

# przeгляд®

12  
2024  
rocznik LXXIX  
cena 30,00 zł  
w tym 8% VAT



# komunikacyjny

UKAZUJE SIĘ OD 1945 ROKU



## Infrastruktura i służby ruchu lotniczego

eISSN  
2544-6037

ISSN  
0033-22-32

Czy Służby Ruchu Lotniczego mogą być szkolone również przez podmioty prywatne? Krajobraz wyzwań i możliwości sztucznej inteligencji w lotnictwie cywilnym. Projekt geometrii, model numeryczny i badania właściwości fizyczno-mechanicznych geokraty lotniskowej. Bezpieczeństwo na interoperacyjnej stacji tankowania wodoru w transporcie kolejowym - projekt FP4 RAIL4EARTH w partnerstwie Europe's Rail Joint Undertaking. Badania wyposażenia elektrycznego, elektronicznego oraz mechanicznego przeznaczonego do taboru szynowego w zakresie bezpieczeństwa pożarowego. „Wspólne Przedsięwzięcie Badawczo-Rozwojowe” w obszarze infrastruktury kolejowej w Polsce. Główne linie kolejowych przewozów międzyregionalnych w Polsce

# Projekt geometrii, model numeryczny i badania właściwości fizyczno-mechanicznych geokraty lotniskowej

## Geometry project, numerical model and physical-mechanical properties tests of the airport geogrid



**Mariusz Wesołowski**

Płk dr hab. inż.

Wojskowy Instytut Techniki  
Pancernej i Samochodowej

ORCID: 0000-0002-5545-8831

mariusz.wesolowski@witp.is.eu



**Krzysztof Blacha**

Płk dr inż.

Instytut Techniczny Wojsk  
Lotniczych

krzysztof.blacha@itwl.pl



**Paweł Pietruszewski**

Mgr inż.

Instytut Techniczny Wojsk  
Lotniczych

pawel.pietruszewski@itwl.pl



**Piotr Niewiarowski**

Mgr inż.

Projekt Plus Sp. z o.o.

pniewiarowski@rejestracjalotnisk.com.pl

**Streszczenie:** Odpowiednio zaprojektowana, kompleksowo przebadana oraz poprawnie technologicznie wykonana geokrata z tworzywa sztucznego może być stosowana do poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych, zapewniając bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. Będąc przedmiotem artykułu geokrata wykonana została metodą wtryskową z PEHD (polietylen wysokiej gęstości) uzyskiwanych z procesu recyklingu tworzyw sztucznych w formie jednorodnego regranulatu o stałych i opisanych w karcie technicznej produktu parametrach. Stosowanie tzw. przemiału nie jest dopuszczalne. Do produkcji geokraty na jedną inwestycję należy użyć regranulatu skomponowanego i wytworzonego z jednej partii recyklingowanego tworzywa. Na etapie projektowania geometrii geokraty przyjęto założenie, aby poszczególne elementy były ze sobą spinane zamkiem umożliwiającym demontaż, ale nierozpinającym się w warunkach eksploatacji, przy jednoczesnym zapewnieniu redukcji naprężeń termicznych. Zaprojektowana geokrata została zamodelowana i poddana szczegółowej weryfikacji numerycznej w trakcie symulacji Metodą Elementów Skończonych (MES). W artykule przedstawiono również wyniki badań laboratoryjnych, których głównym celem było sprawdzenie wybranych właściwości mechanicznych i fizycznych tworzywa sztucznego, z którego będzie produkowana geokrata. W trakcie badań, które obejmowały sprawdzenie wytrzymałości na zginanie, określenie wytrzymałości na rozciąganie oraz sprawdzenie wytrzymałości na ściskanie, uzyskano satysfakcjonujące wyniki. Kierunek dalszych, realizowanych już prac, skoncentrowany został na wykonaniu badań w warunkach terenowych na rzeczywistym obiekcie lotniskowym, na którym wbudowano geokratę na wybranych elementach funkcjonalnych lotniska. Szczegółowej ocenie zostanie poddana technologia układania geokraty oraz parametr nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych przed i po zastosowaniu geokraty. Otrzymane wyniki stanowią będą podstawę do opracowania kolejnych publikacji.

**Słowa kluczowe:** Geokrata lotniskowa; Naturalna nawierzchnia lotniskowa; Nośność; Tworzywo sztuczne; Bezpieczeństwo operacji lotniczych

**Abstract:** A properly designed, comprehensively tested and technologically correctly manufactured plastic geogrid can be used to improve the load-bearing capacity of natural airport pavements, ensuring the safety of air operations. The geogrid that is the subject of the article was made by injection molding from PEHD (polyethylene high density) obtained from the recycling process of plastic in the form of homogeneous regranulate with constant and described in the technical data sheet of the product. The use of so-called milling is not allowed. For the production of geogrids for a single investment, use regranulate composed and produced from a single batch of recycled plastic. At the stage of designing the geogrid geometry, it was assumed that the individual elements would be fastened together with a lock that would allow disassembly, but would not unfasten under operating conditions, while ensuring the reduction of thermal stresses. The designed geogrid was modeled and subjected to detailed numerical verification during simulation using the Finite Element Method (FEM). The article also presents the results of laboratory tests, the main purpose of which was to check selected mechanical and physical properties of the plastic from which the geogrid will be manufactured. During the tests, which included checking the bending strength, determining the tensile strength and checking the compressive strength, satisfactory results were obtained. The direction of further, already implemented works was focused on conducting tests in field conditions on a real airport facility, where a geogrid was built into selected functional elements of the airport. The technology of laying the geogrid and the load-bearing capacity parameter of natural airport pavements before and after the use of the geogrid will be subjected to a detailed assessment. The obtained results will constitute the basis for the development of further publications

**Keywords:** Airport geogrid; Natural airport surface; Load-bearing capacity; Plastic; Safety of flight operations

### Wstęp

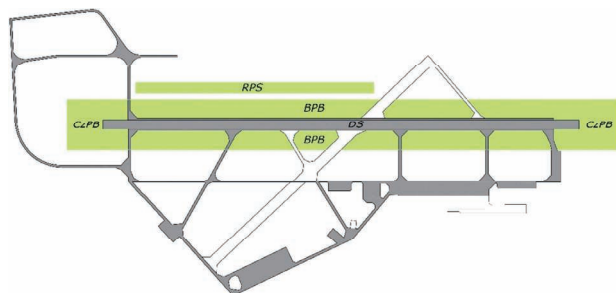
Transport lotniczy na przełomie ostatnich dziesięcioleci przeszedł ogromną transformację. Zwiększająca się masa startowa statków powietrznych, ich budowa oraz nieustanny rozwój spowodował przejście z

lotnisk o nawierzchni naturalnej/darńniowej do nawierzchni sztucznych. Niemniej jednak ten specyficzny rodzaj nawierzchni w dalszym ciągu występuje na lotniskach i lądowiskach użytku cywilnego oraz wojskowego, odgrywając bardzo ważną rolę podczas wykonywania operacji lotni-

skich. Naturalne nawierzchnie lotniskowe odpowiadają za zapewnienie bezpieczeństwa w odniesieniu do manewru przerwane go startu bądź opóźnionego lądowania i ewentualnego wykołowania z drogi startowej. Jednak do niedawna wymagania oraz metodyka dotyczące oceny



1. Skutki niedostatecznej nośności naturalnej nawierzchni lotniskowej [6,7]



2. Schemat rozmieszczenia EFL [10]

nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych nie były uregulowane, co spowodowało, że zostały one częściowo zaniedbane, a to bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych. Zdarzenia, incydenty lotnicze związane z wyżej wymienionymi sytuacjami zarejestrowane są w Międzynarodowej Bazie Katastrof Lotniczych czasami z bardzo tragicznymi skutkami, a awaryjne opuszczenie drogi startowej jest szczególnie groźne w sytuacji nieodpowiedniej nośności naturalnej nawierzchni znajdującej się w obrębie drogi startowej. Przykład skutków niedostatecznej nośności naturalnej nawierzchni lotniskowej zobrazowano na rys. 1.

