



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
MECHANICZNO-
-TECHNOLOGICZNY**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

mgr inż. Piotr Bieniek

ROZPRAWA DOKTORSKA

Analiza naprężeń i odkształceń
w procesie modelowania
płyty oporowej mózdzierza

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Tupaj, prof. PRz

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Sz wajka



**SZKOŁA
DOKTORSKA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ



Rzeszów, 2025

Niniejszą pracę, jak i wszystko co robię,
dedykuję mojej żonie i trzem synkom,
bo są dla mnie wielką, życiową inspiracją

Podziękowania:

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania Panom Promotorom: Prodziekanowi dr hab. inż. Mirosławowi Tupajowi za nieocenioną pomoc udzieloną w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej, cierpliwość, wyrozumiałość i motywację oraz dr inż. Krzysztofowi Szwejce za wsparcie w przeprowadzeniu analiz badawczych i liczne dyskusje. Dziękuję Panom również za poświęcony czas, konsultacje naukowe, cenne wskazówki, dobre słowo i miłą atmosferę podczas naszych spotkań.

Dziękuję wszystkim pracownikom Wydziału Mechaniczno-Technologicznego za pomoc w realizacji doktoratu, a w szczególności Panu Dziekanowi dr hab. inż. Andrzejowi Trytkowi oraz moim kolegom i koleżankom.

Chciałbym również podziękować Dyrekcji Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia za finansowe wsparcie, niezbędne do realizacji badań oraz udostępnienie infrastruktury naukowo-badawczej, a w szczególności Panu Dyrektorowi płk dr inż. Pawłowi Sweklejowi oraz Panu Zastępcy Dyrektora płk dr inż. Radosławowi Warchołowi.

Dziękuję moim koleżankom i kolegom z Ośrodka Badań Dynamicznych, którzy wspierali mnie w czasie trwania doktoratu.

Szczególne podziękowania składam mojej żonie Marzence, za codzienne wsparcie, okazywaną miłość, cierpliwość i otuchę w chwilach zwątpienia. Dzięki Niej i naszym synkom miałem motywację do napisania niniejszej pracy i ukończenia Szkoły Doktorskiej.

Dziękuję również moim rodzicom za rozbudzenie ciekawości świata w dzieciństwie i chęć jego poznawania oraz stworzenie domu pełnego miłości i idealnych warunków do nauki, niniejsza praca jest zwieńczeniem wszystkich waszych starań.

Na zakończenie chciałbym podziękować całej mojej rodzinie, przyjaciołom i znajomym oraz wszystkim, którzy choćby w najmniejszym stopniu pomogli mi w realizacji doktoratu.

Spis treści

| | |
|---|----|
| Wykaz symboli i oznaczeń..... | 9 |
| Wstęp..... | 13 |
| Schemat pracy..... | 15 |
| 1. Wprowadzenie..... | 19 |
| 1.1. Charakterystyka płyt oporowych moździerzcy ciągnionych..... | 19 |
| 1.1.1. Opis moździerzcy ciągnionego M98..... | 19 |
| 1.1.2. Rozwój technologiczny stosowanych płyt oporowych..... | 20 |
| 1.2. MES w projektowaniu konstrukcji..... | 24 |
| 1.2.1. Charakterystyka metody elementów skończonych..... | 24 |
| 1.2.2. Praktyczne przykłady zastosowania MES..... | 26 |
| 1.3. Pomiary tensometryczne..... | 30 |
| 1.3.1. Charakterystyka tensometrii oporowej..... | 30 |
| 1.3.2. Istota pomiarów tensometrycznych w praktyce..... | 33 |
| 1.4. Wymagania stawiane współczesnym płytom oporowym..... | 36 |
| 2. Teza, cel i zakres pracy..... | 39 |
| 3. Materiał badawczy..... | 43 |
| 3.1. Skład chemiczny oraz wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne materiału płyty oporowej..... | 44 |
| 3.2. Badania mikroskopowe materiału płyty oporowej..... | 48 |
| 3.3. Opracowanie modelu 3D płyty oporowej..... | 52 |
| 4. Wstępne badania poligonowe płyty oporowej..... | 57 |
| 4.1. Metodyka pomiaru parametrów balistycznych..... | 57 |
| 4.1.1. Pomiar ciśnienia gazów prochowych metodą zgmiotową..... | 58 |
| 4.1.2. Pomiar ciśnienia gazów prochowych metodą piezoelektryczną..... | 60 |
| 4.1.3. Pomiar prędkości pocisków mobilnym systemem radiolokacyjnym..... | 62 |
| 4.1.4. Parametry balistyczne w badaniu wstępnym..... | 65 |
| 4.2. Metodyka pomiaru odkształceń płyty oporowej..... | 67 |
| 5. Badania zasadnicze strzelaniem z płyty oporowej..... | 75 |
| 5.1. Prace związane z przygotowaniem amunicji do badań..... | 75 |
| 5.2. Przygotowanie stanowisk do ostrzału płyty..... | 78 |

