

**Czasopismo Naukowo-Techniczne
Wydziału Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy**

Scientific-Technical Journal of
Mechanical Engineering Faculty of
UTP University of Science and Technology in Bydgoszcz



POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

DEVELOPMENTS
IN MECHANICAL
ENGINEERING

7(4)

2016

Wydawnictwa Uczelniane
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
w Bydgoszczy



ZESPÓŁ REDAKCYJNY
EDITORIAL BOARD

Przewodniczący (redaktor naczelny) – Editor-in-chief – Stanisław MROZIŃSKI

Redaktorzy Działowi – Branch editors:

Eksploatacja Maszyn <i>Machine Operating and Maintenance</i>	Bogdan LANDOWSKI
Inżynieria Biomedyczna <i>Biomedical Engineering</i>	Adam MAZURKIEWICZ
Inżynieria Produkcji <i>Production Engineering</i>	Marek SZCZUTKOWSKI
Mechanika i Konstrukcja Maszyn <i>Mechanics and Machinery Design</i>	Janusz ZACHWIEJA
Maszyny i urządzenia energetyczne <i>Machines and energetic devices</i>	Marcin ZASTEMPOWSKI
Transport – <i>Transport</i>	Marcin ŁUKASIEWICZ
Sekretarz Zespołu – Executive secretary	Sylwester WAWRZYŃIAK

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL PROGRAMME COMMITTEE

Bogdan ŻÓŁTOWSKI – **przewodniczący – chairman** (PL – UTP)

Maria ČZARNOGURSKÁ (SK)	Edmund DULCET (PL – UTP)
Jurek DUSZCZYK (NL)	Friedrich FRANEK (A)
Andrzej GOŁĄBCZAK (PL – PL)	Henryk HOLKA (PL – UTP)
Lidia ILIEVA-MITUTSOVA (BG)	Marian JANCZAREK (PL– PL)
Tomasz KICZKOWIAK (PL – PKo.)	Tomasz LIPIŃSKI (PL – UWM)
Ivan OBORSKI (UK)	Dariusz OZIMINA (PL – PŚw.)
Manfred PAHL (D)	Kazimierz PESZYŃSKI (PL – UTP)
Jindřich PETRUŠKA (CZ)	Raj B.K.N. RAO (GB)
Marian SZCZEREK (PL – ITE PIB)	Vasily S. SHEVCHENKO (BL)
	Zdeněk TRÁVNIČEK (CZ)

Opracowanie redakcyjne i techniczne – mgr Michał Górecki, mgr inż. Tomasz Szałajda

Projekt okładki – mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2016

Utwór w całości ani w fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Praca powstała przy wsparciu projektu „Realizacja II etapu regionalnego Centrum Innowacyjności” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISSN 2300-3383

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego

Redaktor Naczelny: prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski

ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426

e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.wu.utp.edu.pl>

Wyd. I. Nakład 50 egz. Ark. aut. 4. Ark. druk. 6.

Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. ks. A. Kordeckiego 20

SPIS TREŚCI
CONTENTS

Bartosz Graczyk, Remigiusz Polasik Wpływ infrastruktury drogowej na bezpieczeństwo ruchu drogowego 5 The influence of the road infrastructure on the road traffic safety	5
Paweł Maćkowiak, Dominika Magdziarz, Radosław Tomkiewicz, Patrycja Kabat, Maciej Kotyk Wielkość i liczba wad w elementach wyprodukowanych metodą FDM w zależności od parametru prędkości wytwarzania 17 Quality items obtained by FDM depending on the parameter manufacturing speed	17
Piotr Zimniak Badanie anizotropii <i>in situ</i> w procesie selektywnego spiekania laserem proszków tworzyw PA12-CF 33 Study of <i>in situ</i> anisotropy in the selective laser sintering process of powder PA12-CF	33
Emil Smyk Metoda porównania wpływu zmiany parametrów zaworu osiowosymetrycznego na jego działanie 47 Method of influence comparison of change of axisymmetric valve parameters on his operation	47
Michał Stopel, Dariusz Skibicki, Jakub Ruszkowski Analiza numeryczna testu balistycznego pocisku kalibru 7.92×33 57 Numerical analysis of a ballistic test of a bullet cal. 7.92×33	57
Tadeusz Mikołajczyk, Marika Skornia, Andrzej Łukaszewicz Koncepcja pasywnego stanowiska do ćwiczeń wzroku 67 The concept of passive device for eyesight exercises	67
Tadeusz Mikołajczyk, Paweł Walkowiak, Marika Skornia Egzoszkielec kończyny górnej o jednym stopniu swobody 79 Upper limb exoskeleton with one degree of freedom	79

Marietta Markiewicz-Patalon, Jerzy Kaszkowiak	
New systems of municipal waste's management illustrated	
with an example of selected districts	87

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

7(4)/2016, 5-15

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Bartosz GRACZYK, Remigiusz POLASIK

**WPLYW INFRASTRUKTURY DROGOWEJ
NA BEZPIECZEŃSTWO RUCHU DROGOWEGO**

Streszczenie: Bezpieczeństwo ruchu drogowego (BRD) jest zagadnieniem odnoszącym się do systemów transportu drogowego, które są systemami socjotechnicznymi typu człowiek – obiekt techniczny (pojazd) – otoczenie, <C–OT–O>. Wszystkie czynniki występują w bezpośredniej synergii o różnym nasileniu. BRD zależy więc od wielu zmiennych, począwszy od cech charakteru człowieka oraz jego zdolności psychomotorycznych, poprzez sprawność oraz parametry obiektu technicznego, a skończywszy na stanie infrastruktury drogowej – jednym z głównych elementów otoczenia. W pracy podjęto próbę oceny oddziaływania otoczenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo ruchu drogowego, otoczenie drogi, infrastruktura drogowa, drogi wybaczące błędy kierowców, wypadek drogowy

1. WSTĘP

Bezpieczeństwem ruchu drogowego nazywa się stan osiągnięty w wyniku podejmowanych działań i środków ekonomicznych, prawnych i inżynierskich, umożliwiających wyeliminowanie lub ograniczenie zagrożeń w ruchu drogowym [4].

W systemach transportu drogowego przez pojęcie otoczenie należy rozumieć: drogi i ich wyposażenie, sąsiadujące z drogą elementy infrastruktury, aktualne warunki atmosferyczne oraz innych uczestników ruchu drogowego [6].

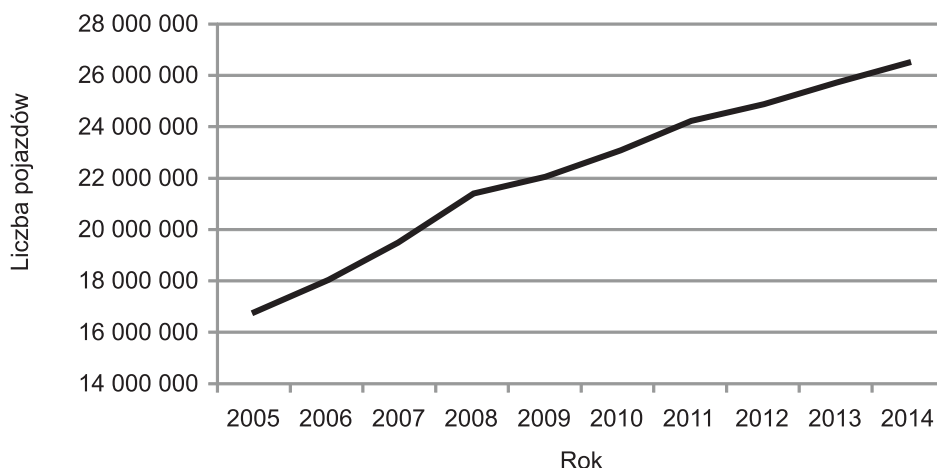
Problemem, któremu muszą sprostać projektanci dróg, ich zarządcy, organizatorzy ruchu drogowego oraz służby egzekwujące przestrzeganie zasad Kodeksu Drogowego, jest systematyczne zwiększanie się liczby zarejestrowanych pojazdów silnikowych w Polsce. Rysunek 1 przedstawia tendencję wzrostową tego zjawiska w Polsce w czasie dziesięciu lat [11].

W 1997 roku odnotowano największą liczbę wypadków drogowych na przestrzeni kilkudziesięciu lat w Polsce. Doszło wówczas do 66 586 wypadków. 18 lat później, w roku 2015, liczba wypadków wyniosła ponad połowę mniej – 32 967. Zmniejszanie się liczby wypadków drogowych następuje stopniowo, z roku na rok (choć odnotowano także trzykrotne zahamowanie tej tendencji) [11]. Stanowi to potwierdzenie tezy, iż inwestycje w infrastrukturę drogową, mimo zwiększania się liczby zarejestrowanych pojazdów, przynoszą za-

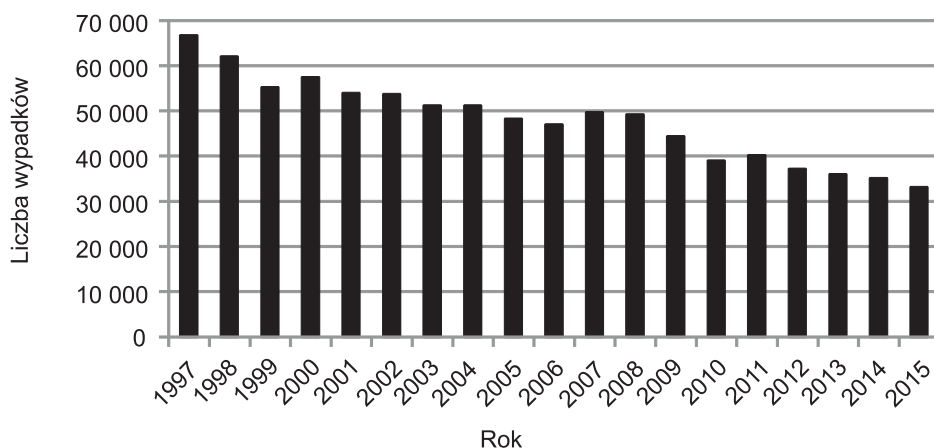
inż. Bartosz GRACZYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,
Koło Naukowe Transportowców, e-mail: bargacz@gmail.com

inż. Remigiusz POLASIK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,
Koło Naukowe Transportowców

mierzony skutek. Rysunek 2 ukazuje tendencję spadkową liczby wypadków drogowych w Polsce w latach 1997-2015 [11].



Rys. 1. Wykres liczby zarejestrowanych pojazdów silnikowych w Polsce w latach 2005-2014 [11]
Fig. 1. The graph of the number of registered motor vehicles in Poland in the period 2005-2014 [11]



Rys. 2. Wykres liczby wypadków drogowych w Polsce w latach 1997-2015 [11]
Fig. 2. The graph of the number of car accidents in Poland in the period 1997-2015 [11]

Jak wykazuje analiza statystyk [11] dotyczących bezpieczeństwa ruchu na polskich drogach, największa liczba wypadków drogowych koncentruje się w obszarze zabudowanym – ten bowiem generuje największe natężenie ruchu drogowego. Więcej osób ginie jednak w wyniku wypadków, do których dochodzi w obszarze niezabudowanym. Osiągane w nim prędkości są większe, co w sposób zdecydowany wpływa na ciężkość wypadków drogowych, a więc i liczbę ofiar.

2. ANALIZA STANU ISTNIEJĄCEGO

Obciążenie człowieka sprawstwem zdarzeń w ruchu drogowym jest powszechną praktyką. Kierujący pojazdem decyduje, z jaką prędkością, w jakim stanie oraz, w jaki sposób prowadzi pojazd. Otoczenie drogi wpływa na zdarzenia drogowe. Prawie zawsze zdarzenie drogowe powstaje w wyniku błędu człowieka, ale błąd ten popełniany jest często przez niego w wyniku określonej, niekorzystnej sytuacji w ruchu drogowym lub określonej wady drogi [5, 7].

2.1. Niedostateczne cechy techniczno-eksploatacyjne nawierzchni drogowej

Bez wątplenia znaczący wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego mają cechy techniczno-eksploatacyjne nawierzchni drogowej. Regularna ocena stanu nawierzchni dróg wspomaga efektywne planowanie remontów oraz niezbędnych zabiegów utrzymaniowych. Kontrolowane parametry, takie jak równość podłużna, równość poprzeczna czy współczynnik tarcia opisujący własności przeciwpoślizgowe, pozwalają nadzorować stan techniczny, który winien być adekwatny do założonego poziomu bezpieczeństwa na drodze. Uszkodzenia powierzchniowe nawierzchni drogowej w postaci rys, pęknięć siatkowych, pęknięć pojedynczych, wybojów, ubytków i wykruszeń, które pojawiają się w procesie starzenia eksploatacyjnego, prowadzą do dalszej degradacji, a w konsekwencji do obniżenia poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego [5]. Uszkodzenia powstają na skutek zmęczenia materiału tworzącego nawierzchnię drogi, a także związane są z niszczącym wpływem warunków atmosferycznych. Intensywność ich występowania w Polsce wynika z niedoinwestowania dróg, czego konsekwencją są dalsze zaniedbania w zakresie ich utrzymania. Osobną grupę stanowią uszkodzenia powstałe na skutek zdarzeń w ruchu drogowym czy innych przypadków losowych.

Śliska jezdnia o niedostatecznej wartości współczynnika przyczepności czy też zabrudzona na skutek nieprawidłowego utrzymania, sprzyja powstawaniu zagrożeń w ruchu drogowym. Koleiny, a więc wzdłużne wgniecenia drogi spowodowane przez ciężkie pojazdy, wypełniające się spływającą wodą znacznie obniżają komfort prowadzenia pojazdu, a zwiększają ryzyko poślizgu. Szeroko pojęte wyboje wpływają na konieczność dokonywania przez kierującego gwałtownych, niebezpiecznych i nieprzewidywalnych dla innych uczestników ruchu drogowego, manewrów. Zwiększa to jego zmęczenie, a drgania obniżają koncentrację uwagi, co więc pośrednio może wpłynąć na zaistnienie zdarzenia drogowego. Nie zostanie ono jednak w statystykach ujęte jako spowodowane nieprawidłowym stanem jezdni, dlatego należy mieć świadomość, że stan infrastruktury drogowej znacząco wpływa na bezpieczeństwo ruchu drogowego.

2.2. Brak odpowiedniej hierarchizacji ciągów dróg

Brak odpowiedniej hierarchizacji ciągów dróg w Polsce wpływa negatywnie w zakresie funkcji i zadań, a zatem również prędkości oraz dostępności [5]. Ruch kordonowy, a więc obejmujący pojazdy dojeżdżające do miasta, wyjeżdż-

działające oraz przejeżdżające przez nie, łączy się na sieci drogowej z ruchem lokalnym. Utrudnia to zarządzanie siecią oraz utrzymanie na niej pożądanego poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Ograniczona przepustowość nie jest w stanie sprostać natężeniu ruchu generowanego przez ruch zewnętrzny. Pojazdy ciężkie powodują uszkodzenia infrastruktury drogowej o nośności nieprzystosowanej do obsługi ich ruchu w obrębie miast. Ponadto ograniczają widoczność, co może prowadzić do wypadków z udziałem pieszych, gdzie ruch poprzeczny charakteryzuje się dużym natężeniem. Niedostateczna hierarchizacja dróg przy niejednorodnej strukturze rodzajowej potoku pojazdów powoduje duże zapotrzebowanie na wyprzedzanie, kończące się często wypadkiem drogowym. Ze względu na bezpieczeństwo drogowe dobrym rozwiązaniem okazuje się więc tworzenie infrastruktury drogowej w postaci obwodnic miast i skierowanie ruchu tranzytowego na te szlaki, będące najczęściej w ciągach dróg klasy S oraz A. Charakteryzują się dużą przepustowością oraz bezkolizyjnymi skrzyżowaniami z innymi potokami ruchu. Ułatwia to także utrzymanie w należyтым stanie tych korytarzy transportowych, których zadaniem jest prowadzenie ruchu najcięższego, wymagającego najwyższej klasy dróg [5].

2.3. Niejednorodna geometria infrastruktury drogowej

Kolejnym aspektem jest niejednorodna geometria infrastruktury drogowej. W przebiegu długich odcinków prostych z łukami poziomymi o dużych promieniach, rzędu 3000 m, 1800 m, zazwyczaj nie występuje ograniczenie prędkości lub jest ono niewielkie. Pułapką dla kierujących w takich miejscach jest zastosowanie w pewnym punkcie trasy łuku poziomego o małym promieniu, rzędu 100 m. Takie miejsce, oznaczone dużymi ograniczeniami prędkości, jest miejscem na mapie drogowej, w którym kierujący przyzwyczajony do jazdy z dużą prędkością jest zmuszony do nagłej, znacznej jej redukcji. Jego przyzwyczajenie, spowodowane jazdą z dużymi prędkościami na pozostałych odcinkach drogi, osłabia jego czujność. Kierujący jest przekonany, że i ten łuk pokona z większą prędkością, niestety często jest w błędzie. Takie punkty znane są z dużej liczby zdarzeń drogowych, w których nie dostosowano prędkości do panujących ograniczeń.

Analizy zdarzeń drogowych dowodzą, że bardzo duży udział wśród sprawców zdarzeń drogowych mają osoby zamiejscowe. Osoby te średnio czterokrotnie częściej powodują zdarzenie drogowe niż osoby miejscowe, znające charakterystykę istniejącego odcinka. Jest to spowodowane faktem, że kierujący ci poprzez słabszą znajomość sieci drogowej popełniają błędy w miejscach nietypowych pod względem rozwiązania geometrycznego i organizacji ruchu, o niedostatecznej widoczności i trudnych do oceny pod względem sposobu jazdy [5].

2.4. Brak oznakowania poziomego na drogach niższych kategorii

Znaczący wpływ na poprawę bezpieczeństwa ruchu, zwłaszcza w porze nocnej, ma stosowanie oznakowania poziomego – linii krawędziowych oraz linii segregacyjnych – na nieoświetlonych drogach zamiejskich. Przepisy regulu-

ją, na jakich kategoriach dróg oznakowanie poziome powinno być obligatoryjnie stosowane (drogi krajowe oraz wojewódzkie), a na jakich jedynie zaleca się ich stosowanie (drogi powiatowe oraz gminne) [8]. Na drogach powiatowych i gminnych, nieposiadających linii krawędziowych, a także często utwardzonego pobocza, komfort i bezpieczeństwo jazdy są niskie. Spowodowane jest to słabą widocznością pasa ruchu, na którym nałożone podczas napraw łąty postrzegane mogą być jako jednorodne z wybojami, a ewentualna próba ich ominięcia może skutkować opuszczeniem jezdni i prowokowaniem zagrożenia w ruchu drogowym. Problem jest tym bardziej istotny, iż poboczem, szczególnie na tej kategorii drogach, często poruszają się piesi. Brak linii segregacyjnych powoduje niebezpieczne sytuacje w trakcie wymijania pojazdów, kiedy kierujący oślepiani światłami pojazdów nadjeżdżających z naprzeciwka, w przekroju poprzecznym drogi zmuszeni są orientować się jedynie intuicyjnie. Stwarza to ryzyko bardzo groźnych uderzeń czołowych oraz bocznych, których skutki są najcięższe ze względu na skumulowaną energię kinetyczną poruszających się pojazdów.

2.5. Drzewa w pasie drogowym

Polskie przepisy nie regulują odległości, w jakiej powinny znajdować się drzewa w stosunku do jezdni. Istnieją jedynie wytyczne dotyczące wysokości skrajni drogi jako wolnej, niezabudowanej przestrzeni nad jezdnią oraz innymi elementami jej przekroju poprzecznego, w zależności od tego, czy występują [9]. Tymczasem kolizje z drzewami, określanymi jako przydrożne, należą do wypadków drogowych najcięższych w skutkach. Istnienie związku pomiędzy wypadkami drogowymi a drzewami przydrożnymi jest spowodowane w większości przypadków wypadnięciem pojazdu poza jezdnię. W Polsce na licznych odcinkach dróg pozbawionych poboczy drzewa rosną przy krawędzi jezdni. W takiej sytuacji zdarzenia drogowe powiązane są nie z wypadnięciem z jezdni, a z najechaniem na drzewo rosnące w jej bezpośrednim sąsiedztwie [1]. Według statystyk [11] dotyczących wypadków drogowych i ich skutków w Polsce w roku 2015, w 1769 wypadkach spowodowanych najechaniem na drzewo zginęło 405 osób, a 2167 zostało rannych. Do oceny rozmiaru zagrożenia odpowiednimi skutkami wypadku w poszczególnych rodzajach zdarzeń drogowych, wyznaczany jest wskaźnik W_z określający liczbę ofiar śmiertelnych na 100 wypadków danego rodzaju oraz wskaźnik W_r – analogicznie w odniesieniu do osób rannych [1]:

$$W_z = \frac{\text{liczba ofiar śmiertelnych w danym rodzaju wypadku drogowego}}{\text{liczba danego rodzaju wypadków drogowych}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$W_r = \frac{\text{liczba osób rannych w danym rodzaju wypadku drogowego}}{\text{liczba danego rodzaju wypadków drogowych}} \cdot 100 \quad (2)$$

Wskaźnik W_z dla najechania na drzewo jest najwyższy spośród 13 rodzajów zdarzeń drogowych analizowanych w ramach dostępnych danych statystycznych, a wręcz wyraźnie przewyższa pozostałe, co odzwierciedlają dane zawarte w tabeli 1 [11]. Ilustruje to skalę i powagę problemu, często podawanego w wątpliwość przez ekologów. Obecność drzew w pasie drogowym nie współistnieje z koncepcją dróg wybaczących błędy kierowców.

Tabela 1. Wypadki drogowe i ich skutki w Polsce w 2015 roku [11]

Table 1. Road accidents and its effects in Poland in 2015 [11]

Rodzaj zdarzenia		Wypadki	Ofiary śmiertelne	Ranni	W_z	W_r
Zderzenie się pojazdów w ruchu	boczne	9768	548	12286	5,61	125,78
	czołowe	3049	511	4837	16,76	158,64
	tylne	3985	211	5108	5,29	128,18
Najechanie	na pieszego	8436	906	7989	10,74	94,70
	na drzewo	1769	405	2167	22,89	122,50
	na słup, znak	514	39	653	7,59	127,04
	na unieruchomiony pojazd	319	34	386	10,66	121,00
	na barierę ochronną	329	23	418	6,99	127,05
	na zwierzę	216	10	265	4,63	122,69
	na dziurę, wybój	44	4	52	9,09	118,18
Wywrócenie się pojazdu		2646	170	3336	6,42	126,08
Wypadek z pasażerem		651	5	842	0,77	129,34
Inne rodzaje		1241	72	1439	5,80	115,95

3. DOBRE PRAKTYKI W ZAKRESIE INFRASTRUKTURY DROGOWEJ

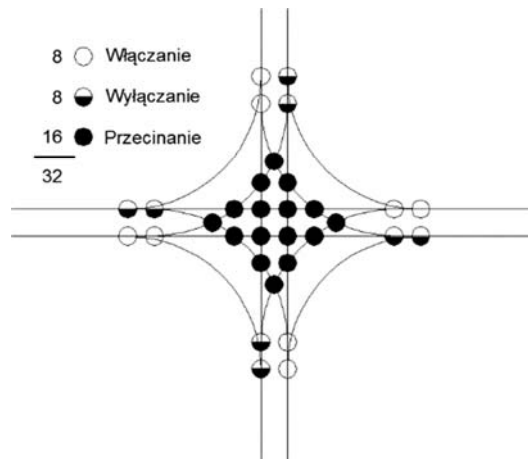
Rozwój nauki i techniki powoduje powstawanie wielu rozwiązań mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa ruchu drogowego. W systemach transportu drogowego największy postęp w tym obszarze dotyczy pojazdów samochodowych. Wdrożenie rozwiązań w otoczeniu drogi stanowi długotrwałą operację, wymagającą współdziałania specjalistów wielu dziedzin.

3.1. Skrzyżowania o ruchu okrężnym

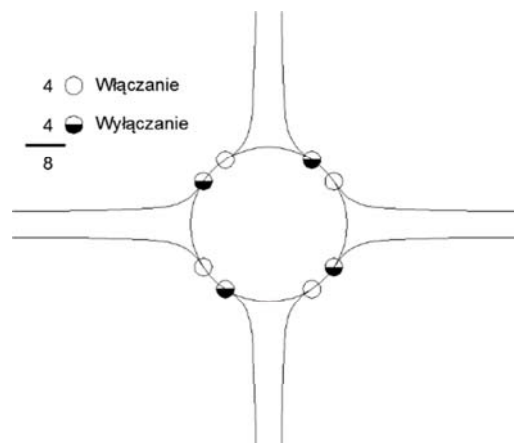
W 1893 roku w amerykańskim stanie Ohio powstało pierwsze skrzyżowanie typu rondo. Do Europy ten „wynalazek infrastrukturalny” dotarł w 1907 roku, kiedy to we Francji zbudowano skrzyżowanie o ruchu okrężnym. W Polsce pierwsze rondo powstawały w okresie socjalizmu, lecz były głównie stosowane do prowadzenia ruchu na dużych skrzyżowaniach. Tym mniejszym najczęściej zapewniano krzyżowanie zwykłe, a także z kanalizowaniem częściowym lub

całkowitym [5]. Zdecydowane zwiększenie intensywności wyboru małych rond jako rozwiązania koncepcyjnego dla skrzyżowań o małej powierzchni odnotowano na przełomie XX i XXI wieku.

Najważniejszą zaletą skrzyżowań typu rondo jest mniejsza liczba punktów kolizji niż w przypadku zwykłego krzyżowania dróg [5]. Zwykle skrzyżowanie czterowlotowe ma aż 32 punkty kolizji (rys. 3), spośród których po 8 dedykowanych jest relacjom włączania i wyłączania. Natomiast 16 dotyczy punktów kolizji generujących największe zagrożenie w obszarze skrzyżowania – przecinania toru ruchu innego pojazdu. Na rondzie jednopasowym czterowlotowym, które powstaje często na skutek modernizacji skrzyżowania zwykłego, istnieje tylko 8 punktów kolizji (rys. 4) opartych na włączaniu w inny tor ruchu oraz wyłączeniu.



Rys. 3. Liczba punktów kolizji na skrzyżowaniu zwykłym czterowlotowym [5]
 Fig. 3. The number of collision points at the 4-way crossroad [5]



Rys. 4. Liczba punktów kolizji na skrzyżowaniu typu rondo jednopasowe czterowlotowe [5]
 Fig. 4. The number of collision points at the 4-way 1-lane roundabout [5]

Niniejszy opis ukazuje wyższość stosowania skrzyżowania typu rondo jako rozwiązania bezpieczniejszego. Występujące na rondzie jednopasowym relacje opierają się tylko na włączaniu i wyłączaniu, a więc manewrach stosunkowo bezpiecznych w ruchu drogowym. Znajduje to obecnie odzwierciedlenie w praktyce inżynierskiej, gdzie skrzyżowania typu rondo są powszechnie stosowane. Budowane są na większości klas dróg (poza A i S). Zazwyczaj ronda jednopasowe stosowane są w obszarze niezabudowanym przy skrzyżowaniach dróg klasy GP i G oraz w obszarze zabudowanym na drogach klasy G, Z, L, a nawet D.

3.2. Urządzenia bezpieczeństwa infrastruktury drogowej

Sposoby kształtowania bezpieczeństwa ruchu drogowego dzielą urządzenia infrastruktury drogowej na pasywne oraz aktywne urządzenia bezpieczeństwa [6].

Pasywne urządzenia bezpieczeństwa to:

- urządzenia do organizowania ruchu,
- urządzenia informujące i chroniące kierujących przed niebezpiecznymi miejscami lub sytuacjami na drodze,
- urządzenia poprawiające widoczność lub dostrzegalność miejsca oraz oznakowania drogowego,
- urządzenia stosowane do spowalniania ruchu.

Zadaniem tych urządzeń jest umożliwienie kierującemu uniknięcia zdarzenia drogowego poprzez pasywne oddziaływanie na niego [5, 6].

Aktywne urządzenia bezpieczeństwa to urządzenia, które powodują zmniejszenie skutków zdarzeń drogowych dla użytkowników drogi poprzez ich aktywną ochronę (analogia do bezpieczeństwa biernego pojazdu). Zalicza się do nich:

- urządzenia pochłaniające energię zderzenia,
- urządzenia naprowadzające pojazd na właściwy tor jazdy,
- urządzenia powstrzymujące całkowicie pojazd,
- urządzenia minimalizujące uszkodzenia pojazdu,
- urządzenia przeznaczone dla pieszych i rowerzystów.

