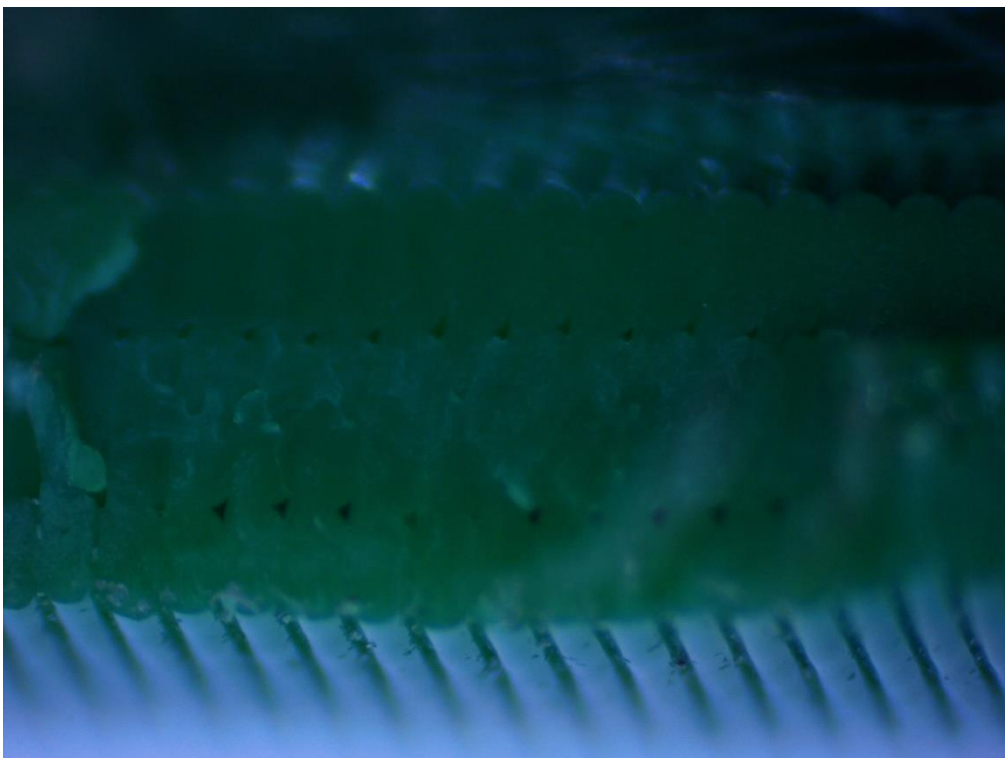
Rys. 5.83. Widok przełomu próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR700 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.84. Widok przełomu próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR700 przy czterdziestokrotnym powiększeniu



Rys. 5.85. Widok przełomu próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR1819 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.86. Widok przełomu próbki z polilaktydu i żywicy poliuretanowej PR1819 przy czterdziestokrotnym powiększeniu

Analizując powierzchnię przełomu próbek wykonanych z polilaktydu wypełnionych żywicami chemoutwardzalnymi można stwierdzić, że wyniki badań makroskopowych żywic PR2000, PR700 oraz PR1819 są identyczne jak dla próbek, których cienkościenny model badawczy wytworzony został z kopolimeru ABS. Natomiast w przypadku polilaktydu, można zaobserwować zniszczenie nici materiału modelowego o ostrych krawędziach na kierunku prostopadłym do ścieżek nakładanego filamentu. Takie pęknięcie spowodowane jest maksymalnymi naprężeniami stycznymi występującymi na obwodzie przekroju poprzecznego próbki. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż polilaktyd w żadnym badanym przypadku nie ulega zniszczeniu wzdłuż linii pęknięcia żywicy polimerowej, co świadczy o niskiej adhezji zastosowanych materiałów.

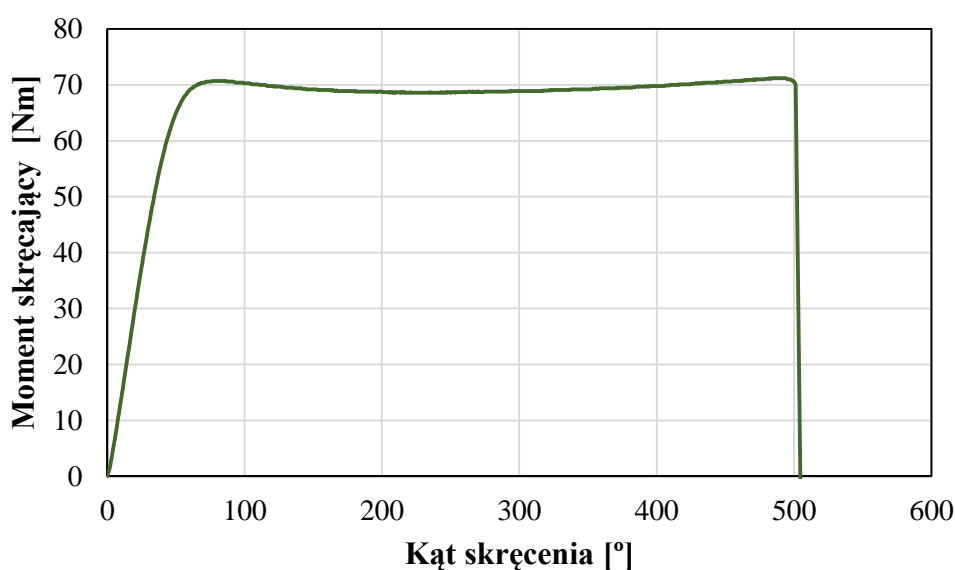
Wyniki badań dla próbek wytworzonych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem z żywic chemoutwardzalnych PR2000, PR700 oraz PR1819 przedstawiono w tabeli 5.21 i na rysunkach 5.87 – 5.89.

Tabela 5.21. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań dla żywic poliuretanowych wytworzonych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem

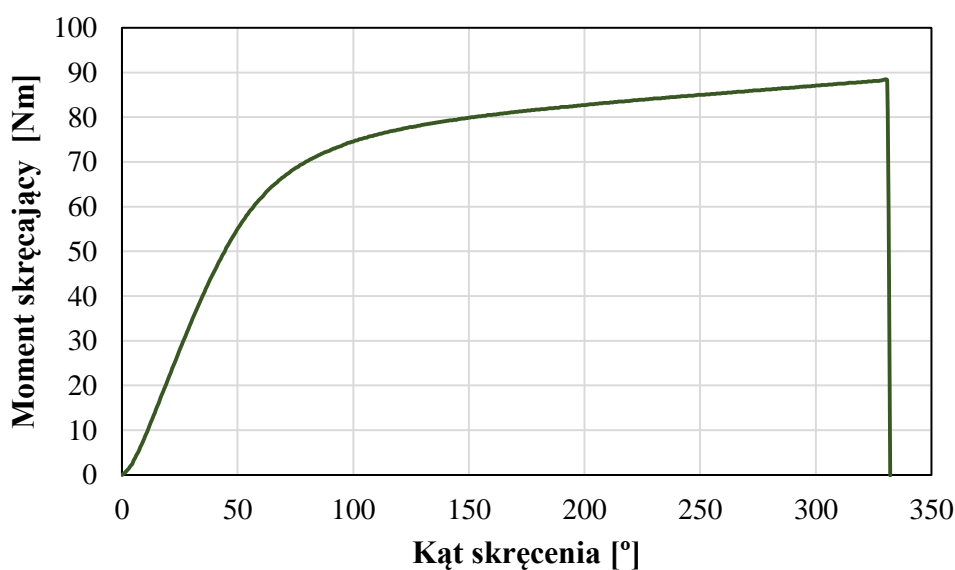
	Moment skręcający [Nm]			Kąt skręcenia [°]		
	PR2000	PR700	PR1819	PR2000	PR700	PR1819
Próbka 1	71,2	88,2	86,6	501,2	330,9	533,0
Próbka 2	70,4	87,4	87,4	497,8	328,5	530,2
Próbka 3	71,4	88,6	85,9	505,6	331,4	538,5
Próbka 4	70,9	87,1	85,7	508,4	327,6	535,4
Próbka 5	71,6	86,9	87,2	499,1	333,7	528,6
Średnia	71,1	87,6	86,6	502,4	330,4	533,1
Odchylenie standardowe	0,4	0,7	0,7	4,0	2,2	3,6
Wsp. zmienności	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7

W ostatnim etapie prowadzonych badań statycznej próbie skręcania zostały poddane próbki wytworzone metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem z żywic poliuretanowych PR2000, PR700 oraz PR1819. Na podstawie otrzymanych przebiegów krzywych skręcania można stwierdzić, że wszystkie trzy żywice posiadają cechy ciał sprężysto-plastycznych. Wysoki sumaryczny kąt skręcenia potwierdza deklarowane przez producenta właściwości wytrzymałościowe żywic zbliżone do kopolimeru ASB oraz polimetakrylanu metylu. W przypadku żywic PR2000 oraz PR1819 można zaobserwować wyraźną granicę plastyczności, wynoszącą odpowiednio: $71,1 \pm 0,4$ Nm w zakresie kąta skręcenia $60 - 80^\circ$ oraz $86,6 \pm 0,7$ Nm w zakresie kąta skręcenia $80 - 100^\circ$.

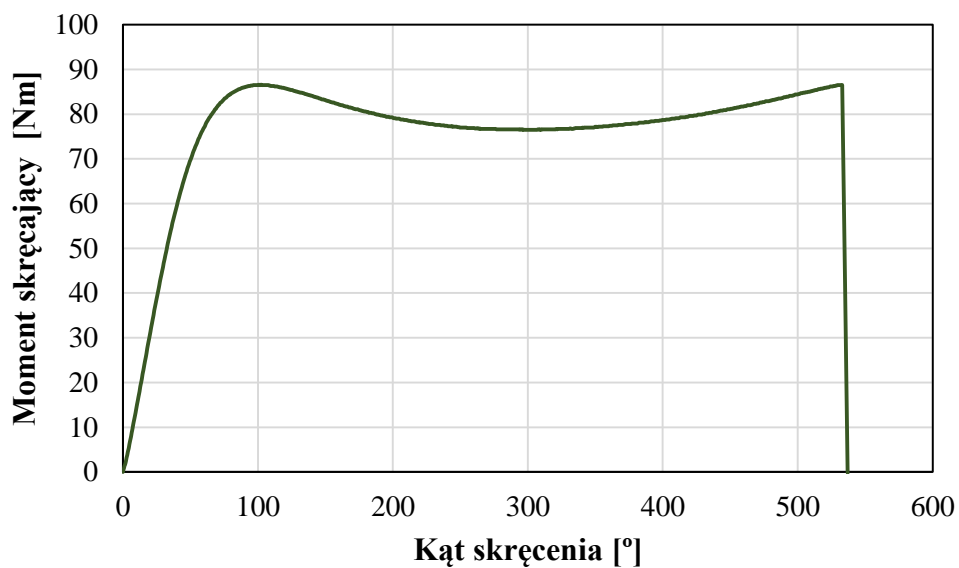
W obu przypadkach po przekroczeniu granicy plastyczności dochodzi do chwilowego spadku wartości maksymalnej momentu skręcającego, a następnie do umocnienia materiału do wartości zbliżonej do trwałego odkształcenia plastycznego. Sumaryczny kąt skręcenia próbek wynosił $502,4 \pm 4,0^\circ$ w przypadku żywicy PR2000 oraz $533,1 \pm 3,6^\circ$ dla żywicy PR1819. Analizując przebieg krzywej skręcenia próbek wypełnionych żywicą PR700 można zaobserwować łagodnie narastające odkształcenie, a po przekroczeniu umownej granicy plastyczności wzrost naprężeń uplastyczniających (umocnienie materiału). Doraźna wytrzymałość na skręcanie odpowiadała obciążeniu wynoszącemu $87,6 \pm 0,7 \text{ Nm}$, przy maksymalnym kącie skręcenia $330,4 \pm 2,2^\circ$.