Naturalna nawierzchnia lotniskowa, według [1,2], jest to nawierzchnia lotniskowa utworzona przez odpowiednie przygotowanie gruntu w celu zapewnienia możliwości bezpiecznego ruchu po niej wojskowych i cywilnych statków powietrznych. Aktualnie rozróżnia się dwa typy nawierzchni naturalnych, tj.: gruntowe

i darniowe [3]. Nawierzchnie gruntowe wykonane są z odpowiednio przygotowanego gruntu – nie posiadają warstwy darniowej (trawiastej). Natomiast nawierzchnia darniowa jest nawierzchnią gruntową, pokrytą warstwą odpowiednio dobranej i rozwiniętej roślinności trawiastej [4,5].

W zależności od rodzaju lotniska i jego funkcji naturalne nawierzchnie lotniskowe spełniają określone zadania. Obecnie naturalne nawierzchnie lotniskowe występują na elementach funkcjonalnych lotniska (EFL), takich jak (rys. 2):

- boczne pasy bezpieczeństwa (BPB, pobocza), które zabezpieczają statek powietrzny przed uszkodzeniami, w sytuacji awaryjnego zjechania z drogi startowej. Nawierzchnie naturalne powinny być przygotowane lub zbudowane w taki sposób, aby w przypadku ewentualnego zjazdu statku powietrzego z drogi startowej nie spowodowały jego uszkodzenia i infrastruktury podziemnej

oraz aby gwarantowały szybkie przywrócenie zdolności operacyjnej lotniska poprzez sprawne usunięcie statku powietrzego przez służby lotniska [8,9];

- czołowe pasy bezpieczeństwa (CzPB, RESA – Runway End Safety Area), które gwarantują, aby manewr przerwano startu bądź opóźnionego lądowania i ewentualnego wykołowania statku powietrzego z drogi startowej mógł zostać przeprowadzony bez jego uszkodzenia [8,9];
- nieutwardzone drogi startowe na mniejszych lotniskach lub roboczy pas startowy (RPS – EFL na lotniskach wojskowych), które są częścią pasa startowego przeznaczoną do rozbiegu i oderwania statku powietrzego przy starcie oraz do przyziemienia i dobiegu przy lądowaniu.

## Geokrata - wymagania techniczno-użytkowe

Elementy wzmocnienia naturalnych nawierzchni lotniskowych, tj. geokrata wykonana została metodą wtryskową z PEHD uzyskiwanych z procesu recyklingu tworzyw sztucznych. Jest to olbrzymia zaleta, gdyż w tym samym systemie może być ponownie przetwarzana. Zaproponowano konstrukcję opartą na ośmioboku wzmacnianą progiem krawędziowym oraz kotwą zabezpieczającą przed wrywaniem, co pozwoli na zniwelowanie odkształceń związanych ze zmianą wymiarów pod wpływem różnic temperatur. Typowe właściwości tworzywa, przeznaczonego do wytworzenia geokraty lotniskowej

Tab. 1. Typowe właściwości tworzywa przeznaczonego do wykonania geokraty lotniskowej

| Typowe właściwości   | Wartość nominalna | J.m.              | Metoda badań  |
|--|-------------------|-------------------|---------------|
| Wskaźnik szybkości płynięcia (MFR)<br>190°C/2,16 kg<br>190°C/5,0 kg            | 4,0               | g/10 min          | ISO 1133-1    |
|  | 11,0              | g/10 min          | ISO 1133-1    |
| Gęstość  | 0,955             | g/cm <sup>3</sup> | ISO 1183-1    |
| Moduł sztywności przy rozciąganiu  | 1200              | MPa               | ISO 527-1, -2 |
| Napężenie na granicy plastyczności   | 27                | MPa               | ISO 527-1, -2 |
| FNCT (3,5 MPa, 2% Akropal N100, 80°C)  | 4,5               | godz.             | ISO 16770     |
| Udarność z karbem wg Charpy'ego<br>23°C, Typ 1, karb A<br>-30°C, Typ 1, karb A | 4,0               | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179       |
|  | 4,5               | kJ/m <sup>2</sup> | ISO 179       |
| Twardość Shore (Shore D)   | 60                |                   | ISO 868       |
| Twardość kulkowa (H 132/30)  | 52                | MPa               | ISO 2039-1    |
| Temperatura mięknienia Vicata (B/50 N)   | 73                | °C                | ISO 306       |



|  |  |
|--|--|
|  | krata lotniskowa wciśnięta w istniejące podłoże gruntowe |
|  | podłoże gruntowe   |

|  |   |
|--|---|
|  | krata lotniskowa ułożona w sposób odwrócony wypełniona humusem i obsiana trawą    |
|  | 2 cm - warstwa podsypki piaskowej   |
|  | 10 cm - dolna warstwa podbudowy z kruszywa 0/31,5 mm stabilizowanego mechanicznie |
|  | 15 cm - dolna warstwa podbudowy z kruszywa 0/63 mm                                |
|  | 10 cm - warstwa podsypki piaskowej  |
|  | podłoże gruntowe  |

3. Układ konstrukcji nawierzchni naturalnej wzmocnionej geokrątką poprzez jej wciśnięcie [11]

4. Układ konstrukcji nawierzchni naturalnej wzmocnionej geokrątką ułożoną poniżej poziomu terenu [11]

przedstawiono w tab. 1.

W celu weryfikacji geokrątki, zaprojektowano szereg badań sprawdzających. W ramach badań laboratoryjnych zaplanowano ocenę właściwości mechanicznych i fizycznych tworzywa sztucznego, z którego będzie produkowana geokrątki. Badania będą obejmowały:

- sprawdzenie wytrzymałości na zginanie,
- określenie wytrzymałości na rozciąganie,
- sprawdzenie wytrzymałości na ściskanie,
- sprawdzenie odporności na działanie czynników eksploatacyjnych występujących na nawierzchniach lotniskowych tj.:
  - paliwa,
  - środki odladzające,
  - woda.

Przedstawione wymagania dla tworzyw sztucznych zostały określone na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych realizowanych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych.