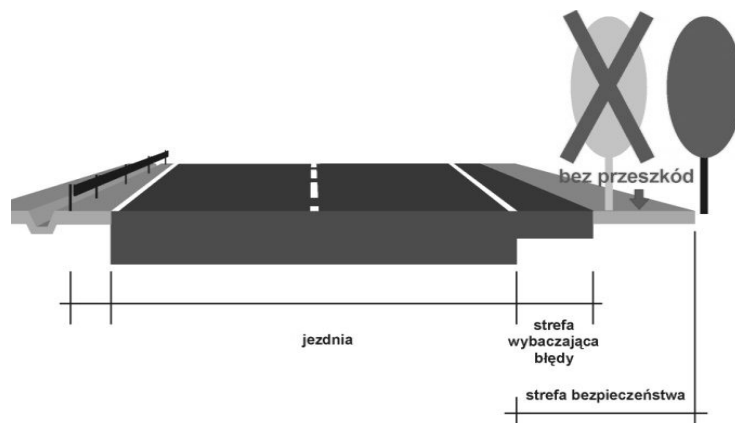
Zminimalizowanie skutków zdarzeń drogowych dla kierujących oraz pasażerów ma miejsce w sytuacji bezpośredniego kontaktu pojazdu z wyżej wymienionymi urządzeniami podczas niekontrolowanego opuszczenia drogi. Pochłanianie energii zderzenia pojazdu następuje w urządzeniach głównie poprzez ich odkształcenie [5, 6].

Z aktywnymi urządzeniami bezpieczeństwa związana jest koncepcja dróg „wybaczących” błędy kierowców.

3.3. Drogi „wybaczące” błędy kierowców (ang. *forgiving roads*)

Oprócz urządzeń bezpieczeństwa, koncepcja dróg „wybaczących” błędy kierowców obejmuje również dwie strefy. Pierwsza z nich – strefa „wybacząca” błędy jako pas pobocza, który w przypadku popełnienia błędu lub zaistnienia nieprzewidzianego zdarzenia, którego następstwem jest niespodziewane zje-

chanie pojazdu z jezdni – umożliwia bezpieczny powrót na prawidłowy tor jazdy. Druga zaś – strefa bezpieczeństwa, zawierająca również strefę „wybaczącą” błędy, to pas wolny od wszelkich przeszkód poza krawędzią jezdni, który złagodzi skutki wypadnięcia pojazdu z jezdni. Położenie stref w pasie drogowym przedstawiono na rysunku 5 [2].



Rys. 5. Schemat strefy bezpieczeństwa oraz wybaczącej błędy kierowców [2]
 Fig. 5. The scheme of safety zone and forgiving roadside [2]

W strefie bezpieczeństwa, według koncepcji dróg „wybaczących”, nowo budowane odcinki dróg powinny być bezwzględnie pozbawione drzew, słupów czy innych niczym nieosłoniętych przeszkód. W przypadku dróg istniejących jednym z rozwiązań jest stosowanie barier energochłonnych między jezdnią a obiektami występującymi w pasie drogowym.

Droga powinna być tak zaprojektowana, aby kierujący nie był zmuszony do nieustannej koncentracji uwagi na unikaniu manewrów nieprawidłowych, natomiast winna zapewniać konieczność koncentrowania uwagi jedynie na bezpiecznym prowadzeniu pojazdu [3].

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy danych statystycznych [10, 11] oraz przeglądu literatury [1-9], dokonanych na potrzeby realizacji pracy stwierdzono, iż zwiększenie bezpieczeństwa ruchu drogowego poprzez kształtowanie otoczenia drogi powinno koncentrować się między innymi na:

- utrzymaniu nawierzchni drogowej w należyтым stanie technicznym,
- odpowiedniej hierarchizacji ciągów dróg,
- budowie obwodnic miast i skierowaniu ruchu kordonowego na te szlaki,
- segregacji ruchu pieszego, rowerowego, samochodowego, tramwajowego,
- uspokajaniu ruchu w strefach mieszkaniowych,

- wdrażaniu koncepcji tzw. dróg samoobjaśniających charakteryzujących się łatwo rozpoznawalną funkcją i sposobem użytkowania, segregacją ruchu ze względu na użytkowników i prędkość,
- budowie urządzeń dla niechronionych uczestników ruchu drogowego (chodniki, drogi dla rowerów),
- urządzaniu bezpiecznych przejść dla pieszych oraz odpowiednim organizowaniu przestrzeni w obszarze przejścia,
- wyborze rozwiązań ograniczających liczbę punktów kolizji podczas krzyżowania dróg,
- zarządzaniu prędkością,
- stosowaniu urządzeń bezpieczeństwa infrastruktury drogowej,
- eliminowaniu z pasa drogowego niczym nieosłoniętych przeszkód,
- wdrażaniu inteligentnych systemów transportowych (ITS) w ramach zarządzania ruchem drogowym (np. znaki zmiennej treści, systemy sterowania ruchem).

W ciągu ostatnich lat w Polsce przeprowadzanych jest wiele inwestycji drogowych, których celem jest przede wszystkim zwiększenie bezpieczeństwa ruchu drogowego poprzez przebudowę oraz budowę nowych odcinków dróg. Zauważalny jest fakt korzystnego wpływu tych inwestycji. Nadal jednak pozostaje wiele do wykonania w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego, o czym świadczą statystyki liczby ofiar śmiertelnych na 100 wypadków w Polsce na tle krajów europejskich. Według danych opublikowanych w bazie CARE, w 2014 roku Polska zajęła niechlubne pierwsze miejsce w tejże statystyce [10].

W pracy przedstawiono jedynie przykłady niedostatecznego stanu istniejącego oraz dobrych praktyk w kształtowaniu otoczenia drogi. Mimo że zakres tematu jest o wiele bardziej obszerny, nawet w świetle przedstawionych przykładów, wpływ infrastruktury drogowej na bezpieczeństwo ruchu drogowego jest bezsprzeczny.

LITERATURA

- [1] BIEROŃSKI J.: Problem zieleni urządzonej w pasach drogowych w Polsce. *Problemy Ekologii Krajobrazu* 17, 2006.
- [2] BUDZYŃSKI M. i zespół: Opracowanie zasad i wdrożenia działań dla zmniejszenia ciężkości wypadków. Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, Gdańsk 2009.
- [3] DWORZECKI J.: Bezpieczeństwo ruchu drogowego w Polsce (zarys problematyki). *Zeszyty Naukowe WSOWL* 4, 2011.
- [4] MICHAŁSKI R. i zespół: Bezpieczeństwo ruchu drogowego na Warmii i Mazurach. *Biuletyn WR BRD* 1, 2003.
- [5] SZCZURASZEK T. i zespół: Bezpieczeństwo ruchu miejskiego. WKŁ, Warszawa, 2008.
- [6] Raport Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego: *Narodowy Program Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego 2013-2020*, 2013.
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (Dz.U. nr 220, poz. 2181).

- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 czerwca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. nr 43 poz. 430).
- [9] WICHER J.: Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego. WKŁ, Warszawa, 2012.
- [10] Źródło danych: Europejska Baza Danych o Wypadkach Drogowych CARE.
- [11] Źródło danych: Komenda Główna Policji, System Ewidencji Wypadków i Kolizji.

THE INFLUENCE OF THE ROAD INFRASTRUCTURE ON THE ROAD TRAFFIC SAFETY

Summary: In hereby work was described the influence of the road infrastructure on the road traffic safety. Road traffic safety is a problem relating to road transport systems which are social engineering systems of the type the man – the technical object – the environment. This paper attempts to evaluate especially the impact of the environment of the road on traffic road safety.

Key words: road traffic safety, environment of the road, road infrastructure, forgiving roads, road accident

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

7(4)/2016, 17-31

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Paweł MAĆKOWIAK, Dominika MAGDZIARZ, Radosław TOMKIEWICZ,
Patrycja KABAT, Maciej KOTYK

**WIELKOŚĆ I LICZBA WAD W ELEMENTACH
WYPRODUKOWANYCH METODĄ FDM W ZALEŻNOŚCI
OD PARAMETRU PRĘDKOŚCI WYTWARZANIA**

Streszczenie: W pracy zaprezentowano rodzaje wad występujących w elementach wytwarzanych technologią szybkiego prototypowania FDM. Przedstawiono wyniki badań wpływu prędkości wytwarzania na liczbę i wielkość wad oraz opisano przyczyny ich powstawania.

Słowa kluczowe: FDM, szybkie prototypowanie, wady, prędkość wytwarzania

1. WPROWADZENIE

W procesie projektowania i wdrażania niektórych, nowych produktów buduje się prototypy. Wykrycie problemów na etapie prototypu umożliwia wprowadzenie zmian, których koszt wdrożenia jest mniejszy niż po uruchomieniu serii produkcyjnej [7, 8].

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania urządzeniami do szybkiego prototypowania. Przyczyną tego stanu jest opracowanie i rozpowszechnienie przyrostowej technologii FDM (*fused deposition modeling*), polegającej na nakładaniu kolejnych warstw tworzywa wytłaczanego przez głowicę. Urządzenia wykorzystujące tę technologię nie są uciążliwe dla otoczenia podczas eksploatacji, nie wytwarzają szkodliwych substancji, nie generują znacznego hałasu, są stosunkowo małych gabarytów. Połączenie tych zalet z niskim kosztem urządzeń i materiałów eksploatacyjnych powoduje powszechne ich zastosowanie [1, 2, 7].

Wytwarzanie prototypów technologią FDM jest czasochłonne. Jedną z możliwości przyspieszenia procesu jest zwiększanie prędkości głowicy nanoszącej tworzywo. Wzrost prędkości może jednak powodować pojawienie się lub powiększenie występujących wad w wytwarzanych elementach.

mgr Paweł MAĆKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

Dominika MAGDZIARZ, UTP Bydgoszcz

Radosław TOMKIEWICZ, UTP Bydgoszcz

Patrycja KABAT, UTP Bydgoszcz

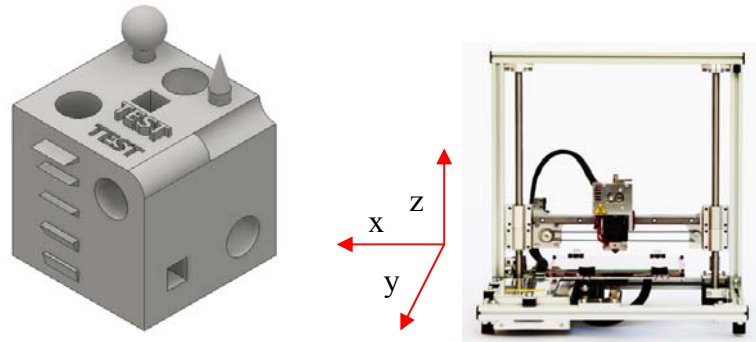
mgr inż. Maciej KOTYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: Maciej.Kotykat@utp.edu.pl

Anitha, Arunachalam, Radhakrishnan [1] przeprowadzili badania mające na celu ocenę wpływu poszczególnych parametrów na chropowatość powierzchni wytwarzanych prototypów. Wynikiem pracy było wyznaczanie najbardziej efektywnej wysokości warstw oraz szybkości wytwarzania. Górski, Kuczko, Wichniarek [8] badali wpływ parametrów procesu wytwarzania próbek metodą FDM na ich powtarzalność i zgodność z modelem numerycznym. Próbkę mierzono za pomocą skanera 3D. Wyniki badań wykazują na istotny wpływ orientacji próbki w komorze roboczej oraz wpływ wielkości elementu na dokładność jego wykonania. Tyberg, Bøhn [11] przeprowadzili badania mające na celu redukcję czasu wytwarzania prototypów w technologii FDM poprzez maksymalizację grubości warstw materiału nakładanego przez głowicę.

W pracy przedstawiono wady występujące w prototypach i opisano przyczyny ich powstania. Celem dodatkowym było określenie zależności pomiędzy prędkością nanoszenia tworzywa a wielkością i liczbą występujących wad w wytworzonych próbkach.

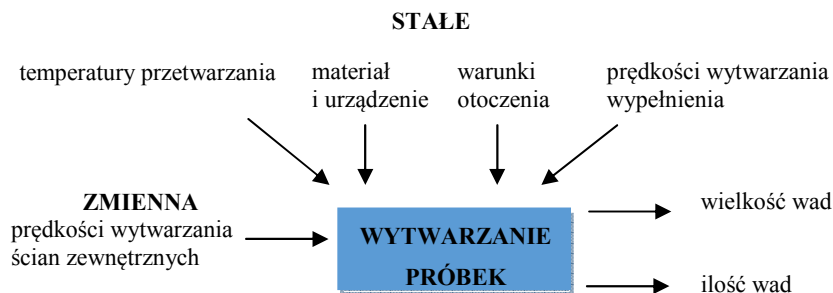
2. METODA BADAWCZA

Celem przeprowadzenia badań zaprojektowano model testowy. Na podstawie przeglądu literatury zaproponowano występowanie w nim powierzchni, przy których odtworzeniu spodziewano się pojawienia wad. Za pomocą jednego detalu umożliwiono sprawdzenie wielu rodzajów wad, które w dotychczasowych pracach oceniane były oddzielnie na osobnych modelach. Wymiary detalu testowego stanowiącego sześciąt, wyłączając elementy wypukłe, wynoszą $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ (rys. 1). Detal testowy ma płaszczyzny umożliwiające pomiary wymiarów zewnętrznych i wewnętrznych. W modelu przewidziano pochylenia ścianek pod kątem 15° , 30° , 45° , 60° , 75° względem płaszczyzny pionowej. Otwory przelotowe oraz kieszenie o przekroju kwadratowym leżą w każdej osi detalu, co umożliwia weryfikację i porównanie błędów związanych z kierunkiem wytwarzania. Powierzchnie zaokrąglone w postaci promieni wklęsłych, wypukłych, sfery wypukłej i wklęsłej oraz stożka umożliwiają obserwację wad wynikających z grubości nakładanej warstwy. Tekst wypukły oraz wklęsły umożliwia ocenę możliwości wytwarzania cienkościennych struktur i szczelin [2, 6, 13].



Rys. 1. Model testowy oraz urządzenie do szybkiego prototypowania DIM200
 Fig. 1. Test model and device for rapid prototyping DIM 200

W celu badania wpływu prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych na liczbę i wielkość występujących wad przyjęto, że prędkości nanoszenia wypełnienia oraz prędkości dojazdu będą stałe i wyniosą odpowiednio $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Prędkości wytwarzania ścianek zewnętrznych wynoszą dla kolejnych próbek $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Liczbę warstw zewnętrznych przyjęto 3. Wybrano sposób wypełnienia w postaci linii prostych przecinających się między warstwami pod kątem prostym. Współczynnik wypełnienia wyniósł 20%. Parametry temperaturowe dobrano zgodnie z zaleceniami producenta dla wykorzystanego tworzywa jakim był ABS+. Schemat zmiennych i stałych wejściowych oraz badanych wartości wyjściowych przedstawiona na schemacie (rys. 2). Do zwiększenia przyczepności detalu do stołu użyto roztworu ABS w acetonie [10].



Rys. 2. Schemat stałych i zmiennych wejściowych oraz zmiennych wyjściowych
 Fig. 2. Diagram of fixed and variable input and output variables

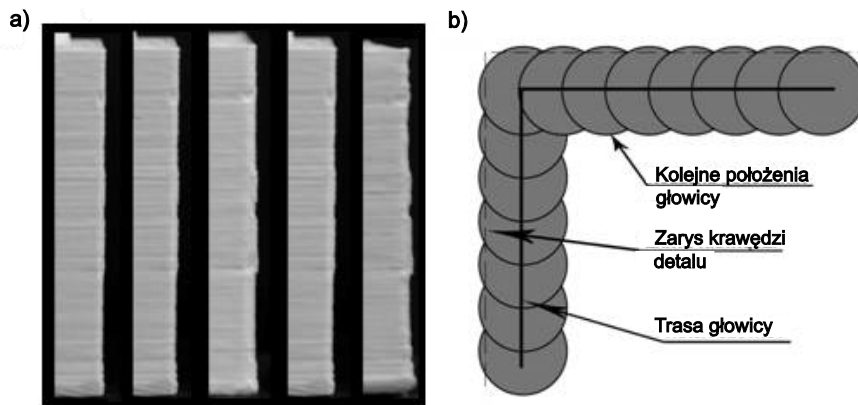
Próbki wytworzono na urządzeniu DIM200. Urządzenie realizuje ruch stołu w kierunku y, ruch głowicy w kierunku x oraz ruch trawersu wraz z głowicą w kierunku z. Napęd stanowią silniki krokowe.

Wykonano pomiar występujących wad na mikroskopie pomiarowym i chropowatościomierzu.

3. OPIS ZAOBESERWOWANYCH WAD W WYTWORZONYCH PRÓBKACH

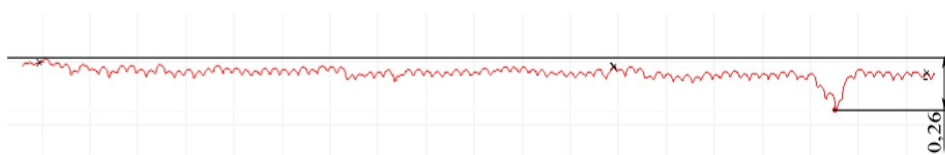
3.1. Wady krawędzi

Pierwsze omawiane wady występują na krawędziach. Boki próbek nie są proste, można zaobserwować na nich uwypuklenia, których ilość, a w szczególności wielkość, wzrasta wraz z prędkością wytwarzania (rys. 3a). Dokonano wykreślenia profilu powierzchni krawędzi na chropowatościomierzu (rys. 4). Następnie zmierzono odchyłkę prostoliniowości jako odległości pomiędzy prostymi przechodzącymi przez najdalej wysunięte punkty krawędzi (rys. 5). Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunku. Obserwuje się wzrost wielkości wad krawędzi wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania.



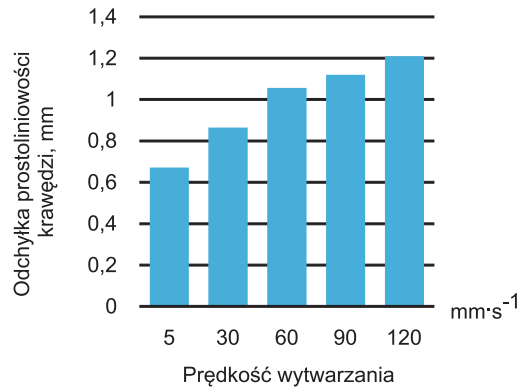
Rys. 3. a) zestawienie uzyskanych krawędzi próbek, w zależności od prędkości: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, b) teoretyczny minimalny promień krawędzi

Fig. 3. a) the edges of the samples, depending on the speed: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, b) the theoretical minimum edge radius



Rys. 4. Przedstawienie odchyłki prostoliniowości krawędzi na próbce wykonanej z prędkością $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

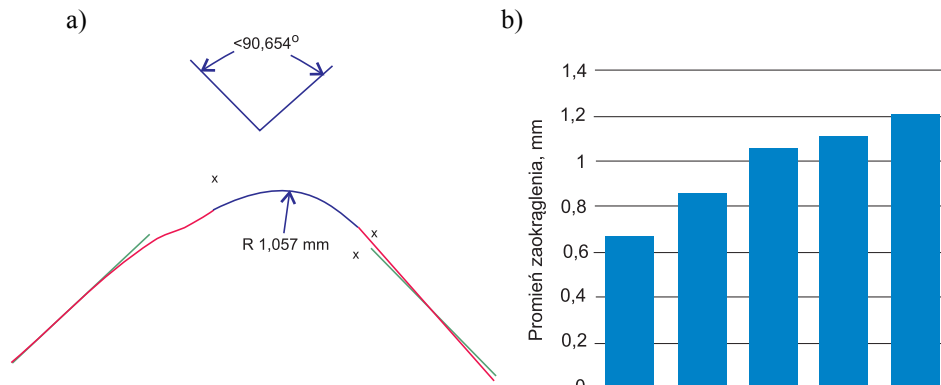
Fig. 4. Presentation of the straightness deviations edge of the sample performed at a speed $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$



Rys. 5. Odchyłka prostoliniowości krawędzi w zależności od prędkości: 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹
 Fig. 5. Straightness deviation edge depending on speed: 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Zaobserwowano, że miejsca występowania większej liczby wad oraz ich kształt powtarza się w każdej próbce. Może to sugerować źródło występowania tych błędów w urządzeniu prototypującym bądź w programie.

W każdej próbce można zaobserwować zaokrąglenia krawędzi, rosnące wraz ze wzrostem prędkości głowicy. W modelu komputerowym krawędzie nie były zaokrąglone. Pomiar promieni wykonano na chropowatościomierzu (rys. 6a) i porównano na wykresie (rys. 6b).



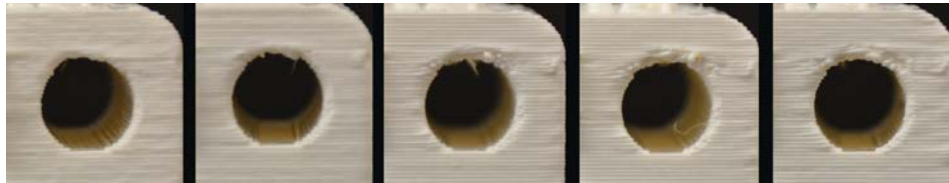
Rys. 6. Przykładowy wynik pomiaru promienia zaokrąglenia krawędzi próbki oraz porównanie na wykresie wyników pomiarów dla próbek wytwarzanych z różną prędkością
 Fig. 6. An example measurement result of the edge radius of the of the samples and to compare the graph of measurement results for samples produced at different speeds

Minimalny teoretyczny promień zaokrąglenia wynika z okrągłego otworu dyszy. W urządzeniu prototypującym DIM200 średnica otworu dyszy wynosi 0,4 mm. W związku z tym minimalny promień, jaki można osiągnąć wynosi

0,2 mm. Rysunek 4b przedstawia schemat kolejnych położenia głowicy zakreślającej krawędź próbki.

3.2. Wady przewieszeń

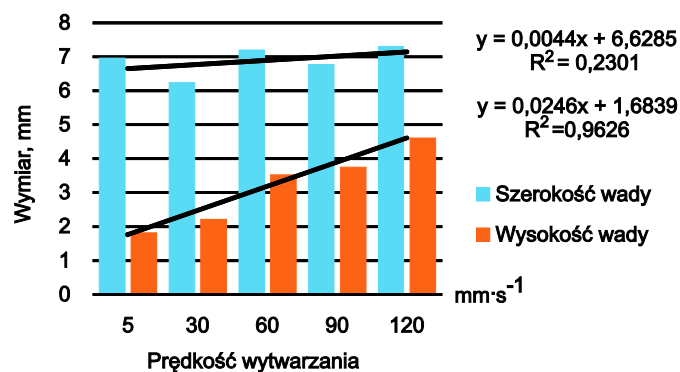
Kolejną widoczną wadą są zniekształcenia wyjść otworów leżących w osiach równoległych do powierzchni stołu (rys. 7).



Rys. 7. Zestawienie otworów przelotowych w osi Y w zależności od prędkości:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Fig. 7. The through holes in the Y-axis, depending on the speed:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Wady te występowały przy każdej prędkości głowicy, przy czym wraz z jej wzrostem następowało zwiększenie zniekształceń na powierzchniach przyległych do wyjść otworów. Za pomocą mikroskopu pomiarowego dokonano pomiaru szerokości i wysokości występujących w próbkach wad. Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunku (rys. 8). Naniesiono linie trendu i zaobserwowano, że prędkość wytwarzania ma większy wpływ na wzrost wysokości wady niż na wzrost jej długości. Świadczy o tym o ponad 5,5 razy większy współczynnik kierunkowy linii trendu dla wysokości wady. Ponadto linia trendu ta posiada wysoki współczynnik determinacji R², który świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu modelu.

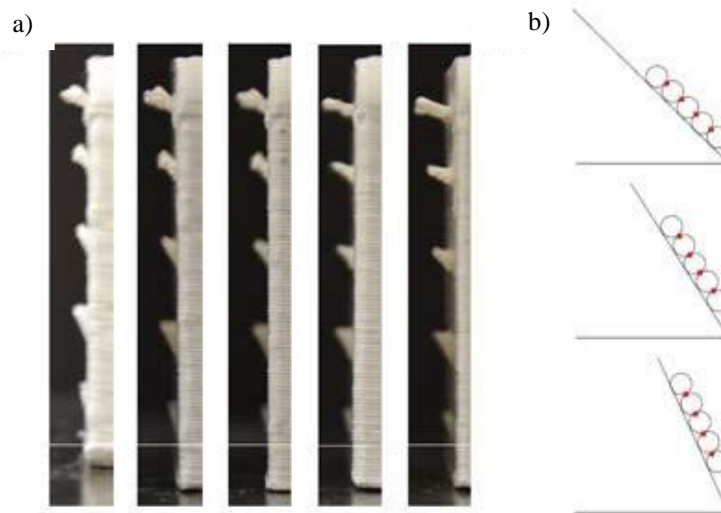


Rys. 8. Powierzchnia wad w okolicach otworów w zależności od prędkości:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Fig. 8. The size of surface defects around holes, depending on the speed:
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm/s, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Wada ta jest spowodowana koniecznością wykonania przewieszenia tworzywa nad otworem w trakcie jego wytwarzania. Nakładane tworzywo nieoparte od dołu ugina się pod swoim ciężarem, powodując zniekształcenie. Wraz ze wzrostem prędkości tworzywo jest wytłaczane szybciej, co skutkuje skróceniem czasu na jego wychłodzenie poniżej temperatury plastyczności. Może to wyjaśnić wzrost wielkości wady wraz ze wzrostem prędkości głowicy. Im dłuższe przewieszenie, tym ugięcie i zaistniała wada będą większe.

Na każdej próbce wystąpiły wady na powierzchniach pochyłych (rys. 9a). Pomiaru kąta pochylenia ścian oraz długości półek dokonano na chropowatościomierzu (rys. 10).



Rys. 9. a) zależność deformacji pochyłości próbek w zależności od prędkości:

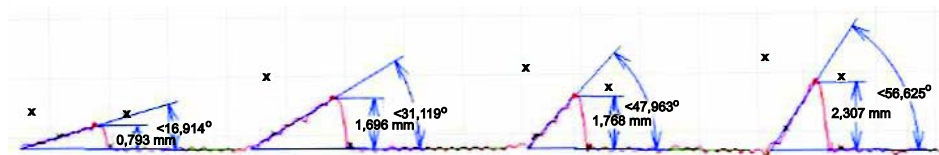
5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹,

b) przyczyna powstawania wady na pochyłościach

Fig. 9. a) The dependence of the deformation gradient of samples depending on the head speed:

5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹,

b) cause the formation of defects on the slopes

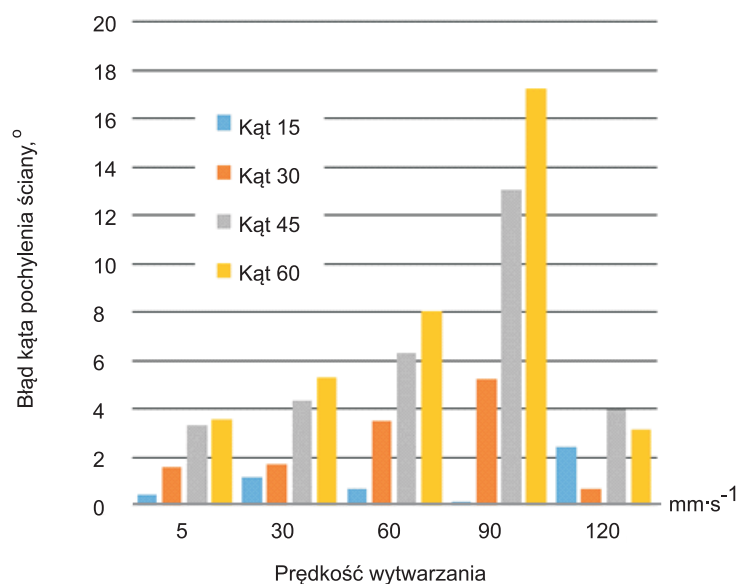


Rys. 10. Pomiar kąta pochylenia oraz długości półek

Fig. 10. The measurement of the angle and length of the shelves

Wraz ze wzrostem kąta pochylenia względem pionu wzrasta różnica pomiędzy jego wartością nominalną a rzeczywistą. Wady w postaci zbyt krótkiej półki w stosunku do modelu komputerowego są obserwowane przy pochyle-

niach 60° względem pionu. Pochyłości pod kątem 75° są znacząco zdeformowane, co uniemożliwia jednoznaczny pomiar. Wykres porównawczy odchyłek kątów rzeczywistych od nominalnych przedstawiono na rysunku (rys. 11).



