

Soczewki z drukarki? Druk 3D jako innowacyjne rozwiązanie produkcji soczewek okularowych



MACIEJ CIEBIĘRA¹, dr hab. BOŻENA ZGARDZIŃSKA, prof. UMCS^{2,3}, prof. RYSZARD NASKRĘCKI^{3,4}

¹Hoya Lens Poland sp. z o.o.,
²Instytut Fizyki, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie
³Centrum Ecotech-Complex, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie
⁴Laboratorium Fizyki Widzenia i Optometrii, Wydział Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Badania dotyczące zastosowania soczewek optycznych do korekcji wad wzroku rozpoczęły się w XVII wieku. W tym kontekście warto przypomnieć dzieło Benito Daza de Valdesa pod tytułem „Uso de los antoios para todo género de vistas”, które ukazało się w 1623 roku w Sewilli i które szybko zostało przetłumaczone z języka hiszpańskiego i wydane w języku angielskim pod tytułem „The use of eyeglasses” (pełen tytuł tej książki brzmi: „Use of glasses for all kinds of views in which it is taught to know the degrees that each one is missing from his sight, and those who have any glasses and at what time they should be used, and how they will be needed in absence, with other important points, for the usefulness and preservation of sight”). To i inne powstałe w tym czasie naukowe opracowania przyczyniły się do upowszechnienia i rozwoju wiedzy o rozpoznaniu i korygowaniu wad wzroku, jak i do opracowania procedur badania refrakcji, na których w znacznej mierze opieramy się dziś. Jednak obecnie na soczewki okularowe patrzymy przez pryzmat postępu technicznego i technologicznego minionego stulecia, w szczególności w odniesieniu do technologii masowej produkcji soczewek o złożonych krzywiznach powierzchni, czyli FreeForm. Dzięki zastosowaniu frezarek sterowanych numerycznie, możliwe stało się wykonywanie soczewek o bardzo złożonych geometriach krzywizn, jak choćby soczewki progresywne.

FreeForm, czyli jak jest obecnie

Wprowadzenie technologii FreeForm pociągnęło za sobą istotną rewolucję w zakresie wyboru materiału, z którego wykonywane są soczewki okularowe. Szkło mineralne zostało wyparte przez materiały organiczne, tzw. plastiki. Szkła mineralne, pomimo licznych zalet, są przede wszystkim znacznie trudniejsze w obróbce niż materiały organiczne. Oczywiście możliwa jest produkcja także soczewek mineralnych w technologii FreeForm, ale zużycie elementów skrawających jest znacznie większe niż w przypadku obróbki plastików, a co za tym idzie, masowa produkcja szklanych soczewek w technologii FreeForm jest znacznie mniej opłacalna.

Badania nad materiałami o odpowiednich własnościach optycznych, mechanicznych i użytkowych trwają już dziesiątki lat. Obecnie do dyspozycji mamy szereg tworzyw sztucznych o różnych właściwościach i parametrach optycznych i użytkowych, często znacznie lepszych niż te, jakie posiadają szkła mineralne (tab. 1).

Rok wprowadzenia*	Rodzaj	Przykładowe oznaczenie
ok. 1930	polistyren	PPS, PS
ok. 1950	poliakryl	PMMA (akryl)
ok. 1960	poliester	PADC, (CR-39 [®])
ok. 1970	poliwęglan	PC
ok. 1980	poliuretan	PU, (Trivex [™] , MR [™])
ok. 2005	cykliczne olefiny	COC, (Zeonex [™])

Tab. 1. Materiały organiczne stosowane do produkcji soczewek okularowych *orientacyjnie [14,15]

Tworzywa sztuczne (plastiki) to produkty wytwarzane z ropy naftowej. Przyjmuje się, iż do wyprodukowania 1 kg plastiku należy zużyć około 2 kg surowca w postaci ropy naftowej, nie wliczając w to ropy potrzebnej do wytworzenia energii niezbędnej do przeprowadzenia procesów produkcyjnych. Czy to dużo? Obecnie produkcja plastików pochłania około 8% światowego wydobycia ropy naftowej, a według Komisji Europejskiej do 2050 roku, tworzywa sztuczne mogą odpowiadać za aż 20% światowego zużycia ropy naftowej i 15% emisji gazów cieplarnianych [4].

Plastiki otrzymane w procesie polimeryzacji lub polikondensacji wprowadza się do odpowiednich form w procesach tłoczenia, odlewania czy prasowania, a następnie schładza się w kontrolowanych warunkach tak, aby w materiale optycznym nie powstały naprężenia. Metoda ta dobrze sprawdza się w procesie wytwarzania gotowych soczewek okularowych, jednak posiada także liczne ograniczenia. Największe ograniczenia nakłada konieczność korzystania z formy, którą wykonuje się ze szkła lub specjalnych spieków metali. Przygotowanie formy wymaga dużej precyzji, co jest pracochłonne i często drogie. Dlatego też wykonywanie soczewek poprzez odlewanie w formach

ogranicza się do produkcji dużych serii np. soczewek magazynowych, przeznaczonych do dystrybucji masowej. Wytwarzanie tą metodą produktów zindywidualizowanych (jednostkowych) jest możliwe, ale obecnie nadal nieopłacalne.