Do weryfikacji systemu wzmacniania naturalnych nawierzchni lotniskowych zaplanowano badania poligonowe polegające na identyfikacji podłoża gruntowego (określenie rodzaju i stanu gruntu) poprzez ręczne wiercenia geotechniczne oraz okre-

śleniu nośności badanej nawierzchni za pomocą sondowania dynamiczną sondą stożkową. Po zastosowaniu układu konstrukcji złożonej z geokrątki lotniskowej i podłoża gruntowego zaprojektowano badania poligonowe oceniające skuteczność wykonanego wzmocnienia. Badania prowadzone na wykonanym wzmocnieniu, będą polegały na określeniu nośności układu konstrukcyjnego złożonego z geokrątki lotniskowej i podłoża gruntowego wyrażonego kalifornijskim wskaźnikiem nośności CBR (California Bearing Ratio). Wymagania jakie musi spełniać naturalna nawierzchnia lotniskowa wzmocniona geokrątką, w odniesieniu do parametru CBR zawarte są w normie NO-17-A503:2017 Nawierzchnie lotniskowe - Naturalne nawierzchnie lotniskowe - Badania nośności. Zgodnie z ww. normą przyjęto, że nośność systemu nie powinna być mniejsza niż CBR 15%.

W celu realizacji pracy zaprojektowano dwa rozwiązania układu konstrukcyjnego składającego się z geokrątki lotniskowej i podłoża gruntowego [11]:

- krata lotniskowa wciskana bezpośrednio w podłoże gruntowe (rys. 3),
- krata lotniskowa ułożona poniżej poziomu terenu na odpowiednio przygotowanej podbudowie (rys. 4).

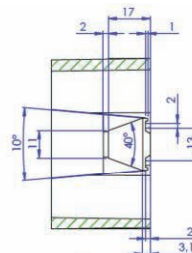
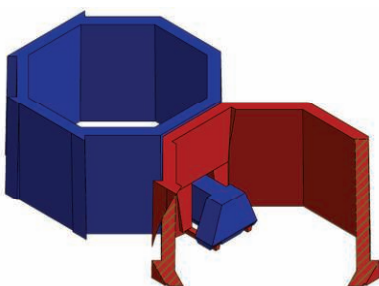
Tab. 2. Kategorie nośności podłoża

| Kategoria podłoża        | CBR [%]      |
|--------------------------|--------------|
| A (nośność wysoka)       | CBR > 13     |
| B (nośność średnia)      | 8 < CBR ≤ 13 |
| C (nośność niska)        | 4 < CBR ≤ 8  |
| D (nośność bardzo niska) | CBR ≤ 4      |

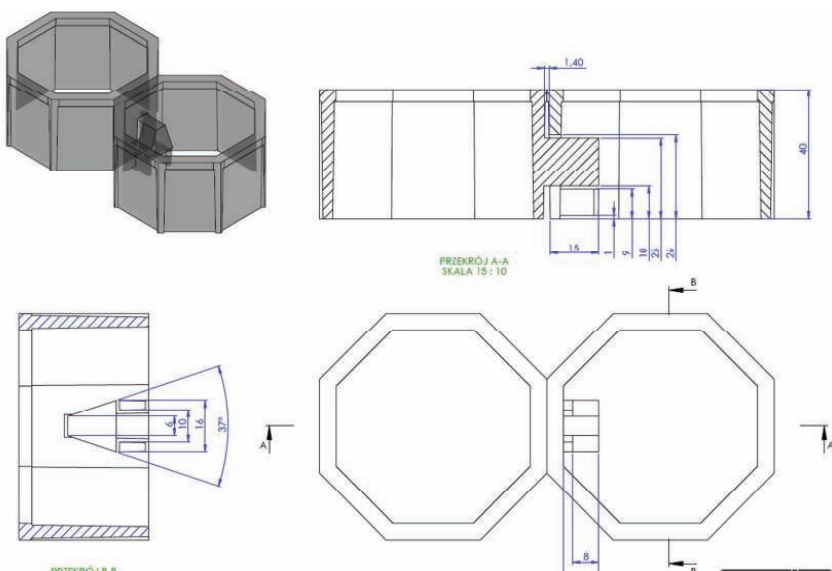
Wybór konkretnego rozwiązania układu konstrukcji, tj.: geokrątki wciskana lub geokrątki układana poniżej poziomu terenu, uzależniona jest od kategorii nośności podłoża, które ma być wzmocnione. Kategorie nośności podłoża opisano w tab. 2. Założono, że konstrukcję składającą się z geokrątki wciśniętej bezpośrednio w istniejące podłoże gruntowe będzie się stosować w celu poprawy nośności naturalnych nawierzchni lotniskowych, które cechują się kategorią gruntu A – duża nośność, CBR > 13% oraz B – średnia nośność, CBR od 8% do 13%. W przypadku kategorii gruntu C – niska nośność, CBR od 4% do 8% oraz D – bardzo niska nośność, CBR < 4% zaleca się zastosowanie układu konstrukcyjnego złożonego z odpowiednio przygotowanej podbudowy oraz ułożonej na niej geokrątki lotniskowej.

## Projekt geometrii

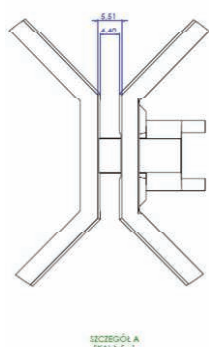
Przy wyborze geometrii geokrątki było istotne, aby poszczególne elementy były ze sobą spinane zamkiem umożliwiającym demontaż, ale nierozpinającym się w warunkach eksploatacji oraz umożliwiającym redukcję naprężeń termicznych. Przyjęto do projektu układu konstrukcyjnego nawierzchni budowa zamka umożliwia spinanie elementów ze sobą przez sprężyste kliknięcie (zamocowanie) w momencie łączenia



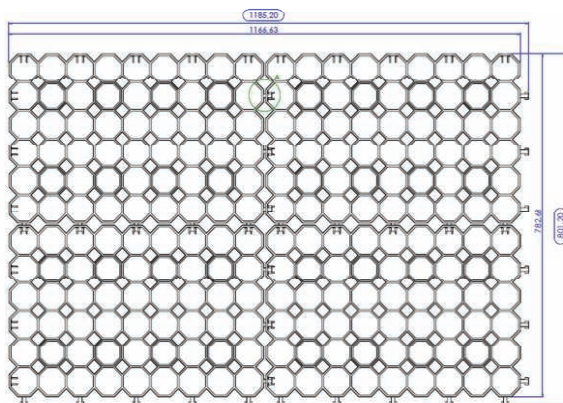
5. Widok zamka zaprojektowanej geokrątki lotniskowej



6. Widok połączenia



7. Widok zaprojektowanej geometrii geokraty



pojedynczych krat ze sobą. Na rys. 5 przedstawiono projekt budowy zamka.

Zapięcia geokraty posiadają samoblokujący zaczep, dzięki czemu nie rozpinają się. System mocowania składa się z trzech zaczepów w kształcie litery „T” na dwóch bokach oraz czterech zaczepów w kształcie litery „U”, co zobrazowano na rys. 6. Natomiast na rys. 7 przedstawiono wymiary geometryczne zaprojektowanej geokraty.