Rys. 5.87. Wykres statycznej próby skręcenia dla próbki z żywicy poliuretanowej PR2000

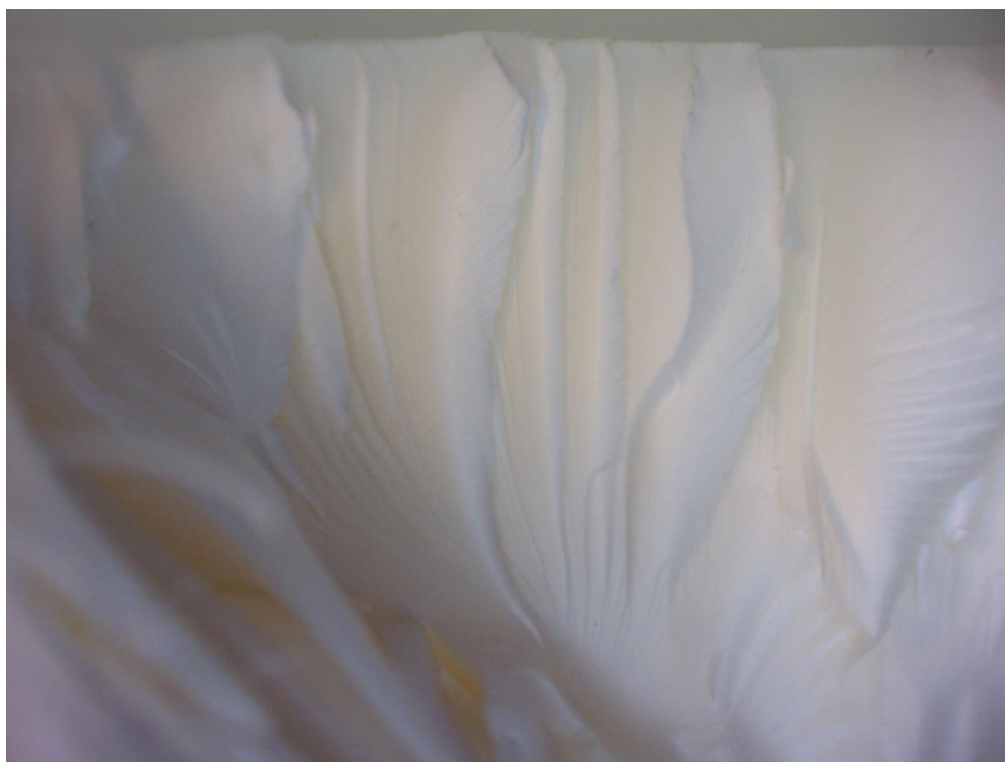


Rys. 5.88. Wykres statycznej próby skręcenia dla próbki z żywicy poliuretanowej PR700

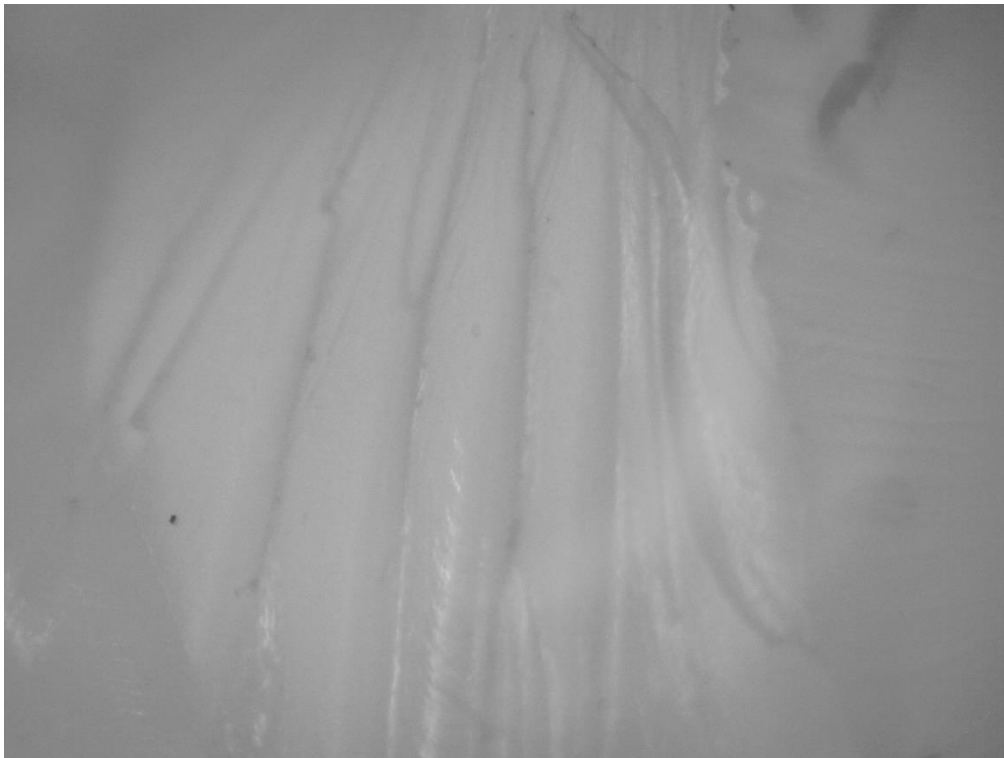


Rys. 5.89. Wykres statycznej próby skręcania dla próbki z żywicy poliuretanowej PR1819

Na rysunkach 5.90 – 5.95 zostały przedstawione wyniki badań morfologii powierzchni dla żywic poliuretanowych wytworzonych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem.



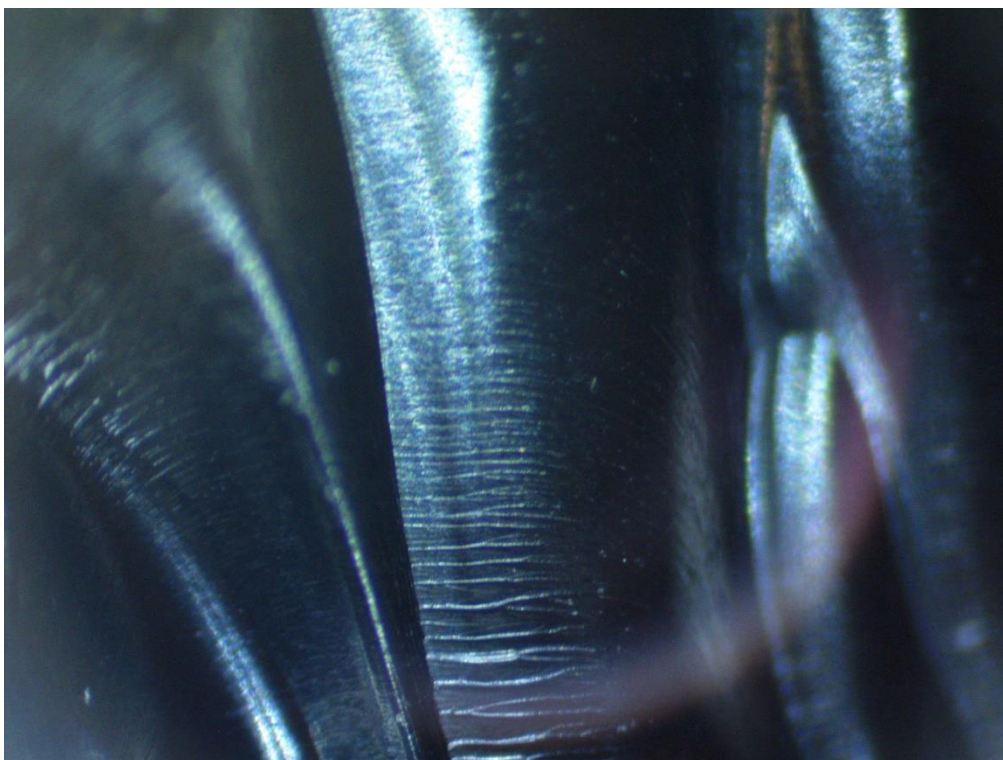
Rys. 5.90. Widok przełomu próbki z żywicy poliuretanowej PR2000 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.91. Widok przelomu próbki z żywicy poliuretanowej PR2000 przy czterdziestokrotnym powiększeniu



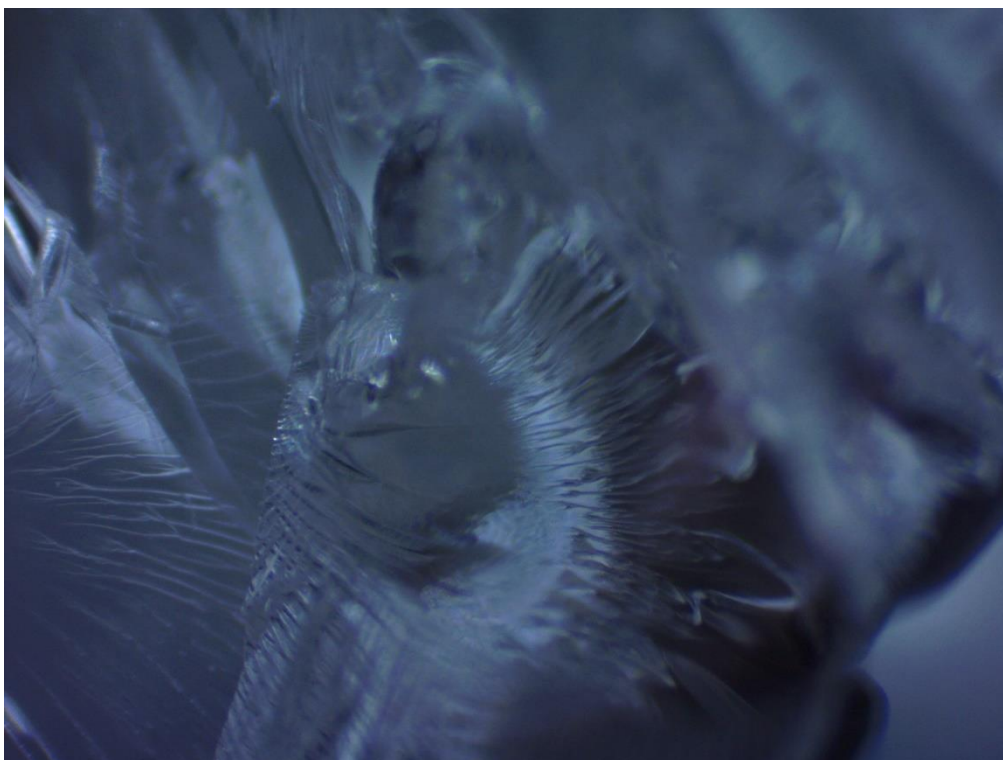
Rys. 5.92. Widok przelomu próbki z żywicy poliuretanowej PR700 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.93. Widok przełomu próbki z żywicy poliuretanowej PR700 przy czterdziestokrotnym powiększeniu