Aby wykonać soczewki o parametrach zindywidualizowanych, należy najpierw uzyskać półprodukt, jakim jest tzw. półpraska. Jest to bryła z materiału optycznego o jednej powierzchni – zazwyczaj czołowej – wykonanej „na gotowo”, czyli posiadającej taką krzywiznę, jaką będzie miał produkt końcowy. Półpraski wykonuje się opisanymi wcześniej metodami odlewania w formach. Do nadania odpowiedniej krzywizny druciej powierzchni soczewki stosuje się obrabiarki sterowane numerycznie (CNC, *Computerized Numerical Control*) z frezami diamentowymi. Ta technologia pozwala na niezwykle precyzyjną kontrolę krzywizny, przez co uzyskuje się soczewki o złożonych parametrach optycznych.

Proces obróbki powierzchni poprzez frezowanie jest technologią, w której usuwa się z półproduktu nadmiar materiału. Usunięty materiał jest odpadem technologicznym, który nie może zostać ponownie wykorzystany do produkcji soczewek okularowych. Przetworzenie polimeru do postaci wyjściowej jest obecnie zbyt kosztowne i nie jest stosowane w branży optycznej. Polimerowe wióry powstałe podczas frezowania są utylizowane i często wykorzystywane jako wypełniacze w innych gałęziach gospodarki, np. w branży samochodowej czy budownictwie.

Warto zwrócić uwagę, iż w zależności od zastosowanych parametrów produkcyjnych ilość odpadów podczas frezowania powierzchni wynosi od 57 do 76% masy wyjściowej półproduktu. Jeżeli przyjąć, iż soczewkę należy wstawić do oprawki o okrągłej tarczy o średnicy 50 mm (bez dodatkowej decentracji), to całkowita ilość odpadów wyniesie od 71 do 85%! (tabela 2).

Moc optyczna soczewki	Utrata materiału po frezowaniu półproduktu [%]	Całkowita utrata materiału po oprawieniu [%]
+3,00	75,94	84,53
-3,00	57,33	70,77

Tab. 2. Procentowa utrata masy półproduktu dla wybranych soczewek – oszacowanie własne

Należy również zauważyć, że operacji frezowania soczewki towarzyszy także wykorzystanie wody jako chłodziwa, w ilości od kilku do kilkadziesiąt litrów na jedną soczewkę! To generuje dodatkowy problem, jakim jest potencjalne przedostanie się mikro- i nanoplastików do obiegu wody. Mikroplastikami określa się słabo rozpuszczalne w wodzie odpady tworzyw sztucznych mniejsze niż 5 mm, natomiast nanoplastiki to odpady o rozmiarach mniejszych niż kilka mikrometrów. Badania wskazują, iż mikro- i nanoplastiki szczególnie zagrażają organizmowi żyjącym w morzach i oceanach, ponieważ z łatwością trafiają do łańcuchów pokarmowych, prowadząc do nieodwracalnych zmian w ekosystemie [12]. Aby zapobiec transmisji tych zanieczyszczeń w firmach produkujących soczewki okularowe, stosuje się m.in. zamknięty obieg wody, odstojniki czy lokalne oczyszczalnie ścieków z dodatkowymi osadnikami i filtrami. Tego typu rozwiązania, zazwyczaj kosztowne, wciąż nie są rutynowo wykorzystywane podczas obróbki soczewek okularowych w zakładach (salonach) optycznych, gdzie często odpady produkcyjne są utylizowane jak zwykłe ścieki.

Druk 3D jako alternatywna metoda wytwarzania soczewek okularowych

Druk 3D (druk przestrzenny) to proces wytwarzania trójwymiarowych obiektów, zaprojektowanych cyfrowo. Istotą druku przestrzennego jest nanoszenie na siebie kolejnych warstw materiału, z których stopniowo (warstwa po warstwie) tworzony jest gotowy obiekt [1]. Druk 3D jest więc przeciwieństwem wytwarzania subtraktywnego (czyli usuwania materiału) obecnie stosowanego do nadawania ostatecznej krzywizny soczewkom.

Nasuwa się zatem pytanie, czy zastosowanie metod przyrostowych może stanowić alternatywę dla obecnych metod wytwarzania soczewek okularowych, szczególnie tych o bardzo złożonych krzywiznach powierzchni? Pytanie to nabiera szczególnego znaczenia w kontekście zasygnalizowanych powyżej zagrożeń o charakterze ekologicznym oraz nowych oczekiwań i wyzwań związanych z produkcją soczewek okularowych.