## Model numeryczny – weryfikacja geometrii metodą MES

Rozpatrywany układ konstrukcyjny został zamodelowany w programie

SolidWorks Simulation. SolidWorks Simulation to intuicyjne narzędzie stworzone do przeprowadzania szybkich symulacji wytrzymałościowych tworzonych produktów, z jednoczesnym zachowaniem wysokiej rzetelności wyników. Dodatek Simulation charakteryzuje się między innymi możliwością wykonywania symulacji, testów, obliczeń, analiz wytrzymałościowych, termicznych, analiz MES, obliczeń wyboczeń, obliczeń wytrzymałościowych.

Analizie metodą elementów skończonych poddano poletko składające się z 12 geokrat lotniskowych, w układzie 3 x 4, co pozwoliło na uwzględnienie efektu dystrybucji naprężeń. Zaprojektowana geokrata

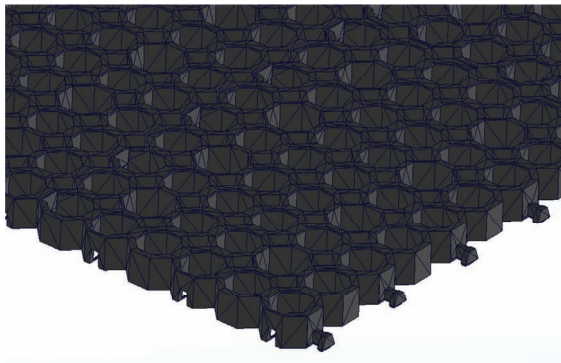
lotniskowa posiada wymiary 0,409 x 0,601 m, co daje powierzchnię poletka równą około 3 m<sup>2</sup>, oraz wysokość ścianek równą 40 mm. Symulację obliczeniową przeprowadzono w trzech miejscach analitycznych: w środku geokraty, przy krawędzi geokraty oraz na krawędzi łączącej dwie sąsiadujące geokraty, dla jednego transportowego, wojskowego statku powietrznego typu C-130E Hercules. Obciążenie, które generuje samolot przekazywane jest na powierzchnię poprzez koła goleni głównych, których rozstaw (przyjęty do analizy) dla C-130E Hercules wynosi 4,35 m. Maksymalna masa startowa samolotu to 79 400 kg, zaś nacisk na pojedyncze koło jest równy 1 215 kPa. Goleń dziobowa statku powietrznego przenosi jedynie ok. 10-15% obciążenia całkowitego statku powietrznego, dlatego jest ona pomijana przy określaniu obciążenia pochodzącego od samolotu. Natomiast na goleń główną przypada ok. 85-90% obciążenia całkowitego (do obliczeń przyjęto 85%). Tak zredukowana wartość obciążenia przypadająca na jedno koło w goleni głównej, została zamodelowana jako obciążenie siłami prostopadłymi do warstwy powierzchniowej przedmiotowej konstrukcji zbudowanej z geokraty lotniskowej i naturalnej nawierzchni lotniskowej.

Obciążenie równoważne przypadające na jedną goleń samolotu ( $P$ ) wyznacza się wg wzoru:

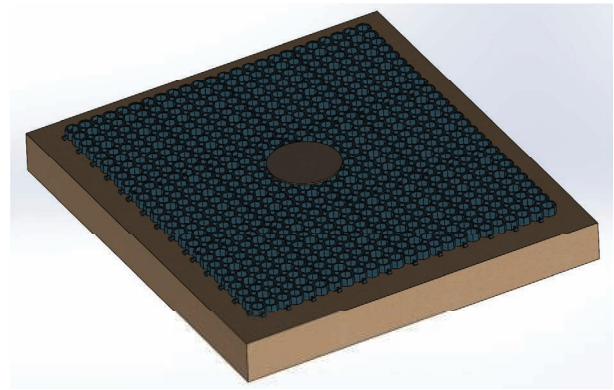
$$P_r = P_g / (\psi \cdot r) \quad (1)$$

w którym:  $P_g$  – obciążenie przypadające na jedną goleń główną samolotu [N],  $\psi$  – współczynnik poprawkowy ze względu na intensywność ruchu [-],  $r$  – współczynnik redukcyjny zastępujący rzeczywistą goleń dwukołową, goleń obliczeniową jednokołową [-].

Dla współczynnika poprawkowego  $\psi$  uwzględniającego intensywność ruchu przyjęto wartość 0,89 [-], natomiast dla współczynnika redukcyjnego  $r$  przyjęto wartość 1,0 [-].



8. Widok modelu siatki geokraty



9. Widok układu konstrukcji

cyjnego  $r$  przyjęto wartość 1,68 [-]. Obciążenie przypadające na jedną goleń główną samolotu ( $P_g$ ) wyznacza się według zależności:

$$P_g = 0,85/2 \cdot (Q \cdot g)/2 \quad (2)$$

w którym:  $Q$  – obciążenie całkowite statku powietrznego [kg],  $g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>].

Dla wstępnej analizy przyjęto, że generowane obciążenie konstrukcji (nawierzchni) od goleni samolotu rozkłada się równomiernie na całej powierzchni styku opony z nawierzchnią. Do obliczeń przyjęto nacisk na pojedyncze koło (każda z goleni składa się z dwóch kół) o wartości  $F = 1,25$  MPa, jako powierzchnię nacisku przyjęto okrąg o średnicy 340 mm.

Na analizowanym poletku symulację przeprowadzono w trzech miejscach analitycznych:

- obciążenie realizowane w środku geokraty lotniskowej (wariant I),
- obciążenie realizowane na narożu łączącym cztery geokraty lotniskowe (wariant II),
- obciążenie realizowane na krawędzi łączącej dwie geokraty lotniskowe (wariant III).

Zaproponowany w pracy model MES układu konstrukcyjnego geokraty lotniskowej oraz podłoża wykonano jako model 3D z elementami bryłowymi. Widok modelu siatki kraty pokazano na rys. 8, zaś na rys. 9 widok analizowanego układu konstrukcji.

Z analizy numerycznej wykonanej MES uzyskano następujące parametry ocenianego układu konstrukcyjnego:

- przemieszczenie pionowe  $U_{max}$ ,
- odkształcenie równoważne  $ESTRN_{max}$ ,
- naprężenie zredukowane według hipotezy wytrzymałościowej Hubera – Misesa – Hencky’ego  $SMises$ .

Wartości otrzymanych parametrów dla poszczególnych wariantów przyłożenia obciążenia zamieszczono w tab. 3 oraz na rys. 10-12.

Zaprojektowany model geokraty lotniskowej w SolidWorks został wydrukowany na drukarce 3D w dwóch egzemplarzach. Umożliwiło to sprawdzenie między innymi zamków spinających geokraty ze sobą oraz

luzów, redukujących wydłużalność termiczną. Wykonane wydruki kraty lotniskowej przedstawiono na rys. 13.

### Badania właściwości fizyczno-mechanicznych

Tworzywo sztuczne, z którego wykonano geokratę - element systemu wzmacniania naturalnych nawierzchni lotniskowych, zostało poddane szczegółowym badaniom materiałowym, w celu określenia podstawowych własności fizyko-mechanicznych [12]. Badania laboratoryjne przeprowadzono na przygotowanych próbkach formowanych metodą wtryskową, które przedstawiono na rys. 14.