Rys. 11. Pomiar kąta pochylenia oraz długości półek
Fig. 11. The measurement of the angle and length of the shelves

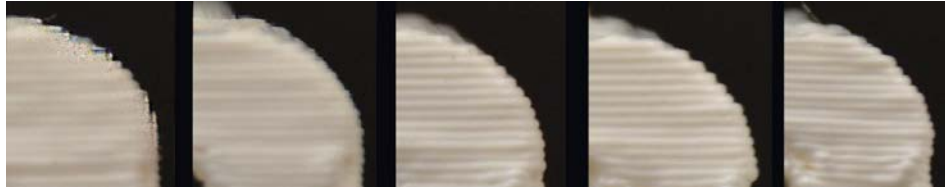
Wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania wzrasta różnica pomiędzy kątem nominalnym a pomierzonym. Stwierdzenie to nie dotyczy prędkości $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz pochylenia ściany 15° względem pionu.

Występujące wady i błędy mogą być spowodowane zmniejszaniem się powierzchni styku pomiędzy nałożoną warstwą a jej podstawą przy wzrastającym kącie pochylenia ściany. Coraz większa część włókna jest zawieszona bez podparcia. W pochyleniach ścian zbliżających się do kąta 90° kolejne warstwy są doklejane do bocznych krawędzi wcześniej nałożonych warstw, a nie do ich górnych powierzchni. Miejsce dołączenia kolejnych włókien jest przedstawione w postaci czerwonych punktów na rysunku 9b. Wraz ze wzrostem wysokości pochylenia, błędy sumują się, powodując coraz większe deformacje. Jest to wada, która na podstawie przeprowadzonych obserwacji nie zależy od prędkości [2, 7].

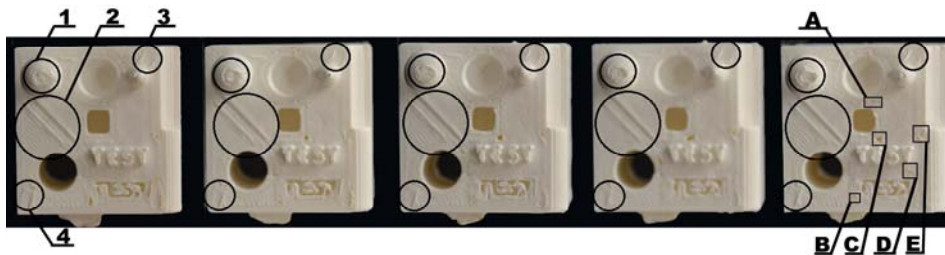
3.3. Wady chropowatości powierzchni

Kolejną wadą, która występowała niezależnie od prędkości, jest wysoka chropowatość szczególnie widoczna na promieniach (rys. 12). Widoczne są wyraźne przejścia pomiędzy poszczególnymi warstwami. Na każdej próbce sfera jest spłaszczona na górze, co zaznaczono cyfrą 1 na rysunku 13. Sfera nie ma

idealnie kulistej formy, natomiast stożki nie są zakończone ostrym wierzchołkiem, jak było zaprojektowane w modelu komputerowym. Wklęsłe czasy mają płaskie, równoległe do podłoża powierzchnię, a promienie nie są gładkie.



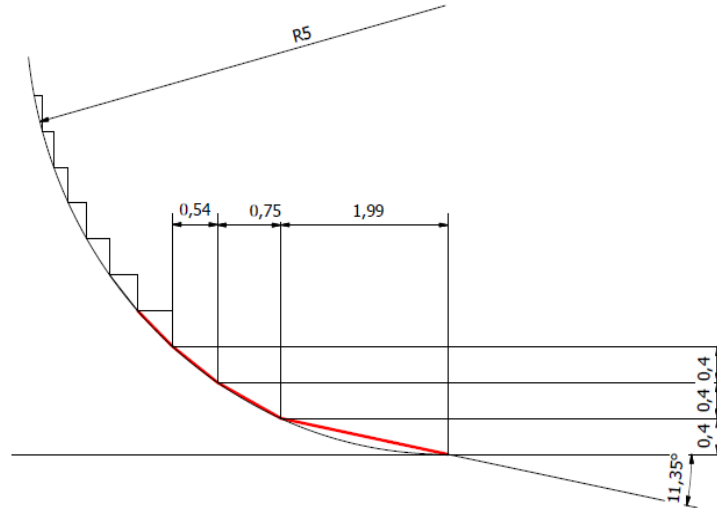
Rys. 12. Chropowatość na powierzchniach promieni wypukłych w zależności od prędkości ruchu głowicy: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
 Fig. 12. The roughness of the convex surfaces of the radii depending on the head speed: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 90 mm/s , $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$



Rys. 13. Błędy przejazdu głowicy (1,2,3,4) oraz nieciągłości tworzywa (A,B,C,D,E) w zależności od prędkości głowicy: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
 Fig. 13. Errors traveling head (1,2,3,4) and the material discontinuity (A, B, C, D, E) according to the head speed: $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Niska klasa chropowatości powierzchni spowodowana jest tym, że średnica filamentu po wyjściu z głowicy ma określoną wartość, która stanowi wysokość nakładanych warstw tworzywa.

Proces tworzenia programu wykonywanego przez maszynę polega na podzieleniu stworzonego modelu na warstwy o określonej grubości. Kolejnym krokiem jest generowanie programu nakładającego tworzywo na obrysie danego poziomu, a następnie wypełnienia jego środka. Po odtworzeniu pierwszej warstwy program przechodzi do kolejnej wyższej warstwy, leżącej nad poprzednio wykonaną. W przypadku badanych próbek wysokość warstwy wynosiła $0,4 \text{ mm}$. Jest to wartość średnicy tworzywa, które wytłaczane jest z ekstrudera głowicy. Jeśli podzielimy łuk na warstwy, otrzymamy schodkowy jego przekrój (rys. 14). Wysokość schodka będzie równa wysokości warstwy. Efekt schodków jest większy w miejscu, w którym promień płaszczyzny jest najbardziej odchylony od pionu. Wada tego typu nie jest obserwowalna, gdy łuk leży w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny stołu np. powierzchnia otworu w osi z [1, 5, 7, 12].



Rys. 14. Schodkowe ułożenie filamentu na powierzchni łuku
 Fig. 14. Arrangement of the material in the form of steps on the surface of arcs

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiaru wysokości wytwarzanych warstw. Pomiar został wykonany za pomocą mikroskopu pomiarowego. Procedura pomiarowa polegała na odczytywaniu wartości w momencie przekroczenia kolejnych linii oddzielających warstwy. Średnia wysokość wyniosła 0,401 mm, a odchylenie standardowe 0,038 mm.

Tabela 1. Wyniki pomiarów wysokości warstw próbki
 Table 1. The results of measurements of the amount of specimen layers

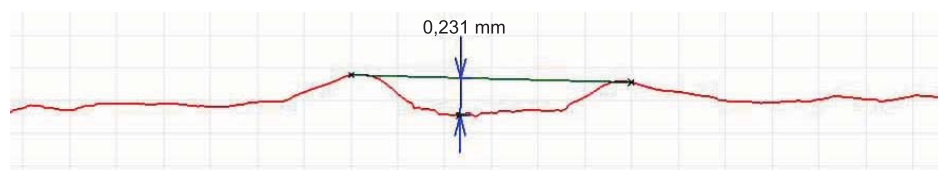
Ilość mierzonych warstw	Kolejne pomierzone wysokości, mm	Wysokość pojedynczych warstw, mm
0	0	–
1	0,38	0,38
2	0,81	0,43
3	1,19	0,38
4	1,62	0,43
5	1,96	0,34
6	2,38	0,42
7	2,85	0,47
8	3,23	0,38
9	3,64	0,41
10	4,01	0,37
Średnia wysokość warstwy		0,401
Odchylenie standardowe		0,038

Analizując sposób działania urządzenia, silników krokowych oraz tworzenia programu gcode, można spodziewać się, że błąd dyskretyzacji łuku obejmie również łuki leżące w płaszczyźnie stołu. Silniki krokowe przemieszczają z dużą prędkością ekstruder pomiędzy kolejnymi położeniami. Ekstruder porusza się pomiędzy nimi po liniach prostych. Prędkość głowicy jest sterowana częstotliwością tych przemieszczeń. Tworzenie programu gcode również ogranicza możliwości wykonania łuków. Program w formacie gcode stanowią kolejne położenia – współrzędne punktów głowicy z dodatkowymi informacjami zapisanymi w formie kodu. Podobnie jak w silnikach krokowych głowica będzie przemieszczała się po odcinkach prostych. Ich długość zależy będzie w tym przypadku od liczby punktów na danym odcinku łuku. Im większa liczba punktów, tym dokładniej będzie odwzorowana krzywizna.

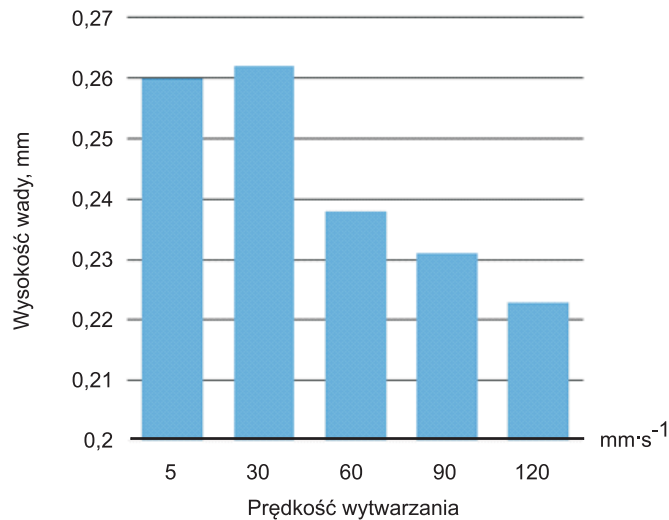
Kolejną przyczyną wad tego typu jest rysunek importowany do formatu stl. Format ten może cechować się zróżnicowaną rozdzielczością. Wraz z jej pogorszeniem zapis do formatu stl może powodować pojawienie się widocznych błędów w wytwarzanym detalu [3, 9].

3.4. Wady górnych powierzchni

Na każdej próbce pojawiły się wady w postaci wypukłych linii, które zostały oznaczone cyframi 1, 2, 3, 4 na rysunku 13. Mogą one być spowodowane błędami powstałymi w trakcie generacji programu lub wynikać z przejazdu głowicy. Pojawiają się one na łączeniu fragmentów powierzchni (linie oznaczone cyfrą 2), które głowica wykonuje oddzielnie np. wykonując środkową część powierzchni, następnie lewą i na końcu prawą. Wady mogą wynikać z niedokładnego pozycjonowania głowicy i nakładania się wytwarzanych fragmentów. W celu porównania wysokości wad wykreślono profil powierzchni na linii prostopadłej do kierunku wad. Następnie wykreślono linię pomiędzy wierzchołkami wad i wyznaczono odległość między tą linią a najniższym punktem pomiędzy tymi wadami. Przykładowy pomiar przedstawiono na rysunku 15. Wyniki pomiaru przedstawiono na rysunku (rys. 16). Z obserwacji wynika, że powyżej prędkości $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ wraz z jej dalszym wzrostem zmniejsza się wysokość opisywanej wady.



Rys. 15. Przykładowy pomiar wysokości wypukłych wad powierzchni
Fig. 15. An example of measuring the height of the convex surface defects

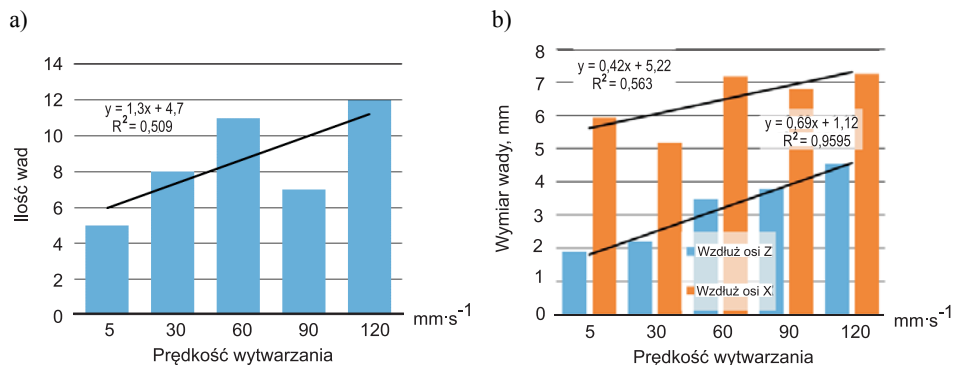


Rys. 16. Porównanie wyników pomiarów wysokości wypukłych wad powierzchni
Fig. 16. Comparison of the results of measurements of the height convex surface defects

Wraz ze wzrostem prędkości głowicy wzrastała liczba wad w postaci małych otworów – niedolań, pustych obszarów powierzchni (rys. 13 A, B, C, D, E). Wadę można wyjaśnić ciągnięciem nałożonego już tworzywa przez głowicę. W chwili, gdy głowica wykonuje ruch po promieniu tworzywa zagęszcza się po wewnętrznej stronie łuku, zostawiając po zewnętrznej wolną przestrzeń.

Wada typu „pociągnięcie” (oznaczona cyfrą 1) jest spowodowana szybkim ruchem odjazdu głowicy po zakończeniu nakładania tworzywa w danym fragmencie. Szybki ruch powoduje pociągnięcie uplastycznionego jeszcze tworzywa, powodując jego przemieszczenie i utwardzenie w zdeformowanej formie. Błędy w postaci szerokich linii oznaczonych cyframi 3 i 4 na rysunku 13 są spowodowane ruchem dojazdowym ciepłej głowicy nad już wytworzoną warstwą i ponownym uplastycznieniem jej materiału. Docisk głowicy pozostawia trwały ślad po zastygnięciu tworzywa.

Za pomocą mikroskopu pomiarowego policzono liczbę wad występujących na wybranej powierzchni. Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 17). Widoczny jest wzrost liczby wad wraz z wzrostem prędkości wytwarzania. Na rysunku 17 przedstawiono również wykres zależności wymiarów wady w dwóch kierunkach w zależności od szybkości nakładania tworzywa. Pomimo różnicy w wielkościach długości wad dla obu osi obserwujemy wzrost długości wad wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania.



Rys. 17. Wykresy a) liczby i b) długości wad w zależności od prędkości wytwarzania
 Fig. 17. Charts the number a) and b) length of defects depending on the production speed

3.5. Wady elementów cienkościennych

Tekst na każdej próbce jest nieczytelny (rys. 18). Napis wklęsły oraz wypukły został zniekształcony w wyniku zastosowania zbyt małej szerokości liter. Zamiana prędkości wydruku nie spowodowała subiektywnej poprawy lub pogorszenia czytelności tekstu. Należałoby powiększyć szerokość liter, aby stał się on bardziej czytelny. Trudno wnioskować na podstawie analizowanych próbek, czy prędkość wytwarzania wpłynęła na jego czytelność [6, 7].



Rys. 18. Jakość tekstu wklęsłego i wypukłego w zależności od prędkości głowicy:
 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

Fig. 18. The text quality concave and convex depending on the head speed:
 5 mm·s⁻¹, 30 mm·s⁻¹, 60 mm·s⁻¹, 90 mm·s⁻¹, 120 mm·s⁻¹

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane z przeprowadzonych prac badawczych wyniki wskazują, że najmniej zdeformowane powierzchnie i najmniejszą liczbę wad uzyskuje się przy niższych prędkościach roboczych głowicy.

Zaistniałe wady można podzielić na zależne oraz niezależne od prędkości wytwarzania. Wielkość i liczba wad zależnych od prędkości wzrasta wraz ze wzrostem prędkości wytwarzania.

Zmniejszenie się liczby i wielkości wad niezależnych od prędkości można uzyskać poprzez modyfikacje elementów urządzenia, np.: zmniejszenie średnicy dyszy wytłaczającej tworzywo, zwiększenie rozdzielczości urządzenia, skró-

cenie czasu schładzania wytłoczonego tworzywa poprzez dobór parametrów procesu bądź wymuszoną wentylację.

W detalach mogą występować powierzchnie powodujące pojawienie się określonych wad. Przy doborze parametrów wytwarzania prototypów techniką FDM konieczne jest zatem przeanalizowanie detalu pod kątem występowania trudnych do wykonania powierzchni oraz żądanej jakości wyrobu. Na tej podstawie możliwy jest wybór odpowiedniej prędkości głowicy nanoszącej tworzywo, a tym samym zminimalizowanie wielkości i liczby wad oraz czasu trwania procesu.

LITERATURA

- [1] ANITHA R., ARUNACHALAM S.: Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling. *Journal of Material Processing Technology*, 2001, 385-388.
- [2] BLICHARZ B., CEDER M.: Wytwarzanie mechanizmów metodą FDM. *Mechanik* 7, 2015, 37-44.
- [3] BUDZIK G.: Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*, 2009.
- [4] BYUN H., LEE K.H.: Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22, 2006, 69-80.
- [5] CHOI S.H., SAMAVEDAM S.: Modelling and optimisation of Rapid Prototyping. *Computers in Industry* 47, 2002, 39-53
- [6] CUNICO M.W.M.: Study of fdm process parameter for deposition of filament in area with no support material. *Conference: 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 2012.
- [7] DZIUBEK T., FILIP M.: Analiza i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania. *Mechanik* 12, 2015, 54-61.
- [8] GÓRSKI F., KUCZKO W.: Choosing optimal rapid manufacturing process for thin-walled products using expert algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management* 2, 2010, 408-420.
- [9] MARCINIEC A., BUDZIK G.: Ocena dokładności prototypów stożkowych kół zębatych z zastosowaniem CMM. *Mechanika* 7, 2010, 75-80.
- [10] MARKOWSKI T., BUDZIK G.: Analiza możliwości wytwarzania kół zębatych o małych modułach technologią FDM. *XII Forum inżynierskie ProCax, Sosnowiec 2013*.
- [11] TYBERG J., BØHN J.H.: FDM systems and local adaptive slicing. *Materials and Design* 20, 1999, 77-82.
- [12] RAYEGANI F., ONWUBOLU G.: Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73, 07, 2014, 509-519.
- [13] SKAWIŃSKI P., SIEMIŃSKI P.: Zastosowanie przyrostowej metody FDM/FFF do wytwarzania kół przekładni zębatych. *Mechanik* 12, 2015, 173-179.

QUALITY ITEMS OBTAINED BY FDM DEPENDING ON THE PARAMETER MANUFACTURING SPEED

Summary: The paper presents the types of defects occurring in the elements produced FDM rapid prototyping technology. The results of studies the impact of manufacturing speed on the number and size of defects and describes their causes.

Key words: FDM, rapid prototyping, defects, manufacturing speed

Piotr ZIMNIAK

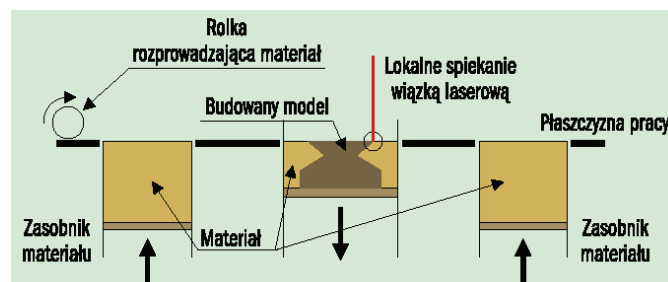
**BADANIE ANIZOTROPII *IN SITU* W PROCESIE
SELEKTYWNEGO SPIEKANIA LASEREM
PROSZKÓW TWORZYW PA12-CF**

Streszczenie: W pracy omówiono podstawy laserowego, selektywnego spiekania proszkowego tworzywa polimerowego jako jednej z wiodących technologii przyrostowego wytwarzania modeli użytkowych i prototypów. Wadą techniki SLS jest zjawisko anizotropii, wynikające z mechanizmu nakładania kolejnych warstw za pomocą narzędzia rozprowadzającego tworzywo proszkowe, kompozytu na bazie poliamidu 12 z dodatkiem włókien węglowych PA12-CF, tj. klingi lub walca, co istotnie wpływa na właściwości mechaniczne uzyskanych wyrobów. W dalszej części pracy opisano unikatowe stanowisko badawcze do nakładania tworzywa proszkowego oraz zaproponowano odpowiednią metodę analizy obrazu, pomocną w zakresie wyznaczenia ukierunkowania włókien tworzywa proszkowego PA12-CF w ujęciu ilościowym i jakościowym.

Słowa kluczowe: selektywne spiekanie laserowe, tworzywo proszkowe PA12-CF, analiza obrazu, ukierunkowanie włókien

1. WPROWADZENIE

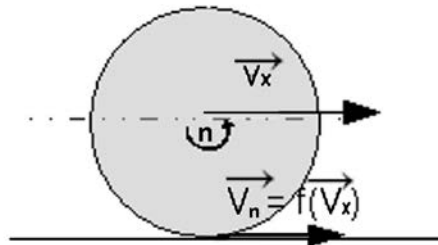
Selektywne spiekanie laserowe proszków jest jedną z wiodących technologii przyrostowego wytwarzania modeli użytkowych i prototypów [1, 3, 10]. Na przestrzeni ostatnich lat nastąpił dynamiczny rozwój stosowanych materiałów i urządzeń [6, 9]. Światowe firmy w branży szybkiego prototypowania, np. 3DSystems, EOS wprowadzają każdego roku nowy rodzaj tworzywa lub nową maszynę [1, 2, 13]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy typowego urządzenia do spiekania laserowego z ważniejszymi jego elementami, niezbędnymi do realizacji spiekania tworzyw polimerowych.



Rys. 1. Schemat ideowy urządzenia (wg 3DSystems) do procesu spiekania tworzyw metodą SLS [19]

Fig. 1. The scheme of the device for Selective Laser Sintering (SLS) method [19]

System walcowy stosowany w maszynach firmy 3DSystems został opracowany i opatentowany przez firmę DTM. Podstawowym elementem konstrukcyjnym tego rozwiązania jest wałek, którego zadaniem jest naniesienie równomiernej warstwy proszku o określonej grubości, zależnej od stosowanego materiału i technologii. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania jest kinematyka ruchów walca, polegająca na złożeniu ruchu obrotowego i postępowego walca (rys. 2). Istotnym i jednocześnie chronionym patentem tego rozwiązania jest przeciwbieżność ruchu obrotowego w stosunku do ruchu postępowego. Taki układ pozwala na uzyskanie luźnej struktury materiału o stałej gęstości nasypowej i nie powoduje jego ubijania (zagęszczania) podczas nakładania (nasypania), co ma istotny wpływ na właściwy przebieg procesu spiekania [7, 9, 16].



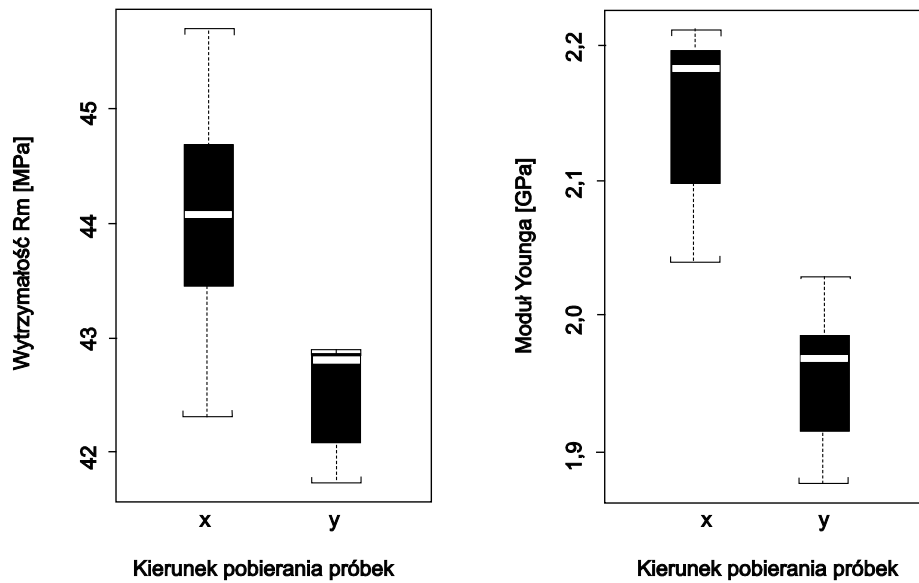
Rys. 2. Rodzaje ruchów walca nakładającego warstwy proszku poliamidowego (opracowanie własne)

Fig. 2. Movements of the PA powder overlaying roll (own study)

Istotną niedogodnością techniki SLS jest zjawisko anizotropii, wynikające z mechanizmu nakładania kolejnych warstw za pomocą narzędzia rozprzodającego tworzywo proszkowe (klingi lub walca), co przekłada się na właściwości mechaniczne uzyskanych wyrobów. Z analizy literatury wynika, że występują znaczne różnice, np. wartości wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga wyznaczone w kierunku osi x i y . Na rysunku 3 pokazano wartości obu parametrów w zależności od kierunku pobierania próbek [4, 5]. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono rezultaty badań E. Riva i in. [11], dotyczące oceny anizotropii poprzez porównanie wytrzymałości na rozciąganie, w zależności od kierunku pobierania próbek dla kąta: 0° , 45° i 90° . Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano dla próbek pobieranych przy kącie 0° , tj. w kierunku ruchu walca, a najgorsze rezultaty otrzymano dla próbek pobieranych przy kącie 90° , tj. w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu walca (x). Zjawisko anizotropii właściwości komplikuje się przy spiekaniu proszków z napelniczem włóknistym.

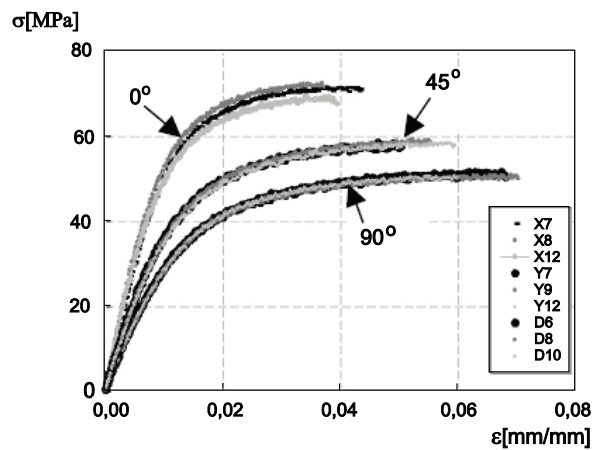
Cel opracowania: Zakładając, że kierunek ułożenia włókien decyduje o właściwościach mechanicznych i przetwórczych wytworów, dla osiągnięcia celu pracy sformułowano problem w postaci pytania: jakie cechy geometryczne i warunki ruchu walca zasilającego przestrzeń roboczą drukarki 3D proszkiem polimerowym z napelniczem włóknistym są niezbędne dla zmniejszenia anizotropii właściwości mechanicznych i przetwórczych produktu otrzymanego w technologii SLS?

W celu przeprowadzenia takich badań zastosowano analizę obrazu struktury proszku polimerowego z napełniaczem włóknistym *in situ*.