Powszechność i dostępność drukarek 3D skłoniła nas do sprawdzenia technologicznej gotowości do produkcji soczewek przy zastosowaniu technologii przyrostowych. Kluczową rolę w wykorzystaniu technologii addytywnych odgrywa wybór odpowiedniej technologii druku. Ze względu na stosowany do druku materiał można wyróżnić trzy główne grupy technologii przyrostowych: technologia FDM, w której materiałem drukującym mogą być termoplastyczne filamenty w postaci żyłki, technologia SLA wykorzystująca żywice światło-utwardzalne oraz technologia SLS/SLM wykorzystująca szeroką gamę materiałów proszkowych (polimerów, metali).

Technologie SLS (ang. *Selective Laser Sintering*) polegające na selektywnym spiekaniu proszków za pomocą skupionej wiązki lasera są już obecne w branży optycznej i wykorzystywane do produkcji opraw okularowych. Co więcej, firma Evonik opracowała z takim przeznaczeniem specjalny materiał Trogamid, który jest wytwarzany w 40% z biomasy. Wyzwaniem jest jednak uzyskanie obiektu o izotropowych właściwościach, w pełni przezierającego optycznie. To, w połączeniu z mniejszą dostępnością technologii SLS, odsuwa w czasie jej wykorzystanie do produkcji soczewek, choć warto podkreślić, że prace nad zmniejszeniem porowatości obiektów wytworzonych w technologii SLS cały czas trwają, więc może w niedalekiej przyszłości będzie to ciekawe rozwiązanie również dla branży optycznej.

Metoda FDM

Metoda FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) jest obecnie najbardziej rozpowszechnioną i dostępną technologią druku przestrzennego. Została opracowana z końcem lat 80., a pierwsze drukarki tego typu były dostępne już w latach 90. Obecnie łatwe w obsłudze drukarki 3D w technologii FDM można kupić w cenie poniżej dwóch tysięcy złotych.

Metoda FDM bazuje na wytłaczaniu przez rozgrzaną dyszę ciekłego tworzywa termoplastycznego (zazwyczaj jest to ABS lub PLA) i układaniu go warstwa po warstwie w ruchu wzdłuż osi x, y i z. Materiał drukujący w postaci żyłki, nazywany filamentem, podawany jest z szybkością regulowaną ekstruderem do układu grzejnego, gdzie ulega stopieniu, a następnie wypływa z dyszy o średnicy od 0,2 do 1,5 mm w określonym miejscu stołu. W ten sposób ze stygnącego tworzywa budowany jest wcześniej zaprojektowany model.

Podczas pierwszych prób wytworzenia soczewek z wykorzystaniem technologii przyrostowych nie skupialiśmy się na parametrach optycznych drukowanych soczewek, a sprawdzaliśmy możliwość dobrego odwzorowania kształtu soczewek. Celem było wykonanie soczewki o mocy optycznej +3,00 i średnicy 50 mm. W celu maksymalnego uproszczenia modelu założyliśmy, iż soczewka będzie płasko-wypukła. Znając współczynnik załamania światła materiału, z którego mają być wykonane soczewki oraz oczekiwaną moc optyczną powierzchni załamującej (D), można obliczyć promień krzywizny tej powierzchni:

$$R = \frac{n - 1}{D}$$

W obliczeniach przyjęto, że soczewka umieszczona jest w powietrzu oraz pominięto wpływ grubości środkowej CT na moc optyczną soczewki okularowej, grubość brzegowa ET nie została określona, a grubość środkowa wynikała z wysokości strzałkowej:

$$CT = R - \sqrt{R^2 + \left(\frac{\Phi}{2}\right)^2}$$

Metoda FDM bez dodatkowej postprodukcji modelu daje relatywnie małą dokładność odwzorowania, czyli około $\pm 0,15$ mm, co jest jednak wystarczające, aby sprostać podstawowym wymaganiom ISO dotyczącym średnicy soczewki [8–11]:

- średnica (wymiar) nominalny [dn] – średnica podana przez producenta;
- średnica efektywna (wymiar rzeczywisty) [de] – rzeczywista średnica soczewki;
- średnica użyteczna (wymiar czynny) [du] – średnica obszaru optycznie czynnego;

Między tymi wymiarami zachodzą następujące relacje:

$$d_n - 1\text{mm} \leq d_e \leq d_n + 2\text{mm}$$

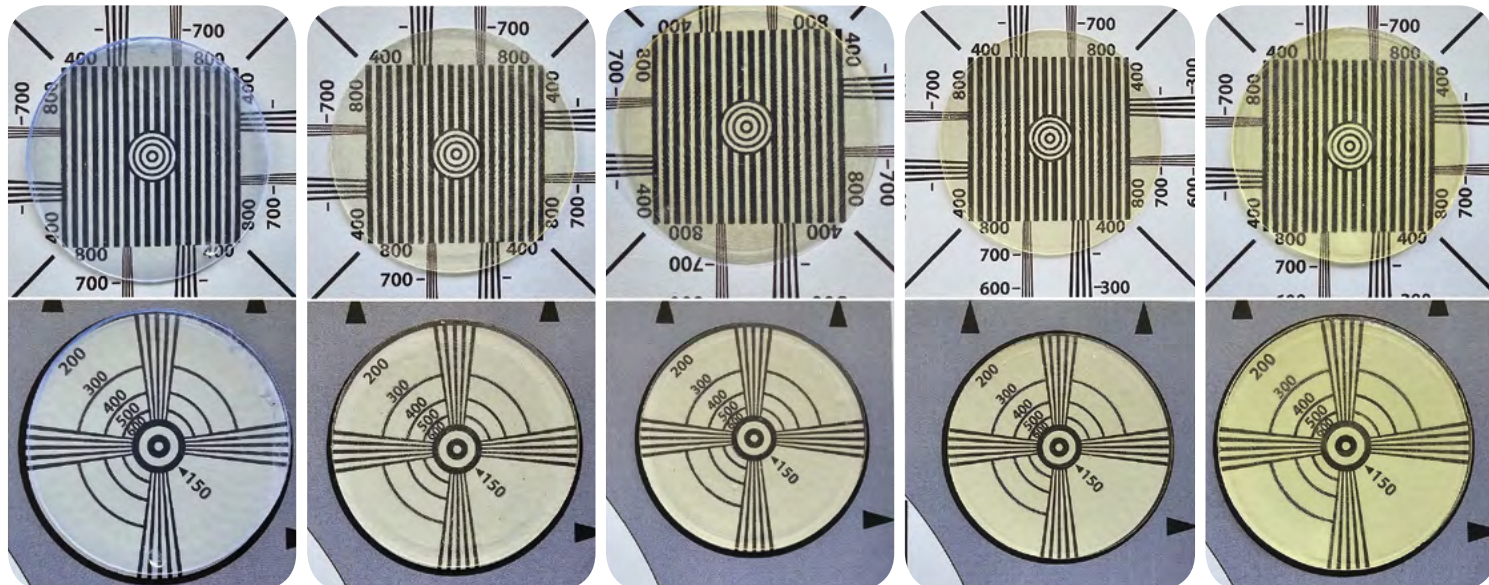
$$d_u \geq d_n - 2\text{mm}$$

Drukowane soczewki pozwalają uzyskać wymiary mogące sprostać wymaganiom standardom, znacznie gorzej było z jakością optyczną otrzymanych soczewek, o ile w tym przypadku w ogóle można było mówić o jakości optycznej (fot. 1).



Fot. 1. Przykładowa soczewka wydrukowana technologią FDM

Właściwości optyczne otrzymanych tą metodą soczewek były na tyle słabe, że nie poddano ich testom sprawdzającym parametry optyczne



Fot. 2. Próbniki wydrukowane w technologii SLA uzyskane przy wykorzystaniu pięciu różnych żywic

określone w normie PN-EN ISO 8980-3:2013 „Wymagania dotyczące transmisji i metody pomiaru”. Możliwe jest uzyskanie tą techniką soczewek o wyższej transparentności, jednak widoczne na zdjęciu 1. ślady ścieżek, po których układany był filament, występujące zarówno wewnątrz, jak i na powierzchni obiektu, są niemożliwe do wyeliminowania w standardowych procesach postprodukcji i nawet obiekty uzyskujące pozorną (wizualną) przezroczystość po zastosowaniu procesów obróbki chemicznej, wykazują anizotropowość wewnętrzną.

Stereolitografia

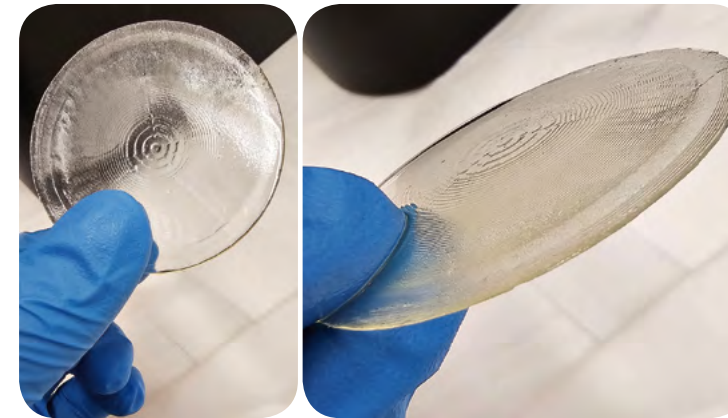
Stereolitografia (SLA) jest najstarszą technologią druku 3D i ze względu na dużą precyzję druku znalazła szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Drukowany obiekt powstaje poprzez selektywne utwardzanie ciekłej żywicy fotonopolimerowej, warstwa po warstwie, za pomocą wiązki światła ultrafioletowego (np. lasera). Z uwagi na stale podnoszoną rozdzielność drukarek SLA wydruki wykonane tą techniką pozwalają uzyskać bardzo dobrą dokładność wymiarową. Uważa się, że druk techniką SLA stanowi optymalne rozwiązanie dla wytwarzania małych obiektów o wysokiej precyzji. Warto także dodać, że fotonopolimeryzacja wykorzystywana jest w produkcji soczewek kontaktowych.