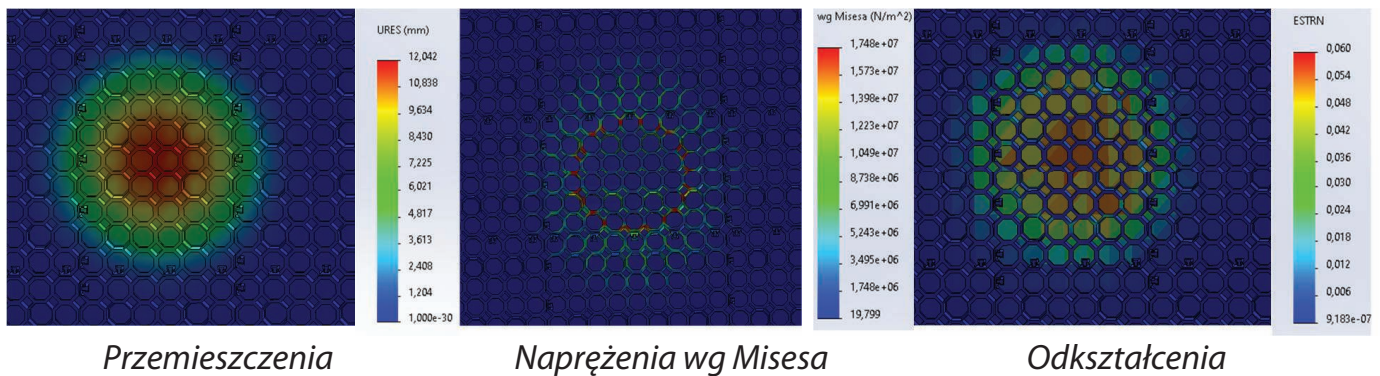
Tab. 3. Parametry ocenianego układu konstrukcyjnego uzyskane podczas analizy MES

| Parametr uzyskany z analizy MES  | Wariant I       | Wariant II | Wariant III |
|--|-----------------|------------|-------------|
|  | C-130E Hercules |            |             |
| Przemieszczenie pionowe $U_{max}$ [mm]                                 | 12,042          | 11,882     | 11,969      |
| Wartość odkształceń równoważnych $ESTRN_{max}$ [-]                     | 0,060           | 0,054      | 0,058       |
| Naprężenia zredukowane wg hipotezy Misesa $SMises$ [N/m <sup>2</sup> ] | 2,577           | 2,698      | 2,575       |

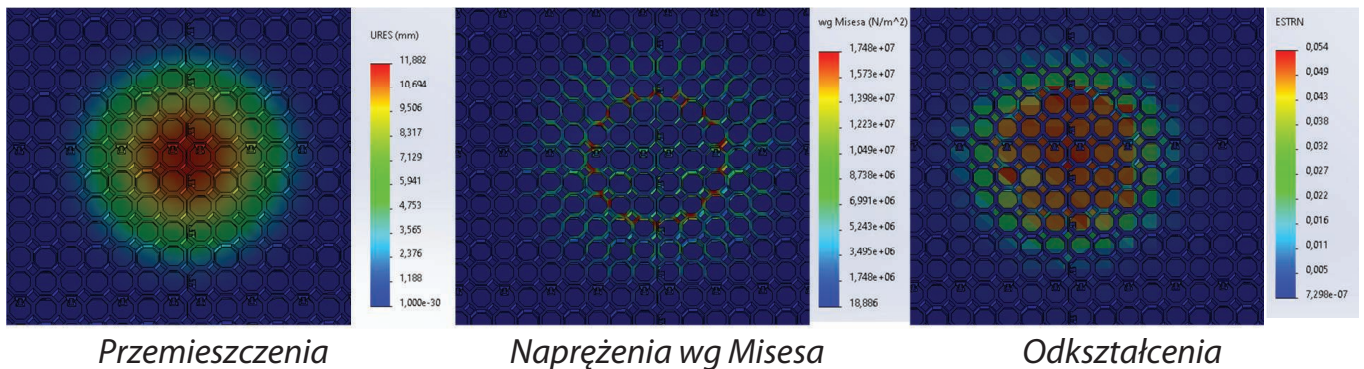
Tab. 4. Zestawienie wyników statycznego zginania

| Oznaczenie próbki | Grubość  | Szerokość                      | Wytrzymałość na zginanie | Odształcenie przy maksymalnym naprężeniu | Moduł sprężystości przy zginaniu |
|-------------------|----------|--------------------------------|--------------------------|--|----------------------------------|
|                   | $h$ [mm] | $b$ [mm]                       | $\sigma_m$ [MPa]         | $\epsilon_m$ [%]                         | $E_f$ [MPa]                      |
| Z/23/1 ZSP        | 4,00     | 10,00                          | 29,0                     | 7,3                                      | 830                              |
| Z/23/2 ZSP        | 4,00     | 10,04                          | 28,9                     | 7,4                                      | 836                              |
| Z/23/3 ZSP        | 4,00     | 10,00                          | 29,5                     | 7,0                                      | 848                              |
| Z/23/4 ZSP        | 4,00     | 9,99                           | 29,0                     | 7,3                                      | 845                              |
| Z/23/5 ZSP        | 4,00     | 9,97                           | 29,0                     | 7,6                                      | 839                              |
|                   |          | <b>Średnia:</b>                | <b>29,1</b>              | <b>7,3</b>                               | <b>839,6</b>                     |
|                   |          | <b>Odchylenie standardowe:</b> | <b>0,2</b>               | <b>0,2</b>                               | <b>7,2</b>                       |

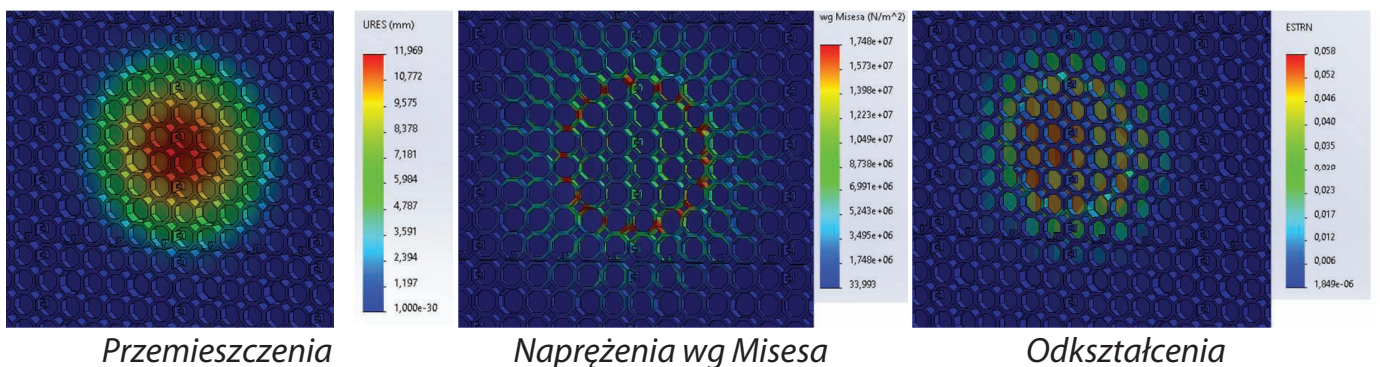




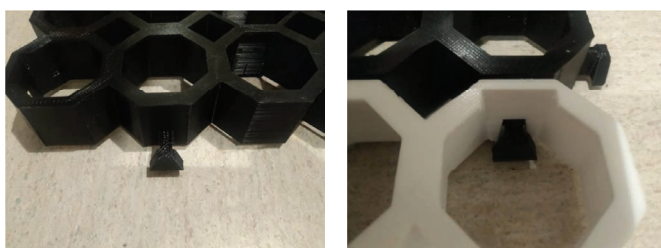
10. Wariant I - obciążenie realizowane w środku geokraty lotniskowej