| | |
|--|-----|
| 5.3. Wykonanie instalacji tensometrycznej do pomiaru naprężeń..... | 79 |
| 5.4. Pomiar odkształceń płyty uwzględniający różne warunki jej eksploatacji..... | 82 |
| 6. Analizy numeryczne MES..... | 93 |
| 6.1. Model obliczeniowy..... | 93 |
| 6.2. Warunki brzegowe..... | 96 |
| 6.2.1. Siły działające na układ..... | 96 |
| 6.2.2. Zdefiniowanie podłoża..... | 98 |
| 6.2.3. Podparcie płyty oporowej..... | 100 |
| 6.2.4. Lokalizacja punktów pomiarowych..... | 102 |
| 6.2.5. Dane materiałowe..... | 103 |
| 6.2.6. Kąty ostrzału..... | 103 |
| 6.2.7. Istota prowadzonych iteracji..... | 104 |
| 7. Wyniki badań i ich analiza..... | 109 |
| 7.1. Naprężenia zredukowane z pomiarów rozetami tensometrycznymi..... | 109 |
| 7.2. Wyniki z symulacji numerycznych MES..... | 113 |
| 7.3. Analiza wyników symulacji numerycznych MES w odniesieniu do pomiarów tensometrycznych..... | 123 |
| 7.4. Analiza wyników symulacji numerycznych MES..... | 128 |
| 7.5. Analiza statystyczna wyników badań..... | 134 |
| 7.6. Zastosowanie sieci neuronowych do modelowania odkształceń płyty oporowej mózdzierza..... | 140 |
| 7.6.1. Ogólne zasady tworzenia modelu neuronowego..... | 140 |
| 7.6.2. Budowa i analiza modelu neuronowego..... | 142 |
| 8. Modyfikacja nowej konstrukcji płyty oporowej..... | 149 |
| 8.1. Model numeryczny zmodyfikowanej konstrukcji..... | 150 |
| 8.2. Wyniki symulacji MES zmodyfikowanej konstrukcji płyty i ich analiza..... | 153 |
| 8.3. Ekspertyza zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej..... | 160 |
| Podsumowanie..... | 163 |
| Wnioski końcowe..... | 169 |
| Literatura..... | 171 |
| Streszczenie rozprawy doktorskiej..... | 183 |
| Doctoral dissertation abstract..... | 185 |

Wykaz symboli i oznaczeń

Symbole i oznaczenia:

| | | |
|-----------------------|---|--|
| $1 \div 10$ | – | punkty pomiarowe odpowiadające lokalizacji rozet na płycie oporowej, |
| A' | – | grunty morenowe skonsolidowane, |
| $A1 \div A5$ | – | punkty pomiarowe układu wertykalnego modelu numerycznego płyty oporowej, zlokalizowane najbliżej trzpienia lufy moździerza, |
| A_5 | – | wydłużenie stali, |
| B' | – | grunty inne skonsolidowane oraz morenowe nieskonsolidowane, |
| $B1 \div B5$ | – | punkty pomiarowe układu wertykalnego modelu numerycznego płyty oporowej, zlokalizowane przed kołnierzem, |
| β | – | wskaźnik skonsolidowania gruntu, |
| C' | – | grunty inne nieskonsolidowane, |
| $C1 \div C5$ | – | punkty pomiarowe układu wertykalnego modelu numerycznego płyty oporowej, zlokalizowane na kołnierzu stanowiącym obrys zewnętrzny, |
| $C_K, C_N, C_P,$ | – | współczynniki obliczeniowe z analizy ANOVA dotyczące odpowiednio kąta podniesienia lufy, obszaru płyty oporowej i zastosowanego podłoża, |
| D' | – | iłły, niezależnie od pochodzenia geologicznego, |
| δ | – | iloraz modułu odkształcenia i ściśliwości gruntu, |
| E | – | moduł sprężystości Younga, |
| E_0 | – | moduł pierwotnego odkształcenia gruntu, |
| E_1 | – | moduł wtórnego odkształcenia gruntu, |
| ε_0 | – | odkształcenie tensometru umieszczonego pod kątem 0° , wchodzącego w skład rozety (płaski stan naprężeń), |
| ε_1 | – | odkształcenie na kierunku głównym pierwszym (płaski stan naprężeń), |
| ε_2 | – | odkształcenie na kierunku głównym drugim (płaski stan naprężeń), |
| ε_{45} | – | odkształcenie tensometru umieszczonego pod kątem 45° , wchodzącego w skład rozety (płaski stan naprężeń), |
| ε_{90} | – | odkształcenie tensometru umieszczonego pod kątem 90° , wchodzącego w skład rozety (płaski stan naprężeń), |
| ε_φ | – | odkształcenie działające pod kątem φ (płaski stan naprężeń), |
| F | – | współczynnik testu Fishera, |