W technologii SLA stosowane są różnego rodzaju żywice. Teoretycznie najlepiej byłoby skorzystać z tych samych żywic, z których wykonywane są soczewki okularowe. W praktyce wymagałoby to jednak opracowania zupełnie nowych procesów produkcyjnych, gdyż przy wytwarzaniu soczewek okularowych stosuje się inne mechanizmy polimeryzacji. Oczywiście nic nie stoi na przeszkodzie podjęcia bardziej zaawansowanych prób we współpracy z ośrodkami zajmującymi się chemią organiczną, jednak na chwilę obecną możliwe było przetestowanie komercyjnie dostępnych drukarek i żywic.

Do wydruku soczewek wykorzystano dostępne żywice transparentne, w tym używane do wytwarzania obiektów medycznych (protezy, implanty), co zapewniało ich biokompatybilność. Wszystkie żywice utwardzane były światłem widzialnym o długości fali $\lambda = 405$ nm.

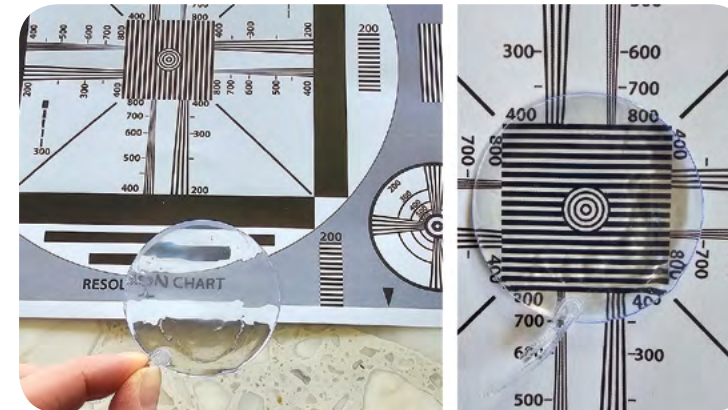
Otrzymano szereg wydruków soczewek (fot. 2), z których część charakteryzowała się wyraźnym żółtym zabarwieniem, które dodatkowo zwiększało się po kilku tygodniach od wydruku, co wynika z właściwości użytych żywic.

Wszystkie wydrukowane soczewki posiadały na powierzchni wypowe ślady (wynikające z niedokładności samego projektu, a niektóre z nich były ponadto zbyt elastyczne (właściwość użytej żywicy), aby spełnić minimalne wymagania stawiane soczewkom okularowym (fot. 3).



Fot. 3. Wyraźne widoczne kolejne wypowe warstwy w soczewkach

Powyższe próby i doświadczenia pozwalały łatwo stwierdzić, że otrzymane „domowymi sposobami” soczewki okularowe nie nadawały się wprost do montażu w oprawki. Soczewki te do uzyskania zadawalającej jakości optycznej wymagają dalszych procesów poprawiających ich właściwości (post-processing, czyli post-obróbka). Najprostsze polerowanie mechaniczne nie przyniosło jednak oczekiwanych rezultatów z uwagi na twardość modeli. Inną znaną metodą niwelowania niedoskonałości powierzchni modelu jest powłoczenie obiektu żywicą – u nas było to zanurzenie wydrukowanej soczewki w płynnej żywicy – oraz utwardzenie powłoki. Tak otrzymany produkt był nadal daleki od jakości optycznej, jaką posiadają obecnie produkowane soczewki okularowe, choć dawał pewne nadzieje na dalszy postęp z wykorzystaniem technologii druku SLA (fot. 4). Oba przytoczone procesy podnoszą jakość optyczną soczewek, jednak wprowadzają dodatkowy czynnik modyfikujący krzywiznę soczewek.



Fot. 4. Soczewka wytworzona metodą SLA, dodatkowo zanurzona w żywicy i ponownie utwardzona

Możliwości badań i rozwoju

Przytoczone przykłady pilotażowych badań nad wytwarzaniem addytywnym soczewek nie wyczerpują katalogu dostępnych technik produkcji i post-produkcji, wskazują już jednak potencjalne problemy i otwierające się możliwości przed branżą optyczną. Kluczowym czynnikiem mobilizującym postęp będzie aspekt ekologiczny. Szacuje się, iż w 2023 roku na świecie wyprodukowano około 680 mln soczewek okularowych [6], co pozostawiło po sobie około 30 tys. ton odpadów w postaci mikro- i nanoplastików. Podczas procesów produkcyjnych wykorzystano także trudne do oszacowania ilości wody oraz energii. Technologie druku 3D dają więc ogromne szanse na redukcję ilości odpadów, ale nie tylko.