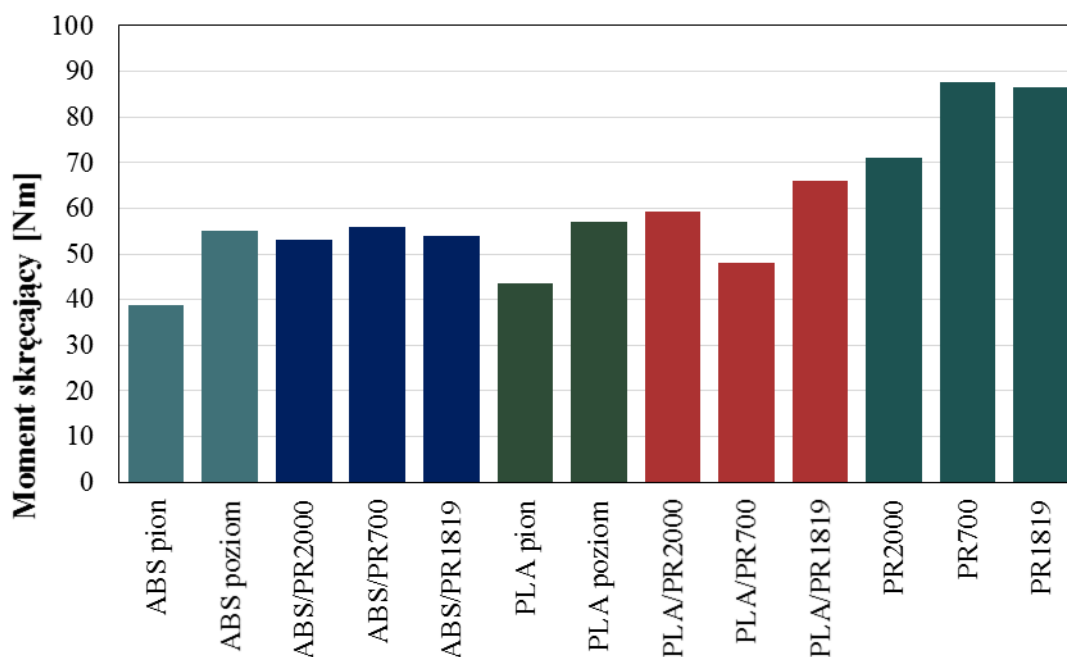
Rys. 5.94. Widok przełomu próbki z żywicy poliuretanowej PR1819 przy dziesięciokrotnym powiększeniu



Rys. 5.95. Widok przełomu próbki z żywicy poliuretanowej PR1819 przy czterdziestokrotnym powiększeniu

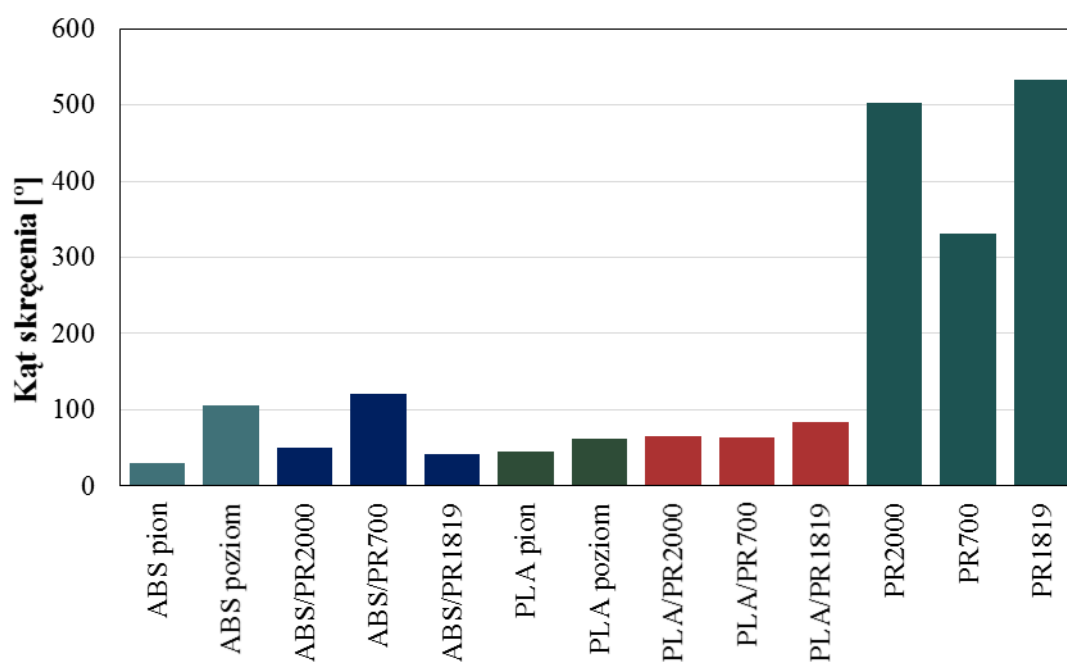
Na podstawie otrzymanych wyników obserwacji przełomów próbek wykonanych z żywic chemoutwardzalnych: PR2000, PR700 oraz PR1819 można stwierdzić jednoznacznie, że we wszystkich przypadkach uzyskano charakterystyczny dla żywic polimerowych kruchy (łupliwy) przełom pozbawiony wyraźnych śladów odkształcenia plastycznego. Interesującym może być fakt, że w przypadku opracowanej technologii łączenia polimerów termoplastycznych z polimerami chemoutwardzalnymi, przełom próbek z kopolimeru ABS oraz polilaktydu wypełnionych żywicą PR2000 był ciągliwy. Natomiast charakter dekohezji pozostałych żywic jest niezmienny niezależnie od zastosowanej technologii wytwarzania.

Na rysunkach 5.96 i 5.97 przedstawiono zestawienia wartości średnich momentu skręcającego oraz kąta skręcenia dla każdego badanego wariantu.



Rys. 5.96. Średnie wartości momentu skręcającego dla każdego badanego wariantu

Wyniki badań wytrzymałości na skręcanie charakteryzują się dobrą powtarzalnością dla wszystkich serii, o czym świadczy wartość współczynnika zmienności nie przekraczająca 5%. Na ich podstawie można potwierdzić tezę zwiększenia wytrzymałości modeli badawczych wytworzonych metodą hybrydową, w stosunku do próbek wykonywanych wyłącznie metodą ekstruzji warstwowej.



Rys. 5.97. Średnie wartości kąta skręcenia dla każdego badanego wariantu

Analizując wyniki próbek wykonanych metodą MEX można zaobserwować wzrost wytrzymałości na skręcanie dla modeli badawczych wytworzonych poziomo względem platformy roboczej urządzenia w stosunku do próbek wykonanych pionowo. W odniesieniu do średnich wartości momentu skręcającego w przypadku kopolimeru ABS był to wzrost o 42%, dla polilaktydu o 31%. Próbki wykonane technologią hybrydową, których cienkościenna forma została wykonana z kopolimeru ABS posiadały zbliżone wartości momentu skręcającego w stosunku do próbek wytworzonych poziomo metodą ekstruzji warstwowej oraz odnotowują wzrost momentu skręcającego o ok. 37 – 44% w odniesieniu do próbek wykonanych w położeniu pionowym. W przypadku cienkościennej formy wykonanej z polilaktydu próbki wypełnione żywicą PR700 posiadały mniejszą wytrzymałości od próbek ułożonych poziomo względem platformy roboczej urządzenia (zbliżoną do próbek w położeniu pionowym). Natomiast wzrost wartości momentu skręcającego modeli badawczych wypełnionych żywicą PR2000 oraz PR1819 w stosunku do próbek ułożonych poziomo wynosił ok. 35 – 52%.

Porównując badania wytrzymałości próbek wykonanych metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem z modelami badawczymi wykonanymi technologią hybrydową można wywnioskować, że próbki wytwarzane technologią łączącą MEX oraz VC charakteryzują się każdorazowo obniżoną wytrzymałością na skręcanie w stosunku do próbek wykonanych z żywic chemoutwardzalnych. W przypadku modeli badawczych, których cienkościenna forma została wykonana z kopolimeru ABS średnie wartości momentu skręcającego stanowią ok. 62 – 75% wartości dla materiału bazowego, natomiast dla polilaktydu jest to ok. 76 – 83% (pomijając próbki wypełnione żywicą PR700).

Warto zaznaczyć różnice pomiędzy próbkami wykonanymi technologią hybrydową oraz metodą odlewania pod obniżonym ciśnieniem. Średnie wartości momentu skręcającego próbek wykonanych technologią hybrydową są zauważalnie, choć niewiele niższe w odniesieniu do materiału bazowego. Parametrem uwidaczniającym różnice jest kąt skręcenia, którego wartość w zależności od zastosowanej żywicy jest od 275% do 1300% większa w stosunku do próbek wykonanych technologią hybrydową. Można zatem wyciągnąć wniosek, że wytwarzanie próbek technologią łączącą MEX oraz VC wpływa na obniżenie zdolności do odkształcenia plastycznego rdzenia próbek wykonanego z żywicy chemoutwardzalnej. Jest to spowodowane adhezją pomiędzy przetwarzanymi materiałami oraz występowaniem karbów w miejscu ich łączenia.

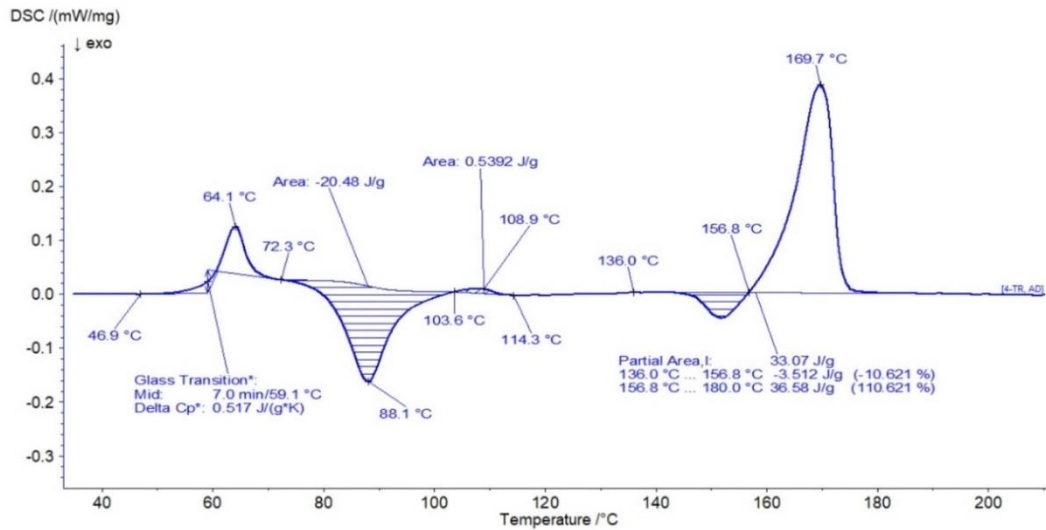
5.6. Skaningowa kalorymetria różnicowa

Materiałami stosowanymi w metodzie ekstruzji warstwowej są polimery, co oznacza, że składają się z wielokrotnie powtórzonych łańcuchów molekularnych. Strukturę molekularną materiałów polimerowych można podzielić na bezpostaciową (amorficzną) oraz semikrystaliczną (częściowo uporządkowaną). W procesie wygrzewania materiałów termoplastycznych molekuly przeorganizowują swoją strukturę do warunków równowagi i zmniejszenia wewnętrznych naprężeń. Oznacza to, że w skutek przeprowadzenia obróbki cieplnej tworzyw polimerowych dochodzi w nich do zwiększenia ilości fazy krystalicznej. W związku z tym przeprowadzono analizę termiczną metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC – ang. Differential Scanning Calorimetry) dla materiałów termoplastycznych, które zostały wygrzane w procesie dotwardzania żywic chemoutwardzalnych podczas wytwarzania próbek technologią hybrydową. Analiza miała na celu sprawdzenie udziału fazy krystalicznej w zależności od przeprowadzonego procesu wygrzewania. Wzrost stopnia krystaliczności powoduje zwiększanie wytrzymałości mechanicznej oraz sprężystości, przy zmniejszaniu odkształcalności tworzywa. W tabeli 5.22 przedstawiono opis badanych materiałów.