| | | |
|------------------|---|--|
| HB | – | pomiar twardości metodą Brinella, |
| H-M-H | – | hipoteza Hubera-Misesa-Hencky’ego, |
| HV | – | pomiar twardości metodą Vickersa, |
| I _D | – | stopień zagęszczenia gruntu, |
| K | – | współczynnik obliczeniowy z analizy ANOVA stanowiący stałą, |
| k ₁ | – | sprężystość elementów Bush na pierwotnej konstrukcji płyty, |
| k ₂ | – | sprężystość elementów Bush na zmodyfikowanej płycie, |
| KCU | – | udarność stali, |
| l ₁ | – | liczba węzłów na pierwotnej konstrukcji płyty, |
| l ₂ | – | liczba węzłów na zmodyfikowanej płycie, |
| M ₀ | – | edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej gruntu, |
| M ₁ | – | edometryczny moduł ściśliwości wtórnej gruntu, |
| M98 | – | ciągniony moździerz kalibru 98 mm, |
| MAG | – | spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych, |
| MB-98 | – | 98 mm moździerz balistyczny wyposażony w zamek umożliwiający prowadzenie pomiarów ciśnienia gazów prochowych podczas ostrzału, |
| MLP | – | typ sieci modelu neuronowego o nazwie perceptron wielowarstwowy, |
| MSE | – | błąd średniokwadratowy, |
| MZR | – | makieta masowa zapalnika głowicowego, |
| MZR-96 | – | programowalny, głowicowy zapalnik czasowy, |
| OB-98 | – | balistyczny nabój moździerzowy z pociskiem odłamowo-burzącym, |
| p | – | poziom istotności analizy statystycznej, |
| P _{cp} | – | ciśnienie maksymalne zmierzone czujnikiem piezoelektrycznym, |
| P _d ’ | – | piasek drobnoziarnisty, |
| P _o ’ | – | grunt pólśypki, |
| P _{pz} | – | ciśnienie maksymalne zmierzone przyrządem zgmiotowym, |
| P _π ’ | – | piasek pylasty, |
| P _r ’ | – | piasek gruboziarnisty, |
| P _s ’ | – | piasek średnioziarnisty, |
| PZ-181 | – | balistyczny nabój moździerzowy z pociskiem dymnym, |
| PZ-191 | – | balistyczny nabój moździerzowy z pociskiem oświetlającym, |
| R ² | – | współczynnik determinacji, |