Rys. 3. Wpływ kierunku pobierania próbek (PA12 + włókno szklane) na wytrzymałość na rozciąganie R_m i Moduł Younga E [5]

Fig. 3. Influence of the sampling (PA12+GF) on tensile strength R_m and elasticity modulus E [5]

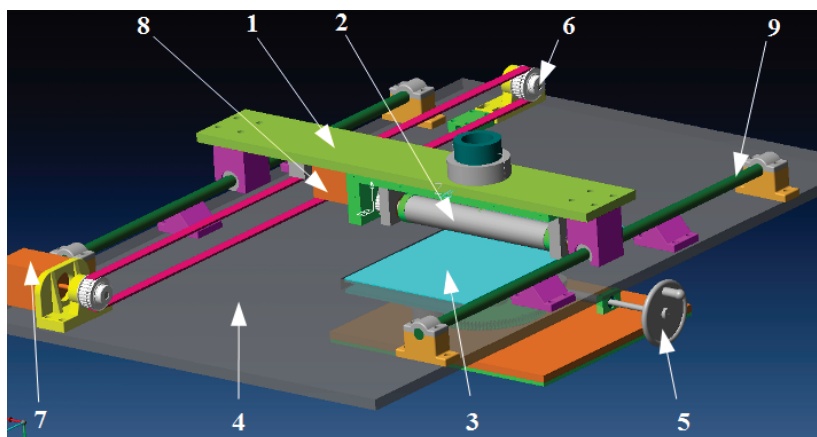


Rys. 4. Wpływ kierunku pobierania próbek (PA12+włókno CF) na wytrzymałość na rozciąganie [11]
Fig. 4. Influence of the sampling (PA12+CF) on tensile strength R_m and elasticity modulus E [11]

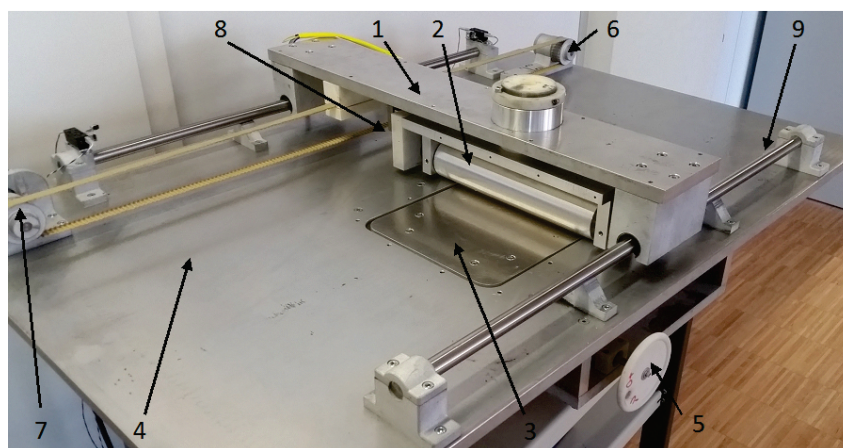
2. BADANIE STRUKTURY WSADU PROSZKU PA12-CF

Poniżej zostały opisane najważniejsze etapy realizacji badań w zakresie wyznaczenia pochylenia (ukierunkowania) włókien węglowych podczas nakła-

dania tworzywa proszkowego PA12-CF w procesie SLS . Badania zostały przeprowadzone na specjalnie zaprojektowanym (rys. 5) i wykonanym stanowisku badawczym (rys. 6), pozwalającym na realizację badań wpływu cech geometrycznych i ruchowych walca będącego elementem rozpraszającym materiał proszkowy z napełniaczem włóknistym, tj. PA12-CF.



Rys. 5. Model wirtualny stanowiska badawczego: 1 – zespół jezdny walca, 2 – zespół walca, 3 – ruchowa platforma robocza, 4 – stół stały, 5 – zespół nastawy grubości nakładanej warstwy, 6 – zespół napędowy układu jezdny walca, 7 – silnik napędowy układu jezdny walca, 8 – silnik napędowy walca, 9 – prowadnica układu jezdny walca (opracowanie własne)
 Fig. 5. Virtual model of the test stand: 1 – roll traverse assembly, 2 – roll assembly, 3 – movable working platform, 4 – stationary table, 5 – assembly for adjusting overlaid layer thickness, 6 – drive assembly of the roll traverse system, 7 – drive motor of the roll traverse system, 8 – motor of the roll drive, 9 – guide of the roll traverse system (own study)



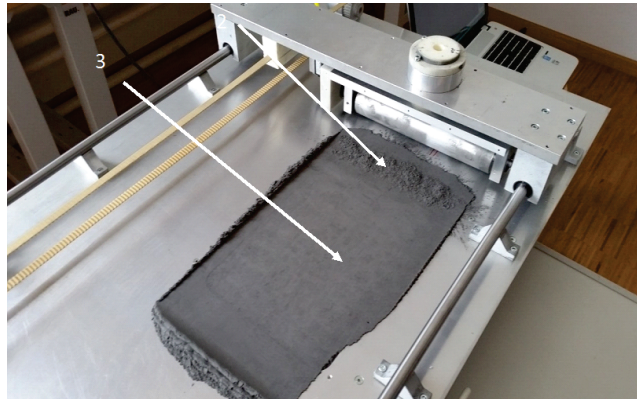
Rys. 6. Widok ogólny, zasadniczej części stanowiska badawczego (opracowanie własne), (oznaczenia zgodne z opisem na rys. 5)

Fig. 6. General view of the basic part of the test stand (own study), (denotations after fig. 5)

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane w taki sposób, aby nakładanie poszczególnych warstw tworzywa polimerowego przebiegało w warunkach zbliżonych do przemysłowych. Dotyczy to zwłaszcza długości drogi, prędkości, przyspieszeń oraz wymiarów walca. W warunkach przemysłowych walcowi nadawany jest jednocześnie ruch obrotowy przeciwbieżny i ruch prostoliniowy zespołu jezdnych walca – rysunek 2.

Prędkość wypadkowa jest „złożeniem” składowej prędkości liniowej v_x oraz prędkości obwodowej v_n , będącej funkcją prędkości obrotowej n . W obiekcie rzeczywistym kierunek i zwrot obu prędkości jest jednakowy. Prędkość wypadkowa jest sumą wektorów $v_{wyp} = v_x + v_n$. Kierunek i zwrot wektora prędkości wypadkowej jest zgodny z kierunkiem i zwrotem wektora v_x . W odróżnieniu od obiektu rzeczywistego na stanowisku badawczym zastosowano dwa niezależne napędy (nadające walcowi ruch obrotowy przeciwbieżny i ruch prostoliniowy zespołu jezdnych walca), dające duże możliwości przy doborze poszczególnych prędkości składowych.

Po przygotowaniu (dozowaniu) odpowiedniej ilości materiału następuje nałożenie kolejnej warstwy proszku kompozytowego za pomocą walca o określonej średnicy i strukturze geometrycznej powierzchni oraz badanych prędkościach v_x oraz v_n . – rysunek 7.



Rys. 7. Widok ogólny nałożonej warstwy tworzywa proszkowego PA12-CF: 2 – porcja tworzywa przygotowana do nakładania kolejnej warstwy, 3 – nałożona warstwa (opracowanie własne)

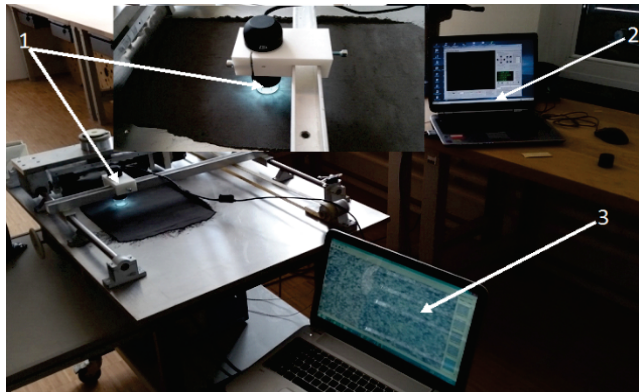
Fig. 7. General view of the overlaid powder layer PA12-CF: 2 – portion ready for overlay the successive layer of the material (own study)

Do pobrania materiału fotograficznego zastosowano kamerę cyfrową USB firmy DNT DigiMicro Profi (rys. 8), która pozwala na wykonanie fotografii w dwóch zakresach: 20x oraz 200x – krotnym powiększeniem w rozdzielczości od 1,3 do 5 Megapixeli. Wymiary rzeczywiste rejestrowanych obrazów wynoszą $2,5 \times 2,5$ mm.

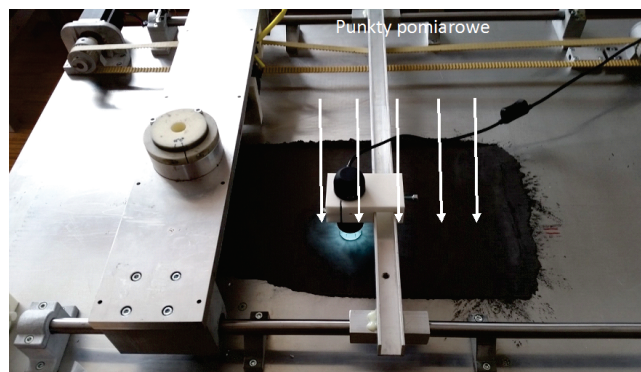
Kamera została ustawiona w osi wzdłużnej platformy roboczej (rys. 9), dla każdej nakładanej warstwy wykonano po 5 zdjęć (rys. 10), które zostały poddane dalszej obróbce w programie do analizy obrazu.



Rys. 8. Widok kamery cyfrowej (opracowanie własne)
Fig. 8. The view of the digital camera (own study)

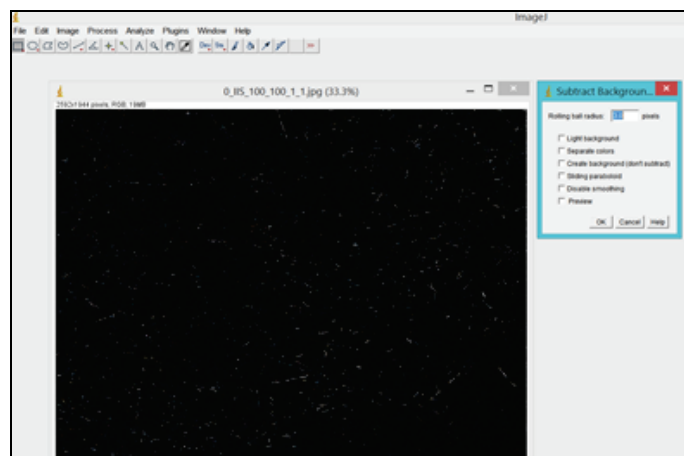


Rys. 9. Widok usytuowania kamery cyfrowej do rejestracji obrazów: 1 – kamera cyfrowa, 2 – komputer sterujący prędkościami walca i zespołu jezdnych, 3 – komputer do archiwizacji danych
Fig. 9. The view of positioning of the digital camera for registering images: 1 – digital camera, 2 – computer controlling roll and driver assembly speeds, 3 – computer for storing data



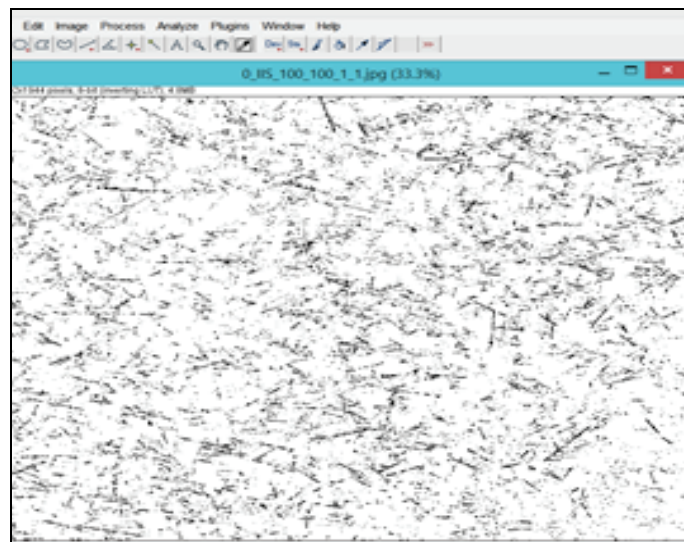
Rys. 10. Widok ogólny nałożonej warstwy tworzywa proszkowego PA12+CF z zaznaczonymi punktami rejestracji obrazów (opracowanie własne)
Fig. 10. General view of the overlaid powdered polymer layer with marked points of registering images (own study)

Drugi krok – w kolejnej fazie (2. krok) za pomocą funkcji Subtract Background przeprowadzono eliminację elementów niebędących przedmiotem badań, a dotyczy to ziaren poliamidu, które stanowią osnowę poliamidową. Elementy osnowy zapisano jako tło (w kolorze czarnym) i przedstawiono na rysunku 14.



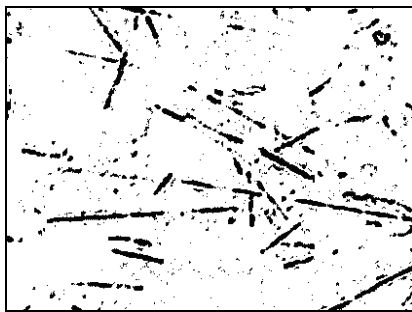
Rys. 14. Widok zapisanej osnowy poliamidowej (opracowanie własne)
Fig. 14. The view of the registered PA matrix (own study)

Trzeci krok – w trzeciej fazie (3. krok) następuje przejście do formatu binarnego (rys. 15), gdyż tylko obrazy w takim formacie można poddać analizie ilościowo-jakościowej ukierunkowania włókien.

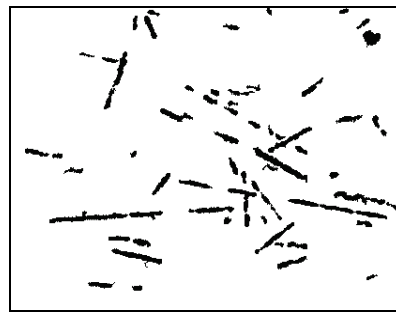


Rys. 15. Wygląd analizowanego obrazu w formacie binarnym (opracowanie własne)
Fig. 15. The view of the analyzed image in binary format (own study)

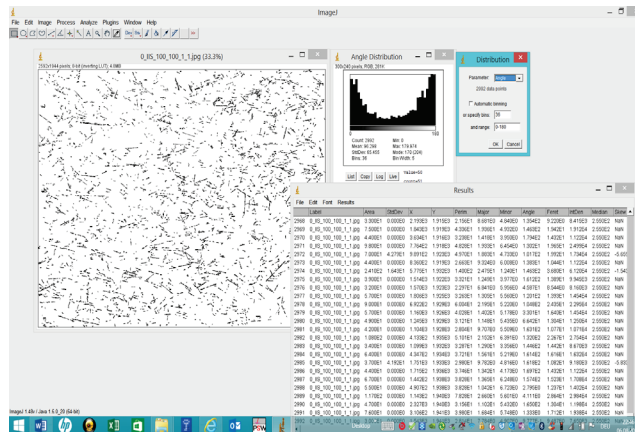
Mając do dyspozycji obraz w postaci binarnej obejmujący wszystkie elementy (rys. 16), można poddać go odpowiedniej analizie. Zdefiniowano wymiary elementów które będą przedmiotem analizy ilościowo-jakościowej, do której przyjęto elementy o powierzchni mniejszej od $(30 \text{ pixel})^2$. Przykładowy fragment obrazu z zapisem binarnym przedstawiono na rysunku 16 i 17. Natomiast na rysunku 18 przedstawiono natomiast przykładowo widok obrazu binarnego oraz rezultaty analizy ilościowej ukierunkowania liczby włókien przyporządkowanych odpowiednim kątom, w zakresie od 0° - 180° , co 5° . Rezultaty analizy ilościowej przedstawiono w formie tabelarycznej (tab. 1) oraz graficznej – na rysunkach 19 i 20, gdzie pokazano przebieg ukierunkowania włókien.



Rys. 16. Fragment obrazu z zapisem binarnym, obejmujący wszystkie elementy (opracowanie własne)
Fig. 16. Fragment of the image with binary registration comprising all elements (own study)



Rys. 17. Fragment obrazu z zapisem binarnym, obejmujący elementy o powierzchni $> 30 \text{ pixel}^2$ (opracowanie własne)
Fig. 17. Fragment of the image with binary registration comprising elements of surface $> 30 \text{ pixel}^2$ (own study)

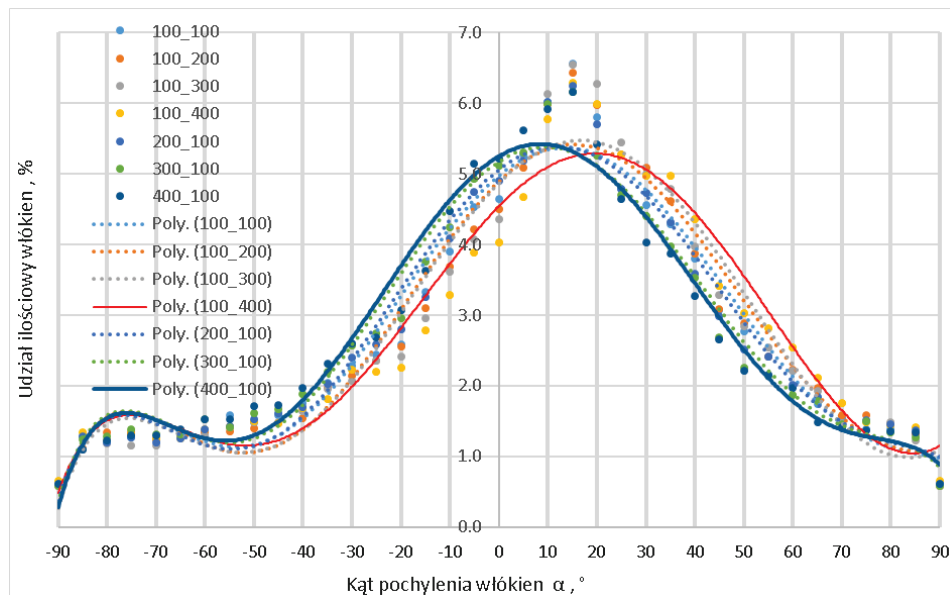


Rys. 18. Widok przykładowego obrazu binarnego oraz uzyskane rezultaty analizy ilościowej ukierunkowania liczby włókien przyporządkowanych odpowiednim kątom, w zakresie 0° - 180° , co 5° – wg tab. 1 (opracowanie własne)
Fig. 18. The view of the example of the binary image and results of the quantitative analysis of orientation of the number of fibers attributed to suitable angles within 0 - 180° each 5° – after Table 1 (own study)

Tabela 1. Przykładowe wyniki liczby włókien w zakresie od 0° do 180° co 5°
 Table 1. The example of the results of the number of fibers within 0-180° each 5°

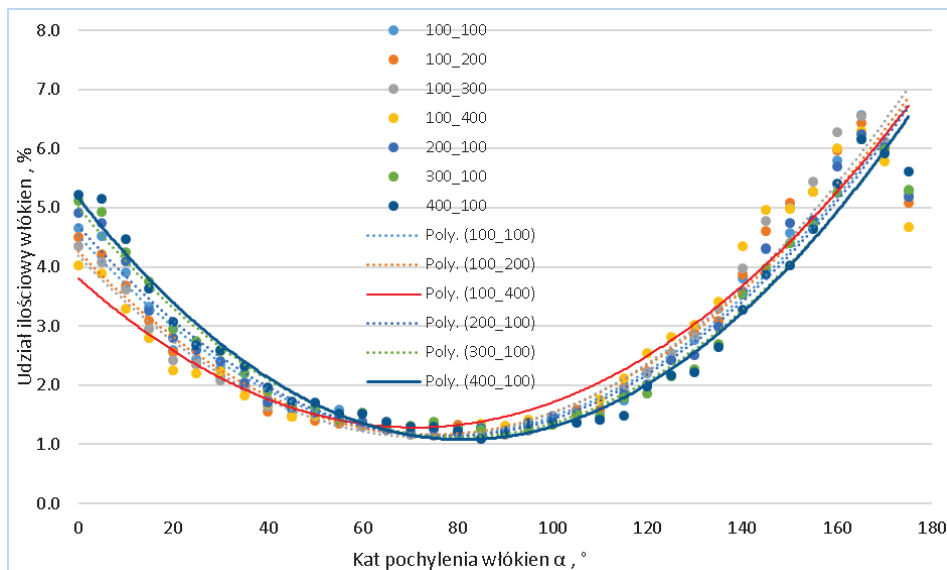
Kąt pochylenia α°	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175
Liczba włókien	102	99	76	61	51	45	47	34	26	29	23	24	22	24	18	33	26	26	36	38	38	38	46	59	68	84	114	120	164	126	134	158	159	115	106	

Tabela przedstawia przykładowy rozkład dla jednego punktu pomiarowego, tj. jednej fotografii. W przeprowadzonych badaniach dla 5 kolejno nakładanych warstw wykonano po 5 fotografii dla każdej z nich, co łącznie daje 25 punktów pomiarowych dla jednego badanego przypadku. Poniżej przedstawiono interpretację geometryczną przykładowych wyników badań wpływu prędkości liniowej układu jezdnych walca i prędkości obrotowej walca na rozkład włókien w nakładanej warstwie materiału.



Rys. 19. Średni udział procentowy włókien w zakresie od -90 do +90° dla badanego walca, w zależności od prędkości liniowej i obwodowej walca $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100, \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 19. Average percent share of fibers within -90 to +90° for the tested roll depending on the linear and circumferential speed of the roll $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100, \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$



Rys. 20. Średni udział procentowy włókien w zakresie od 0° do 180° , dla badanego walca w zależności od prędkości liniowej i obwodowej walca $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100$; $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 20. Average percent share of fibers within 0 to 180° for the tested roll depending on the linear and circumferential speed of the roll $v_x, v_n = 100_100; 100_200; 100_300; 100_400; 200_100; 300_100; 400_100$, $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie badań doświadczalnych rozwiązano sformułowany problem i osiągnięto cel badań polegający na wyznaczeniu geometrycznych cech powierzchni transportującej i warunki ruchu walca, zasilającego przestrzeń roboczą drukarki 3D proszkiem polimerowym z napełniaczem włóknistym, niezbędne dla zmniejszenia (minimalizacji) anizotropii właściwości produktu otrzymanego z technologii SLS.

Dla przeprowadzenia takich badań zastosowano analizę obrazu struktury proszku polimerowego z napełniaczem włóknistym *in situ*. Przeprowadzone badania wskazują na możliwość zastosowania udoskonalonej, algorytmicznej metody analizy obrazu w celu wyznaczenia udziału ilościowego i jakościowego pochylenia włókien węglowych w stosunku do kierunku ruchu walca (x) podczas nakładania proszku tworzyw PA12-CF w procesie SLS. Metoda ta pozwala, już na wstępnym etapie badań, określić wpływ badanych czynników geometrycznych i ruchowych walca na ukierunkowanie włókien, a tym samym na minimalizację anizotropii właściwości mechanicznych i przetwórczych wyrobów wykonanych za pomocą technologii SLS.

Zastosowanie analizy obrazu na tym etapie badań pozwala na skrócenie czasu badań, jak również oszczędności materiału, którego wysoka cena ma zna-

czący wpływ na ogólny koszt badań. Pozwala pośrednio na wytypowanie preferowanej struktury geometrycznej walca i jego parametrów ruchowych.

LITERATURA

- [1] AMADO A., SCHMID M., LEVY G., WEGENER K.: Advances in SLS powder characterization Proceedings of the International Conference on Additive Manufacturing, SFF, Texas, 2011, 438-452.
- [2] CEVOLINI F.: Rapid Manufacturing with carbon reinforced plastics: applications for motor sport, aerospace and automotive small lot production parts. *www.crp.*, 2011.
- [3] CHLEBUS E.: Innowacyjne technologie Rapid Prototyping – Rapid Tooling w rozwoju produktu. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003, 27-38.
- [4] FLOERSHEIM R.B., HOU G., FIRESTONE K.: CFPC material characteristics and SLS prototyping process. Rapid Prototyping Journal 15 Emerald Group Publishing Limited, part 2, 2009, 339-345.
- [5] GHAZ P. ISAEIDI H.: Description of the Anisotropic Material Behaviour of Short Glass Fibre Reinforced Thermoplastics Using FEA. Master's Degree ISRN: BTH-AMT-EX/D-01-SE, 2006.
- [6] GRIESSBACH S.: Korrelation zwischen Materialzusammensetzung, Herstellungsbedingungen und Eigenschaftsprofil von lasergesinterten Polyamid-Werkstoffen. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2012.
- [7] GRIESSBACH V.: Praxis Rapid Technologien. V.G. Kunststofftechnik GmbH. Chemnitz., 2009.
- [8] KRUTH J-P., LEVY G., CRAEGHS T., YASA E.: Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering, CIRP 56(2), 2007, 730-759.
- [9] MONAMI A.: Einfluss von Materialzusammensetzung und Herstellungsbedingungen auf das Eigenschaftsprofil lasergesinterner PA12-Werkstoffe, Universität Halle-Wittenberg, 2006.
- [10] OCZOŚ K.: Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów. *Mechanik 4*, 2008, 217-225.
- [11] RIVA E., STOCCHI A., ZANETTI C.: Short carbon fiber reinforced polyamide: a new compound for rapid prototyping. 22nd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, 2005.
- [12] SAUER A.: Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten. Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [13] SCHMID M., AMADO A., WEGENER K.: Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering. *J. Mater. Res*, 29(17), 2014, 1824-1835.
- [14] SCHMID M.: Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen- Technologie, Prozesse und Werkstoffe. Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [15] WEGNER A., MIELICKI CHR., GRIMM T., GRONHOFF B., WITT G., WORTBERG J.: POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE. Determination of Robust Material Qualities and Processing Conditions for Laser Sintering of Polyamide 12. *Jg. 54; 7*, 2014, 1540-1554.
- [16] ZIMNIAK P.: Uzdatnianie proszku poliamidowego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna 3*, 2008, 36-38.
- [17] ZIMNIAK P., ZIMNIAK J.: Kształtowanie metodami przyrostowymi modeli użytkowych z tworzyw polimerowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna 3*, 2008, 98-99.
- [18] ZIMNIAK P.: Powders and fillers used in SLS/SLM. [W:] *Advanced Grinding – 25th anniversary of the comminution in Bydgoszcz*, red. A. Mroziński, M. Macko, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz, 2011.
- [19] ZIMNIAK P.: Recykulacja tworzyw stosowanych w technice przyrostowej SLS. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna 5*, 2010, 146-147.

STUDY OF IN SITU ANISOTROPY IN THE SELECTIVE LASER SINTERING PROCESS OF POWDER PA12-CF

Summary: The grounds of selective laser sintering (SLS) method, as one of the leading methods of rapid prototyping have been discussed in this paper. The greatest disadvantage of SLS method is anisotropy caused by mechanism of laying sequential layers using distributing tool for PA12-CF powder, i.e. a blade or a roller what may considerably influence the mechanical properties of the obtained products. Consequently this paper also describes the unique test stand for laying powdered polymer and presents the convenient method of image analysis which may help in checking behavior of reinforcing fibers in separate layers of PA12-CF polymer in the product regarding qualitative as well as quantitative aspects.

Key words: selective laser sintering (SLS), powdered polymer PA12-CF, image analysis, fiber orientation

Emil SMYK

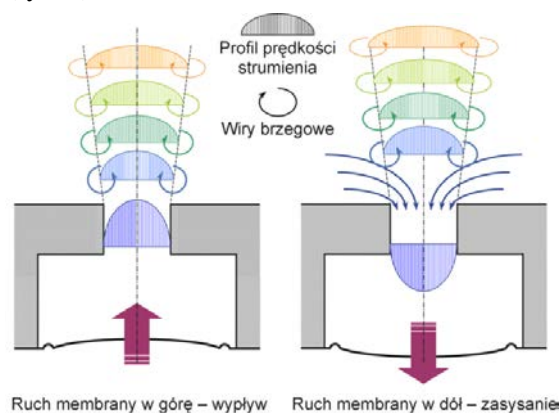
METODA PORÓWNIANIA WPLYWU ZMIANY PARAMETRÓW ZAWORU OSIOWOSYMETRYCZNEGO NA JEGO DZIAŁANIE

Streszczenie: W publikacji zaproponowano metodę doboru parametrów pracy zaworu/dyszy osiowosymetrycznej z wbudowanym generatorem strumieni syntetyzowanych. Najczęściej dobór taki jest wykonywany organoleptycznie, a więc subiektywnie. W związku z tym konieczne jest stworzenie metody pozwalającej na obiektywny wybór najkorzystniejszych parametrów pracy zaworu. Zaproponowano więc współczynnik przesterowania, służący do porównania wpływu różnych ustawień zaworu na strumień główny.

Słowa kluczowe: strumienie syntetyzowane, ZNMF, dysza osiowosymetryczna

1. WSTĘP

Strumienie syntetyzowane powstają na skutek naprzemiennego wtłaczania i wytłaczania płynu roboczego przez dyszę do zamkniętej przestrzeni zwanej komorą roboczą (rys. 1) [3, 7].