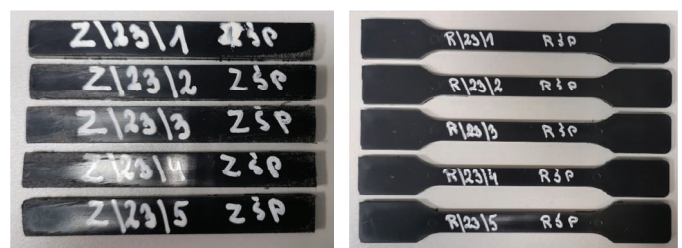
11. Wariant II - obciążenie realizowane na narożu łączącym cztery geokraty



12. Wariant III - obciążenie realizowane na krawędzi łączącej dwie geokraty lotniskowe



13. Widok zamków połączeniowych dwóch geokrat lotniskowych



14. Widok próbek przed badaniami

## Zginanie statyczne

Badania zginania statycznego próbek z tworzywa sztucznego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 178:2019-06 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości przy zginaniu [13]. Badania realizowano z prędkością przemieszczania wynoszącą

5 mm/min. Do pomiaru obciążenia zastosowano czujnik siły o zakresie do 5 kN, przed badaniem próbki obciążano siłą wstępną wynoszącą 1 N, zginanie próbek realizowano do ugięcia próbki o 16 mm. Do próby zginania wykorzystano uchwyt o rozstawie dolnych podpór wynoszącym 64 mm odpowiadającym zalecanym

16-krotnościom grubości próbki.

W oparciu o przeprowadzone próby zginania na próbkach przetrzymywanych w warunkach laboratoryjnych (temp. 21°C oraz wilgotność około 65%) wyznaczono: wytrzymałość na zginanie, odkształcenie przy wytrzymałości na zginanie oraz moduł sprężystości przy zginaniu. Uży-

skane wyniki badań przedstawiono w tab. 4 zaś na rys. 15 zestawiono uzyskane zależności ugięcia od siły.

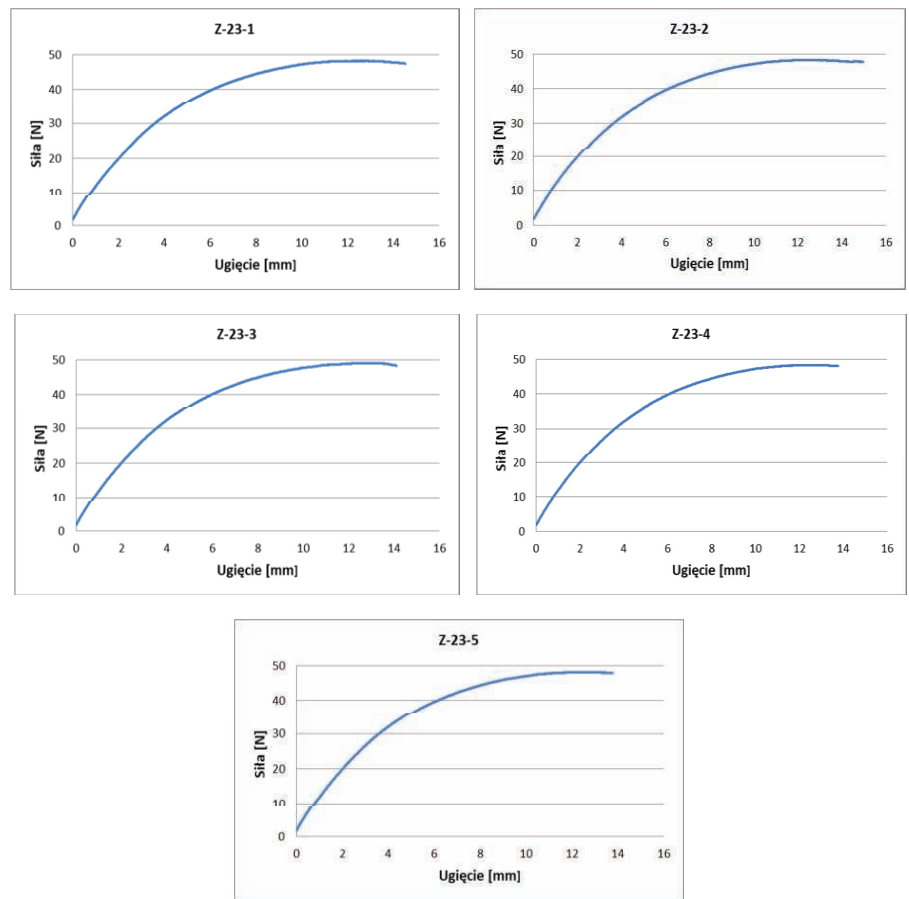
## Rozciąganie statyczne

Badania właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu tworzyw sztucznych są jednym z podstawowych źródeł wiadomości o mechanicznych parametrach tworzyw sztucznych. Próba rozciągania jest znormalizowana i badania prowadzone są zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1:2020-01 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Część 1: Zasady ogólne [14]. Badanie polega na pomiarze powstających odkształceń pod wpływem zadawanego obciążenia. Wielkościami mierzonymi bezpośrednio przy próbie rozciągania są odkształcenia i siły odkształcające. Badania realizowano z prędkością przemieszczania wynoszącą 50 mm/min. W początkowym zakresie rozciągania do 10 mm wydłużenie mierzono ekstensometrem Epsilon.