| | | |
|------------------|---|---|
| $R1 \div R10$ | – | rozety tensometryczne nr 1 ÷ 10, |
| RBF | – | sieci neuronowe o radialnych funkcjach bazowych |
| R_e | – | granica plastyczności stali, |
| R_m | – | wytrzymałość na rozciąganie stali, |
| σ | – | naprężenie (wartości zredukowane z pomiarów tensometrycznych oraz z obliczeń numerycznych), |
| σ_1 | – | naprężenie na kierunku głównym pierwszym (płaski stan naprężeń), |
| σ_2 | – | naprężenie na kierunku głównym drugim (płaski stan naprężeń), |
| σ_{max} | – | naprężenie maksymalne działające w jednym kierunku (płaski stan naprężeń), |
| σ_{min} | – | naprężenie minimalne działające w jednym kierunku (płaski stan naprężeń), |
| σ_φ | – | naprężenie działające pod kątem φ (płaski stan naprężeń), |
| σ_x | – | naprężenie zredukowane z tensometrów przyklejonych poprzecznie na płycie oporowej (badania wstępne), |
| σ_y | – | naprężenie zredukowane z tensometrów przyklejonych wzdłużnie na płycie oporowej (badania wstępne), |
| T | – | temperatura ładunku miotającego, |
| ν | – | współczynnik Poissona, |
| φ | – | kąt pomiędzy kierunkiem naprężenia głównego σ_1 , a odkształceniem działającym pod kątem 0° (płaski stan naprężeń), |
| V_0 | – | prędkość początkowa pocisków mierzona mobilnym radarem Dopplera, |
| VSS | – | metoda płyty statycznej do wyznaczania stopnia zagęszczenia gruntu, |
| x | – | wartość przed normalizacją, |
| x' | – | wartość znormalizowana należąca do zbioru $[0,1]$, |
| x_1, x_2, x_3 | – | sygnały wejściowe sieci wielowarstwowej, |
| X_1 | – | zmienna równania regresji odnosząca stanowiąca obszar płyty oporowej, |
| X_2 | – | zmienna równania regresji odnosząca stanowiąca podłoże, |
| X_3 | – | zmienna równania regresji odnosząca stanowiąca kąt ostrzału, |
| x_{max} | – | maksymalna wartość dla serii analizowanych danych w modelu dla normalizacji z przedziału $[0,1]$, |
| x_{min} | – | minimalna wartość dla serii analizowanych danych w modelu dla normalizacji z przedziału $[0,1]$, |

- y – równanie regresji w zależności od obszaru płyty oporowej, podłoża i kąta podniesienia lufy mózdzierza,
- y_1 – sygnał wyjściowy sieci wielowarstwowej,
- Z – przewężenie stali,
- \dot{Z}' – żwir.

Wstęp

Nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym każdemu strzałowi z broni palnej jest odrzut, a jego niepożądane skutki związane z koniecznością wyhamowania zadanej energii wpływają na zużycie sprzętu uzbrojenia. W przypadku moździerza niemal cała energia z oddanego strzału zostaje odbierana przez płytę oporową, a następnie jest przekazywana na podłoże. Istnieją elementy moździerza takie jak hamulec wylotowy i osłabiacze odrzutu, które jedynie w niewielkim stopniu odciążają pracę płyty oporowej. W związku z tym istotny jest dobór odpowiedniej konstrukcji oraz materiału do wykonania płyty oporowej, aby zapewnić jej żadaną wytrzymałość i trwałość w różnych warunkach eksploatacyjnych, obejmujących zmienne typy podłoży i strefy klimatyczne. Równie ważnymi aspektami są ergonomia, bezpieczeństwo użytkowania oraz mobilność na polu walki. Ta znaczna ilość wymagań stawianych płycie oporowej powinna stanowić kompromis pomiędzy jej odpornością na ostrzał, a późniejszą eksploatacją przez załogi przeszkolonych żołnierzy.

Istotnym wskaźnikiem determinującym żywotność płyty oporowej (zapobiegającym przedwczesnemu pęknięciu) jest rozkład naprężeń na jej powierzchni, pozbawiony spiętrzeń. Ze względu na ściśle strzeżone informacje związane z produkcją wyrobów wojskowych, ich konstrukcją i badaniami, przegląd literatury dotyczący rzeczywistego pomiaru naprężeń i wyników pozyskanych z symulacji komputerowych ostrzału płyt oporowych moździerzy jest znacznie ograniczony.

Celem niniejszej pracy było opracowanie metodyki i przeprowadzenie badań eksperymentalnych płyty oporowej moździerza M98 w warunkach poligonowych oraz przygotowanie modelu obliczeniowego płyty oporowej do szacowania naprężeń przy zastosowaniu symulacji numerycznych metodą elementów skończonych.

W pracy skupiono się na: opracowaniu metodyk, zbudowaniu stanowisk oraz przeprowadzeniu poligonowych badań wstępnych i eksperymentalnych płyty oporowej. Uzyskane dane pomiarowe z ostrzału płyty wraz z wynikami jej badań materiałowych posłużyły do opracowania bazy danych do symulacji numerycznych. Dodatkowo w ramach pracy wykonano model CAD i model numeryczny płyty oporowej, przeprowadzono symulacje numeryczne MES oraz opracowano zmodyfikowaną konstrukcję płyty oporowej.