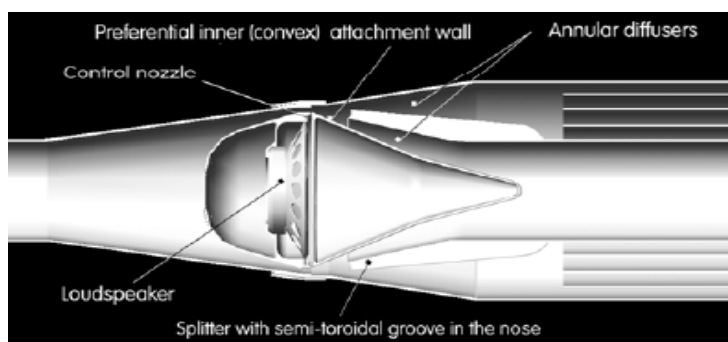
Rys. 1. Idea powstawania strumieni syntetyzowanych w generatorze z membraną
Fig. 1. Idea of synthetic jet formation in actuator with diaphragm

Proces ten realizowany jest poprzez zastąpienie jednej ze ścian komory ruchomym elementem (np. tłokiem, membraną) [3, 6], najczęściej poruszającym się ruchem sinusoidalnym. Pomimo że uśredniony w czasie przepływ w dyszy jest zerowy, to w odpowiedniej odległości od wylotu szereg wypływów tworzy

niezerowy strumień objętości. Jest on wynikiem „syntetyzowania” wirów brzegowych powstających na obwodzie wypływającego z dyszy płynu. Stąd nazwa strumienia syntetyzowane (ang. *synthetic jet*).

Strumienie syntetyzowane znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach techniki jak np. astronautyce, lotnictwie, elektronice (w układach chłodzących) itp. Jednym z bardziej interesujących zastosowań strumieni syntetyzowanych jest aktywne sterowanie strumieniami, a w szczególności możliwość skonstruowania pewnego typu zaworu [4, 5, 6] (rys. 2).

Zawór ten składa się z dyszy osiowosymetrycznej z rdzeniem, w którym zamontowano generator strumieni syntetyzowanych (ang. *synthetic jet actuator*) (rys. 3). Generator zbudowany jest z komory roboczej w kształcie walca, gdzie zamiast podstaw zamontowano głośniki o średnicy $D_g = 50$ mm, natomiast na obwodzie generatora zostały wykonane 24 otwory o średnicy $d = 3$ mm. Pozostałe wymiary stanowiska zostały podane na rysunku 3. Warto zaznaczyć, że istnieje możliwość przemieszczenia rdzenia dyszy, co zostało zobrazowane na rysunku 3 jako wartość x_r . W przedstawionym przypadku rdzeń 4 jest wsunięty w dyszę 3 na głębokość $x_r = -6$ mm, co oznacza, że wylot strumieni syntetyzowanych b jest wsunięty na głębokość 6 mm w dyszę.

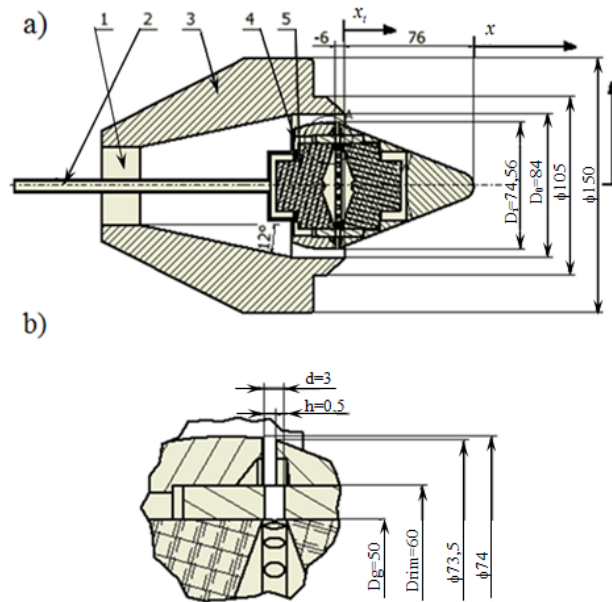


Rys. 2. Przykład osiowosymetrycznej kierownicy strumieni (zaworu) [4]

Fig. 2. Example of an axisymmetric fluidic valve [4]

W stanie normalnej pracy powietrze (strumień główny), dopływające przez wlot 1, w wyniku efektu Coandy przylega do stożka rdzenia 4, w którym zamontowany jest, wcześniej opisany, generator strumieni syntetyzowanych. W takim stanie praktycznie cały strumień główny przepływa wzdłuż stożka rdzenia. W tym przypadku formowany jest strumień o stosunkowo dużej prędkości i małym przekroju. Podczas gdy załączony zostanie generator, strumienie syntetyzowane wypływające przez szczelinę b „odpychają” strumień główny w wyniku czego przylega on do stożka zewnętrznego. Formowany jest strumień o przekroju pierścieniowym i stosunkowo małej prędkości wypływu. Po to, aby zjawisko to nastąpiło, energia strumieni syntetyzowanych musi pokonać siły adhezji występujące na styku strumienia głównego i stożka rdzenia 4. W tym miejscu należy zaznaczyć, że intensywność efektu Coandy, a więc siły adhezji

zależą nie tylko od właściwości fizycznych płynu, ale również od liczby Reynoldsa, chropowatości powierzchni stożka wewnętrznego, jego kąta itp.



Rys. 3. Dysza osiowosymetryczna z generatorem strumieni syntetyzowanych: a) 1 – wlot, 2 – kanał zasilania generatora, 3 – dysza osiowosymetryczna, 4 – generator strumieni syntetyzowanych, 5 – głośniki; b) szczegół generatora

Fig. 3. Annular nozzle with synthetic jet actuator: a) 1 – flow inlet, 2 – actuator's supply channel, 3 – annular nozzle, 4 – synthetic jet actuator, 5 – loudspeakers; b) actuator detail

1.1. Wskaźniki sterowania

Istotne ze względów użytkowych jest opracowanie wskaźników dających jednoznaczne informacje na temat parametrów pracy badanego urządzenia oraz możliwość porównania różnych typów generatorów strumieni syntetyzowanych ze sobą [1, 2]. W pracy [1, 2] zaproponowano zastępujące współczynniki:

- stosunek prędkości:

$$c_u = \frac{U_0}{U_m} \quad (1)$$

gdzie:

U_m – uśredniona w czasie prędkość strumienia głównego w szczelinie pierścieniowej dyszy,

U_0 – uśredniona w czasie prędkość strumieni syntetyzowanych na wylocie generatora, zależna od części okresu, w której powietrze jest wytlaczane z generatora.

Uśredniona w czasie prędkość strumieni syntetyzowanych wynosi:

$$U_0 = f \int_0^{T_E} u_0(t) dt \quad (2)$$

gdzie:

- T_E – czas wytlaczania powietrza,
- f – częstotliwość pracy generatora.

- stosunek strumieni objętości przepływu:

$$c_q = \frac{U_0}{U_m} \frac{A_{sJ}}{A} \quad (3)$$

tutaj

$$A_{sJ} = b \cdot \pi D_i \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_i^2) \quad (5)$$

gdzie:

- A_{sJ} – pole przekroju szczeliny, przez którą wypływa strumień syntetyzowany,
- A – pole przekroju dyszy w miejscu oddziaływania strumieni syntetyzowanych na strumień główny.

Wymiary charakterystyczne dyszy i generatora (D_0 , D_i) występujące we wzorach (4) i (5) zostały przedstawione na rysunku 3. Powyższe współczynniki zostały szerzej omówione w pracy [1, 2]. Określają one stosunek prędkości i strumienia objętości strumieni syntetyzowanych oraz strumienia głównego. Dzięki temu pozwalają na powtórzenie eksperymentu w innych warunkach (jako liczby podobieństwa) oraz umożliwiają porównanie ze sobą różnych generatorów stosowanych w konkretnym doświadczeniu. Nie dają jednak informacji o tym jak ustawienie oraz dobór parametrów pracy danego generatora wpływa na przesterowanie strumienia głównego.

W pracach [1, 2] profil prędkość strumienia głównego dla dyszy osiowosymetrycznej mierzony jest w odległości 40 mm i 80 mm od rdzenia dyszy (rys. 3 parametr x). Rozkład prędkości strumienia głównego zależy od mocy zasilania generatora oraz położenia rdzenia. Dobór tych parametrów odbywał się dotychczas poprzez wzrokowe porównanie wykresów profili prędkości. Ze względów użytkowych należałoby wyznaczyć parametr pozwalający na porównanie przesterowania strumienia głównego. W związku z tym zaproponowano metodę składającą się z następujących kroków:

- wyznaczenia średniej wartości prędkości powietrza \bar{u} dla danego ustawienia (średnia obliczona na podstawie zmierzonego profilu prędkości strumienia głównego w odległości $x = 40$ mm);
- wyznaczenia objętościowego natężenia przepływu \dot{V} na podstawie zmierzonego profilu prędkości, dla danego ustawienia (wyznaczenie pola pod wykresem profilu prędkości);
- wyznaczenia współczynnika przesterowania względnego c_V poprzez podzielenie objętościowego natężenia przepływu \dot{V} przez prędkość średnią \bar{u} .

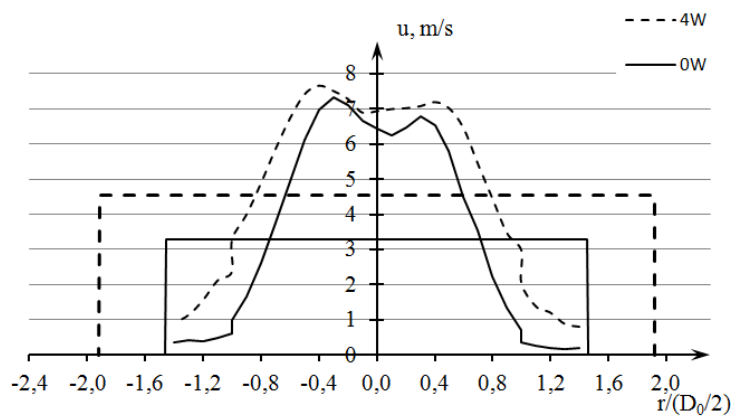
W ten sposób zmierzony profil prędkości powietrza można przedstawić jako prostokąt o wysokości równej co do wartości średniej, prędkości powietrza i długości podstawy rozumianej jako wartość c_V zależnej od profilu (rys. 4).

Ponieważ objętościowe natężenie przepływu \dot{V} (pole pod wykresem profilu prędkości) jest różne w zależności od mocy zasilania generatora (wprowadzenie dodatkowej energii), wprowadzono dodatkowo współczynnik wielkości x , obliczony ze wzoru:

$$x = \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_i} \quad (6)$$

gdzie:

- \dot{V}_0 – natężenie przepływu dla danego ustawienia przy wyłączonym generatorze,
- \dot{V}_i – natężenie przepływu dla danego ustawienia przy zasilanym generatorze.



Rys. 4. Profil prędkości i reprezentacja współczynnika c_V dla $x_t = 3$ mm
 Fig. 4. Velocity profile and representation of ratio c_V for $x_t = 3$ mm

Następnie należy podzielić współczynnik przesterowania względnego c_V przez współczynnik x , co pozwala na wyznaczenie współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$:

$$c_{\bar{v}} = \frac{c_V}{x} = \frac{\dot{V}_i \dot{V}_i}{\bar{u}_i \dot{V}_0} = \frac{\dot{V}_i^2}{\dot{V}_0 \bar{u}_i} \text{ m}^2 \quad (7)$$

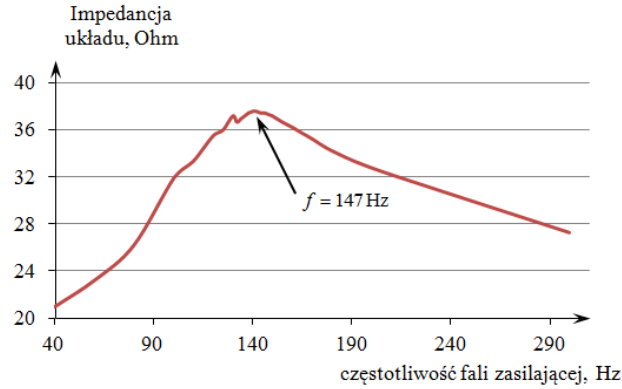
Należy zaznaczyć, że określenie parametrów opisujących warunki pracy generatora (c_u , c_q) oraz oddziaływanie strumieni syntetyzowanych na strumień główny ($c_{\bar{v}}$) ma bezpośredni wpływ na możliwość zastosowania układu przedstawionego na rysunku 3. Dotychczas nie ustalono, w jednoznaczny sposób, jaki parametr mógłby służyć do określenia przesterowania strumienia głównego w dyszy osiowoosymetrycznej, poprzez działanie strumieni syntetyzowanych. Prace [1, 2, 5, 6] nie dostarczają informacji, na jakiej zasadzie dobrano parametry w czasie badań tam przedstawionych.

2. BADANIA

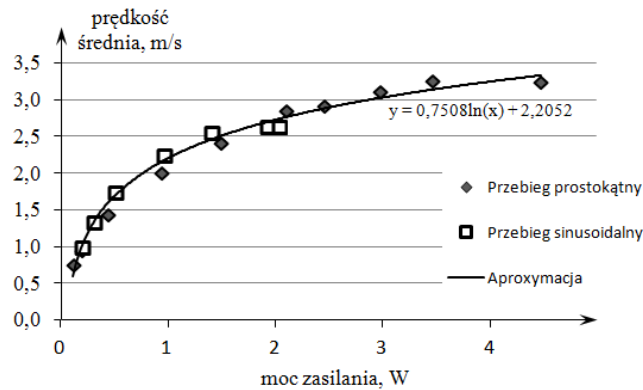
Jako elementy wykonawcze generatora zastosowano głośniki MONACOR SP-6/8SQ ($P_{MAX} = 20 \text{ W}$, $R = 8 \Omega$). Układ był zasilany za pomocą generatora funkcji RIGOL DG4162, poprzez wzmacniacz stereo SEOUM SA-3180B. Powietrze zasilające układ dostarczano przez pompę odśrodkową przy zachowaniu stałego natężenia przepływu dla wszystkich pomiarów. Prędkość powietrza mierzono za pomocą anemometru termicznego HWA (ang. *Hot-Wire Anemometer*) z zastosowaniem sondy jednodrutowej, stałotemperaturowej CTA (ang. *Constant Temperature Anemometer*) o numerze 55P16 firmy DANTEC. Przedstawione w pracy pomiary były prowadzone dla następujących parametrów powietrza: temperatura bezwzględna $T = 295 \text{ K}$, ciśnienie otoczenia $p = 102500 \text{ Pa}$, wilgotność względna $\varphi = 45\%$.

2.1. Badania wstępne

W ramach badań wstępnych wyznaczono charakterystykę częstotliwościową badanego generatora i wyznaczono częstotliwość charakterystyczną pracy jako $f = 147 \text{ Hz}$ (rys. 5). Warto zaznaczyć, że generator strumieni syntetyzowanych był zasilany prądem o przebiegu sinusoidalnym oraz prostokątnym. Wyznaczono w ten sposób zależność prędkości strumieni syntetyzowanych od mocy zasilania generatora. Jak pokazano na rys. 6 prędkość strumieni syntetyzowanych praktycznie nie zależy od postaci prądu zasilającego (fala sinusoidalna lub prostokątna), a jedynie od mocy zasilania (rozkład logarytmiczny). Pozwala to na zastosowanie fali prostokątnej, w celu zwiększenia mocy pracy generatora, przy jednoczesnym utrzymaniu niskiej wypadkowej wartości natężenia prądu (natężenie prądu dla wybranych głośników nie może przekroczyć $I_{MAX} = 0,35 \text{ A}$).



Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa generatora w zależności od impedancji układu
 Fig. 5. Characteristic frequency of actuator depending on the electrical impedance

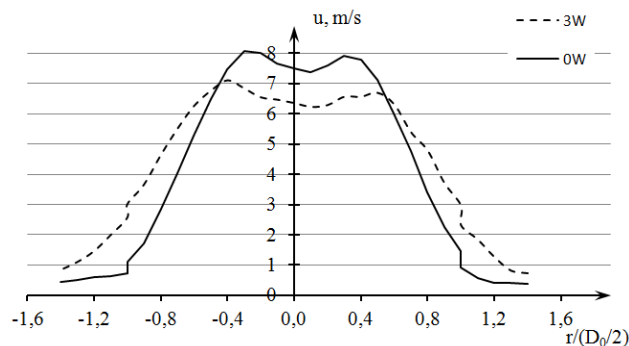


Rys. 6. Zależność prędkości U_0 od mocy zasilania oraz przebiegu prądu zasilającego
 Fig. 6. Dependence of velocity U_0 on the electrical power and the shape of the supply current

Na podstawie powyższych badań przyjęto, że wyznaczenie wskaźników sterowania zostanie przeprowadzone dla przebiegu prostokątnego o mocy 1, 2, 3 i 4 W.

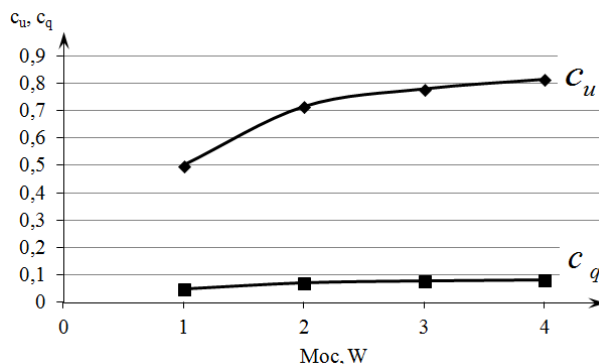
2.2. Badania właściwe

Na rysunku 7 przedstawiono wybrany ($P = 3$ W) rozkład prędkości strumienia głównego. Rozkład ten zbliżony jest do krzywej dzwonowej oraz zgodny z oczekiwaniami – zmniejszenie prędkości maksymalnej, rozszerzenie profilu. Zmiana profilu prędkości jest spowodowana zderzeniem się strumienia głównego oraz strumieni syntetyzowanych. Skutkuje to zwiększeniem turbulencji (zderzeniem się dwóch strumieni o różnym co do kierunku pędzie) oraz wprowadzeniem dodatkowej energii (w postaci pędu) do strumienia głównego. Energia ta przeciwdziała siłą adhezji pomiędzy strumieniem głównym a rdzeniem dyszy, co skutkuje rozszerzeniem profilu prędkości.



Rys. 7. Profil prędkości dla $x_t = 6$ mm przy wyłączonym i włączonym generatorze
 Fig. 7. Velocity profile for $x_t = 6$ mm, with and without switch on the actuator

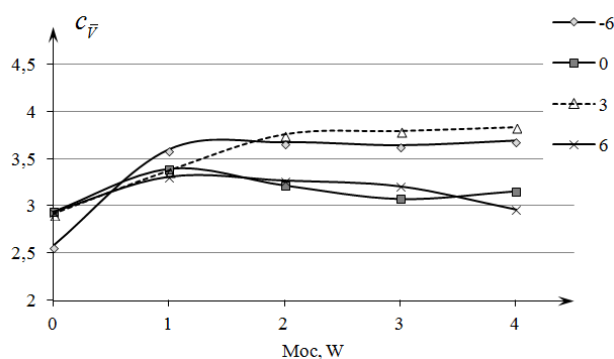
Na rys. 8 przedstawiono współczynniki c_u i c_q w zależności od mocy zasilania. Jak widać, obydwa współczynniki mają ten sam trend wzrostu. Jest to związane z bezpośrednią zależnością pomiędzy współczynnikami c_u i c_q od prędkości strumieni syntetyzowanych. Porównanie wskaźników powinno odbyć się w ramach porównania stanowiska badawczego z innym zawierającym inaczej skonstruowany rdzeń (generator). Mają one charakter informacyjny, a ich wyznaczenie jest konieczne do zapewnienia odtwarzalności i powtarzalności pomiarów.



Rys. 8. Współczynniki sterowania zależne od mocy zasilania generatora
 Fig. 8. Control ratio depending on the actuator power

Rys. przedstawia zależność współczynnika przesterowania $c_{\bar{p}}$, obliczonego dla zmierzonego profilu prędkości, w zależności od mocy zasilania i ustawienia rdzenia w dyszy. Najmniejsze wartości uzyskano dla profilu z wyłączonym sterowaniem. Natomiast najwyższe wartości współczynnika przesterowania $c_{\bar{p}}$ uzyskano dla ustawienia rdzenia w dyszy $x_t = 3$ mm, a następnie dla ustawienia $x_t = -6$ mm. Warto nadmienić, że zwiększanie mocy pracy generatora niekoniecznie prowadzi do zwiększenia przesterowania jak w przypadku usta-

wienia $x_i = 6$ mm. Może to być spowodowane nadmiernym zwiększeniem turbulencji przepływu w skutek niekorzystnego kształtu szczeliny pierścieniowej przy danym ustawieniu. Ponadto warto zauważyć, że zwiększanie mocy dla ustawień $x_i = 3$ mm i $x_i = -6$ mm powoduje stosunkowo niewielki wzrost współczynnika $c_{\bar{v}}$, ma bezpośredni związek z nieznacznym zwiększeniem prędkości strumieni syntetyzowanych U_0 przy zwiększeniu mocy powyżej $P = 2$ W (rys. 6).



Rys. 9. Zależność współczynnika $c_{\bar{v}}$ od mocy i ustawienia rdzenia dyszy

Fig. 9. Dependence of $c_{\bar{v}}$ ratio from the electric power and setups of nozzle core

Można zauważyć, że dalszy wzrost mocy zasilania nie ma wpływu na zmianę profilu prędkości strumienia głównego, a więc zmianę współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$. W celu zwiększenia wpływu generatora na strumień główny należy przekonstruować generator bądź dyszę główną.

3. WNIOSKI

Analizy profilu prędkości strumienia głównego, dla różnych wartości x_i , przeprowadzone metodą organoleptyczną (porównanie wzrokowe) i metodą współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$ okazały się ze sobą zgodne. Za ich pomocą udało się wyznaczyć najlepsze (ze zbadanych) ustawienie rdzenia w dyszy. Potwierdza to możliwość wykorzystania współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$ do oceny wpływu ustawienia rdzenia w dyszy oraz mocy zasilania generatora na strumień główny.

Ponadto dla badanej dyszy wyznaczono współczynniki c_u oraz c_q . Mogą one służyć do porównania badanego stanowiska z innym [1, 2, 5] i dodatkowo ułatwiają one odtworzenie przedstawionego badania.

PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2015/2018 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamentowy Grant”.

LITERATURA

- [1] BROUČKOVÁ Z.: Aktivní řízení proudu v koaxiálním uspořádání. Praca doktorancka, FS ČVUT Praga, 2012.
- [2] BROUČKOVÁ Z., KORDÍK J., TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V.: Aktivní řízení anulárního proudu radiálním syntetizovaným proudem. Materiały z konferencji: Topical problems of fluid mechanics, 2010.
- [3] MOHSENI K., RAJAT M., (eds.): Synthetic Jets: Fundamentals and Applications. CRC Press, 2014.
- [4] TESAŘ V.: Use of radially switched jet attachment in an exhaust gas flow control valve. Proc. WORKSHOP 95, Ann. University-Wide Seminar, Praga, 1995, 265-266.
- [5] TESAŘ V., PAVELKA M., SMYK E., PESZYŃSKI K.: Control of flow separation by vestigial “synthetic jet”, Colloquium Fluid Dynamics, Praga, 2014.
- [6] TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., KORDÍK J., TRÁVNÍČEK Z., PESZYŃSKI K.: Valves with flow control by synthetic jets. EDP Sciences, EPJ Web of Conferences 25, 2012, 1092.
- [7] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V., Annular synthetic jet used for impinging flow mass-transfer. International journal of heat and mass transfer 46(17), 2003, 3291-3297.
- [8] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V.: Hysteretic behavior of annular impinging jets. 5th European Thermal-Sciences Conference, 2008.
- [7] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., PESZYŃSKI K.: Annular impinging jet controlled by radial synthetic jets. Heat Transfer Engineering 35(16-17), 2014, 1450-1461.

METHOD OF INFLUENCE COMPARISON OF CHANGE OF AXISYMMETRIC VALVE PARAMETERS ON HIS OPERATION

Summary: This paper proposes a method for selecting the operation parameters of the valve/nozzle with build-in synthetic jet actuator. Mostly this selection is performed organoleptically, and therefore subjectively. Thus it is necessary to create a method to objectively choice most favorable operating parameters of the valve. In the study is proposed control ratio used to compare to influence of different settings of the valve on the main stream.

Key words: synthetic jet, ZNMF, axisymmetric nozzle

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

7(4)/2016, 57-65

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Michał STOPEL, Dariusz SKIBICKI, Jakub RUSZKOWSKI

**ANALIZA NUMERYCZNA TESTU
BALISTYCZNEGO POCISKU KALIBRU 7.92 × 33**

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę numeryczną testu balistycznego pocisku kalibru 7,92 × 33 przeprowadzoną na podstawie wytycznych norm opracowanych przez niemieckie towarzystwo VPAM. Test balistyczny polegał na penetracji przez pocisk płyty stalowej, wykonanej ze stali Weldox 700E o grubości 8 mm, w zależności od kąta natarcia. Analiza numeryczna dotyczyła weryfikacji literaturowych danych dotyczących kąta natarcia pocisku i skutecznej penetracji płyty stalowej.

Słowa kluczowe: LS-Dyna, test balistyczny, pocisk, prędkość odkształcenia

1. WSTĘP

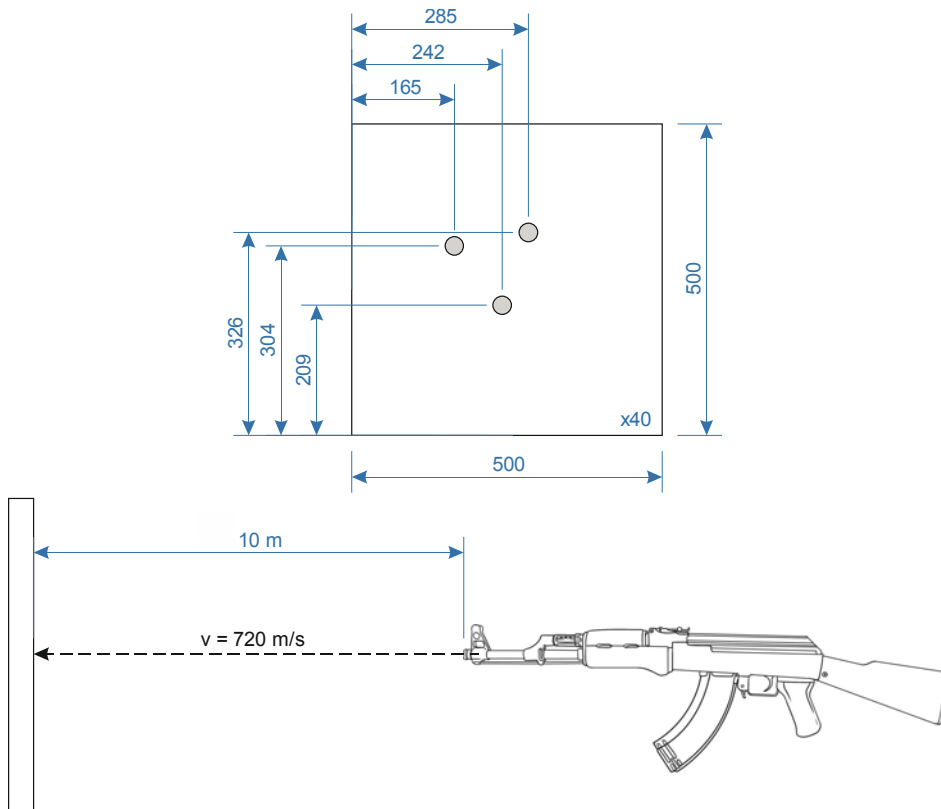
Norma VPAM PM 2007 określa warunki prowadzenia badań eksperymentalnych podczas oceny przydatności materiałów stosowanych do ochrony ludzi oraz obiektów przeciwko pociskom wystrzeliwanym z broni ręcznej i karabinów. Norma mówi, że testowane płyty powinny minimalizować penetrację pocisków bądź ich odłamków przy uderzeniu pod kątem 90 stopni. Na rysunku 1 graficznie przedstawiono warunki prowadzenia eksperymentu na podstawie wytycznych przytoczonej normy.

Na potrzeby prowadzonych badań przygotowano trzy symulacje numeryczne, w których kąt pomiędzy torem pocisku a płaszczyzną płyty wynosił 90, 60 oraz 45 stopni, co schematycznie zaprezentowano na rysunku 2. Zaproponowane symulacje pozwalają zweryfikować literaturowe doniesienia, mówiące o tym, że przy odpowiednim kącie natarcia (dla rozpatrywanego przykładu $\alpha = 45^\circ$) nie dochodzi do skutecznej penetracji blachy stalowej przez pocisk.