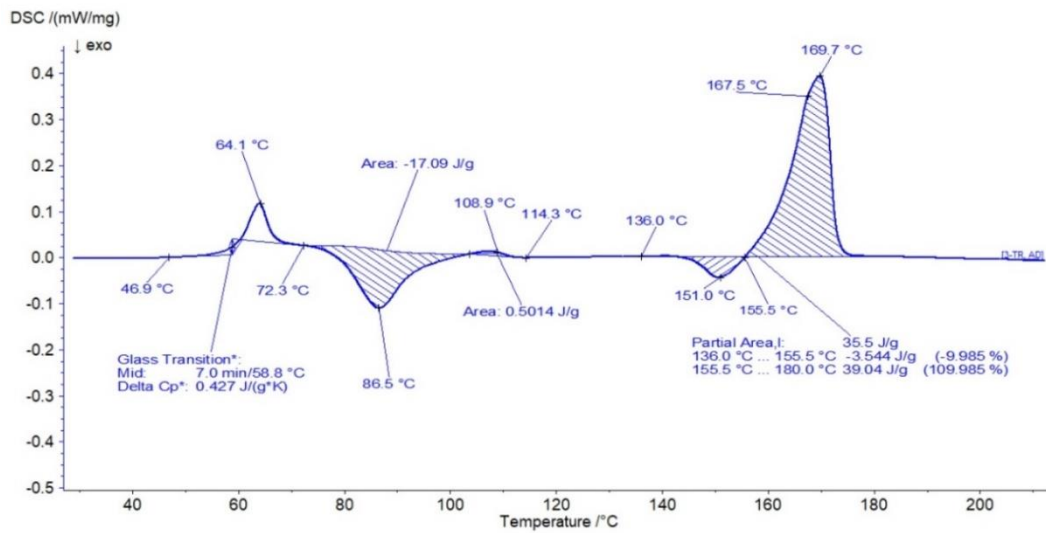
Tabela 5.22. Badane materiały

Symbol		Czas wygrzewania
PLA	ABS	
L1	M1	niewygrzany
L2	M2	60 minut w temperaturze 70 °C
L3	M3	45 minut w temperaturze 70 °C oraz 120 minut w temperaturze 120 °C
L4	M4	180 minut w temperaturze 70 °C oraz 16 godzin w temperaturze 100 °C

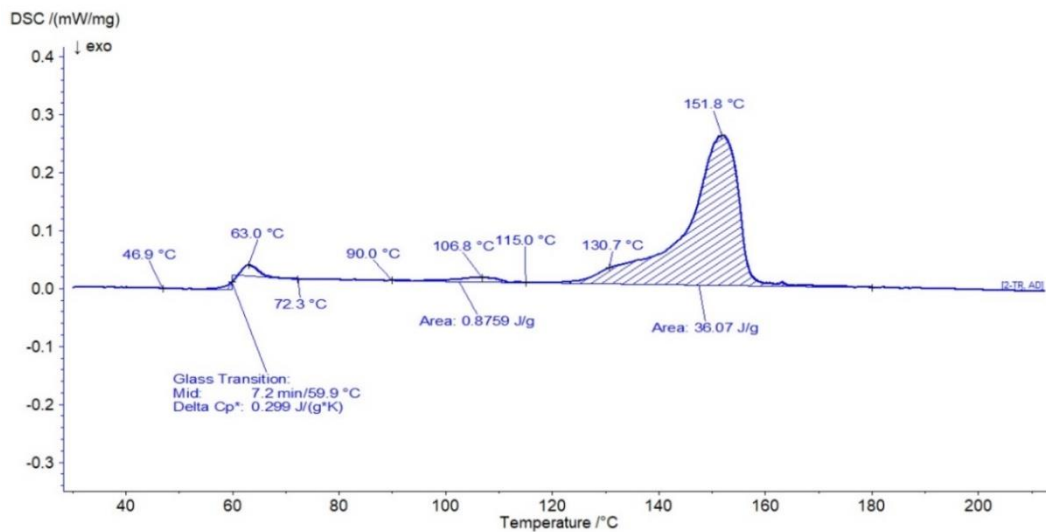
Wyniki analizy termicznej metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej dla poszczególnych próbek zostały przedstawione na rysunkach 5.98 – 5.101.



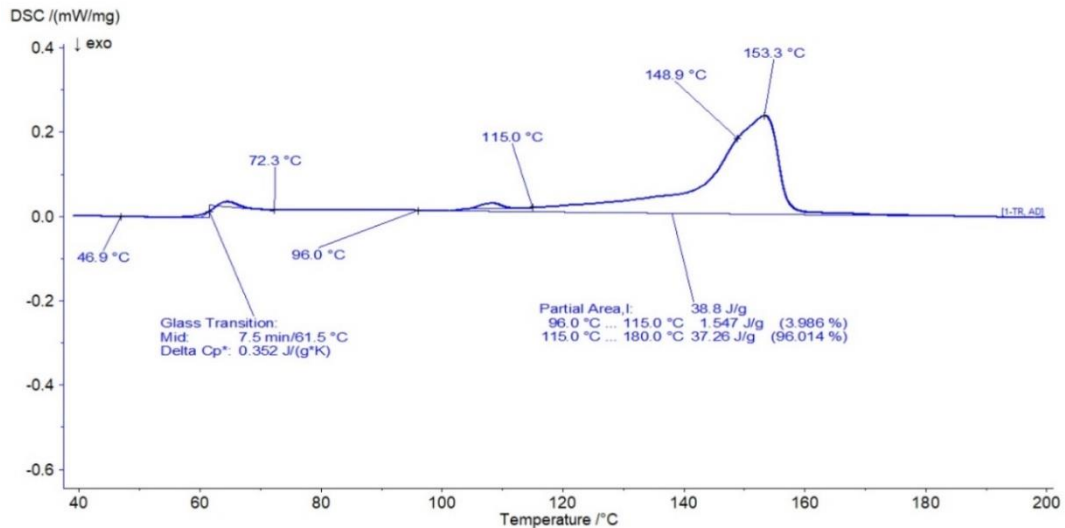
Rys. 5.98. Termogram DSC dla ogrzewania próbki L1



Rys. 5.99. Termogram DSC dla ogrzewania próbki L2



Rys. 5.100. Termogram DSC dla ogrzewania próbki L3



Rys. 5.101. Termogram DSC dla ogrzewania próbki L4

Podczas ogrzewania próbki L1 od temperatury pokojowej pierwsza widoczna anomalia związana jest z przejściem szklistym. Obliczona temperatura przejścia szklistego wynosi 59,1 °C, natomiast Δc_p (zmiana ciepła właściwego podczas przejścia szklistego) wynosi 0,517 J/gK. Między temperaturami 72 °C, a 104 °C występuje egzoenergetyczna anomalia związana z zimną krystalizacją. Oszacowana zmiana entalpi podczas tego przejścia wynosi około 20,5 J/g. Podczas dalszego ogrzewania występuje kolejna anomalia egzoenergetyczna związana z dokrystalizowaniem polimeru. Zmiana entalpi w tym procesie została oszacowana na około 3,5 J/g. Ostatnia widoczna anomalia to wysokoenergetyczny endotermiczny pik związany z topnieniem fazy krystalicznej w próbce. Temperatura maksimum anomalii wynosi około 170 °C, a oszacowana zmiana entalpi to około 36,6 J/g.

Termogram DSC dla próbki L2 przedstawia te same anomalie, które widoczne były na wykresie dla próbki L1. Natomiast różnica jest widoczna głównie w wartości efektów energetycznych poszczególnych przejść. Temperatura przejścia szklistego podobnie jak dla czystej próbki wynosi 59 °C, a Δc_p 0,43 J/gK. Powierzchnia anomalii związanej z zimną krystalizacją jest nieco mniejsza niż w przypadku próbki L1, a związana z nią zmiana entalpi została oszacowana na około 17,1 J/g. Wartość zmiany entalpi podczas krystalizacji bezpośrednio przed topnieniem podobnie jak w przypadku poprzedniej próbki wynosi około 3,5 J/g, a zmiana entalpi podczas topnienia jest nieco wyższa i wynosi około 39 J/g.

Na termogramie próbki L3 nie występują anomalie egzoenergetyczne związane z krystalizacją. Powodem tego jest wysoka zawartość frakcji krystalicznej próbki uzyskanej w skutek obróbki cieplnej. Udział procentowy frakcji krystalicznej świadczy o mniejszym udziale fazy amorficznej, co potwierdza wartość Δc_p równa 0,3 J/gK. Temperatura przejścia szklistego wynosi około 60 °C. Jest to wartość znacznie mniejsza niż w przypadku dwóch pierwszych badanych próbek. Zmiana entalpi podczas topnienia wynosi około 36,1 J/g.

Wykres dla próbki L4 wygląda analogicznie jak dla próbki L3 (również nie obserwujemy efektów związanych z krystalizacją). Temperatura przejścia szklistego jest nieco wyższa niż dla pozostałych próbek i wynosi około 61,5 °C, a Δc_p około 0,35 J/gK co jest porównywalne z wartością dla próbki L3. Zmiana entalpi podczas topnienia wynosi około 37,3 J/g.

Otrzymane wyniki potwierdzają tezę, że obróbka cieplna powoduje krystalizację polimeru, o czym świadczą zarówno wartości Δc_p jak i zmiany entalpi podczas krystalizacji. Jednogodzinne wygrzewanie próbki powoduje niewielki wzrost udziału fazy krystalicznej w polimerze, co potwierdzają niewielkie różnice w wartościach Δc_p oraz zmianie entalpi podczas krystalizacji w porównaniu do próbki z niewygrzanego polilaktydu. Brak efektów egzoenergetycznych podczas ogrzewania próbek L3 i L4 oraz ich podobne wartości Δc_p w przejściu szklistym świadczą o tym, że 19 godzinne wygrzewanie nie powoduje wzrostu udziału fazy krystalicznej w porównaniu do 3 godzinne wygrzewania. W tabeli 5.23 przedstawiono wartości poszczególnych przejść oraz stopień krystalizacji tworzywa w zależności od procesu wygrzewania.

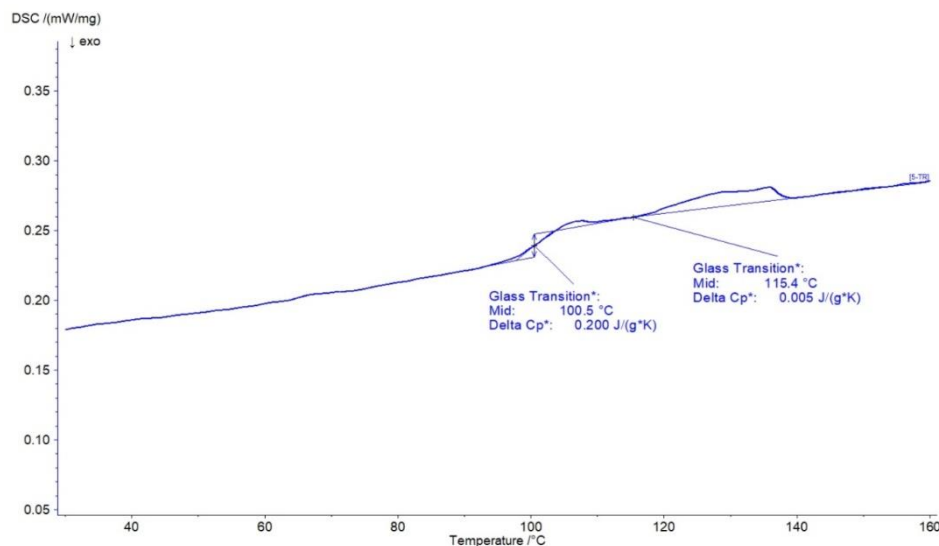
Tabela 5.23. Zestawienie wyników badań DSC

	T_g [°C]	Δc_p [J/gK]	ΔH_1 [J/g]	ΔH_2 [J/g]	ΔH_t [J/g]	%C _r [%]
L1	59,1	0,52	-20,5	-3,5	36,6	11,44
L2	58,8	0,43	-17,1	-3,5	39,0	16,73
L3	59,9	0,3	-	-	36,1	32,8
L4	61,5	0,35	-	-	37,3	33,87

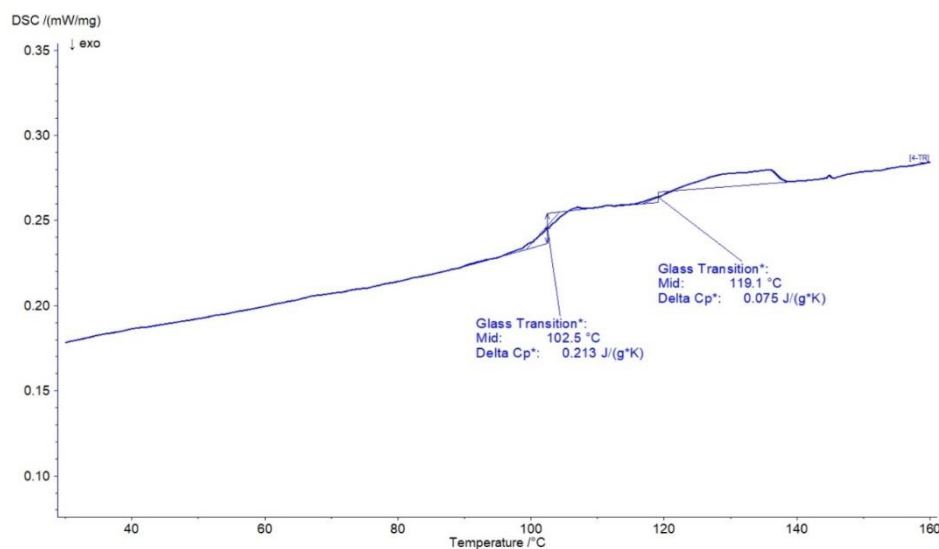
gdzie: ΔH_1 – zmiana entalpi podczas zimnej krystalizacji w niższej temperaturze, ΔH_2 – zmiana entalpi podczas zimnej krystalizacji w wyższej temperaturze, ΔH_t – zmiana entalpi podczas topnienia, %C_r – stopień krystaliczności w procentach.