W pracy zastosowano rozmaite techniki badawcze, które prowadzono w warunkach poligonowych, laboratoryjnych oraz w trakcie komputerowych prac analitycznych. Badania eksperymentalne obejmowały pomiar odkształceń płyty oporowej, pomiar maksymalnego

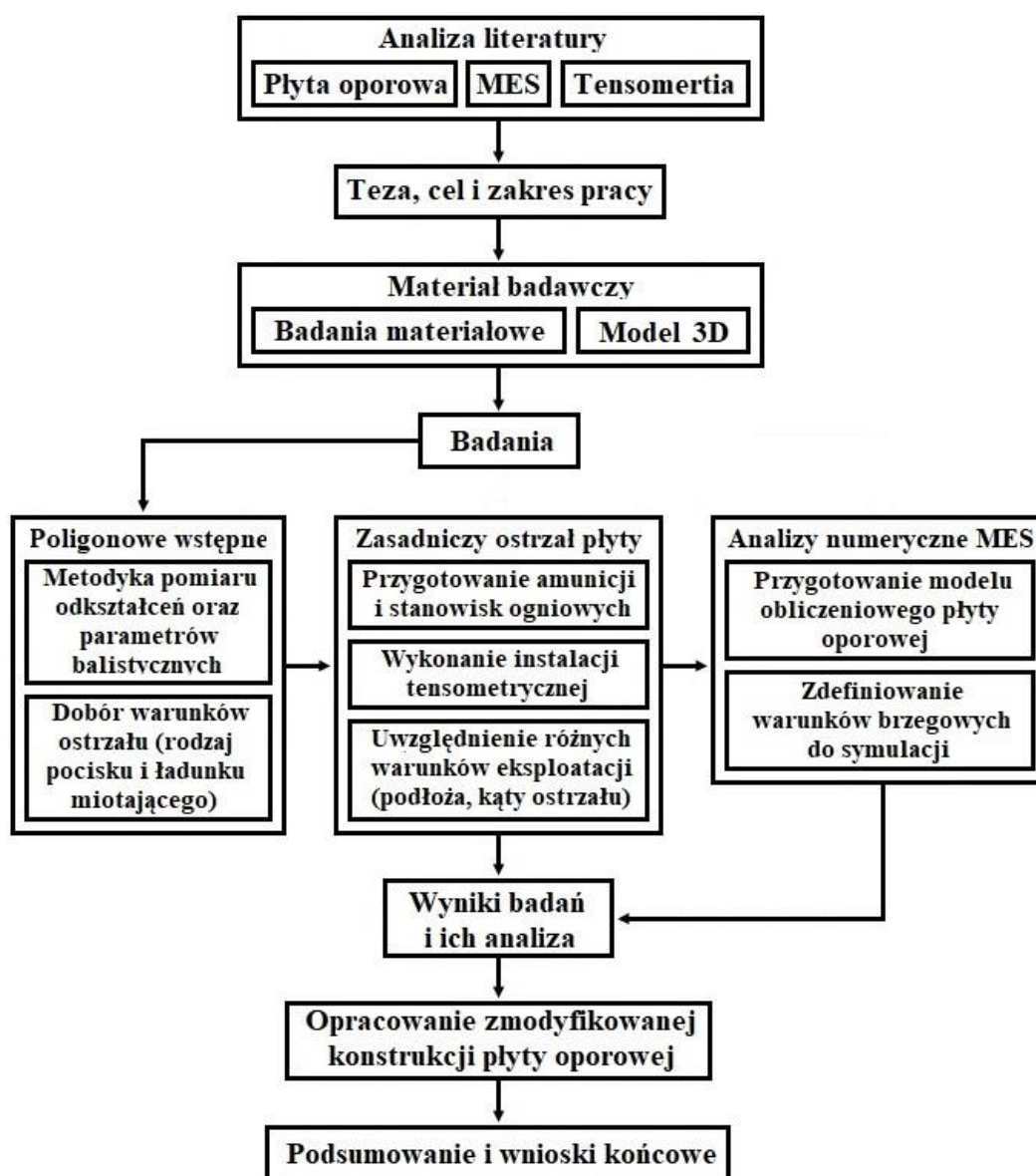
ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy moździerza i pomiar prędkości początkowej wystrzeliwanych pocisków moździerzowych. W ramach badań laboratoryjnych zastosowano badania spektrometryczne, mikroskopowe oraz statyczną próbę rozciągania i ocenę twardości materiału płyty oporowej. W oparciu o komputerowe techniki badawcze opracowano model obliczeniowy płyty oporowej oraz przeprowadzono analizy numeryczne MES.