Soczewki gradientowe

Obecnie prowadzone są badania nad możliwościami drukowania zupełnie innego rodzaju produktów optycznych: soczewek gradientowych o zmiennym współczynniku załamania światła (GRIN, Gradient Index)

[13]. Soczewki takie wykonuje się z materiału o zmiennej wartości współczynnika załamania światła, który zmienia się np. w funkcji odległości od osi soczewki. Obecnie wytwarzanie tego typu soczewek jest wyjątkowo trudne, również ze względu na konieczność wykorzystania wyrafinowanych technologii jak [2]:

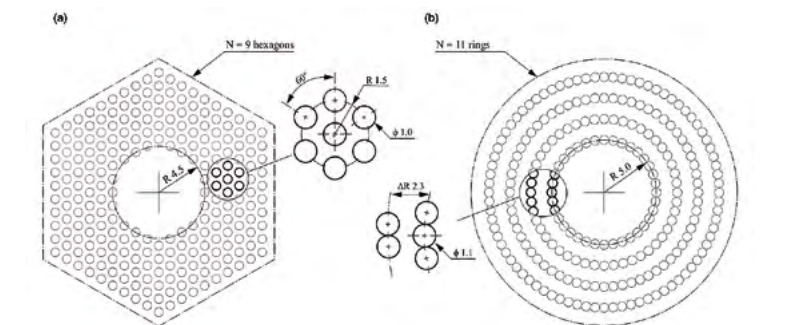
- Napromieniowanie neutronami – szkło bogate w bor jest nasświetlane neutronami, co powoduje zmianę koncentracji boru, a tym samym współczynnika załamania światła materiału soczewki.
- Chemiczne osadzanie z fazy gazowej – polega na osadzeniu różnych rodzajów szkła o różnych współczynnikach załamania światła na powierzchni soczewki.
- Częściowa polimeryzacja – organiczny monomer jest częściowo polimeryzowany przy użyciu światła ultrafioletowego o różnym natężeniu, aby uzyskać gradient współczynnika załamania światła.
- Wymiana jonowa – szkło zanurza się w roztworze zawierającym jony litu. W wyniku dyfuzji jony sodu w szkło ulegają częściowej wymianie na jony litu. W ten sposób próbka uzyskuje gradientową strukturę materiału i odpowiadający jej gradient współczynnika załamania światła.

Metoda oparta na druku 3D zakłada wykonanie soczewek gradientowych z niskotopliwego szkła domieszkowanego dwutlenkiem tytanu. Dodanie dwutlenku tytanu powoduje lokalny wzrost współczynnika załamania światła. W specjalnie zaprojektowanej dyszy drukarki 3D, szkło oraz dwutlenek tytanu są mieszane w kontrolowanych, ściśle określonych proporcjach tak, by uzyskać płynną zmianę współczynnika załamania światła.

Wydrukowany półprodukt podlega suszeniu oraz spiekaniu, dając w rezultacie soczewkę o zmiennym rozkładzie współczynnika załamania światła. Uzyskiwane w ten sposób soczewki nie przekraczają 1 cm średnicy, a zmiany współczynnika załamania światła są na tyle małe, że ich znaczenie w przypadku optyki okularowej jest znikome. Jednak dalsze prace badawcze mogą w rezultacie umożliwić wydrukowanie bardzo cienkich soczewek okularowych, których moc uzyskiwana będzie nie za pomocą zmiany krzywizny powierzchni załamujących światło, a za pomocą zmiany współczynnika załamania światła.

Nadruk mikrosoczewek

Kolejnym ciekawym i ważnym obszarem, w którym można wykorzystać metodę druku 3D jest, zyskująca coraz szersze zastosowanie, kontrola krótkowzroczności z wykorzystaniem soczewek okularowych. Dwie najbardziej obiecujące technologie dające najlepsze rezultaty w tym obszarze to technologia DIMS (ang. *Defocus Incorporated Multiple Segments*) oraz technologia HALT (ang. *Highly Aspherical Lenslet Target*). Obydwie technologie wykorzystują mikrosoczewki o rozmiarach około 1 mm osadzone na czołowej powierzchni soczewki (ryc. 1).

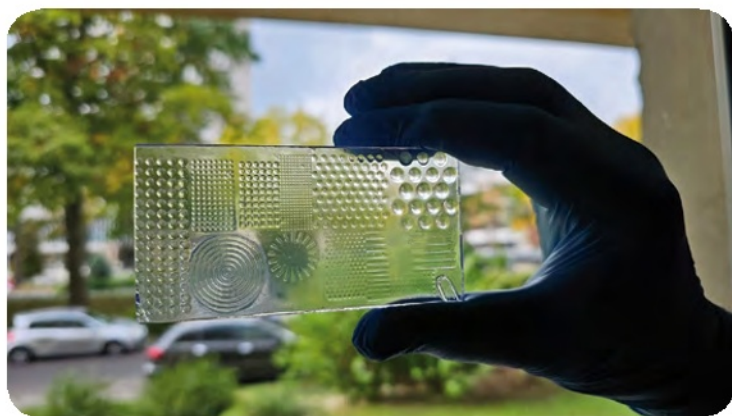


Ryc. 1. Poglądowe przedstawienie mikrosoczewek w technologii DIMS (ryc. a) oraz w technologii HALT (ryc. b) [3]