Następnym materiałem poddanym badaniom analizy termicznej jest kopolimer ABS, który jest polimerem amorficznym. W tworzywach o bezpostaciowej strukturze

molekularnej nie występuje faza krystaliczna, co potwierdzają przeprowadzone badania. Dla każdej z czterech próbek wykonano pomiar DSC podczas ogrzewania od temperatury pokojowej do 160 °C. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 5.102 – 5.105.



Rys. 5.102. Termogram DSC dla ogrzewania próbki M1

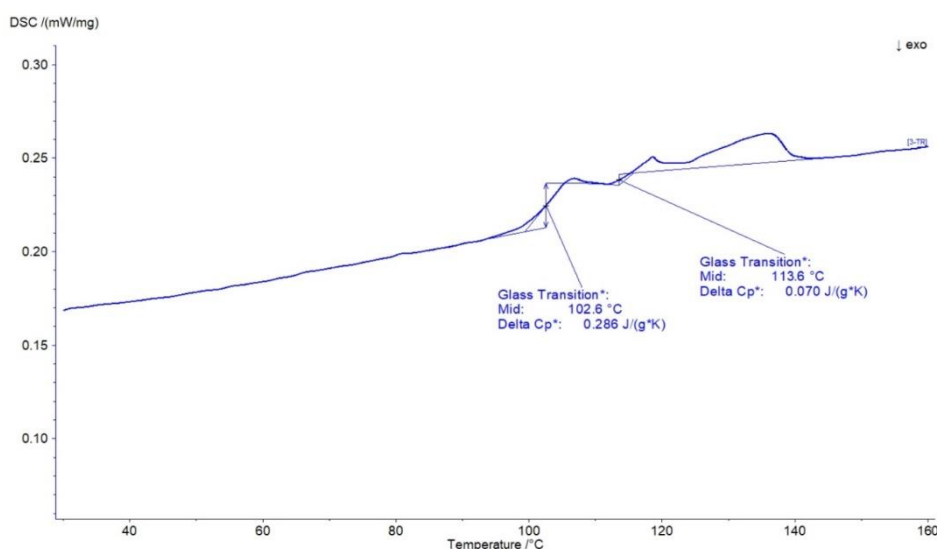


Rys. 5.103. Termogram DSC dla ogrzewania próbki M2

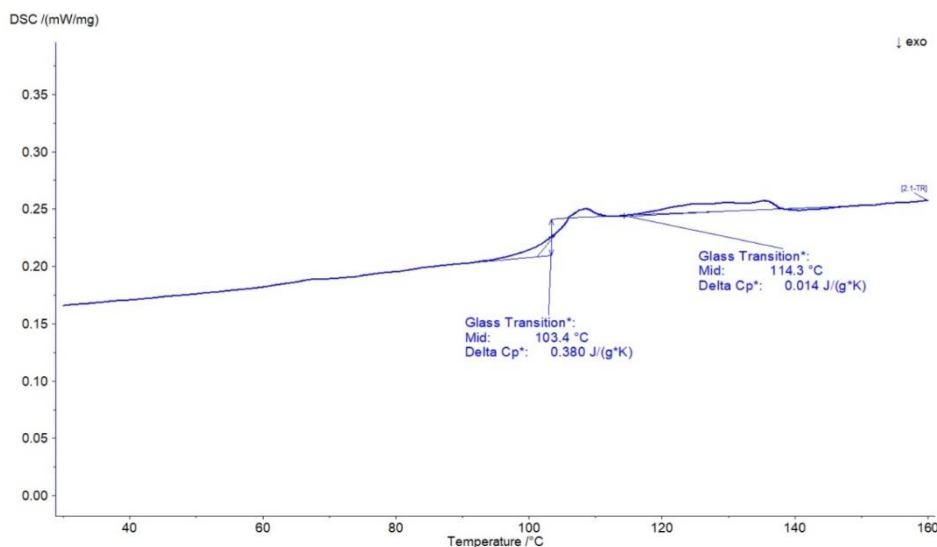
Zgodnie z danymi literaturowymi w wymienionym zakresie temperatury powinny być rejestrowane dwa przejścia szkliste. Pierwsze z nich występuje nieco powyżej temperatury 100 °C i związane jest z komponentem polistyrenowym. Drugie przejście szkliste obserwowane w temperaturze kilkanaście stopni wyższej i przypisywane jest do grupy akrylonitrylowej.

Wzrost czasu wygrzewania próbki powoduje regularny wzrost temperatury przejścia szklistego związanego z grupą polistyrenową, od 100,5 °C dla próbki niewygrzewanej

do 103,4 °C dla próbki najdłużej wygrzewanej. Regularnie wraz ze wzrostem czasu wygrzewania wzrasta również wartość parametru Δc_p dla tego przejścia, od wartości 0,200 J/gK dla próbki niewygrzewanej do 0,380 J/gK dla próbki najdłużej wygrzewanej. Przejście szkliste związane z grupą akrylonitrylową nałożone jest na termogramach na endotermiczną anomalię, co znacznie utrudnia obliczenie wartości charakteryzujących je parametrów. Oszacowano, że temperatura tego przejścia zawiera się w granicach od 113,6 do 119,1 °C, zaś Δc_p przyjmuje wartości od 0,005 do 0,075 J/gK, lecz nie stwierdzono regularności w wartościach tych parametrów w zależności od czasu wygrzewania próbki. Wartości te są obarczone dużą niepewnością pomiarową.



Rys. 5.104. Termogram DSC dla ogrzewania próbki M3



Rys. 5.106. Termogram DSC dla ogrzewania próbki M4

6. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz ich analiza pozwalają na stwierdzenie, że istnieje możliwość zwiększenia wytrzymałości mechanicznej elementów maszyn pracujących w zakresie obciążeń złożonych poprzez zastosowanie opracowanej technologii hybrydowej łączącej metodę ekstruzji warstwowej z technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem. Na podstawie przeprowadzonych badań własnych można uznać, że założone cele pracy zostały osiągnięte, a sformułowana teza pracy została zweryfikowana. Podczas realizacji niniejszej pracy sformułowano istotne wnioski ogólne, dotyczące przyrostowego wytwarzania elementów metodą ekstruzji warstwowej oraz opracowaną autorską technologią hybrydową, będące podsumowaniem rozprawy:

1. Dokładność geometryczna części wytwarzanych metodą ekstruzji warstwowej w dużej mierze zależy od geometrii oraz ułożenia modelu w przestrzeni roboczej urządzenia. Dla części obrotowych dokładność geometryczna jest najwyższa w kierunkach zbliżonych do budowy modelu. Istotnym czynnikiem wpływającym na otrzymaną geometrię końcową jest także stosowanie struktur podpierających, które w miejscu styku z drukowanym elementem zniekształcają jego powierzchnię. Jest to szczególnie widoczne w przypadku elementów obrotowych wykonywanych poziomo względem platformy roboczej urządzenia. Wpływ na dokładność modelu końcowego ma również zastosowane tworzywo termoplastyczne.
2. Struktura geometryczna powierzchni próbek, tak jak w przypadku dokładności geometrycznej, zależy od ułożenia modelu w przestrzeni roboczej urządzenia oraz zastosowania struktur podpierających. W przypadku próbek wytwarzanych poziomo względem platformy roboczej urządzenia można zaobserwować wzrost wybranych parametrów chropowatości względem próbek ułożonych pionowo.
3. Próbki do badań wytrzymałości na skręcanie wykonane w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia, jak wynika z wniosków w punkcie 1 i 2, charakteryzują się najwyższą dokładnością wymiarowo kształtową, natomiast wytrzymałość na skręcanie tych próbek jest najniższa.
4. Kierunek wytwarzania modeli metodą ekstruzji warstwowej ma znaczny wpływ na ich wytrzymałość na rozciąganie, zginanie i skręcanie. Wytrzymałość elementów obniża się w kierunkach obciążeń zbliżonych do kierunku budowy

modelu. Najmniejszą wytrzymałość posiadały próbki wytwarzane w położeniu pionowym względem platformy roboczej urządzenia.

5. Zastosowanie hybrydowej technologii polegającej na wypełnieniu cienkościennej formy polimerem chemoutwardzalnym prowadzi do uzyskania założonej wytrzymałości wytwarzanych części, przy zachowaniu dokładności wymiarowo-kształtowej.
6. Istotny wpływ na wytrzymałość elementów wykonywanych technologią hybrydową ma adhezja pomiędzy polimerem termoplastycznym, a żywicą chemoutwardzalną. Niska adhezja powoduje pogorszenie właściwości wytrzymałościowych próbek, co jest widoczne w przypadku połączenia żywicy PR700 z polilaktydem.
7. Najkorzystniejsze rezultaty płynące z zastosowania technologii hybrydowej w stosunku do próbek wykonanych metodą ekstruzji warstwowej oraz technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem zostały uzyskane w próbie trzypunktowego zginania.
8. Zastosowanie technologii hybrydowej do wytwarzania elementów układów napędowych maszyn z tworzyw polimerowych pozwala na wytwarzanie w pełni funkcjonalnych prototypów oraz części maszyn.
9. Wytwarzanie elementów obrotowych technologią hybrydową zmniejsza zdolność do odkształcenia plastycznego rdzenia próbek, ze względu na adhezję pomiędzy materiałami oraz występowanie karbu wynikające z realizacji procesu budowy modelu metodą ekstruzji warstwowej.
10. Dotwardzanie żywicy chemoutwardzalnej próbek wykonanych technologią hybrydową prowadzi do zwiększenia ilości fazy krystalicznej polimerów o strukturze częściowo uporządkowanej (semikrystalicznej).