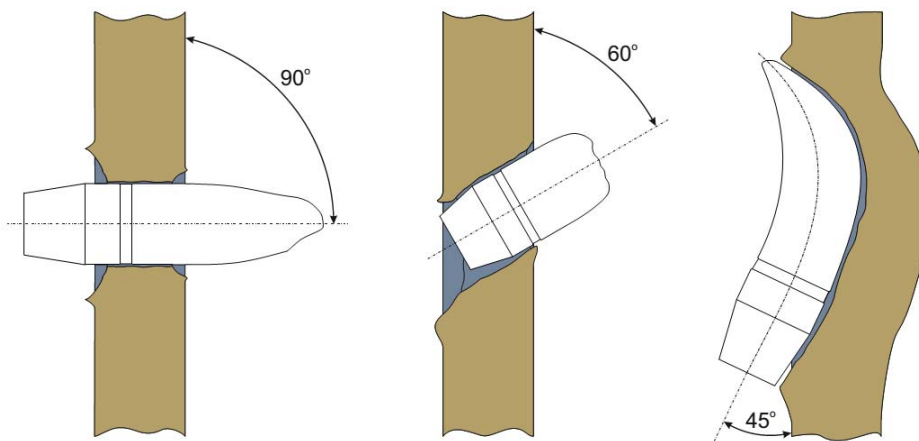
Przyjęty typ pocisku nie jest obecnie stosowany i przyjęty został jako model dla analizy numerycznej jego prędkość początkową określono na podstawie normy VPAM APR 2006. Przyjęta prędkość początkowa pocisku wynosiła $690 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Należy przy tym zaznaczyć, że nie uwzględniono w analizie spadku prędkości wynikającego z oporów powietrza.

mgr inż. Michał STOPEL, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: michal.stopel@utp.edu.pl
dr hab. inż. Dariusz SKIBICKI prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: dariusz.skibicki@utp.edu.pl

Jakub RUSZKOWSKI, Wydział Inżynierii Mechanicznej, e-mail: jakub.ruszkowski86@gmail.com



Rys. 1. Schemat analizy balistycznej w oparciu o normę VPAM PM 2007
Fig. 1. Diagram of ballistic analysis in accordance with VPAM PM 2007



Rys. 2. Schemat prowadzonej analizy balistycznej w odniesieniu do normy VPAM PM 2007
Fig. 2. Diagram of ballistic analysis in accordance with VPAM PM 2007

2. ZJAWISKA WYNIKAJĄCE Z WRAŻLIWOŚCI MATERIAŁU NA PRĘDKOŚĆ ODKSZTAŁCENIA

Podczas odkształcania materiału ze znaczną prędkością obserwuje się wzrost wartości naprężenia uplastyczniającego. Ze względu na bardzo krótki czas trwania procesu odkształcania materiału poddanego obciążeniom związanym z uderzeniem pocisku przemiana cieplna ma charakter izotermiczny, a nie jak w przypadku odkształcania z prędkościami quasi-statycznymi charakter adiabatyyczny.

Uwzględnienie opisanych zjawisk, tj. umocnienia postaciowego, umocnienia wynikającego z wrażliwości na prędkość odkształcenia oraz osłabienia termicznego jest niezwykle istotne podczas prowadzenia analiz numerycznych testów balistycznych.

W środowiskach numerycznych pozwalających na przeprowadzenie analiz typu *explicite* często dostępne są modele materiałowe, które powyższe zjawiska pozwalają uwzględnić w trakcie prowadzenia obliczeń. Jednym z takich środowisk jest LS-Dyna. Spośród zaimplementowanych tam modeli materiałowych wybrano model opracowany przez G.R. Johnsona i W.H. Cooka, którego zapis matematyczny przedstawia się następująco:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

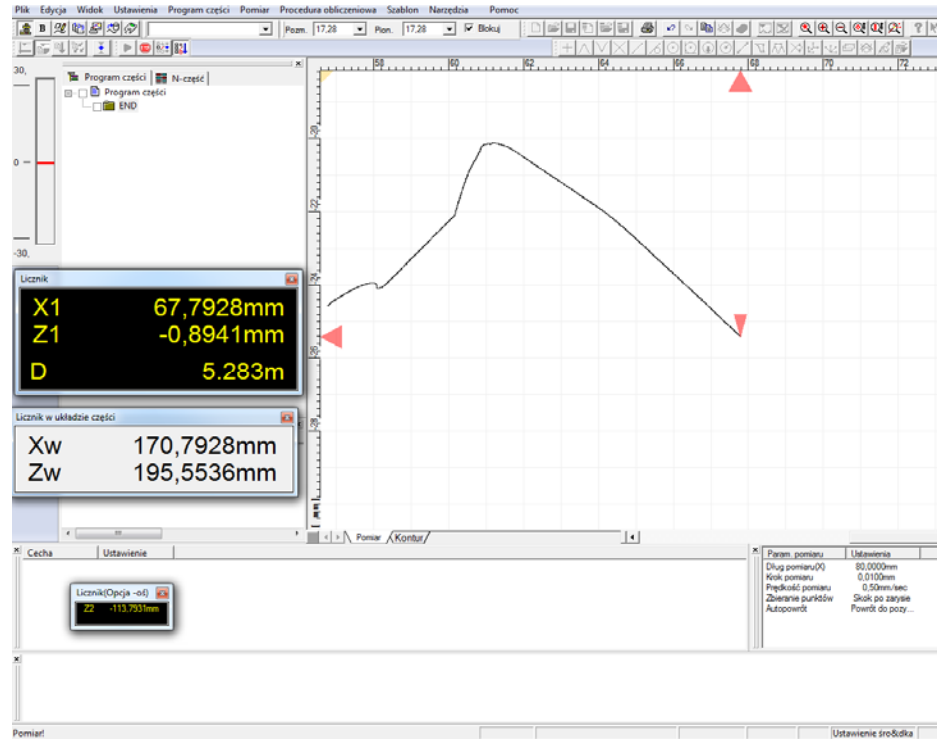
gdzie:

- σ – naprężenie,
- A – granica,
- B – moduł umocnienia postaciowego,
- C – współczynnik wrażliwości na prędkość odkształcenia,
- n – wykładnik umocnienia postaciowego,
- m – wykładnik osłabienia termicznego,
- ε – ekwiwalentne odkształcenie plastyczne,
- $\dot{\varepsilon}^*$ – bezwymiarowa prędkość odkształcenia dla $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$,
- $\dot{\varepsilon}_0$ – minimalna prędkość odkształcenia $1,0 \text{ s}^{-1}$,
- T^* – temperatura homologiczna (temp. pokojowa / temp. topnienia).

3. OBIEKT BADAŃ

Do analizy numerycznej wykorzystano pocisk kalibru $7,92 \times 33$ (rys. 3). Pocisk składa się ze stalowego rdzenia oraz miedzianego płaszczka. Dokładne pomiary geometrii dokonano z wykorzystaniem profilometru Formtracer SV-C3200 (rys. 4). Zmierzony profil zewnętrzny posłużył do utworzenia modelu przestrzennego pocisku w środowisku CAD, który następnie został zdyskretyzowany siatką elementów skończonych. Geometrię oraz zdjęcie pocisku przedstawiono na rysunku 3.

Pocisk uderzał w płytę stalową o grubości 8 mm wykonaną ze stali Wedlox 700E. Podobnie jak w przypadku pocisku stałe modelu materiału pozyskane zo- stały z literatury (tab. 1).



Rys. 4. Pomiar geometrii z wykorzystaniem profilometru Formtracer SV-C3200
 Fig. 4. Geometry measurement with the use of profilometer Formtracer series SV-C3200

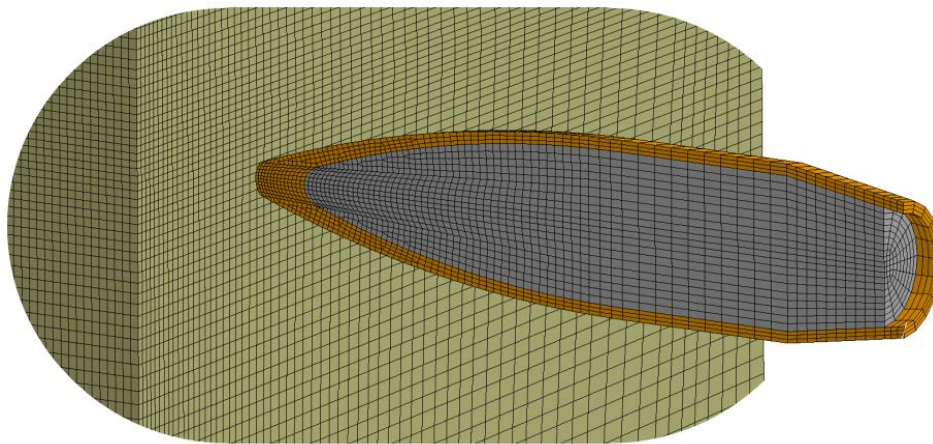
Tabela 1. Stałe materiałowe dla modelu Johnsona-Cooka [1]
 Table 1. Material data for Johnson-Cook's model [1]

	Granica plastyczności	Umocnienie postaciowe			Umocnienie od prędkości odkształcenia		Osłabienie temperaturowe		
	$\sigma_{0,2}$	A	B	n	C	$\dot{\epsilon}_0$	Tr	Tm	m
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	--	--	[s ⁻¹]	[K]	[K]	--
Weldox 700E	819	819	308	0.64	0.0098	5E10 ⁻⁴	293	1800	1.0
Miedziany płaszcz	206	206	505	0.42	0.01	5E10 ⁻⁴	293	1189	1.68
Stalowy rdzeń	1200	1200	50	1.0	0	5E10 ⁻⁴	293	1800	1.0

4. MODEL NUMERYCZNY

4.1. Model pocisku

Model numeryczny pocisku (rys. 5) składa się z dwóch osobnych elementów: płaszcza i rdzenia. W obu przypadkach do odwzorowania geometrii obiektów wykorzystano elementy bryłowe, przestrzenne typu Solid. Elementy te mają trzy stopnie swobody, odpowiadające przemieszczeniom translacyjnym względem osi kartezjańskiego układu współrzędnych. Opisuje je funkcja kształtu pierwszego rzędu. Sumaryczna liczba elementów składająca się na siatkę płaszcza pocisku wynosi 3142, natomiast rdzenia 5484. Dla elementów zdefiniowano kartę *Section_Solid z jednym punktem całkowania [3].



Rys. 5. Siatka elementów skończonych
Fig. 5. Mesh of finite elements

4.2. Model płyty

Płytę podobnie jak elementy pocisku zamodelowano z wykorzystaniem elementów typu Solid. Grubość płyty wynosiła 8 mm. Na jej grubości rozmieszczono 20 rzędów elementów. Łączna liczba elementów składających się skończonych wynosiła 163 840.

4.3. Warunki brzegowe i kontakty

Podczas analizy przyjęto, że model jest symetryczny względem płaszczyzny prostopadłej do osi pocisku, co znacznie skraca czas obliczeń poprzez redukcję liczby elementów skończonych. Płyta utwierdzona była na zewnętrznych powierzchniach poprzez odebranie zarówno translacyjnych stopni swobody, jak i odebranie możliwości obrotu w węzłach elementów. Zmienny był kąt ustawienia płaszczyzny czołowej płyty względem kierunku natarcia pocisku.

We wszystkich węzłach zdyskretyzowanego pocisku z zastosowaniem karty *Velocity_Generation [3] przypisano prędkość początkową wynoszącą

720 m·s⁻¹. Ze względu na przyjęcie symetryczności modelu odstąpiono od nadania pociskowi początkowego ruchu obrotowego względem własnej osi.

Pomiędzy poszczególnymi częściami modelu zdefiniowano kontakt `Eroding_nodes_to_surface` [3]. Jest to kontakt pomiędzy węzłami a segmentami elementów skończonych. Pozwala na szukanie kontaktujących się elementów, gdy inne ulegną zniszczeniu w momencie przekroczenia warunków wytrzymałościowych.

4.4. Kryterium uszkodzenia

Korzystając z zweryfikowanych danych materiałowych [1, 2, 6] przyjęto kryterium uszkodzenia znane jako kryterium Cockrofta-Lathama. Kryterium to opiera się na pracy wykonanej w zakresie plastycznym w jednostkowej objętości i wyraża się wzorem:

$$D = \frac{W}{W_{cr}} = \frac{1}{W_{cr}} \int_0^{\varepsilon_f} \langle \sigma_1 \rangle d\varepsilon_{eq} \quad (2)$$

gdzie:

- D – wartość uszkodzenia, dla D = 1 element jest usuwany z analizy,
- W – praca wykonana przez odkształcenie plastyczne w jednostce objętości,
- W_{cr} – wartość krytyczna pracy,
- σ₁ – naprężenia główne,
- ε_{eq} – odkształcenie ekwiwalentne wg Hubera-Misesa.

Opisując zachowanie materiału z zastosowaniem modelu Johnsona-Cooka (1), można skorzystać z kryterium opracowanego dla tego modelu podając odpowiednie stałe D₍₁₋₅₎. Ze względu na fakt, że stałe te jest znacznie trudniej opracować, a cały proces jest zdecydowanie bardziej czasochłonny, natomiast zasadność stosowania kryterium uszkodzenia Cockrofta-Lathama została zweryfikowana we wcześniejszych badaniach, zdecydowano się pozostać przy tym kryterium.

Należy zauważyć, że elementy ulegały dodatkowo erozji, ze względu na przekroczenie temperatury topnienia dla poszczególnych materiałów, z których zostały wykonane (wartości temperatury topnienia zostały ujęte w tabeli 1).

Stałe dla kryterium wg Cockroft'a-Latham'a uszkodzenia elementów zebrano w tabeli 2.

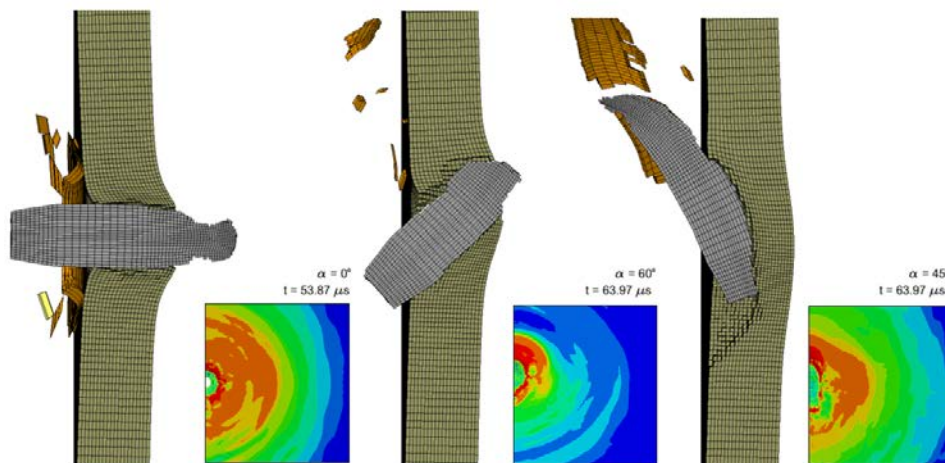
Tabela 2. Stałe dla kryterium uszkodzenia [1]

Table 2. Data for damage criterion [1]

	W _{cr}
Weldox 700E	1486
Miedziany płaszcz	914
Stalowy rdzeń	---

5. ANALIZA SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Rezultaty analiz numerycznych wykonanych dla poszczególnych przypadków przedstawiono na rysunku 6. W wyniku analizy wykazano, że w przypadku kąta natarcia równego 90 oraz 60 stopni doszło do przebicia blachy. Widać, że wraz ze zmniejszaniem się kąta natarcia wzrasta „grubość skuteczna” płyty, co w konsekwencji w przypadku kąta natarcia równego 45 stopni – gdzie grubość materiału, którą ma pokonać pocisk wynosiła 11,3 mm – nie doszło do penetracji stalowej płyty. Na fakt, że stalowa płyta nie została przebita pociskiem uderzającym pod kątem 45 stopni ma również wpływ zależność pomiędzy geometrią pocisku a kątem ustawienia przegrody, w takim wypadku może dojść do rykoszetowania – co wynika z rozkładu wektora prędkości na składowe. Elementy pocisku erodowały głównie ze względu na kryterium związane z przekroczeniem temperatury topnienia dla przypisanego materiału. Elementy płyty erodowały głównie ze względu na przekroczenie krytycznej wartości pracy ujętej w kryterium Cockrofta-Lathama. Analizując obraz map naprężeń można zauważyć, że naprężenie, jak i odkształcenie przemieszcza się w objętości materiału w postaci fali, co wynika z dynamicznego charakteru przyłożonego obciążenia.



Rys. 6. Penetracja płyty stalowej przez pocisk oraz mapa naprężeń na płycie
 Fig. 6. Penetration of steel plate by a projectile and a map of stress on the plate

6. WNIOSKI

Uzyskano zgodność otrzymanych wyników z danymi pozyskanymi z literatury. Wykorzystane stałe modelu, sposób odwzorowania kontaktów pomiędzy elementami oraz warunki brzegowe mogą posłużyć do prowadzenia innego typu analiz takich jak na przykład uderzenia pocisku w drzwi pojazdu bądź barier mających stanowić osłonę przed pociskami. Przygotowane w ten sposób symulacje należałoby zweryfikować poprzez badania eksperymentalne. Takie po-

równanie pozwoliłoby na walidację modelu numerycznego. Dodatkowo autorzy podjęli próbę wyznaczania stałych modelu materiałowego wykorzystując młot udarowy Charpy'ego [4, 5]. Porównanie wyników przeprowadzonej symulacji uderzenia pocisku dla stałych literaturowych oraz stałych wyznaczonych z zastosowaniem metody opracowanej przez autorów pozwoli zweryfikować poprawność wyznaczonych współczynników.

LITERATURA

- [1] BORVIK T., DEY S., CLAUSE A.H.: Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *Int. Journal of Impact Engineering* 36, 2008, 948-964.
- [2] FLORES-JOHNSON E.A., SALEH M.: Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *Int. Journal of Impact Engineering* 38(12), 2011, 1022-1032.
- [3] LS-DYNA Keyword User's Manual Volumes I and II, Sierpień 2012, Wersja 971 R6.1.0, Livermore Software Technology Corporation.
- [4] STOPEL M., SKIBICKI D.: Verification of the Charpy Impact Test Capability to Determine the Constants of the Johnson-Cook Model. *Solid State Phenomena* 250, 2016, 197-202.
- [5] STOPEL M., SKIBICKI D., MOĆKO W.: Verification of FEM Modelling Capabilities Allowing for the Effects of Strain Rate. *Solid State Phenomena* 250, 2016, 203-208.
- [6] TRIA D.E., TRĘBIŃSKI R.: On the Influence of Fracture Criterion on Perforation of High-Strength Steel Plates Subjected to Armour Piercing Projectile. *Archive of Mechanical Engineering* 62(2), 2015, 157-179.

NUMERICAL ANALYSIS OF A BALLISTIC TEST OF A BULLET CAL. 7.92 × 33

Summary: This paper presents some ways of modeling the bullet impact in the LS-Dyna. An attempt was made to verify the literature data the angle of impact of the projectile with the effective penetration of steel plate.

Key words: LS-Dyna, ballistic test, bullet, strain rate

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

7(4)/2016, 67-77

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Tadeusz MIKOŁAJCZYK, Marika SKORNIA, Andrzej ŁUKASZEWICZ

**KONCEPCJA PASYWNEGO STANOWISKA
DO ĆWICZEŃ WZROKU**

Streszczenie: Narząd wzroku to jeden z ważniejszych zmysłów, bez którego trudno funkcjonować w świecie. Wzrok jest bardzo wrażliwy i w wyniku zmian zachodzących z wiekiem, zmian chorobowych, nieprawidłowego korzystania widzenie może ulec pogorszeniu, a nawet zaniknąć całkowicie. Często zapominamy o niego dbać i coraz więcej osób dotkniętych jest wadą wzroku, na którą okuliści przepisują okulary. Są jednak inne metody pozwalające na uzyskanie, utrzymanie bardzo dobrej ostrości, a zarazem jakości widzenia. Należy do nich między innymi metoda Batesa. Opiera się ona na założeniu, że dzięki ćwiczeniom, które utrzymują mięśnie oka w dobrej kondycji, możliwe jest widzenie bez okularów. W pracy przedstawiono pasywne stanowisko z oprogramowaniem, które wspomaga realizację ćwiczeń wzroku wg koncepcji Batesa.

Słowa kluczowe: metoda Batesa, ćwiczenia wzroku, samoleczenie wzroku bez okularów, stanowisko wspomagające ćwiczenia wzroku

1. WPROWADZENIE

Narząd wzroku jest jednym z najważniejszych analizatorów zmysłowych, którego czynność polega na odbieraniu wrażeń promieniowania świetlnego. Wzrok jest bardzo wrażliwy i w wyniku zmian zachodzących z wiekiem, zmian chorobowych, nieprawidłowego korzystania, widzenie może ulec pogorszeniu, a nawet zaniknąć całkowicie. Do korekcji wad wzroku stosuje się najczęściej dodatkowe soczewki – okulary, a czasem i metody operacyjne zmieniające stereometrię soczewki. Według doktora Williama Batesa i doktor Marilyn Rosanes-Berrett najważniejszym czynnikiem pomagającym osiągnąć maksymalną ostrość widzenia na różnym dystansie jest uzyskanie stanu pełnej relaksacji: „Na upośledzenie widzenia, a nawet na takie choroby jak jaskra, mogą mieć wpływ stres i napięcia emocjonalne. To nie oczy nam nie dopisują, to my im nie dopisujemy. Odprężeni i zdrowi widzimy najlepiej, co niekoniecznie oznacza, że widzimy równie dobrze jak ci, którzy są w doskonałej formie. (...) Okulary przynoszą zazwyczaj więcej szkody niż pożytku (...)” [1, 11]. Rozpoczynając

dr inż. Tadeusz MIKOŁAJCZYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: tami@utp.edu.pl, tadeusz.mikolajczyk@utp.edu.pl

inż. Marika SKORNIA, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, e-mail: maja2015@wp.pl

dr inż. Andrzej ŁUKASZEWICZ, Politechnika Białostocka, Białystok, e-mail: a.lukaszewicz@pb.edu.pl

ćwiczenia związane z metodą dr. Batesa, należy w pierwszej kolejności zdjąć okulary.

Istotą metody Batesa jest poszukiwanie sposobów zapewniających możliwość ćwiczeń mięśni wspomagających wzrok oraz stworzenie warunków regeneracji tego organu. Jednym z najważniejszych ćwiczeń tej metody jest mruganie. Osoby z wadami wykazują tendencję do rzadkiego mrugania (<20 razy na minutę), co często wywołuje efekt gapienia się (spowodowane usiłowaniem dostrzeżenia więcej/strachem przed błędnym odczytem) lub zęza. Mruganie należy wymuszać podczas czytania, pracy przy komputerze, ale także przy codziennych czynnościach. Prawidłowe ruchy powiek zapewniają odpoczynek oczom, nawilżają je i masują. Naświetlanie działa relaksująco na umysł i ciało (rozluźnia mięśnie, pobudza funkcji siatkówki), do którego wystarczy: wygodne krzesło i źródło światła. Najważniejszym ćwiczeniem wg dr. Batesa jest palming zapewniający pełne rozluźnienie umysłu i ciała, przy jedynie komfortowym miejscu do siedzenia i podparciu na łokcie. Rozluźnione ręce kładzie się częścią wewnętrzną i wklęsłą dłoni na oczy, a następnie wyobraża się najczarniejszy przedmiot. Pozostałe ćwiczenia to m.in.: kołyszące ruchy ciała (w pozycji wyprostowanej – skręty całego ciała) ożywiające fizyczne i psychiczne rytmy organizmu (wykonywane przed snem zapobiegają bezsenności, pobudzają krążenie krwi) oraz leniwe ósemki, rozluźniające mięśnie karku i oczu, które wykonywać można wszędzie i o każdej porze (poprzez zamknięcie oczu i rysowanie czubkiem nosa ósemek w pionie/poziomie/przekrzywionych, tak by tworzyć je nieprzerwanie i powoli) [1, 6, 10, 11].

Reasumując – celem metod doktora Batesa używanych w leczeniu wad wzroku bez stosowania okularów jest zapewnienie rozluźnienia, relaksacji umysłu i oczu, ponieważ każdy wysiłek zawsze pogarsza wzrok. „Osoby, które pragną poprawić swój wzrok, powinny rozpocząć terapię od przekonania się o tym osobiście” [1]. Dlatego też zarówno te opisane wyżej, jak i inne ćwiczenia obejmujące tę metodę zostały potem wybrane do realizacji części badawczej, w celu ułatwienia ich wykonywania za pomocą technicznego rozwiązania.

Analiza artykułów naukowych wskazuje, że opinie na temat skuteczności takich ćwiczeń są podzielone. Jedni uważają, iż przynoszą one pożądany efekt, inni że nie. Część osób z kolei twierdzi, że ćwiczenia te działają tylko na podświadomość jako tak zwany efekt placebo. Jednak mimo tych wątpliwości poszukuje się optymalnego zestawu ćwiczeń (metod), który w sposób nefarmakologiczny i nieoperacyjny może pomóc wyleczyć wady wzroku lub też im zapobiegać. Należy więc zwiększyć czas przebywania na świeżym powietrzu (naturalne środowisko), ale też podjąć próbę stworzenia urządzenia ułatwiającego wykonywanie ćwiczeń opartych na metodzie Batesa i ich kontrolę [2, 3, 9, 11].

W pracy przedstawiono koncepcję stanowiska, które winno zapewnić możliwość realizacji w sposób kontrolowany zestawu ćwiczeń wspomagających ćwiczenia wzroku głównie w zakresie wymuszenia zmian akomodacji oczu. Na pierwszym etapie realizacji koncepcji zaproponowano wspomagane kompu-

terowo pasywne stanowisko dla ćwiczeń wzroku, zgodnie z koncepcją dr. Williama Batesa.

2. SYSTEM DO ĆWICZEŃ WZROKU

2.1. Koncepcja systemu

Koncepcja systemu ćwiczeń wzroku polega na zastosowaniu specjalnego stanowiska umożliwiającego kontrolę warunków ćwiczeń wzroku wg koncepcji dr. Batesa. Stanowisko umożliwia sterowanie odległością widzenia dla uzyskania bodźców sprzyjających zarówno pracy, jak i relaksacji mięśni odpowiadających za akomodację wzroku. Proponowane urządzenie winno zapewnić pomiar odległości pomiędzy okiem a obserwowanym obrazem. Stanowisko może być realizowane w wersji uproszczonej, gdzie ustawianie odległości realizowane jest przez pacjenta wg wskazań układu pomiarowego lub też wyposażone w automatyczne sterowanie odległością wg opracowanego programu. Na pierwszym etapie postanowiono zrealizować stanowisko pasywne ze sterowaniem manualnym, wyposażone w komputer z opracowanym programem. Koncepcję systemu wstępnie oparto na wyborze ćwiczeń znanych z literatury, przeznaczonych dla osób bez wady i z każdym jej rodzajem.

2.2. Proponowane ćwiczenia

Wybrane na podstawie koncepcji metody Batesa ćwiczenia zostaną podzielone na zestawy i wprowadzone do specjalnie opracowanego programu komputerowego „Eye_Gym”. Wykorzystując możliwości wspomagania komputerowego, zestawy te posiadać będą opis wyświetlający się przed rozpoczęciem treningu w celu zapoznania się z przebiegiem ćwiczenia i prawidłowego wykonania. Niezbędną podczas ćwiczeń zmianę odległości zapewni specjalne urządzenie wyposażone w system pomiaru odległości.

Doboru ćwiczeń dokonano subiektywnie, zgodnie z koncepcją opracowanego stanowiska oraz możliwościami wspomagania komputerowego. W pierwszej kolejności zostanie wprowadzona automatyczna tablica Snellena. Tablicę tę na podstawie metody Batesa wykorzystuje bardzo często w swoich ćwiczeniach dr Rosanes-Berrett. Opracowana koncepcja tablicy Snellena będzie jej zautomatyzowanym odpowiednikiem służącym ćwiczeniom, jak i ocenie jakości widzenia. Możliwe to będzie poprzez sterowanie za pomocą programu komputerowego wyświetlaniem poszczególnych znaków na ekranie monitora oraz swobodną i z jednego miejsca zmianą odległości umieszczenia tablicy. Subiektywna ocena jakości widzenia (realizowana przez pacjenta) będzie odbywała się poprzez wg wprowadzonej skali 1-5 (odpowiednio 1 – najgorzej, 5 – najlepiej), którą zaznaczać będzie badany, a jej przyszłościowy zapis umożliwi szybkie odszukanie i sprawdzenie ostatniego/ostatnich wyników.