Obecnie, za względu na metodę produkcji (przygotowanie czołowej powierzchni załamującej w formie), dużym ograniczeniem jest możliwość zmiany rozkładu mikrosoczewek na powierzchni czołowej soczewki. Duża intensywność prowadzonych badań nad krótkowzrocznością pokazuje, że może mieć znaczenie zmienny rozkład mikrosoczewek na powierzchni so-

czewki lub wykorzystanie mikrosoczewek o zmiennej mocy optycznej, zależnie od potrzeb pacjenta. Korzystając z obecnych metod produkcji indywidualizacja mocy optycznej oraz indywidualizacja rozkładu mikrosoczewek na powierzchni soczewki jest praktycznie nieosiągalna. Stąd metoda pozwalająca na precyzyjny nadruk mikrosoczewek wydaje się kuszącym i dobrze rokującym rozwiązaniem.

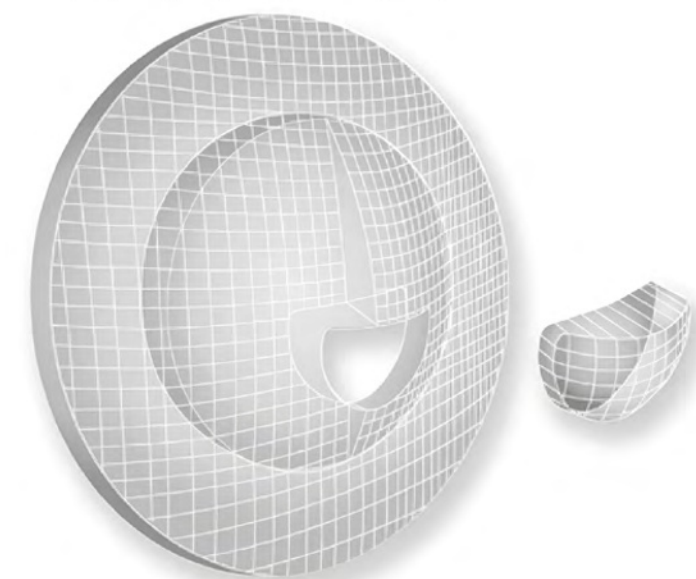
Z powyższych względów podjęliśmy bardzo obiecującą próbę wydruku płytki z naniesionymi mikrosoczewkami o zróżnicowanym rozkładzie przestrzennym oraz innymi elementami, np. okręgami, liniami, kostkami (fot. 5).



Fot. 5. Próbnny wydruk mikrosoczewek oraz elementów optycznych o innych kształtach

Produkty jednostkowe

Bardzo interesującym aspektem wykorzystania druku 3D wydaje się produkcja rozwiązań jednostkowych (zindywidualizowanych). W przypadku bardzo wysokich wartości mocy korekcyjnych lub złożonych rozwiązań wieloogniskowych należy przygotować finalny produkt (soczewkę) tnąc, a następnie klejąc ze sobą kilka soczewek. Dobrym tego przykładem są soczewki lenticularne wieloogniskowe lub soczewki wieloogniskowe z różnymi wartościami korekcji pryzmatycznej w segmentach (ryc. 2).



Ryc. 2. Soczewka Multilens Optio [7]

Potrzeba wykonania jednej soczewki z kilku innych soczewek znacznie podnosi finalny koszt takiego produktu. Wykorzystując druk 3D można wykonać tak zaawansowane konstrukcje jednorazowo, jako całość, bez potrzeby dzielenia procesu produkcji na etapy wytworzenia osobnych segmentów oraz unikając etapu łączenia. Prawdopodobnie w tym obszarze druk soczewek zostanie wykorzystany najszybciej, znacznie redukując koszt i czas wykonania złożonych rozwiązań optycznych.

Podsumowanie

Podsumowując powyższe rozważania należy zadać sobie pytanie: czy otrzymanie „soczewki z drukarki” jest w ogóle możliwe? Wydaje się, a nawet jesteśmy pewni, że tak i to na skalę przemysłową. Jako dowód może posłużyć przykład powstałej w 2009 roku belgijsko-holenderskiej firmy Luxexcel. Ta niewielka firma poinformowała, że jest w stanie produkować komercyjne soczewki okularowe wykorzystując druk 3D. O firmie nie było specjalnie głośno do przetomu roku 2022/2023, kiedy to światowy potentat, czyli Meta – właściciel Facebooka, Instagrama i WhatsAppa dokonał największego przejęcia w branży optycznej kupując Luxexcel za kwotę 500 mln dolarów! [5]

Jeżeli korekcja wzroku w niedalekiej przyszłości wciąż będzie opierać się na optyce okularowej, to przyrostowe metody produkcji soczewek będą jedyną słuszną technologią. Ograniczony dostęp do surowców naturalnych, rosnące koszty energii oraz rosnące koszty utylizacji odpadów to największe problemy, z jakimi obecnie borykają się producenci soczewek okularowych. Druk 3D może być odpowiedzią na większość tych problemów, a to stanowić może wielką szansę dla branży optycznej.