LITERATURA

- [1] Abbott A., Tandon G., Bradford R., Koerner H., Baur J.: Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. *Addit. Manuf.* 2018, 19, 29–38.
- [2] Acquesta A., Monetta T.: As-Built EBM and DMLS Ti-6Al-4V Parts: Topography–Corrosion Resistance Relationship in a Simulated Body Fluid. *Metals* 2020, 10, 1015.
- [3] Al Nashar M., Sutradhar A.: Design of Hierarchical Architected Lattices for Enhanced Energy Absorption. *Materials* 2021, 14, 5384.
- [4] Alafaghani A., Qattawi A.: Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method, *J. Manuf. Process.* 2018, 36, 164–174.
- [5] Algarni M.: The Influence of Raster Angle and Moisture Content on the Mechanical Properties of PLA Parts Produced by Fused Deposition Modeling. *Polymers* 2021, 13, 237.
- [6] Aliheidari N., Christ J., Tripuraneni R., Nadimpalli S., Ameli A.: Interlayer adhesion and fracture resistance of polymers printed through melt extrusion additive manufacturing process. *Mater. Des.* 2018, 156, 351–361.
- [7] Ambrosio D., Gabrion X., Malécot P., Amiot F., Thibaud S.: Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of projection stereolithography–manufactured specimens. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 106, 265–277.
- [8] Aznarte E., Ayranci C., Qureshi A.: Digital light processing (DLP): Anisotropic tensile considerations. In *Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference*, Austin, TX, USA, 7–9 August 2017, pp. 10–203.
- [9] Baba M.N.: Flatwise to Upright Build Orientations under Three-Point Bending Test of Nylon 12 (PA12) Additively Manufactured by SLS. *Polymers* 2022, 14, 1026.
- [10] Badiru A. B., Valencia V. V., Liu D.: *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry*. Boca Raton. 2017.
- [11] Baker A.M., Mccoy J., Majumdar B.S., Rumley-Ouellette B., Wahry J., Marchi A.N., Bernardin J.D., Spornjak D.: Measurement and modelling of thermal and mechanical anisotropy of parts additively manufactured using fused deposition modelling (FDM). In *Proceedings of the 11th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, USA, 12–14 September 2017.
- [12] Barrios J.M., Romero P.E.: Decision Tree Methods for Predicting Surface Roughness in Fused Deposition Modeling Parts. *Materials* 2019, 12, 2574.
- [13] Basile V., Modica F., Fontana G., Ruggeri S., Fassi I.: Improvements in accuracy of fused deposition modeling via integration of low-cost on-board vision systems. *J. Micro Nano-Manuf.* 2020, 8.
- [14] Basurto-Vázquez O., Sánchez-Rodríguez E.P., McShane G.J., Medina D.I.: Load Distribution on PET-G 3D Prints of Honeycomb Cellular Structures under Compression Load. *Polymers* 2021, 13, 1983.

- [15] Beitz S., Uerlich R., Bokelmann T., Diener A., Vietor T., Kwade A.: Influence of powder deposition on powder bed and specimen properties. *Materials* 2019, 12, 297.
- [16] Bourell D.L.: Perspectives on Additive Manufacturing. *Annu. Rev. Mater. Sci.* 2016, 46, 1–18.
- [17] Böckin D., Tillman A.-M.: Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry. *J. Clean. Prod.* 2019, 226, 977–987.
- [18] Brancewicz-Steinmetz E., Sawicki J., Byczkowska P.: The Influence of 3D Printing Parameters on Adhesion between Polylactic Acid (PLA) and Thermoplastic Polyurethane (TPU). *Materials* 2021, 14, 6464.
- [19] Budiyanoro C., Rochardjo H.S.B., Nugroho G.: Overmolding of Hybrid Long and Short Carbon Fiber Polypropylene Composite: Optimizing Processing Parameters. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 132.
- [20] Budzik G.: Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- [21] Budzik G.: Synteza i analiza metod projektowania i wytwarzania elementów o skomplikowanych kształtach na przykładzie wirników turbosprężarek, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
- [22] Budzik G. Burek J. Bazan A. Turek P.: Analysis of the Accuracy of Reconstructed Two Teeth Models Manufactured Using the 3DP and FDM, *Technologies* 2016, STROJNISKI VESTNIK-JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, t.62, z.1, s.11-20.
- [23] Budzik G. Dziubek T. Sobolewski B.: Ocena dokładności geometrii powierzchni bocznej zębów koła zębatego wykonanego addytywną metodą SLS, 2017, PRZEGLĄD MECHANICZNY, z.10, s.50-53.
- [24] Budzik G., Magniszewski M., Przeszłowski Ł., Oleksy M., Oliwa R., Bernaczek J.: Torsional strength testing of machine elements manufacture by incremental technology from polymeric materials. *Polimery* 2018, 63(11-12), 830-832.
- [25] Buj-Corral I., Domínguez-Fernández A., Durán-Llucià R.: Influence of Print Orientation on Surface Roughness in Fused Deposition Modeling (FDM) Processes. *Materials* 2019, 12, 3834.
- [26] Chacón J., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J.: Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater. Des.* 2017, 124, 143–157.
- [27] Chalgham A., Ehrmann A., Wickenkamp I.: Mechanical Properties of FDM Printed PLA Parts before and after Thermal Treatment. *Polymers* 2021, 13, 1239.
- [28] Chaudhry M.S., Czekanski A.: Evaluating FDM Process Parameter Sensitive Mechanical Performance of Elastomers at Various Strain Rates of Loading. *Materials* 2020, 13, 3202.
- [29] Chiulan I., Voicu Ş.I., Batalu D.: The Use of Graphene and Its Derivatives for the Development of Polymer Matrix Composites by Stereolithographic 3D Printing. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3521.
- [30] Christ J.F., Aliheidari N., Ameli A., Pötschke P.: 3D printed highly elastic strain sensors of multiwalled carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nanocomposites. *Mater. Des.* 2017, 131, 394–401.

- [31] Chróścielewski J., Rucka M., Witkowski W.: *Metody doświadczalne w wytrzymałości materiałów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.
- [32] Chu C., Graf G., Rosen D.W.: Design for additive manufacturing of cellular structures. *Comput. Aided Des. Appl.* 2008, 5, 686–696.
- [33] Dave H.K., Prajapati A.R., Rajpurohit S.R., Patadiya N.H., Raval H.K.: Open hole tensile testing of 3D printed parts using in-house fabricated PLA filament. *Rapid Prototyp. J.* 2020, 26, 21–31.
- [34] Dey A., Yodo N.: A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, 64.
- [35] Dębski M., Magniszewski M., Bernaczek J., Przeszlowski Ł., Gontarz M., Kielbicki M.: Influence of torsion on the structure of machine elements made of polymeric materials by 3D printing. *Polimery* 2021, 66(5), 298-304.
- [36] Dizon J.R.C., Espera A.H., Chen Q., Advincula R.C.: Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Addit. Manuf.* 2018, 20, 44–67.
- [37] Domingo-Espin M., Travieso-Rodríguez J.A., Jerez-Mesa R., Lluma-Fuentes J.: Fatigue Performance of ABS Specimens Obtained by Fused Filament Fabrication. *Materials* 2018, 11, 2521.
- [38] Duret F., Preston J.D.: CAD/CAM imaging in dentistry. *Curr. Opin. Dent.* 1991, 1, 150–154.
- [39] Dziubek T.: Application of coordination measuring methods for assessing the performance properties of polymer gears. *Polimery* 2018, 63(1), 49-52.
- [40] Ehrmann G., Brockhagen B., Ehrmann A.: Shape-Memory Properties of 3D Printed Cubes from Diverse PLA Materials with Different Post-Treatments. *Technologies* 2021, 9, 71.
- [41] Elkholly A., Rouby M., Kempers R.: Characterization of the anisotropic thermal conductivity of additively manufactured components by fused filament fabrication. *Prog. Addit. Manuf.* 2019, 4, 497–515.
- [42] Emami M.M., Barazandeh F., Yaghmaie F.: Scanning-projection based stereolithography: method and structure. *Sens Actuators A Phys*, 2014, pp. 116-124
- [43] Enemuoh E.U., Duginski S., Feyen C., Menta V.G.: Effect of Process Parameters on Energy Consumption, Physical, and Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling. *Polymers* 2021, 13, 2406.
- [44] Ferretti P., Leon-Cardenas C., Santi G.M., Sali M., Ciotti E., Frizziero L., Donnici G., Liverani A.: Relationship between FDM 3D Printing Parameters Study: Parameter Optimization for Lower Defects. *Polymers* 2021, 13, 2190.
- [45] Frankiewicz M., Kobiela K., Kurzynowski T.: Possibility for Replicating Mechanoscopic Surface Marks in the Hybrid Vacuum-Pressure Casting Process. *Polymers* 2021, 13, 874.
- [46] Fu J., Li J., Chen C., Rui R.: DEM-FDM Coupled Numerical Study on the Reinforcement of Biaxial and Triaxial Geogrid Using Pullout Test. *Appl. Sci.* 2021, 11, 9001.
- [47] García-Domínguez A., Claver J., Camacho A.M., Sebastián M.A.: Considerations on the Applicability of Test Methods for Mechanical Characterization of Materials Manufactured by FDM. *Materials* 2020, 13, 28.

- [48] Gebisa A.W., Lemu H.G.: Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment. *Materials* 2018, 11, 500.
- [49] Gnanasekaran K., Heijmans T., van Bennekom S., Woldhuis H., Wijnia S., deWith G., Friedrich H.: 3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling. *Appl. Mater. Today* 2017, 9, 21–28.
- [50] González-Henríquez C.M., Sarabia-Vallejos M.A., Rodríguez-Hernández J.: Polymers for additive manufacturing and 4Dprinting: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Prog. Polym. Sci.* 2019, 94, 57–116.
- [51] Guo C., Liu X., Liu G.: Surface Finishing of FDM-Fabricated Amorphous Polyetheretherketone and Its Carbon-Fiber-Reinforced Composite by Dry Milling. *Polymers* 2021, 13, 2175.
- [52] Guzanová A., Draganovská D., Ižaríková G., Živčák J., Hudák R., Brezinová J., Moro R.: The Effect of Position of Materials on a Build Platform on the Hardness, Roughness, and Corrosion Resistance of Ti6Al4V Produced by DMLS Technology. *Metals* 2019, 9, 1055.
- [53] Hassan M.S., Billah K.M.M., Hall S.E., Sepulveda S., Regis J.E., Marquez C., Cordova S., Whitaker J., Robison T., Keating J., Shafirovich E., Lin Y.: Selective Laser Sintering of High-Temperature Thermoset Polymer. *J. Compos. Sci.* 2022, 6, 41.
- [54] He F., Khan M.: Effects of Printing Parameters on the Fatigue Behaviour of 3D-Printed ABS under Dynamic Thermo-Mechanical Loads. *Polymers* 2021, 13, 2362.
- [55] Hsueh M.-H., Lai C.-J., Chung C.-F., Wang S.-H., Huang W.-C., Pan C.-Y., Zeng Y.-S., Hsieh C.-H.: Effect of Printing Parameters on the Tensile Properties of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Based on Fused Deposition Modeling. *Polymers* 2021, 13, 2387.
- [56] Hull C.W.: Apparatus for Production Of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. U.S. Patent Application No. 5556590A, 11 September 1996.
- [57] Hwangbo N.-K., Nam N.-E., Choi J.-H., Kim J.-E.: Effects of the Washing Time and Washing Solution on the Biocompatibility and Mechanical Properties of 3D Printed Dental Resin Materials. *Polymers* 2021, 13, 4410.
- [58] Jain P.K., Pandey P.M., Rao P.V.M.: Experimental investigations for improving part strength in selective laser sintering. *Virtual Phys. Prototyp.* 2008, 3, 177–188.
- [59] Jeong E., Kim Y., Hong S., Yoon K., Lee S.: Innovative Injection Molding Process for the Fabrication of Woven Fabric Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers* 2022, 14, 1577.
- [60] Joniak S.: *Badania eksperymentalne w wytrzymałości materiałów*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [61] Kaczmar J.W., Wróblewski R., Nakinieczny L., Iwko J.: Wytwarzanie i właściwości elementów hybrydowych typu metal–tworzywo polimerowe. *Polimery* 2008, 57(7-8).
- [62] Kaczmarska B., Michta D.: Wielomateriałowe elementy wytwarzane w technice 3D, w: *Techniczne wyzwania rozwoju społeczno-gospodarczego kraju i regionów*. Politechnika Świętokrzyska. Kielce 2016, Nr M79, s. 32-41.