W programie dostępne będą ćwiczenia w dwóch zestawach z tablicą Snellena (tab. 1) i z tzw. puzonowaniem (tab. 2). Każdy trening kończyć będzie palming. Opracowana koncepcja przewiduje sekwencyjne przedstawianie pro-

ponowanych ćwiczeń i czasu ich realizacji. W każdym z nich zmienna będzie dostępność kolorów tła i czcionki: biel i czern lub czerń i biel, w celu zwiększenia możliwości i różnorodności ćwiczeń. Umożliwi to niezbędny w ćwiczeniach poziom relaksacji wzroku.

Tabela 1. Ćwiczenia – zestaw 1

Table 1. Exercises set 1



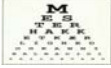








Etap	Nazwa	Czas	Schemat
1	mruganie	1 min	
2	bujanie	2 min	
3	tablica snellena	15-20 min	
4	wizualizacje	3 min	
5	palming	5 min	
Razem		26-31 min	

Tabela 2. Ćwiczenia – zestaw 2

Table 2. Exercises set 2

Etap	Nazwa	Czas	Schemat
1	mruganie	1 min	
2	koncentracja	3 min	zielony granat czarny różowy
3	bujanie	2 min	
4	puzonowanie	3-5 min	
5	wizualizacje	3 min	
6	rysowanie	2 min	
7	palming	5 min	
Razem		19-21 min	

2.3. Opis urządzenia

W celu zrealizowania pierwszych, próbnych badań zaprojektowano i wykonano urządzenie do ułatwienia realizacji ćwiczeń. Głównym elementem stanowiska (rys. 1) jest przesuwny stolik o wymiarach 300×300 mm, na którym stał komputer stosowany w ćwiczeniach. Oprócz tego urządzenie składa się z korpusu szerokości 336 mm, długości 500 mm i wysokości 100 mm zbudowanego z płyt wiórowych o grubości 18 mm. Wewnątrz korpusu usytuowano przesuwny element na szynach połączony, poprzez specjalne przechodzące przez rowki pokrywy korpusu ze stolikiem i umożliwiający zmianę odległości.



Rys. 1. Widok urządzenia: a) od przodu, b) z boku
Fig. 1. Device: a) front view b) side view

Uzyskanie sugerowanej przez program odległości odbywa się manualnie – przez samego ćwiczącego. Wynik pomiaru odległości wyświetlany jest na zewnętrznym, umieszczonym w dogodnym do obserwacji miejscu wyświetlaczu liniału pomiarowego (rys. 2).



Rys. 2. Liniał pomiarowy: a) widok liniału pomiarowego z wyświetlaczem,
b) wyświetlacz liniału pomiarowego po montażu do urządzenia pomiarowego
Fig. 2. Electronic caliper: a) electronic caliper with display,
b) display of electronic caliper installed on the device

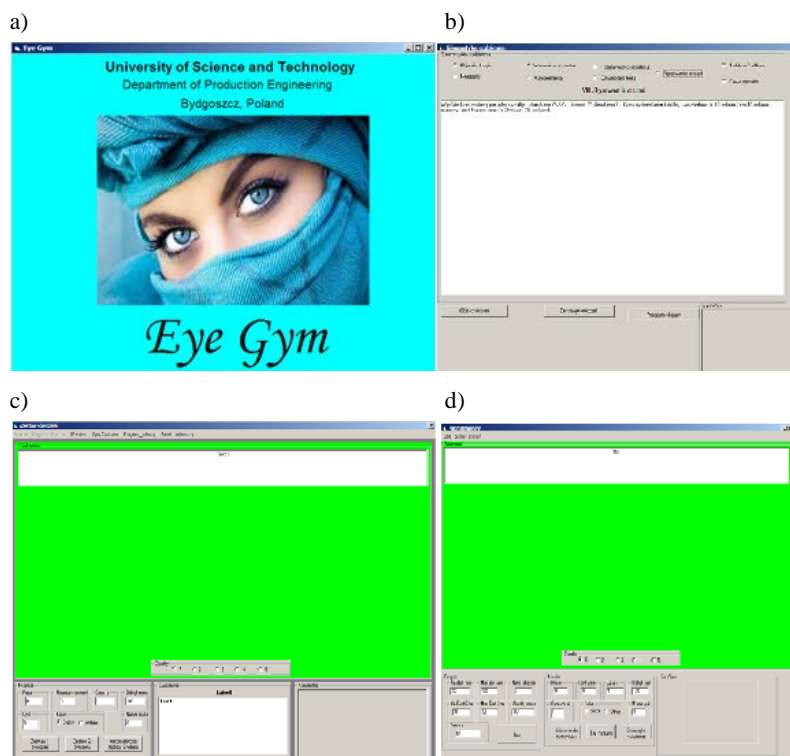
2.4. Program EyeGym

W celu realizacji proponowanych zestawów ćwiczeń opracowano w środowisku Microsoft Visual Basic 6.0 specjalny program nazwany „Eye_Gym” (rys. 3). Program umożliwia korzystanie z gotowych zestawów gimnastyki z dokładnym opisem, informacją na temat zmiany odległości oraz sterowaniem czasem ich przebiegu. Wykorzystano również możliwość edycji komunikatów wokalnych z użyciem syntezatora Ivona [5, 7, 8], pomocnych przy prezentacji opisu ćwiczeń, a także przy odmierzaniu czasu podczas na przykład palmingu kiedy nie widzimy ekranu.

Po rozpoczęciu pracy z programem i naciśnięciu jednokrotnie przyciskiem na tło obrazu (rys. 3a) wyświetli się okno „Gimnastyki codziennej” (rys. 3b) zawierające trzy przyciski do wyboru to jest: „Opis ćwiczeń”, „Zestawy ćwiczeń” i „Program własny”, a także „Eye View” – przyszłościowe miejsce na podgląd oka (zmian zachodzących w źrenicy podczas ćwiczeń) za pomocą kamery USB.

Po wybraniu z wyżej wymienionych opcji – „Opisów ćwiczeń” – dostępne będą ikonki z nazwami danych sposobu treningu (bujania długiego/mrugania/wizualizacji statku/koncentracji/różnej wielkości tekstu/odwróconego tekstu/rysowania oczami/tablica Snellena/puzonowanie), które zapewniają swobodne i spokojne zapoznanie się ze sposobem przeprowadzenia ćwiczenia. W celu wyświetlenia opisu ćwiczenia, należy kliknąć na daną nazwę.

W przypadku wyboru „Zestawu ćwiczeń” w polu o nazwie „Text1” (białe górne pole na rys. 3b) będą wyświetlały się nazwy ćwiczeń i skrócone polecenia jak należy je wykonać. Puste zielone tło przeznaczone jest do wyświetlania obrazków ułatwiających poprzez wizualizację poprawne wykonanie ćwiczenia. Kolejnym elementem jest panel „Quality”, który umożliwia ocenę jakości swojego widzenia w skali 1-5 (1 – bardzo źle widoczne, 2 – źle widoczne, 3 – zamazane, ale dostrzegalne, 4 – dobrze widoczne, 5 – widoczne bez problemów), a także okno „Monitor” umożliwiające podgląd takich parametrów jak: faza, rozmiar czcionki, czas, odległość, cykl, kolor, numer cyklu oraz wybór rodzaju treningu („Zestaw1 ćwiczeń”/„Zestaw2 ćwiczeń”/„Automatyczna tablica Snellena”). W momencie wyboru zestawu lub tablicy wyświetli się zawartość dostępnej opcji ćwiczeń (rys. 3c). Kolejność przebiegu treningu wraz z jego nazwą w miejscu „Label1” (nazwa ćwiczenia) wyświetlana będzie w oknie „ćwiczenia” – „Test1” (białe okno na środku dołu ekranu). W „Komentarzu” (szare pole po prawej stronie dołu ekranu) natomiast uzyskuje się informację szczegółową dotyczącą danego sposobu. Na pasku górnym znajdziemy opcje ułatwiające przechodzenie pomiędzy „preview”/„Opis Ćwiczeń”/„Program własny” a „Panel badawczy”, a więc swobodne przemieszczanie się pomiędzy wszystkimi głównymi panelami programu.



Rys. 3. Kolejne etapy uruchamiania programu Eye_Gym: a) start, b) okno wyboru, c) zestawy ćwiczeń, d) program własny

Fig. 3. Following stages of running the Eye_Gym software: a) start, b) frame of choose, c) exercises, d) own algorithm

Ostatnią z dostępnych opcji możliwą do wyboru z pierwszego panelu (rys. 3b) „Gimnastyka codzienna” jest „Program własny”. Górne okno (białe pole na rys. 3d) i okno zatytułowane „Monitor” (dolny lewy róg) ma te same funkcje jak w „Zestawie Ćwiczeń”. Natomiast znajdujące się tu okno o nazwie „Program” (środkowe okno na dole ekranu rys. 3d) umożliwia wprowadzenie takich danych, jak: min. dystans, maks. dystans, nr cyklu, minimalna wielkość czcionki, maksymalna wielkość czcionki, prędkość przesuwu, pauza oraz przycisk start.

Istotnym elementem jest umieszczone w prawym dolnym rogu okno „Eye View” mające służyć przyszłociowemu wyświetlaniu obrazu oka, przydatnego zdaniem autorów do prac badawczych z użyciem proponowanego stanowiska. Może to być obiektywny sygnał diagnostyczny.

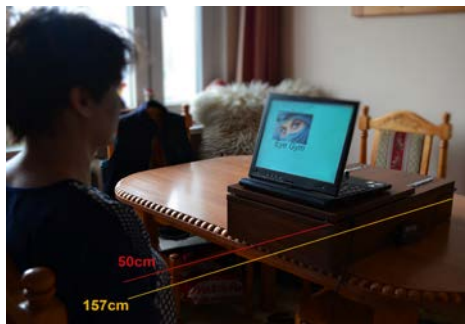
3. PRÓBY STANOWISKA

Po zbudowaniu urządzenia oraz stworzeniu programu, w celu zweryfikowania działania stanowiska przeprowadzono wstępne badania funkcjonowania stanowiska z programem wraz z bazą wybranych ćwiczeń. Celem tych badań

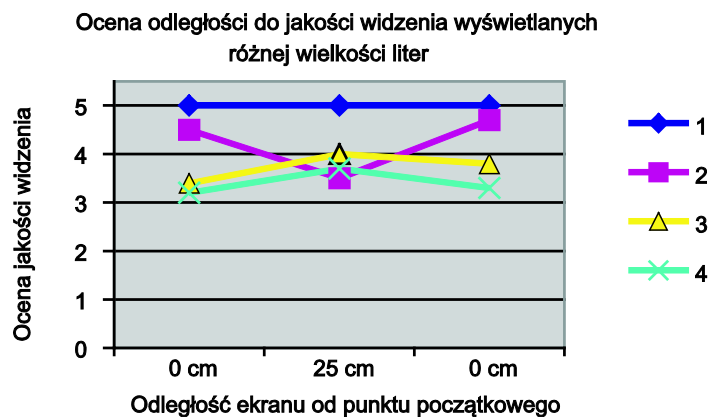
była wstępna weryfikacja przydatności opracowanego stanowiska oraz stworzonego programu.

Badania wstępne zostały przeprowadzone za zgodą 4 osób. Pierwsza nigdy nie miała problemów ze wzrokiem, druga to krótkowidz, trzecia dalekowidz, czwartą cechowała dalekowzroczność starcza. Każda z nich podczas badań siedziała na krześle znajdującym się w odległości 50 cm od ekranu umieszczonego na stoliku urządzenia (rys. 4). W próbach stosowano tablet IBM X41, umożliwiający manipulowanie ekranem (obrót o 180°).

Początkowa odległość wg programu jest zgodna z „Automatyczną Tablicą Snellena” równą 0 cm (odległość oczu ćwiczącego od monitora – 50 cm). Następnie został uruchomiony program z tym ćwiczeniem, a zmiana odległości odbywa się trzykrotnie: na 15 cm, 25 cm i powrót do startu z 3-krotną subiektywną oceną jakości widzenia (na początku, w najdalszym punkcie i po powrocie do startu). Wyniki tej oceny dla różnych odległości zostały przedstawione na wykresie (rys. 5), odpowiednio dla każdej osoby.



Rys. 4. Ustawienie stanowiska do badań próbnych
Fig. 4. Setup of the device for testing purposes



Rys. 5. Wykres uzyskanych wyników subiektywnej oceny jakości widzenia w zależności od nastaw odległości
Fig. 5. Graph of correlations between the results of view quality and distance

Z przeprowadzonych prób oraz analizy otrzymanego na podstawie oceny jakości wzroku według wcześniej omówionej skali wykresu wynika, że:

- dla osoby pierwszej jakość widzenia bez względu na zmianę odległości i czcionki jest na stałym poziomie wynoszącym 5,
- dla osoby krótkowzrocznej różnica – ok. 1 punktu – pomiędzy jakością widzenia odczytywania zmieniającej się wielkości czcionki a zmianą odległości (w punkcie startu i na 25 cm) jest zjawiskiem naturalnym dla osób z tą wadą – dobre widzenie z bliska, złe z daleka; widoczna jest także niewielka poprawa między początkową oceną a końcową,
- dla osoby dalekowzrocznej różnica – prawie 1 punktu – pomiędzy jakością widzenia odczytywania zmieniającej się wielkości czcionki a zmianą odległości (w odsunięciu o 25 cm i w punkcie startu), także naturalna dla osób z tą wadą – lepsze widzenie z daleka, gorsze z bliska,
- dla osoby z dalekowzrocznością starczą jest pewna różnica pomiędzy jakością widzenia odczytywania zmieniającej się wielkości czcionki a zmianą odległości (w punkcie początkowym i w odległości 25 cm), lecz zauważalny jest poważny stopień wady refrakcji w porównaniu z innymi badanymi według oceny jakości widzenia.

Osoby badane były zadowolone z intuicyjnego programu i łatwości obsługi przedstawionego w pracy urządzenia.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionej analizy stanu wiedzy w zakresie zagadnienia stosowania metody Batesa opracowano koncepcję budowy pasywnego stanowiska do ćwiczeń wzroku w oparciu o wskazania tej metody.

Koncepcję oparto na ćwiczeniach wybranych z puli znanych ćwiczeń metody Batesa i jednocześnie kontroli warunków obserwacji obrazu przez zmianę odległości ekranu monitora. W pierwszym etapie zbudowane stanowisko wymaga ustawienia odległości przez pacjenta stosownie do zaleceń programu komputerowego *Eye Gym* opracowanego do obsługi stanowiska. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań wstępnych, którymi objęto grupę 4 osób o różnej kwalifikacji stanu wzroku można stwierdzić, że przygotowane stanowisko i program ułatwia wykonywanie treningu wzroku i jego kontrolę pod względem jakości. Umożliwia on częściową klasyfikację rodzaju i mocy wady wzroku, ponieważ ułatwia subiektywną ocenę jakości widzenia przez osobę badaną przy zmiennej czcionce i odległości. Każdy, nawet pojedynczy epizod ćwiczeń potrafi przynieść delikatną poprawę jakości widzenia.

Po przeprowadzaniu wstępnych badań można wnioskować, że:

- opracowany prototyp stanowiska do ćwiczeń wzroku wykonany zgodnie z ideą metody Batesa spełnia swoje zadanie, zapewniając zmianę odległości, a dobór treningu, kontrolę i ocenę widzenia umożliwia specjalnie opracowany intuicyjny program *Eye_Gym*;

- na podstawie nieskomplikowanych badań z automatyczną tablicą Snellena prostsza i mniej czasochłonna staje się klasyfikacja i moc wady refrakcji;
- zastosowane ćwiczenia wpływają pozytywnie na pacjentów, poprzez relaksację umysłu, a w konsekwencji mięśni i całego organizmu. Działanie to przy dobrym świetle wpływa nie tylko na poprawę wzroku, ale i całego trybu życia;
- przeprowadzone wstępne próby potwierdziły przydatność opracowanego stanowiska – uzyskano rezultaty zgodne z merytoryczną oceną stanu widzenia badanych osób.

Na podstawie wstępnej oceny przedstawionych prób uznano, że należy kontynuować prace nad urządzeniem, z zastosowaniem automatycznej zmiany odległości. W przyszłości planowany jest odczyt sygnału liniału pomiarowego, poprzez skojarzenie go z programem obsługi stanowiska i wyświetlanie bezpośrednio na ekranie komputera. Pożądane jest prowadzenie prac w kierunku budowy systemu automatycznego sterowania położenia ekranu komputerowego z użyciem układu napędowego skojarzonego z programem obsługi stanowiska. Dogodnym jest zastosowanie napędu stołu z wykorzystaniem silnika krokowego sterowanego automatycznie programem *Eye_Gym*. Winno to zapewnić jednocześnie precyzyjną ocenę odległości, z której widzi osoba badana, automatyczny zapis tej odległości w powiązaniu z oceną jakości widzenia, a więc uzyskanie konkretnych parametrów odniesienia do kontroli.

Należy prowadzić prace w zakresie doskonalenia programu *Eye_Gym* przez wyposażenie w większą liczbę funkcji i ćwiczeń, wykorzystujących możliwość automatycznej zmiany wielkości czcionki w funkcji zmian odległości. W pracach tych należy uwzględnić zapis historii oceny wyników ćwiczeń konkretnego pacjenta dla potrzeb diagnostyki wzroku. Szczególnie istotny wydaje się rozwój oprogramowania w zakresie wykorzystania możliwości stosowania obrazu oka do diagnostyki zarówno stanu oświetlenia, jak i oceny np. źrenicy oka. Ważne tu jest rozwiązanie technicznego problemu uzyskiwania obrazu oka niezależnie od pozycji głowy pacjenta.

Celowe jest przeprowadzenie prób praktycznych z wykorzystaniem stanowiska i programu, z uwzględnieniem poprawy komfortu obsługi. Próby te powinny być przeprowadzone na reprezentatywnej grupie osób. Metodyka badań powinna zapewnić obiektywną ocenę efektywności stosowania metody Batesa do poprawy widzenia osób z określoną wadą wzroku.

LITERATURA

- [1] BATES W.H.: Naturalne samoleczenie wzroku bez okularów. Wydawnictwo KOS, 2011.
- [2] ELLIOTT D.B.: The Bates method, elixirs, potions and other cures for myopia: how do they work? Editor-in-Chief, *Ophthalmic & Physiological Optics* 33(2), 2013, 75-77.
- [3] GOPINATHAN G., DHIMAN K.S., MANJUSHA R.: A clinical study to evaluate the efficacy of Trataka Yoga Kriya and eye exercises (non-pharmacological methods) in the management of Timira (Ammetropia and Presbyopia). *Ayu* 33(4), Oct-Dec 2012, 543-546.

- [4] <http://www.eslrr.org/>.
- [5] <http://www.iwona.com>.
- [6] <http://www.jogaoczu.pl/welcome.php>.
- [7] MIKOŁAJCZYK T.: Zastosowanie mobilnego robota w dydaktyce. Logistyka 6, 2014, 7480-7487.
- [8] MIKOŁAJCZYK T., MUSIAL J., ROMANOWSKI L., DOMAGALSKI A., KAMIENIECKI L., MURAWSKI M.: Multipurpose Mobile Robot. Applied Mechanics and Materials 282, 2013, 152-157.
- [9] REPKA M.X.: Prevention of Myopia in Children, MD, MBA.
- [10] ROSANES-BERRETT M.B.: Widzieć bez okularów. Samoleczenie i relaks oczu za pomocą codziennych ćwiczeń. Wydawnictwo MEDIUM, 1998.
- [11] www.slideshare.net/nniimmiiss/percepcja-wzrokowa.

THE CONCEPT OF PASSIVE DEVICE FOR EYESIGHT EXERCISES

Summary: Eyesight is one of the most important senses, hard to exist without it. Eyesight is very sensitive and as a result of aging, sickness or inappropriate usage may get damaged partially or entirely. Very often we forget to care for it what causes more and more people getting affected by vision defects that ophthalmologists “cure” by prescribing glasses. There are methods though, that allow for improvement and sustenance of a very good eyesight sharpness. One of those is Bates method. Theory assumes that through exercises of eye muscles eyesight can be improved and glasses are not always necessary. In the thesis a few concepts of device with special software are presented that support Bates method exercises.

Key words: Bates method, eyesight exercises, natural eyesight improvement, eyesight exercises, auxiliary device

Tadeusz MIKOŁAJCZYK, Paweł WALKOWIAK, Marika SKORNIA

EGZOSZKIELET KOŃCZYNY GÓRNEJ O JEDNYM STOPNIU SWOBODY

Streszczenie: Efektywność rehabilitacji jest ściśle powiązana z odpowiednio dobraną terapią. Kuracja ta może być wykonywana poprzez wyspecjalizowany personel bądź zastosowanie zautomatyzowanych urządzeń. Takim stosowanym w różnych konfiguracjach urządzeniem jest egzoszkielec. Jest to swego rodzaju kombinon z zakładany na użytkownika, umożliwiający wspomaganie bądź nawet zastąpienie motoryki człowieka. W pracy przedstawiono propozycję egzoszkieletu o 1 stopniu swobody, zapewniającego rehabilitację kończyny górnej w stawie łokciowym. Sterowanie odbywa się za pomocą silnika krokowego, co zapewnia dużą dokładność w realizacji zaprogramowanych ruchów.

Słowa kluczowe: egzoszkielec kończyny górnej, staw łokciowy, silnik krokowy, sterowanie, rehabilitacja

1. WPROWADZENIE

Uszkodzenia i choroby narządów ruchu przodują w statystyce osób niepełnosprawnych, sięgając ponad 50% populacji niezależnie od grupy wiekowej [4]. Coraz większa wiedza z zakresu anatomii człowieka oraz postęp technologiczny pozwalają na tworzenie nowych oraz bardziej zaawansowanych i skutecznych rozwiązań wspomagających bądź też zastępujących czynności motoryczne ludzi.

Egzoszkielec (ang. *exoskeleton*) czyli zewnętrzny szkielet w postaci powłoki zakładanej na człowieka ma na celu wspomaganie lub zastąpienie ruchu [6]. Konstrukcja ta mocowana jest do odpowiednich elementów ciała i zasilana najczęściej przez akumulatory [7]. Egzoszkielety wyposażone są w efekторы, których zadaniem jest dostarczenie przynajmniej części energii do wybranej kończyny, współpracując przy tym z człowiekiem [8]. Stosuje się napędy z użyciem silników elektrycznych, systemy siłowników hydraulicznych bądź pneumatycznych. Zastosowanie znalazły również napędy ultradźwiękowe [11].

W pracy przedstawiono wybrane rozwiązania w zakresie tematyki egzoszkieleców oraz zaprezentowano własny projekt egzoszkieletu kończyny górnej o jednym stopniu swobody ze sterowaniem ruchu w stawie łokciowym.

dr inż. Tadeusz MIKOŁAJCZYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: tami@utp.edu.pl, tadeusz.mikolajczyk@utp.edu.pl

inż. Paweł WALKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, e-mail: pawel.walkowiak1992@gmail.com

inż. Marika SKORNIA, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, e-mail: maja2105@wp.pl

2. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ

Pierwsze prace nad egzozszkieletem sięgają lat 60. XX wieku, kiedy firma General Electric wyprodukowała kombinezon o nazwie „Hardiman”. Był on za ciężki, systemy sterujące pracowały nieprecyzyjnie, a z powodu ograniczeń technicznych nie można było kontynuować prac nad projektem [3]. Do doświadczeń powrócono dopiero pod koniec lat 90. XX wieku, gdy DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) zainteresowała się tą dziedziną. Realizowano dwa projekty badawcze:

- „Exoskeletons for human performance augmentation” (2001-2007),
- „Army program executive office soldier” (od 2008 r.).

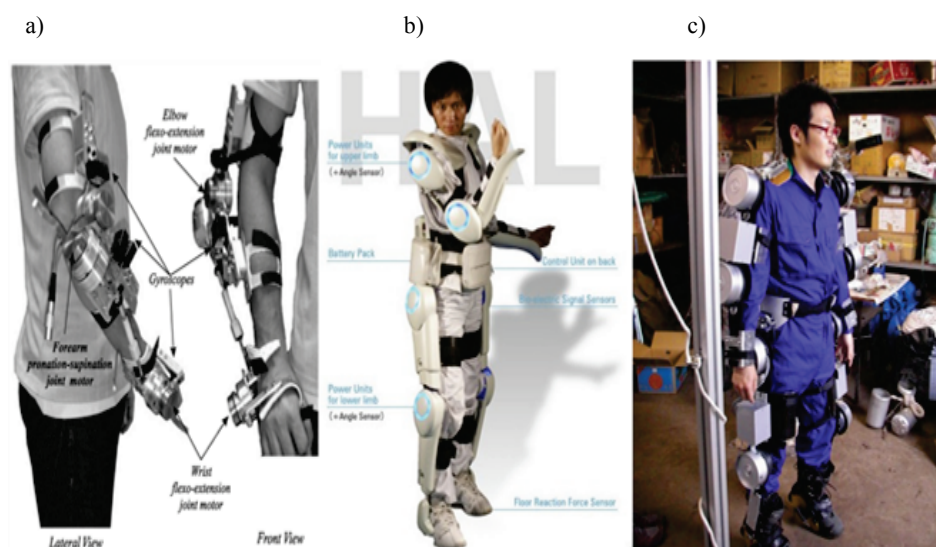
Efektem tych programów, w Sarcos Research Corporation, był amerykański egzozszkielet wojskowy. Rozwiązanie to było inspiracją kolejnych działań w tej dziedzinie na całym świecie [8].

W ostatnich latach powstało wiele różnorodnych projektów dotyczących egzozszkieletów kończyn górnych i dolnych oraz kompleksowych. Część z nich dotyczy zwiększenia siły czy sprawności ludzkiej, ale zastanawiano się również nad tematyką rehabilitacji czy też zastąpienia kończyn człowieka.

Jednym z rozwiązań obecnych na rynku jest WOTAS (Wearable Orthosis for Tremor Assesment and Suppression – rys. 1a). Egzozszkielet ten umożliwia zastosowanie dynamicznych sił wewnętrznych bez jakiegokolwiek odniesienia zewnętrznego na kończynie górnej. Urządzenie ma 3 stopnie swobody wspierane czujnikami kinematycznymi i kinetycznymi [10].

Innym projektem powstałym w Japonii w celu wspierania i rozwijania zdolności fizycznych użytkowników jest HAL-5 (Hybrid Assistive Limb – rys. 1b), opracowany z myślą o poprawie dobrostanu opieki medycznej oraz o wspomaganie w dziedzinach wymagających dużego wysiłku fizycznego. Egzozszkielet wyposażony jest w czujniki rejestrujące bioelektryczne sygnały generowane przez aktywność mięśni. Na podstawie zebranych informacji jednostka napędowa uaktywnia moduły wspierające ruch [5].

Kolejne rozwiązanie opracowane zostało przez profesora Shigeki Toyama do wspomaganie ludzi starszych pracujących na farmach. Wearable Agri Robot (rys. 1c) wyposażony jest w silniki ultradźwiękowe zamocowane na wysokości ramion, łokci, pasa i kolan, pozwalające na podnoszenie przedmiotów ważących do 20 kg. Wagę egzozszkieletu szacuje się na 26 kg, lecz producent zapewnia, że trwają prace nad jej redukcją [11].



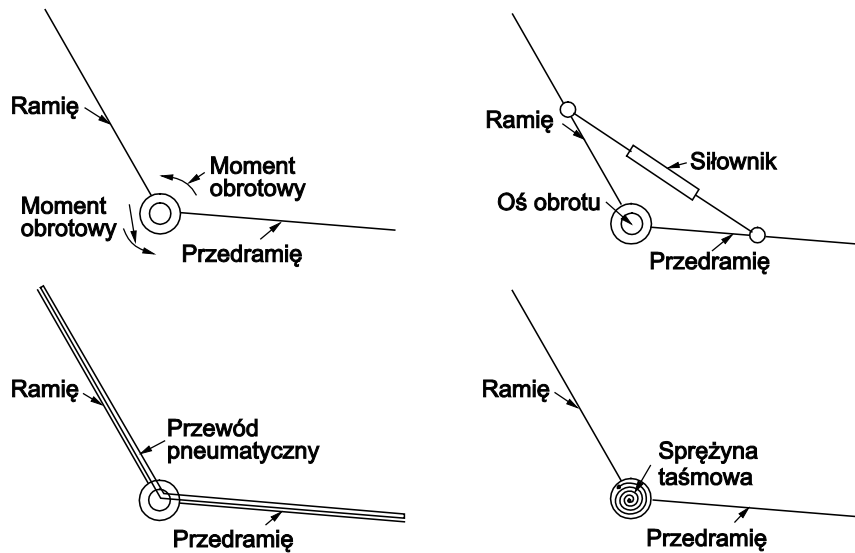
Rys. 1. Wybrane modele egzoskieletów: a) WOTAS Exoskeleton [9],
 b) HAL-5 Exoskeleton [10], c) Wearable Agri Robot [11]
 Fig. 1. Some models of exoskeleton: a) WOTAS Exoskeleton [9],
 b) HAL-5 Exoskeleton [10], c) Wearable Agri Robot [11]

3. EGZOSZKIELET KOŃCZYNY GÓRNEJ

Celem prowadzonych prac było opracowanie modelu egzoskieletu kończyny górnej, zapewniającego wspomaganie ruchu w stawie łokciowym. W pierwszej fazie projektowania egzoskieletu opracowano koncepcje napędu ruchu w stawie łokciowym, zilustrowanego na rysunku 2. Wstępne propozycje obejmowały różne rozwiązania napędu lub wspomagania ruchu.