Czy możliwe będzie wydrukowanie gotowych okularów w domu, z pominięciem salonu optycznego? Przy zastosowaniu obecnych technik druku 3D raczej nie. Po pierwsze, drukarki 3D oferujące niezbędną do tych celów precyzję wykonania, są nadal drogie. Po drugie, wydrukowane soczewki nie nadają się do użytku bez dodatkowego *post-processingu*, np. polerowania, oraz nie posiadają możliwości nakładania dodatkowych warstw uszlachetniających, takich jak powłoka utwardzająca czy warstwa antyrefleksyjna. Prawdopodobnie konieczność zbudowania linii przemysłowych (polerowanie, uszlachetnienie) i ogromny koszt drukarek 3D o odpowiednich parametrach wydruku spowoduje, że tak jak i teraz niezależni optycy wciąż będą nabywać soczewki u profesjonalnych producentów. Z punktu widzenia optyki okularowego stosującego dziś zdalne szlifowanie z wykorzystaniem skanera opraw niewiele się zmieni, gdyż obecnie stosowane technologie skanowania opraw umożliwiają łatwe odejście od szlifowania soczewki pod kształt oprawy do wydrukowania soczewki o odpowiednim do oprawy kształcie tarczy.

Największą korzyścią płynącą dla użytkownika soczewek okularowych będzie ułatwiona, a przez to tańsza i szybsza indywidualizacja produktu. Współczesne technologie FreeForm już umożliwiają wykonywanie wszystkich produktów w oparciu o znaczące potrzeby indywidualne pacjenta. Ograniczeniem jest cena, na którą wpływ ma, oprócz wykorzystywanych urządzeń, także zużycie surowców oraz energii niezbędnej do produkcji. Redukując te czynniki będzie można zaoferować każdemu klientowi tańsze oraz idealnie dopasowane soczewki.

O wadze i atrakcyjności tej tematyki niech świadczy fakt, że Autorzy otrzymali zaproszenie do przedstawienia wyników tych badań podczas majowej konferencji European Academy of Optometry and Optics w Helsinkach.

Adres korespondencyjny: bozena.zgardzinska@mail.umcs.pl

Piśmiennictwo

1. G. Budzik, P. Siemiński. Techniki przyrostowe. Druk Drukarki 3D, OWPW, Warszawa 2015
2. D.T. Moore. Gradient-index optics: a review. *Appl. Opt.* 19, 1035–1038 (1980)
3. J. Gantes-Nuñez, M. Jaskulski, N. López-Gil, P.S. Kollbaum. Optical characterisation of two novel myopia control spectacle lenses. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2023; 43: 388–401 <https://doi.org/10.1111/opo.13098>
4. <https://klimat.rp.pl/zielone-technologie/art17071761-2021-to-rok-walki-z-plastikiem-biznes-szykuje-sie-nazmiany>
5. www.engadget.com/meta-buys-smart-lensmaker-luxexcel-170629568.html
6. www.statista.com/outlook/cmo/eyewear/spectacle-lenses/worldwide
7. Katalog produktów firmy Multilens; 2022
8. PN-EN ISO 14889:2013 – wersja angielska. „Optyka oftalmiczna – Soczewki okularowe – Wymagania podstawowe dotyczące gotowych soczewek nieokrojonych”. PKN, Warszawa 2013
9. PN-EN ISO 8980-1:2017 – wersja polska. „Optyka oftalmiczna – Gotowe soczewki okularowe nieokrojone – Część 1: Wymagania dotyczące soczewek jednoogniskowych i wieloogniskowych”. PKN, Warszawa 2017
10. PN-EN ISO 8980-2:2017 – wersja polska. „Optyka oftalmiczna – Gotowe soczewki okularowe nieokrojone – Część 2: Wymagania dotyczące soczewek progresywnych”. PKN, Warszawa 2017
11. PN-EN ISO 8980-3:2013 – wersja angielska. „Optyka oftalmiczna – Gotowe soczewki okularowe nieokrojone – Część 3: Wymagania dotyczące transmisji i metody pomiaru”. PKN, Warszawa 2013
12. E. Ratajczak, I. Moskowiak (Kórnik), A.M. Staszak. Mikroplastik – megaproblem. *Wszczęświat*, marzec 2021
13. R. Dylla-Spears et al. 3D printed gradient index glass optics. *Sci. Adv.* 6, eabc7429(2020).DOI:10.1126/sciadv.abc7429
14. M. Zając. Technologia free-form w przemyśle optycznym. *OPTYKA* 1(80)/2023
15. M. Zając, M. Ciebiera. *Okulary – Podręcznik dla optyków*. DWE, Wrocław 2024