- [63] Kafle A., Luis E., Silwal R., Pan H.M., Shrestha P.L., Bastola A.K.: 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). *Polymers* 2021, 13, 3101.
- [64] Kim G.-T., Go H.-B., Yu J.-H., Yang S.-Y., Kim K.-M., Choi S.-H., Kwon J.-S.: Cytotoxicity, Colour Stability and Dimensional Accuracy of 3D Printing Resin with Three Different Photoinitiators. *Polymers* 2022, 14, 979.
- [65] Kishore V., Ajinjeru C., Nycz A., Post B., Lindahl J., Kunc V., Duty C.: Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. *Addit. Manuf.* 2017, 14, 7–12.
- [66] Kita J.: *Praktyczny kurs druku 3D*, Magazyn Młody Technik, Warszawa 2015.
- [67] Kordowska M., Musiał W., Stefanowicz K.: Wykorzystanie systemów rapid prototyping do modelowania części samochodowych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*. Instytut Naukowo-Wydawniczy "SPATIUM" 2014, 158-162.
- [68] Kossakowski P.: *Materiały pomocnicze do laboratorium wytrzymałości materiałów*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008.
- [69] Kotlinski J.: Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials. *Rapid Prototyp. J.* 2014, 20, 499–510.
- [70] Kovan V., Altan G., Topal E.S.: Effect of layer thickness and print orientation on strength of 3D printed and adhesively bonded single lap joints. *J. Mech. Sci. Technol.* 2017, 31, 2197–2201.
- [71] Kulinowski P., Malczewski P., Łaszcz M., Baran E., Milanowski B., Kuprianowicz M., Dorożyński P.: Development of Composite, Reinforced, Highly Drug-Loaded Pharmaceutical Printlets Manufactured by Selective Laser Sintering—In Search of Relevant Excipients for Pharmaceutical 3D Printing. *Materials* 2022, 15, 2142.
- [72] Kuo C.C., Chen W.-H., Lin Y.-X., Gao Q., Gian S.-J., Xiao C.-X.: Effects of different fillers on the silicone rubber mold with conformal cooling channels. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 108, 1509–1525.
- [73] Kuo C.C., Li D.-Y., Lin Z.-C., Kang Z.-F.: Characterizations of Polymer Gears Fabricated by Differential Pressure Vacuum Casting and Fused Deposition Modeling. *Polymers* 2021, 13, 4126.
- [74] Kuo C.C., Qiu W.K.: Effect of Differential Pressure on the Transcription Rate of Micro-Featured Components. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 104, 1229–1237.
- [75] Kuo C.C., Qiu, W.K., Liu H.A., Chang C.M.: Filling Mechanism for Prototype Parts Produced by Vacuum Differential Pressure Casting Technology. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, 105, 1469–1481.
- [76] Kuo C.C., Wu M.-X.: Evaluation of service life of silicone rubber molds using vacuum casting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 90, 3775–3781.
- [77] Lalegani Dezaki M., Ariffin M.K.A.M., Serjouei A., Zolfagharian A., Hatami S., Bodaghi M.: Influence of Infill Patterns Generated by CAD and FDM 3D Printer on Surface Roughness and Tensile Strength Properties. *Appl. Sci.* 2021, 11, 7272.
- [78] Lalegani Dezaki M., Mohd Ariffin M.K.A., Ismail M.I.S.: Effects of CNC Machining on Surface Roughness in Fused Deposition Modelling (FDM) Products. *Materials* 2020, 13, 2608.
- [79] Lalegani Dezaki M., Mohd Ariffin M.K.A.: The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process. *Polymers* 2020, 12, 2792.

- [80] Le T.-H., Le V.-S., Dang Q.-K., Nguyen M.-T., Le T.-K., Bui N.-T.: Microstructure Evaluation and Thermal–Mechanical Properties of ABS Matrix Composite Filament Reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes by a Single Screw Extruder for FDM 3D Printing. *Appl. Sci.* 2021, 11, 8798.
- [81] Leal R., Barreiros F.M., Alves L., Romeiro F., Vasco J.C., Santos M., Marto C.: Additive manufacturing tooling for the automotive industry. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 92, 1671–1676.
- [82] Li Y., Lou Y.: Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling. *Polymers* 2020, 12, 2497.
- [83] Li Q., Zhao W., Li Y., Yang W., Wang G.: Flexural Properties and Fracture Behavior of CF/PEEK in Orthogonal Building Orientation by FDM: Microstructure and Mechanism. *Polymers* 2019, 11, 656.
- [84] Lim T., Cheng H., Song W., Lee J., Kim S., Jung W.: Simulated and Experimental Investigation of Mechanical Properties for Improving Isotropic Fracture Strength of 3D-Printed Capsules. *Materials* 2021, 14, 4677.
- [85] Lluçh-Cerezo J., Benavente R., Meseguer M.D., García-Manrique J.A.: Effect of a Powder Mould in the Post-Process Thermal Treatment of ABS Parts Manufactured with FDM Technology. *Polymers* 2021, 13, 2422.
- [86] Long J., Gholizadeh H., Lu J., Seyfoddin A.: Review: Application of Fused Deposition Modelling (FDM) Method of 3D Printing in Drug Delivery. *Curr. Pharm. Des.* 2017, 23, 433–439.
- [87] Mazzanti V., Malagutti L., Mollica F.: FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. *Polymers* 2019, 11, 1094.
- [88] Melchels F.P., Domingos M.A., Klein T.J., Malda J., Bartolo P.J., Huttmacher D.W.: Additive manufacturing of tissues and organs. *Prog. Polym. Sci.* 2012, 37, 1079–1104.
- [89] Messimer S.L., Pereira T.R., Patterson A.E., Lubna M., Drozda F.O.: Full-Density Fused Deposition Modeling Dimensional Error as a Function of Raster Angle and Build Orientation: Large Dataset for Eleven Materials. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, 6.
- [90] Michta D., Kaczmarska B., Gierulski W., Szmidt A.: Uniwersalność druku 3D w technologii FDM. *Materiały & Maszyny Technologiczne.* 2020, 4, 51-55.
- [91] Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L.: Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.* 2015, 3, 42–53.
- [92] Mohan N., Senthil P., Vinodh S., Jayanth N.: A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual Phys. Prototyp.* 2017, 12, 47–59.
- [93] Monzón M., Ortega Z., Hernández A., Paz R., Ortega F.: Anisotropy of photopolymer parts made by digital light processing. *Materials* 2017, 10, 64.
- [94] Muiruri A., Maringa M., du Preez W.: Evaluation of Dislocation Densities in Various Microstructures of Additively Manufactured Ti6Al4V (Eli) by the Method of X-ray Diffraction. *Materials* 2020, 13, 5355.

- [95] Murugan R., Mitilesh R.N., Singamneni S.: Influence of process parameters on the mechanical behaviour and processing time of 3D printing. *Int. J. Mod. Manuf. Technol.* 2019, 1, 21–27.
- [96] Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D.: Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018, 143, 172–196.
- [97] Oleksy M.: Materiały polimerowe stosowane na elementy maszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2019.
- [98] Oleksy M., Budzik G., Kozik B., Gardzinska A.: Hybrydowe nanokompozyty polimerowe stosowane w technologii Rapid Prototyping. *Polimery* 2017, 62(1), 3.
- [99] Oleksy M., Heneczkowski M., Oliwa R., Budzik G., Dziubek T., Markowska O., Szwarz-Rzepka K., Jesionowski T.: Hybrid Composites with Epoxy Resin Matrix Manufactured with Vacuum Casting Technology. *Polimery* 2014, 59, 677–681.
- [100] Oleksy M., Oliwa R., Bulanda K., Budzik G., Przeszłowski Ł., Magniszewski M., Paszkiewicz A.: Torsional strength tests of spline connections made of polymer materials. *Polimery* 2021, 66(1), 52-55.
- [101] Oliwa R., Heneczkowski M., Oleksy M.: Epoxy composites for aviation industry. *Polimery* 2015, 60(3), 167-178.
- [102] Oliwa R., Oleksy M., Heneczkowski M., Budzik G., Markowska O., Przeszłowski Ł.: Zastosowanie metody vacuum casting do wytwarzania prototypów badawczych polimerowych kół zębatych. *Polimery* 2017, 62(1), 36-43.
- [103] Pamarac R.G., Petruse R.E.: Study Regarding the Optimal Milling Parameters for Finishing 3D Printed Parts from ABS and PLA Materials. *Acta Univ. Cibiniensis* 2018, 70, 66–72.
- [104] Pepliński K. Czyżewski P. Górecki D. Sykutera D. & Bieliński M.: Selected geometrical features and strength indicators of elements manufactured by fused deposition modeling technology. *Polimery* 2017, 62(3), 198-207.
- [105] Pisanu L., Santiago L.C., Barbosa J.D.V., Beal V.E., Nascimento M.L.F.: Effect of the Process Parameters on the Adhesive Strength of Dissimilar Polymers Obtained by Multicomponent Injection Molding. *Polymers* 2021, 13, 1039.
- [106] Pisula J., Budzik G., Turek P., Cieplak M.: An Analysis of Polymer Gear Wear in a Spur Gear Train Made Using FDM and FFF Methods Based on Tooth Surface Topography Assessment. *Polymers* 2021, 13, 1649.
- [107] Podsiadły B., Skalski A., Rozpiórski W., Słoma M.: Are We Able to Print Components as Strong as Injection Molded?—Comparing the Properties of 3D Printed and Injection Molded Components Made from ABS Thermoplastic. *Appl. Sci.* 2021, 11, 6946.
- [108] Popkova E. G. Ragulina Y. V. Bogoviz A. V.: *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century*, Springer International Publishing 2019.
- [109] Prajapati H., Ravoori D., Woods R.L., Jain A.: Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM). *Addit. Manuf.* 2018, 21, 84–90.
- [110] Prasong W., Muanchan P., Ishigami A., Thumsorn S., Kurose T., Ito H.: Properties of 3d printable poly (lactic acid)-poly (butylene adipate-co-

- terephthalate) blends and nano talc composites. *J. Nanomater.* 2020, 2020, 8040517.
- [111] Puerta P.V., Sanchez D.M., Batista M., Salguero J.: Criteria Selection for a Comparative Study of Functional Performance of Fused Deposition Modelling and Vacuum Casting Processes. *J. Manuf. Process.* 2018, 35, 721–727.
- [112] Rajendran Royan N.R., Leong J.S., Chan W.N., Tan J.R., Shamsuddin Z.S.B.: Current State and Challenges of Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites as Feeder in FDM-Based 3D Printing. *Polymers* 2021, 13, 2289.
- [113] Ravi A.K., Deshpande A., Hsu K.H.: An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *J. Manuf. Process.* 2016, 24, 179–185.
- [114] Redwood B., Schöffner F., Garret B.: *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*, 3D Hubs, Amsterdam, The Netherlands 2017
- [115] Richardson M., Haylock B.: Designer/maker: The rise of additive manufacturing, domestic-scale production and the possible implications for the automotive industry. *Comput. Aided Des. Appl.* 2012, 2, 33–48.
- [116] Roberson D., Shemelya C.M., MacDonald E., Wicker R.: Expanding the applicability of FDM-type technologies through materials development. *Rapid Prototyp. J.* 2015, 21, 137–143.
- [117] Rochardjo H.S.B., Budiyanoro C.: Manufacturing and Analysis of Overmolded Hybrid Fiber Polyamide 6 Composite. *Polymers* 2021, 13, 3820.
- [118] Rodríguez-González P., Robles Valero P.E., Fernández-Abia A.I., Castro-Sastre M.A., Barreiro García J.: Application of Vacuum Techniques in Shell Moulds Produced by Additive Manufacturing. *Metals* 2020, 10, 1090.
- [119] Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho A.M.: The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials* 2018, 11, 1333.
- [120] Rymuza Z.: *Trybologia polimerów ślizgowych*. WNT. Warszawa 1986.
- [121] Sarabia-Vallejos M.A., Rodríguez-Umanzor F.E., González-Henríquez C.M., Rodríguez-Hernández J.: Innovation in Additive Manufacturing Using Polymers: A Survey on the Technological and Material Developments. *Polymers* 2022, 14, 1351.
- [122] Schwarzer-Fischer E., Abel J., Sieder-Katzmann J., Propst M., Bach C., Scheithauer U., Michaelis A.: Study on CerAMufacturing of Novel Alumina Aerospike Nozzles by Lithography-Based Ceramic Vat Photopolymerization (CerAM VPP). *Materials* 2022, 15, 3279.
- [123] Sep J., Budzik G.: *Możliwości aplikacyjne technologii Rapid Manufacturing w przemyśle lotniczym*. Mechanik 2015.
- [124] Shaik Y.P., Schuster J., Shaik A., Mohammed M., Katherapalli H.R.: Effect of Autoclave Pressure and Temperature on Consolidation of Layers and Mechanical Properties of Additively Manufactured (FDM) Products with PLA. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 114.
- [125] Shemelya C., de la Rosa A., Torrado A.R., Yu K., Domanowski J., Bonacuse P.J., Martin R.E., Juhasz M., Hurwitz F., Wicker R.B., et al.: Anisotropy of thermal conductivity in 3D printed polymer matrix composites for space based cube satellites. *Addit. Manuf.* 2017, 16, 186–196.