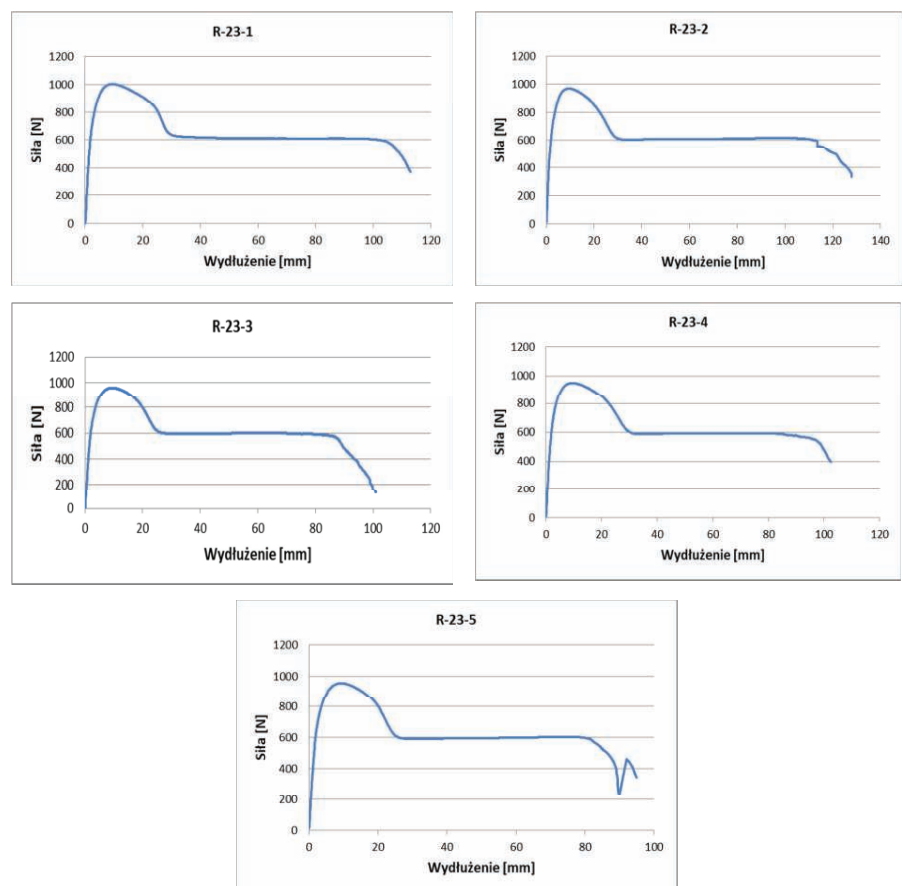
W oparciu o przeprowadzone badania na próbkach przetrzymywanych w warunkach laboratoryjnych (temp. 21°C, oraz wilgotność około 65%), wyznaczono: doraźną wzdluzną wytrzymałość na rozciąganie, wzdluzne naprężenie niszczące przy rozciąganiu, wydłużenie względne przy zerwaniu oraz moduł sprężystości wzdluznej. Uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 5, zaś na rys. 16 zestawiono uzyskane zależności ugięcia od siły.

## Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie geokrat lotniskowych wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 25619-2:2015-11 Geosyntetyki. Zachowanie się podczas ściskania. Część 2: Zachowanie się podczas krótkotrwałego ściskania [15]. Badaniu poddano 4 geokraty lotniskowe o wymiarach ok.



15. Wykresy zależności ugięcia od siły



16. Wykresy zależności wydłużenia od siły

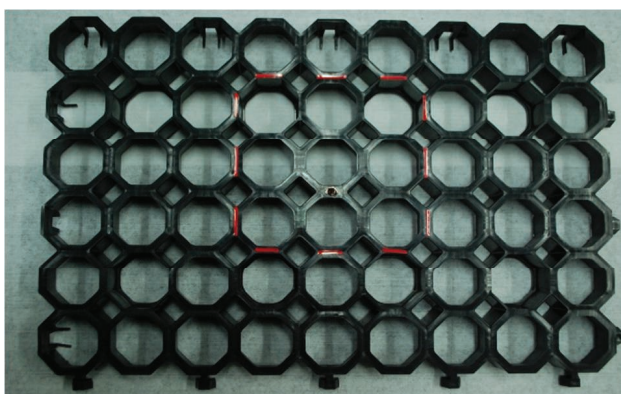


Tab. 5. Zestawienie wyników statycznego rozciągania

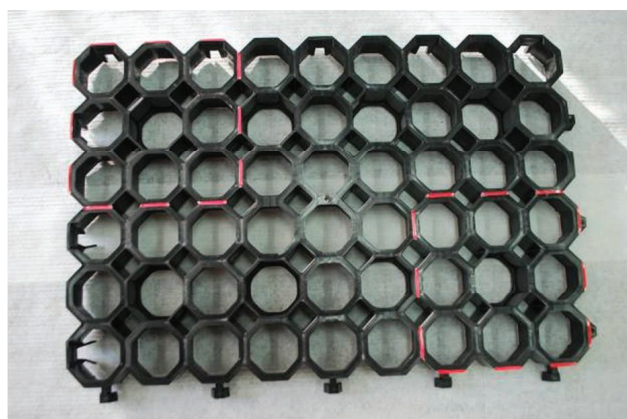
| Oznaczenie próbki       | Szerokość | Grubość  | Maksymalna siła | Wzdłużne naprężenie niszczące   | Wydłużenie względne przy zerwaniu | Moduł sprężystości wzdłużnej |
|-------------------------|-----------|----------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                         | $h$ [mm]  | $b$ [mm] | $F$ [N]         | $\sigma_1$ [N/mm <sup>2</sup> ] | $\epsilon_1$ [%]                  | $E_1$ [N/mm <sup>2</sup> ]   |
| R23/1 RSP               | 4,00      | 9,96     | 1003            | 25,2                            | 161                               | 1242                         |
| R23/2 RSP               | 4,01      | 10,00    | 968             | 24,1                            | 183                               | 1154                         |
| R23/3 RSP               | 3,99      | 9,95     | 959             | 24,1                            | 144                               | 1151                         |
| R23/4 RSP               | 3,98      | 9,97     | 950             | 24,0                            | 146                               | 1124                         |
| R23/5 RSP               | 3,99      | 10,00    | 957             | 24,0                            | 136                               | 1189                         |
| Średnia:                |           |          | 967             | 24,3                            | 154,0                             | 1172                         |
| Odchylenie standardowe: |           |          | 21              | 0,5                             | 18,6                              | 45                           |

Tab. 6. Zestawienie wyników wytrzymałości na ściskanie podczas krótkotrwałego ściskania

| Nr próbki | Obszar ściskania | $\sigma_{mr}$ [kPa] |
|-----------|------------------|---------------------|
| S/23/1    | Środek           | 5050                |
| S/23/2    |                  | 4997                |
| S/23/3    |                  | 5043                |
| S/23/4-a  | Naroże           | 4120                |
| S/23/4-b  |                  | 4285                |



17. Widok geokraty przed badaniem: liniami zaznaczono obszar obciążenia próbki - ściskanie w obszarze środkowym



18. Widok geokraty przed badaniem: liniami zaznaczono obszar obciążenia próbki - ściskanie w obszarze naroży

409 x 601 x 40 mm, które formowane były wtryskowo z tworzywa sztucznego – przykładowe kraty przed badaniem rys. 17 i 18. Trzy geokraty poddane zostały ścisnaniu w obszarze środkowym, a w ramach sprawdzenia poddano jedną geokratę ścisnaniu w obszarze naroży.

Badania wytrzymałości na ściskanie kraty lotniskowej wykonano w maszynie wytrzymałościowej typu MTS 810.23 o maksymalnym obciążeniu  $\pm 250$  kN z siłomierzem typu 661.22D-01 o zakresie pomiarowym  $\pm 250$  kN i zakresie przemieszczenia tłoka siłownika równym  $\pm 80$  mm. Do pomiaru odkształceń kraty lotniskowej pod wpływem obciążenia zastosowano wideoekstensometr klasy 1 MessPhysik ME46.

Obciążenie wstępne (zero przemieszczenia płyty ściskającej ruchomej względem płyty bazowej) było równe około 5 kPa odpowiadające sile 229 N. Prędkość odkształcania wynosiła  $v = 4$  mm/min (przemieszczenie płyty ruchomej). Jako kryterium

zakończenia badania wytrzymałości na ściskanie przyjęto przemieszczenie płyty ruchomej o 20 mm.