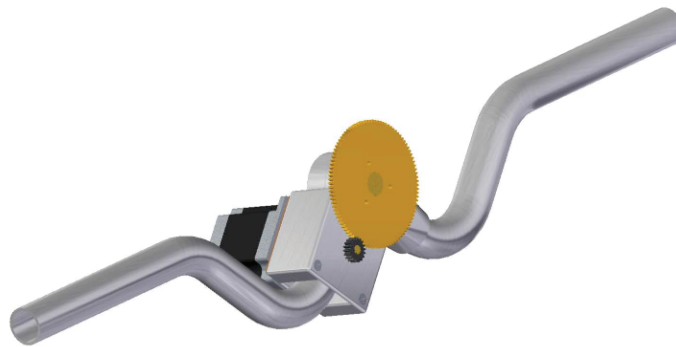
Rozpatrywano rozwiązania z zastosowaniem momentu obrotowego w łokciu, stosowanie różnego typu siłowników pneumatycznych zapewniających ruch zgięcia i wyprostu kończyny czy też wspomaganie mechaniczne (rys. 2).

Na podstawie analizy przedstawionych koncepcji z uwagi na możliwości sterowania, a także biorąc pod uwagę możliwość wykonania zdecydowano o realizacji koncepcji z wykorzystaniem momentu obrotowego (rys. 2a). Do napędu wybrano silnik krokowy o momencie obrotowym 1 Nm. W celu zwiększenia momentu obrotowego układu napędowego zastosowano dodatkowe przełożenie. Z uwagi na prototypowy charakter rozwiązania oraz dostępność elementów użyto przekładni zębatej.



Rys. 2. Koncepty egzozszkieletu kończyny górnej
Fig. 2. Ideas of upper limb exoskeleton

W celu zapewnienia optymalnych własności mechanicznych egzozszkieletu do jego konstrukcji zastosowano rury ze stopu PA6, zapewniające odpowiednią wytrzymałość, niską masę oraz walory estetyczne. Za pomocą programu Solid Edge opracowano model wirtualny konstrukcji (rys. 3).



Rys. 3. Model wirtualny prototypu egzozszkieletu kończyny górnej
wykonany w środowisku Solid Edge
Fig. 3. Virtual model of upper limb exoskeleton made using Solid Edge

Przegub wykonano z wykorzystaniem elementów przegubu z zestawu do mocowań stelaży z rur o średnicy 25 mm. Wykonano specjalny trzpień oraz łożyskowanie, co umożliwi obrót elementów egzozszkieletu. Z uwagi na konieczność odpowiedniego zakresu ruchu zastosowano specjalne wygięcie końcówek rur. W ten sposób zapewniono wymagany zakres ruchu od 30°-180°.

Do napędu egzoszkieletu wykorzystano silnik krokowy, którego obudowę połączono z „ramieniem” egzoszkieletu. Na osi silnika zastosowano koło zębate współpracujące z kołem zębatym połączonym z „przedramieniem” egzoszkieletu. Uzyskano w ten sposób przekładnię zębatą o przełożeniu 1:5, zwiększającą moment przekazywany przez silnik krokowy. Ponieważ minimalny skok silnika wynosi $1,8^\circ$ przy pracy pełno krokowej minimalny ruch przedramienia to $0,36^\circ$. Przy ustawieniu $\frac{1}{2}$ kroku minimalny ruch to $0,18^\circ$. Wykonany prototyp egzoszkieletu przedstawiono na rysunku 4.

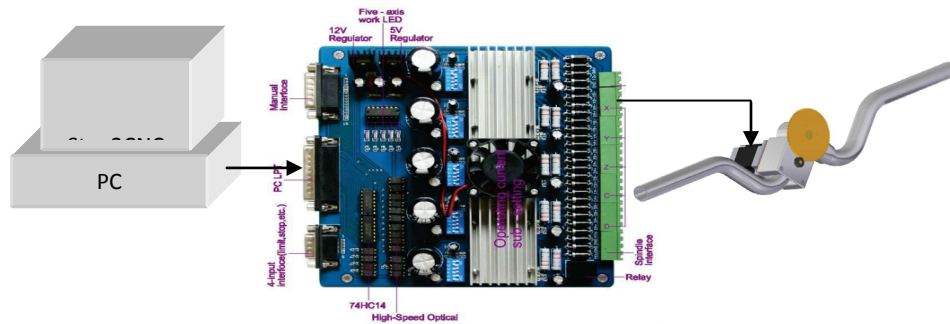


Rys. 4. Prototyp egzoszkieletu kończyny górnej
Fig. 4. Prototype of upper limb exoskeleton

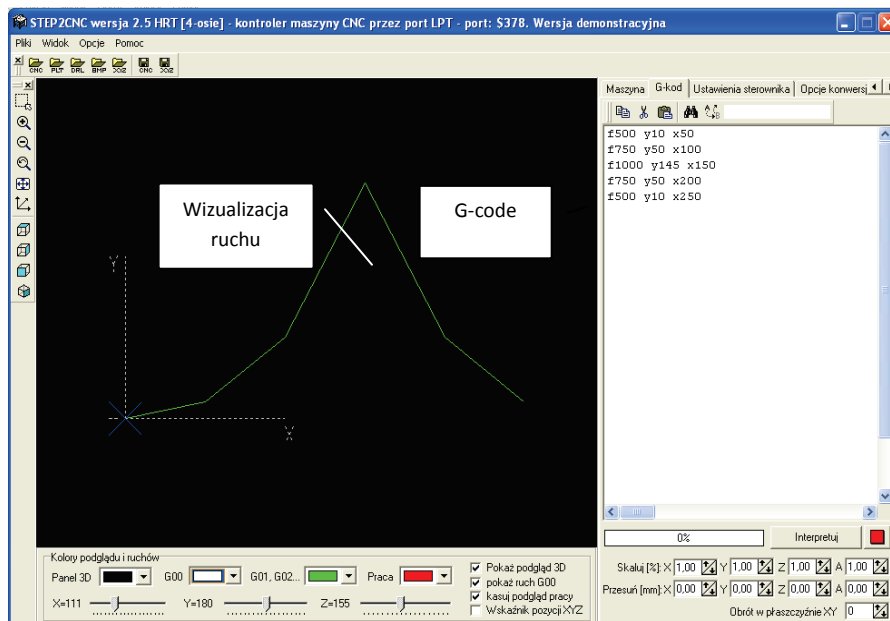
Sterowanie egzoszkieletem odbywa się przez sterownik TB6560 (rys. 5) podłączony do komputera portem LPT. Całość zasilana jest zasilaczem przemysłowym o mocy 600W, napięciu wyjściowym do 36V i prądem wyjściowym rzędu 16A. Wykorzystano program do sterowania obrabiarek sterowanych numerycznie *Step2CNC* (rys. 6). Program umożliwia zarówno sterowanie manualne z użyciem przycisków panelu sterowania ręcznego jak i sterowanie automatyczne. Sterowanie automatyczne odbywa się z użyciem pliku G-code. Stosowane kody umożliwiają sterowanie położeniem kątowym przedramienia, prędkością ruchu, a także programowanie przerw w ruchu. Plik sterowania może być przygotowany zarówno w edytorze programu *Step2CNC*, jak i opracowany jako plik tekstowy w dowolnym edytorze (np. *Notepad*). Plik sterujący może być wtedy wprowadzony z pamięci komputera do programu. Dzięki zastosowaniu tego programu w trybie automatycznym możliwe jest zastosowanie pewnej sekwencji ruchów, które zostaną wykonane przez silnik krokowy. Przy zastosowaniu w zapisie kodu dodatkowej osi (wirtualnie) uzyskano w prosty sposób wizualizację parametrów ruchu (rys. 6).

Przeprowadzono próby działania egzoszkieletu z wykorzystaniem panelu sterowania manualnego programu *Step2CNC*, jak i G-code. Zastosowanie kodu

sterowania umożliwiło automatyzację pracy urządzenia w zakresie programowania położenia przedramienia, prędkości przemieszczeń i przerw.



Rys. 5. System sterowania egzoszkieletu
Fig. 5. Control system of exoskeleton



Rys. 6. Interfejs programu Step2CNC z wizualizacją ruchu
Fig. 6. View of Step2CNC software with visualization of move

Przeprowadzone próby egzoszkieletu potwierdziły poprawność działania. Zastosowany w układzie wyłącznik krańcowy zapewniał niezawodną kalibrację pozycji początkowej (wyprostowane przedramię kąt 180°). W zakładce ustawienia programu ustalono parametr sterowanej osi umożliwiające sterowanie stosowanie do wprowadzonej w parametrze pliku G-code wartości kąta. Wymagało to określenia liczby kroków silnika krokowego z uwzględnieniem zastosowanego w konstrukcji przełożenia.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeglądu części literaturowej oraz części własnej sformułowano następujące wnioski:

- zaprojektowany układ napędowy z zastosowaniem silnika krokowego zapewnia precyzyjne pozycjonowanie i powtarzalność ruchu (dokładność ok. 3-5% kroku), szeroki zakres prędkości obrotowych oraz pracę z pełnym momentem w stanie spoczynku (o ile obecne jest zasilanie na uzwojeniach),
- materiały wykorzystane do budowy egzoszkieletu oraz wybrany profil rurowy zapewniają dobre parametry wytrzymałościowe przy stosunkowo niskiej masie – około 2 kg,
- prosta konstrukcja oraz wykorzystane gotowe komponenty umożliwiły stosunkowo niski koszt wykonania,
- do budowy układu sterowania wykorzystano ogólnie dostępne niedrogie komponenty oraz komputer PC,
- zastosowany program do sterowania egzoszkieletem *Step2CNC* pozwala na dokładne określenie kąta jakie ramię ma uzyskać, umożliwia zaprogramowanie sekwencji ruchów przy zmiennych prędkościach obrotowych,
- wykorzystanie programu *Step2CNC* umożliwia dogodne budowanie układów z automatycznym sterowaniem napędów w 4 osiach,
- celowe jest prowadzenie dalszych prac w zakresie opracowania ergonomicznych elementów łączących egzoszkielec z ramieniem pacjenta, zwiększenia liczby stopni swobody, a także opracowania własnego programu sterowania.

LITERATURA

- [1] Akcesoria.cnc, pobrano 01.05.2015, <http://www.akcesoria.cnc.info.pl/pliki/step2cnc/591x411xstep2cnc.png.pagespeed.ic.6AjMkw2YPP.png>
- [2] aliimg.com, pobrano 01.05.2015, http://hz01.i.aliimg.com/img/pb/667/817/388/388817667_405.jpg.
- [3] CIĘŻKOWSKI P., MIROSLAW T.: Analiza porównawcza systemów transportu typu – egzoszkielec. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 4(95), 2013, 31-39.
- [4] Europejskie Ankiety Badanie Zdrowia (EHIS) 2009, GUS.
- [5] KAWAMOTO H., KAMIBAYASHI K., NAKATA Y. et al.: Pilot study of locomotion improvement using hybrid assistive limb in chronic stroke patients. BMC Neurology 13(141), 2013, pobrano 01.05.2015, <http://www.biomedcentral.com/1471-2377/13/131>.
- [6] MIKOŁAJEWSKA E., MIKOŁAJEWSKI D.: Egzoszkielety we współczesnych środowiskach zintegrowanych. Zeszyty Naukowe WSOWL 4, 2011, 246-253.
- [7] MIKOŁAJEWSKA E., MIKOŁAJEWSKI D.: Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkielec medycznych. Zeszyty Naukowe WSOWL 5, 2011, 58-63.
- [8] MIKOŁAJEWSKA E., MIKOŁAJEWSKI D.: Możliwości wykorzystania egzoszkieletu medycznego jako nowoczesnej formy terapii. Państwowy Fundusz Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych, Niepełnosprawność – zagadnienia, problemy, rozwiązania 4, 2012, 121-141.

- [9] PONS J.L., ROCON E., RUIZ A.F., MORENO J.C.: Upper-Limb Robotic Rehabilitation Exoskeleton: Tremor Suppression. Rehabilitation Robotics, pobrano 12.15.2014, http://www.intechopen.com/books/rehabilitation_robotics/upperlimb_robotic_rehabilitation_exoskeleton_tremor_suppression.
- [10] Robaid.com, pobrano 26.06.2015, from Robaid.com, <http://www.robaid.com/bionics/cyberdyne-hal-5-exoskeleton-robot.htm>.
- [11] TOYAMA S.: Toyama Research. Pobrano 22.04.2015, http://www.tuat.ac.jp/~toyama/research_assistancesuitE.htm.

UPPER LIMB EXOSKELETON WITH ONE DEGREE OF FREEDOM

Summary: The effectiveness of rehabilitation is closely linked with suitably chosen therapy. The treatment can be performed only by specialized personnel or through the use of automated devices. So there is a possibility of solution which is exoskeleton. It is the kind of suit that allows the user assumed to support or even replace the human motor. The paper presents a proposal to the exoskeleton with 1 degree of freedom providing upper extremity rehabilitation in the elbow. Control is via stepper motor which ensures high accuracy in the implementation of programmed movements.

Key words: upper limb exoskeleton, elbow, stepper motor, control, rehabilitation

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

7(4)/2016, 87-93

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Marietta MARKIEWICZ-PATALON, Jerzy KASZKOWIAK

**NEW SYSTEMS OF MUNICIPAL WASTE'S MANAGEMENT
ILLUSTRATED WITH AN EXAMPLE OF SELECTED
DISTRICTS**

Summary: The problems of generation and management of municipal wastes generated by households are presented in this article. The numeric data concerning the volumes of generated municipal wastes, their processing and costs related to their storage in two, independent of each other districts are presented here. The obtained results were compared with assumptions established by these districts when the act came into effect. The quantity of waste per capita varies from 0.13 to 0.30 Mg/year.

Key words: wastes management, volumes of generated wastes, Environmental Protection Law, local self-government, wastes' recovery problem

1. INTRODUCTION

The problem of municipal wastes segregation has, according to literature, been noticed already since XIX century. The first documents confirming the waste collection and segregation as well as establishment of the first municipal waste incineration plant have been preserved from that period of time. According to the act as of April 27, 2001 Environmental Protection Law considers all the materials and fluid substances from which a considerable volume may be used as a secondary materials [1], to be waste. In their general division, there may be distinguished municipal and industrial wastes. In Poland, in spite of legal conditions, there still are being formed the so-called illegal dumps, with not control and supervision, the consequences of existence of which shall be noticeable for the next years.

Harmfulness of wastes for the natural environment is the essential criterion of wastes division. The mentioned wastes, pursuant to the European Directive, are being classified as: wastes from households, large wastes, craft wastes and wastes from trade of the character of wastes from households, garden and parkland wastes, from market places, street sweepings, construction wastes, sewage sludge, fecal matter, fecal sediments, leavings formed in the course of waste water treatment and water conditioning [4].

mgr inż. Marietta MARKIEWICZ-PATALON, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,
e-mail: marietta.markiewicz@utp.edu.pl

dr inż. Jerzy KASZKOWIAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii
Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: jerzy.kaszковиak@utp.edu.pl

Legal changes in the manner of management of wastes generated by households took place in July 2013, when there started to bind the Act on the change of the act on maintaining cleanness and order in districts [2]. It shifted the obligation of management of wastes generated by households to local self-governments. Prior to the Law's amendment, management of wastes in Poland was not arranged and it was the owner of a real estate who decided on what company and for what amount shall collect municipal wastes. From the date of coming into force of the law, a new obligation of the district is conducting an annual analysis of the state of municipal wastes' management in order to verify its technical and organizational possibilities within the scope of municipal wastes' processing, investment needs, costs of the municipal wastes' management system [9]. Each holder of wastes, understood according to the Law on wastes of April 27, 2001 (Journal of Laws of June 20, 2001) as a physical or legal person factually managing the wastes, (owner of the property that the earlier mentioned wastes is stored), should get appropriate containers for selective collection of wastes. Selective collection of wastes means separate collection of fractions of: paper, metal, plastics, glass, large multi-material packages, bio-degradable municipal wastes including bio-degradable package wastes and used electric and electronic equipment [3].



Fig. 1. Municipal wastes at households (own study)

The inhabitants of districts have been obliged to lodge declarations governing the type of collection (selective or non-selective) and incurring costs of wastes' collection from households. The reason of such changes' introduction was the state of the natural environment, polluted by mass storage of non-degradable wastes or wastes putrefying over a longer time period. The areas where wastes are being stored, commonly called dumps, result in considerable threat to the natural environment and generate mounting costs, what results from the increase of wastes' generation at households for at least 1% per year.



Fig. 2. Municipal wastes dump (own study)

Revisions have, to a small degree, improved functioning of wastes' turnover and wastes in Poland have been all the time been considered as a needless ballast, and their storage on dumps far from a city has been considered to be the best solutions. Meanwhile up-to-date methods make it possible not only to eliminate a harmful impact of wastes on environment but also to obtain considerable economical profits [7]. A household generates annually about 300-500 kg of wastes, what in the scale of the whole country gives about 10-11 million tons per year (on the basis of data on volumes of wastes registered on dumps) [10]. Moreover, a considerable volume of wastes is stored on illegal dumps.

The changes resulting from the adjustment of the Polish law to the European law result not only segregation and storage of wastes, but most of all their processing. As far as recycling is considered, as compared to the western European countries, Poland has been using its potential possibilities in less than 10%. For example, in Germany only 20% of wastes are sent at dumps due to impossibility of their re-use. The remaining part is re-used or processed into energy. Production of alternative fuels may be the example of plastics' processing. Establishment of industrial plants dealing with wastes' incineration, professionally called Thermal Municipal Wastes' Conversion Installations has become the most popular method among the recycling method of wastes' use in Poland. This process is not the only method of their utilization, an incineration plant is the solution of the problem of these wastes which give in to other utilization methods, it does not fill in for recycling, composting or other methods, it is only supplementation of recycling methods. Annually in Poland 9473830,98 Mg of wastes are generated, that is why up-to-date technological solutions of their utilization and recovery are such an important aspect. The share of individual provinces in the total volume of generated municipal wastes in Poland is differentiated both in absolute values as well as expressed per

capita. The highest volume of municipal wastes is generated in the Silesian and Mazovian provinces. In the Mazovian province it is 0,25 Mg per capita while in Silesian province 0,29 Mg per capita.

Table 1. The volumes of generated wastes in provinces per year (own study on the basis of [5])

Province	Volume of wastes during a year, Mg	Volume of wastes during a year per capita, Mg
ŁÓDZ	575 752,71	0,22
MAZOVIAN	1 331 624,24	0,25
LITTLE POLAND	702 040,46	0,20
SILESIA	1 347 843,98	0,29
LUBLIN	348 423,88	0,16
SUBCARPATHIAN	357 579,09	0,16
PODLASKIE	251 713,85	0,20
ŚWIĘTOKRZYSKIE	169 697,12	0,13
LUBUSZ	313 098,11	0,30
GREAT POLAND	949 771,12	0,27
WEST POMERANIAN	519 510,71	0,30
LOWER SILESIA	853 739,49	0,29
OPOLE	247 976,68	0,24
KUYAVIAN-POMERANIAN	514 951,87	0,24
POMERANIAN	644 789,71	0,28
WARMIAN-MAZURIAN	345 317,96	0,23

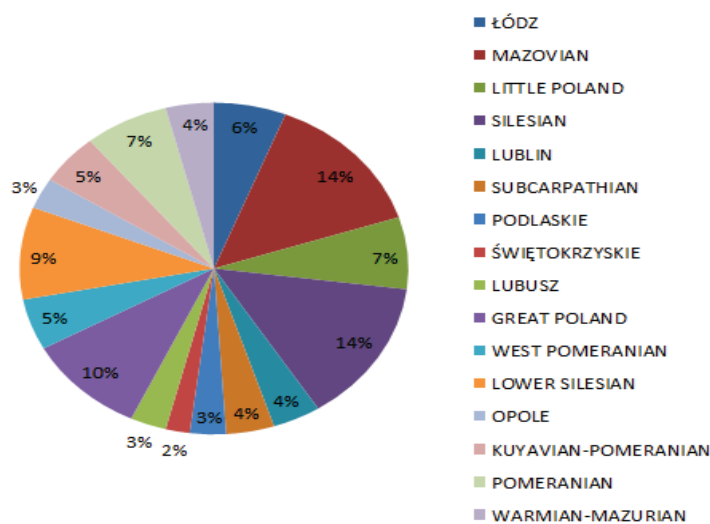


Fig. 3. The percentage share of generated wastes in individual provinces within a year (own study on the basis of [5])

2. PURPOSE OF THE STUDY

The purpose of the study is to establish the volume of municipal wastes generated by one inhabitant and comparison of the above mentioned wastes' generation in two unrelated districts and the analysis of wastes' management manner.

3. RESULTS OF THE STUDIES

The volume of wastes generated by households in selected districts, in two separated provinces (district A – Mazovian province, district B – Warmian-Mazurian province) were analysed. The volumes of generated wastes per capita and the ratio of the volume of wastes recovered for storage at dumps and the costs of their storage were compared.

Table 2. Comparison of the volumes of the generated wastes (own study on the basis of literature [6, 8])

	District A	District B
Number of inhabitants	4866 inhabitants	8697 inhabitants
Volume of municipal wastes	1147,7 [Mg/year]	1478,0 [Mg/year]
Volume of municipal wastes per capita	0,24 [Mg/year]	0,17 [Mg/year]
Volume of wastes subject to recovery	140,7 [Mg/year]	221,0 [Mg/year]
Volume of wastes stored at dumps	1007,0 [Mg/year]	1257,0 [Mg/year]
Costs connected with storage of wastes not subject to recovery (110,6 PLN/t)	111374,2 [PLN/year]	139024,2 [PLN/year]
Cost of wastes' storage per capita	22,9 [PLN/t]	15,9 [PLN/t]

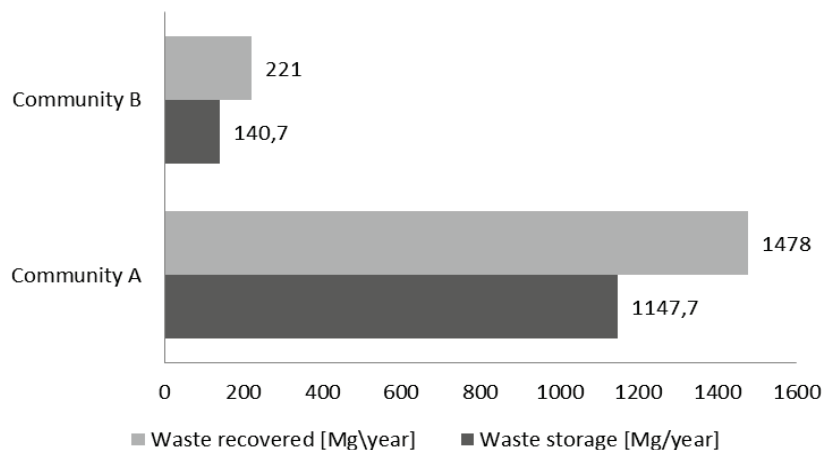


Fig. 4. Ratio of wastes recovered to stored (on study)

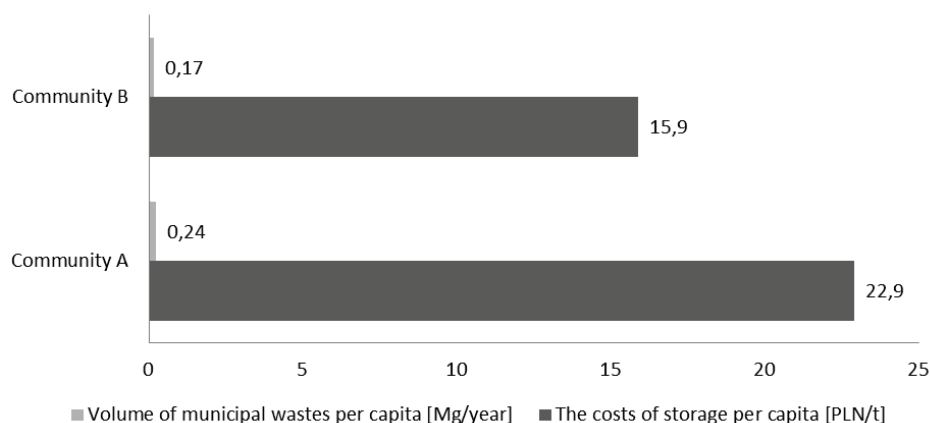


Fig. 5. Comparison of the costs of storage and volumes of wastes' generation per capita (own study on the basis of literature [6, 8])

At the chart 4 the ratio of the volume of wastes subject to recovery and the volume of wastes stored at dumps. These volumes are similar in both the districts. The district A has been recovering 13% of wastes while 87% is transported on dumpsites, analogously in district B – 15% of wastes is subject to recovery while 85% is stored on dumpsites. From the presented data (chart 4 and 5) it results, that the district A, in spite of a lower number of inhabitants generates for 0,07 [Mg/year] more of municipal wastes than the district B, and what's connected with that, the cost of storage of wastes not subject to recovery per capita is for 7 PLN higher than in the district B.

4. CONCLUSIONS

Wastes and threats connected with them are a growing problem in the environment protection. However, last years showed an increased interest of the State authorities in wastes management and minimization of their generation in individual districts, but also introduction of new technologies connected with rendering harmless and recycling of wastes. Within the scope of wastes' management since 1997 many legal conditionings which set down the mode of wastes' handling have been established, however these were the revisions from 2013 which forced the local self-governments to organize the manner of the wastes management. The presented districts located in the Mazovian and Warmian-Mazurian province have been gradually implementing the provisions of the Law since 2013. The so-far changes concern imposing upon inhabitants of the terms of a municipal company collecting wastes from households and impose an obligation of wastes' segregation and bearing costs connected with their storage at dumpsites. A gradual increase of the volume of wastes subject to recovery and substitution of storage with management is being observed. However, there is no correlation between enterprises offering wastes processing services and legal conditionings and expenses for raw materials' recovery, what

constitutes an issue not settled yet. Undoubtedly, apart from further legal and organizational changes, necessary are actions encouraging inhabitants to segregate wastes and fully legal their storage. So far there are still more wastes stored on dumpsites than recovered or utilized.

REFERENCES

- [1] Act as of April 27, 2001, Law on Environmental Protection (Journal of Laws no 62 item 627).
- [2] Act as of July 1, 2011 on the change of the act on cleanness and order maintenance in districts and some other acts (Journal of Laws from July 25, 2011 item 897).
- [3] Act as of September 13, 1996 on cleanness and order maintenance in districts.
- [4] Directives of the European Parliament and the Council 2009/98/CE dated November 19, 2008 on wastes (Journal of Laws L312 from 22 XI 2008).
- [5] stat.gov.pl/obszary-tematyczne/infrastruktura-komunalna-nieruchomosci/nieruchomosci-budynki-infrastruktura-komunalna/infrastruktura-komunalna.
- [6] www.brodnica.net.pl/asp/pliki/download/pgo.pdf.
- [7] www.egospodarka.pl, Wysypiska śmieci rosnącym problemem. Regina Anam, poradnik internetowy eGospodarka.
- [8] www.milakowo-umig.bip-wm.pl/public.
- [9] www.mos.gov.pl, Ministerstwo Środowiska, Departament Gospodarki Odpadami, Nowy system gospodarki odpadami komunalnymi, Emilia Kołaczek, Warszawa.
- [10] www.mos.gov.pl, Ministerstwo Środowiska, Rzeczpospolita Polska.
- [11] www.spalarnie-odpadow.pl/technologie-spalania.