- [126] Shih C.-C., Burnette M., Staack D., Wang J., Tai B.L.: Effects of cold plasma treatment on interlayer bonding strength in FFF process. *Addit. Manuf.* 2019, 25, 104–111.
- [127] Silva F.J.G., Soares M.R., Ferreira L.P., Alves A.C., Brito M., Campilho R.D.S.G., Sousa V.F.C.: A Novel Automated System for the Handling of Car Seat Wires on Plastic Over-Injection Molding Machines. *Machines* 2021, 9, 141.
- [128] Singh D., Singh R., Boparai K.S.: Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of art review. *J. Manuf. Process.* 2018, 31, 80–95.
- [129] Singh R., Sandhu G.S., Penna R., Farina I.: Investigations for thermal and electrical conductivity of ABS-graphene blended prototypes. *Materials* 2017, 10, 881.
- [130] Sonsalla T., Moore A.L., Meng W.J., Radadia A.D., Weiss L.: 3-D printer settings effects on the thermal conductivity of acrylonitrile butadiene styrene (ABS). *Polym. Test.* 2018, 70, 389–395.
- [131] Soyama H., Takeo F.: Effect of Various Peening Methods on the Fatigue Properties of Titanium Alloy Ti6Al4V Manufactured by Direct Metal Laser Sintering and Electron Beam Melting. *Materials* 2020, 13, 2216.
- [132] Spoerk M., Savandaiah C., Arbeiter F., Traxler G., Cardon L., Holzer C., Sapkota J.: Anisotropic properties of oriented short carbon fibre filled polypropylene parts fabricated by extrusion-based additive manufacturing. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2018, 113, 95–104.
- [133] Srinivasan R., Prathap P., Raj A., Kannan S.A., Deepak V.: Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of PETG parts. *Mater. Today Proc.* 2020, 27, 1877–1883.
- [134] Sukanto H., Smaradhana D.F., Triyono J., Wicaksono P.: Investigating the Effect of Layer Thickness on the Product Quality of PLA Manufactured by 3D Printing Technique. In *Proceedings of the 6th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials, Surakarta, Indonesia, 16–17 October 2019*, Springer: Singapore, 2020, pp. 811–818.
- [135] Sun Y.X., Tian, W., Zhang T., Chen P., Li M.J.: Strength and toughness enhancement in 3d printing via bioinspired tool path. *Mater. Des.* 2020, 185, 108239.
- [136] Śliwa R., Oleksy M., Markowska O., Budzik G., Dziubek T., Zaborniak M., Czech-Polak J., Heneczkowski M.: Kompozyty handlowych nienasyconych żywic poliestrowych z dodatkiem nanonapełniaczy Nanobent®. Cz. II. Nanokompozyty z udziałem krajowych nanonapełniaczy stosowane w technologii Vacuum Casting. *Polimery* 2021, 61(1), 16-23.
- [137] Taufik M., Jain P.K.: CNC-assisted selective melting for improved surface finish of FDM parts. *Taylor Fr. J. Virtual Phys. Prototyp.* 2016, 11, 319–341.
- [138] Thaler D., Aliheidari N., Ameli A.: Mechanical, electrical, and piezoresistivity behaviors of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene/carbon nanotube nanocomposites. *Smart Mater. Struct.* 2019, 28, 084004.
- [139] Torregrosa-Penalva G., García-Martínez H., Ortega-Argüello Á.E., Rodríguez-Martínez A., Busqué-Nadal A., Ávila-Navarro E.: Implementation of Microwave Circuits Using Stereolithography. *Polymers* 2022, 14, 1612.

- [140] Török J., Törökova M., Duplakova D., Murcinkova Z., Duplak J., Kascak J., Karkova M.: Advanced Configuration Parameters of Post Processor Influencing Tensile Testing PLA and Add-Mixtures in Polymer Matrix in the Process of FDM Technology. *Appl. Sci.* 2021, 11, 6212.
- [141] Tsiolikas A., Mikrou T., Vakouftsi F., Aslani K.-E., Kechagias J.: (Ioannis) Robust design application for optimizing ABS fused filament fabrication process: A case study. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019, 564, 012021.
- [142] Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S.: Fused deposition modelling: A review. *Rapid Prototyp. J.* 2019, 26, 176–201.
- [143] Walker P., Malz S., Trudel E., Nosir S., ElSayed M.S.A., Kok L.: Effects of Ultrasonic Impact Treatment on the Stress-Controlled Fatigue Performance of Additively Manufactured DMLS Ti-6Al-4V Alloy. *Appl. Sci.* 2019, 9, 4787.
- [144] Wu, W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H., Zhao J.: Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials* 2015, 8, 5834–5846.
- [145] www.centrumdruku3d.pl
- [146] www.forbot.pl
- [147] www.solveere.pl
- [148] www.spectrumfilaments.com
- [149] www.tooling.milar.pl
- [150] Yadav D., Chhabra D., Garg R.K., Ahlawat A., Phogat A.: Optimization of FDM 3D printing process parameters for multimaterial using artificial neural network. *Mater. Today Proc.* 2020, 21, 1583–1591.
- [151] Yadav D.K., Srivastava R., Dev S.: Design & fabrication of ABS part by FDM for automobile application. *Mater. Today Proc.* 2020, 26, 2089–2093.
- [152] Zárbynická L., Petrů J., Krpec P., Pagáč M.: Effect of Additives and Print Orientation on the Properties of Laser Sintering-Printed Polyamide 12 Components. *Polymers* 2022, 14, 1172.
- [153] Zhan S.A., Song J.T., Ding M.H., Guo J., Liu H.H.: A Study of Thin-Walled ZL105A Casting Manufactured by Vacuum Differential Pressure Casting. *Adv. Eng. Res.* 2017, 135, 574–582.
- [154] Zhang H.G., Hu Q.X.: Study of the Filling Mechanism and Parameter Optimization Method for Vacuum Casting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 83, 711–720.
- [155] Zhang J., Yang B., Fu F., You F., Dong X., Dai M.: Resistivity and its anisotropy characterization of 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene copolymer (ABS)/carbon black (CB) composites. *Appl. Sci.* 2017, 7, 20.
- [156] Zhu X., Wang F., Ma D., Bührig-Polaczek A.: Dimensional Tolerance of Casting in the Bridgman Furnace Based on 3D Printing Techniques. *Metals* 2020, 10, 299.
- [157] Ziemian C., Sharma M., Ziemi S.: Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. In *Mechanical Engineering, InTech: London, UK, 2012.*
- [158] Ziębowicz A., Sambok-Kielbowicz A., Walke W., Mzyk A., Kosiel K., Kubacki J., Bączkowski B., Pawlyta M., Ziębowicz B.: Evaluation of Bacterial

- Adhesion to the ZrO₂ Atomic Layer Deposited on the Surface of Cobalt-Chromium Dental Alloy Produced by DMLS Method. *Materials* 2021, 14, 1079.
- [159] Zohdi N., Tareq S., Yang C.: Investigation on mechanical anisotropy of high impact polystyrene fabricated via fused deposition modelling. In *Proceedings of the International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering Research and Practice*, Sydney, Australia, 24–28 November 2019, pp. 24–28.
- [160] Żenkiewicz M., Stepczyńska M., Karasiewicz T., Moraczewski K., Rytlewski P.: *Metody badań i oceny niektórych właściwości tworzyw polimerowych i metali*, Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz 2012.

STRESZCZENIE

Tytuł: Badania i analiza walcowych elementów maszyn wytwarzanych hybrydowymi metodami szybkiego prototypowania

Tematyka rozprawy podejmuje problematykę wytwarzania części maszyn z tworzyw polimerowych wykonanych metodą ekstruzji warstwowej oraz ograniczeń tej technologii związanej z ułożeniem modelu w komorze roboczej urządzenia. Głównym celem pracy jest opracowanie metodyki wytwarzania części maszyn pracujących w zakresie obciążeń skręcających, o zadanej wytrzymałości z zastosowaniem opracowanej hybrydowej technologii wytwarzania łączącej metodę ekstruzji warstwowej z odlewania pod obniżonym ciśnieniem.

Pierwsza część pracy obejmuje analizę stanu zagadnienia związaną z wytwarzaniem metodami przyrostowymi części maszyn z tworzyw polimerowych oraz elementów polimerowo-metalowych technologiami hybrydowymi. Ograniczenia, które wynikają z zastosowania metody ekstruzji warstwowej, a w szczególności anizotropia mechaniczna, uzasadniają podjęcie tematu rozprawy doktorskiej.

W drugiej części rozprawy opracowano metodykę hybrydowego wytwarzania części maszyn. Próbkę do badań wykonano metodą ekstruzji warstwowej, technologią odlewania pod obniżonym ciśnieniem oraz opracowaną technologią hybrydową. Do wytworzenia próbek zastosowano tworzywo termoplastyczne ABS i PLA oraz odlewane próżniowo żywice chemoutwardzalne PR2000, PR700, PR1819. Następnie wykonano badania wytrzymałościowe w postaci statycznej próby rozciągania i zginania próbek normatywnych oraz statycznej próby skręcania walcowych próbek z wielowypustem na zaprojektowanym stanowisku badawczym. Przeprowadzono badania dokładności geometrycznej oraz struktury geometrycznej powierzchni próbek. Ostatnią częścią badań były pomiary termiczne metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań sformułowano wnioski.

ABSTRACT

Title: Research and analysis of cylindrical machine elements produced by hybrid methods of rapid prototyping

The subject of the dissertation discusses the problem of production machine parts from polymeric materials made by material extrusion and the limitations of this technology related to the arrangement of the model in the working chamber of the device. The main purpose of the work is to develop a methodology for manufacturing machine parts operating in the range of torsional loads, with a given strength, using the developed hybrid manufacturing technology combining the method of material extrusion with casting under reduced pressure.

The first part of the work includes an analysis of the state of affairs related to the production of machine parts made of polymeric materials and polymer-metal elements using hybrid technologies using additive methods. The limitations that result from the use of the material extrusion method, and in particular the mechanical anisotropy, justify the topic of the doctoral dissertation.

In the second part of the dissertation, the methodology of hybrid manufacturing of machine parts was developed. Test samples were made by material extrusion, low pressure casting technology and the developed hybrid technology. ABS and PLA thermoplastics and vacuum-cast PR2000, PR700, PR1819 chemically cured resins were used to produce the samples. Then, strength tests were performed in the form of a static tensile and bending test of standard samples and a static torsion test of cylindrical splined samples on a designed test stand. Tests of geometric accuracy and geometric structure of the surface of the samples were carried out. The last part of the research was thermal measurements using differential scanning calorimetry. Based on the analysis of the obtained research results, conclusions were formulated.