Wytrzymałość na ściskanie podczas krótkotrwałego ściskania  $\sigma_{mr}$ , która jest największą wartością naprężenia ściskającego w próbce podczas badania została określona zgodnie z poniższym wzorem:

$$\sigma_{mr} = 10^{-3} \cdot F \cdot (N_u / N_{próbk}) \quad (3)$$

w którym:  $F$  – siła ściskająca [N],  $N_u$  – liczba elementów próbki obciążonych na 1 m<sup>2</sup>,  $N_{próbk}$  – liczba elementów obciążonych w próbce.

Wyniki wytrzymałości na ściskanie zamieszczono w tab. 6.

## Podsumowanie

Będąca przedmiotem artykułu geokrata, element wzmocnienia naturalnych nawierzchni lotniskowych, została zaprojektowana w taki sposób, aby jej parametry wytrzymałościowe zapewniały bezpieczne przenoszenie

obciążeń pochodzących od statków powietrznych na podłoże gruntowe. Geokrata wykonana została metodą wtryskową z PEHD (polietylen wysokiej gęstości) uzyskiwanych z procesu recyklingu tworzyw sztucznych. Jej konstrukcję oparto na ośmioboku wzmocnianym progiem krawędziowym oraz kotwie zabezpieczającej przed wrywaniem, dzięki czemu możliwe jest zniwelowanie odkształceń związanych ze zmianą wymiarów pod wpływem różnic temperatur. Projektując geometrię geokraty przyjęto założenie, aby poszczególne elementy były ze sobą spinane zamkiem umożliwiającym demontaż, ale nierozpinającym się w warunkach eksploatacji oraz umożliwiającym redukcję naprężeń termicznych. Zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne zostało także zamodelowane w programie SolidWorks Simulation, w celu wykonania symulacji, testów, obliczeń, analiz wytrzymałościowych, termicznych oraz analiz MES (Metoda Elementów Skończonych).

W celu weryfikacji poprawności zaprojektowanej konstrukcji, przeprowadzono szereg badań sprawdzających właściwości mechaniczne i fizyczne tworzywa sztucznego, z którego będzie produkowana geokrata. Badania obejmowały sprawdzenie wytrzymałości na zginanie, określenie wytrzymałości na rozciąganie oraz sprawdzenie wytrzymałości na ściskanie. Przedmiotowe badania zostały przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych, podczas których uzyskano satysfakcjonujące wyniki.

Zastosowanie geokraty do wzmacniania nawierzchni naturalnych lotnisk wojskowych i cywilnych jest nowym podejściem do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Bezprecedensową przewagą zastosowania geokrat nad innymi metodami wzmacniania, jak np. stabilizacja mechaniczna, chemiczna gruntu, wymiana gruntu, jest reżim czasowy przywrócenia zdolności operacyjnej lotniska. Praktyczne zastosowanie geokrat na naturalnych nawierzchniach lotniskowych pozwala na wyeliminowanie zastoisk wody, poprzez utrzymanie odpowiedniego drenażu, oraz kolein, które pojawiają się w rozmokłym podłożu od ruchu pojazdów. Dzięki tym właściwościom naturalne nawierzchnie lotniskowe mogą być wykorzystywane przez cały rok do wykonywania operacji lotniczych przez wojskowe statki powietrzne. Jest to ogromna zaleta w porównaniu do aktualnie stosowanego podejścia w procesie eksploatacji nawierzchni naturalnych.

*Przedmiotowy artykuł powstał w wyniku projektu realizowanego na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa - Konkurs nr 11/2020 pt. „System wzmacnienia naturalnych nawierzchni lotniskowych lotnisk wojskowych, kr. KRATA”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. ◀*

## Materiały źródłowe

- [1] NO-17-A503:2017 Nawierzchnie lotniskowe – Naturalne nawierzchnie lotniskowe – Badania nośności.
- [2] Wesołowski M., Pietruszewski P., Kowalewska A., Cellular geosynthetics in the aspect of application in airfield construction, *Journal of KONBIN*, 2019, Vol. 49, Issue 4, 341-362, nr DOI: 10.2478/jok-2019-0090.
- [3] Graczyk M., Nita P., Gruntowe i darniowe nawierzchnie lotniskowe, *Prace IBDiM*, nr 3-4, 1998.
- [4] Wesołowski M., Blacha K., Iwanowski P., Pietruszewski P., Rola i funkcja naturalnych nawierzchni lotniskowych w systemie zapewnienia bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych, [w] „Przegląd Komunikacyjny”, nr 12/2018.
- [5] Wesołowski M., Kowalewska A., The impact of a geogrid system on load-bearing capacity of natural airfield pavements, *Archives of Civil Engineering*, 2020, Vol. LXVI, 52, nr DOI: 10.24425/ace.2020.131795.
- [6] ABC Chicago: Southwest Airlines flight from Houston to Nashville goes off runway, <https://abc-7chicago.com/news/southwest-airlines-flight-goes-off-runway-in-nashville/1124244/>, dostęp online 26.05.2020 r.
- [7] Airliners: Boeing 747-368 - Saudi Arabian Airlines, <https://www.airliners.net/photo/Saudi-Arabian-Airlines/Boeing-747-368/193201>, dostęp online 26.05.2020 r.
- [8] EASA: Załącznik do Decyzji Dyrektora Wykonawczego EASA nr 2017/021/R z dnia 08 grudnia 2017 r. wdrażającej wydanie

czwarte Specyfikacji Certyfikacyjnych (CS) oraz Materiałów Zawierających Wytyczne (GM) do Projektowania Lotnisk CS-ADR-DSN, Kolonia, Niemcy 2017.

- [9] ICAO: Załącznik 14 ICAO do Konwencji o Międzynarodowym Lotnictwie Cywilnym, Lotniska Tom I - Projektowanie i eksploatacja lotnisk, wydanie 6, 2013.
- [10] Wesołowski M., Kompleksowa ocena stanu technicznego nawierzchni elementów funkcjonalnych lotnisk w aspekcie bezpieczeństwa lotów, *Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych*, Warszawa 2020, ISBN 978-83-61021-98-8.
- [11] Kowalewska A., Wesołowski M., Kłysz S., Geogrid as an effective reinforcement of natural airfield pavements, *Journal of KONBIN* 2023, Vol. 53, Issue 2, 1-16, nr DOI: 10.5604/01.3001.0053.7102.
- [12] Kowalewska A., Blacha K., Wesołowski M., Kłysz S., Analysis of physico-chemical properties of geogrids used for the reinforcement of natural airfield pavements, *Aviation and Security*, Issue No 4 (2/2023), 375-388, nr DOI: 10.55676/asi.v4i2.97.
- [13] PN-EN ISO 178:2019-06 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości przy zginaniu.
- [14] PN-EN ISO 527-1:2020-01 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Część 1: Zasady ogólne.
- [15] PN-EN ISO 25619-2:2015-11 Geosyntetyki. Zachowanie się podczas ściskania. Część 2: Zachowanie się podczas krótkotrwałego ściskania.