Przeprowadzone badania miały na celu rozszerzenie wiedzy w zakresie: metodologii prowadzenia pomiarów odkształceń płyty oporowej (doboru tensometrów i strategii ich rozmieszczenia), korelacji danych z pomiarów rzeczywistych w odniesieniu do definiowania warunków brzegowych do symulacji numerycznych MES (z uwzględnieniem zmiennej sztywności gruntu), wpływu różnych warunków ostrzału płyty oporowej na uzyskiwane wartości jej odkształceń, sposobu modyfikacji konstrukcji płyty oporowej w celu redukcji obszarów spiętrzających się naprężeń.

Wyniki pracy powinny przyczynić się do: rozwoju badań nad innymi rodzajami płyt oporowych na podstawie zaproponowanej metodyki badawczej, poprawy założeń związanych z projektowaniem płyt oporowych moździerzy (uwzględniających aspekty wytrzymałościowe, ergonomiczne, technologiczne i ekonomiczne), opracowania nowej konstrukcji płyty oporowej moździerza M98 (zapewniającej większą mobilność na polu walki przez redukcję jej masy oraz dłuższą żywotność poprzez zmniejszenie spiętrzających się naprężeń) oraz opracowania lub zmiany konstrukcji typoszeregu płyt oporowych moździerzy.

Schemat pracy

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z: analizy literatury, tezy, celu i zakresu pracy, laboratoryjnych badań nad materiałem i kształtem płyty oporowej, poligonowych badań strzelaniem z płyty oporowej w różnych warunkach eksploatacyjnych, opracowania modelu obliczeniowego płyty oporowej wraz z zdefiniowaniem warunków brzegowych, symulacji numerycznych MES, analiz wyników otrzymanych z poszczególnych etapów badań, opracowania zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej oraz podsumowania i wniosków końcowych. Wszystkie wyżej wymienione etapy pracy przedstawiono na rysunku 1.0 w formie schematu.



Rys. 1.0. Schemat rozprawy doktorskiej

Pierwszy rozdział obejmuje aktualny stan wiedzy związany z badaną płytą oporową, będącą częścią mózdzierza M98 oraz różnymi rodzajami płyt oporowych stosowanymi na świecie. Zawiera rys historyczny od momentu produkcji pierwszych płyt i mózdzierzy do czasów współczesnych oferujących innowacyjne rozwiązania i patenty. Kolejne podrozdziały stanowią wprowadzenie i praktyczne zastosowanie symulacji metodą elementów skończonych i pomiary tensometryczne rozetami elektrooporowymi prowadzone na płytach oporowych. Na zakończenie przybliżono wymagania stawiane płytom oporowym oraz problemy napotykane w ich cyklu eksploatacyjnym.

W rozdziale drugim zdefiniowano tezę, cel oraz zakres pracy.

Trzeci rozdział dotyczy materiału badawczego, który stanowi płyta oporowa mózdzierza M98. W ramach prac laboratoryjnych nad płytą przeprowadzono badania spektrometryczne, mikroskopowe oraz statyczną próbę rozciągania i ocenę twardości jej materiału. Oprócz badań materiałowych, dokonano również odtworzenia zewnętrznego kształtu płyty oporowej poprzez jej zeskanowanie za pomocą skanera 3D.

W rozdziale czwartym zatytułowanym „Wstępne badania poligonowe płyty oporowej” dokonano oceny możliwości pomiaru odkształceń występujących na płycie oporowej podczas ostrzału przy zastosowaniu tensometrów elektrooporowych. Próby te stanowiły badania wstępne, na podstawie których przyjęto późniejszą metodykę pomiaru odkształceń, zweryfikowano sposoby pomiaru parametrów balistycznych oraz wpływ zmiennych warunków ostrzału (różnych rodzajów pocisków, skrajnych temperatur ładunków miotających) na uzyskiwane wyniki.

Piąty rozdział pod tytułem „Badania zasadnicze strzelaniem z płyty oporowej” obejmuje opis prac związanych z przygotowaniem amunicji do badań, stanowisk ogniowych do ostrzału płyty oporowej oraz wykonaniem instalacji tensometrycznej na płycie. Zawiera zbiór wyników z poligonowego ostrzału płyty oporowej uwzględniającego różne warunki jej eksploatacji, obejmujące badania z podłoża: ziemnego, piaszczystego i kamienistego, przy kącie podniesienia lufy mózdzierza wynoszącym: 45°, 60° i 75°.

W rozdziale szóstym zatytułowanym „Analizy numeryczne MES” przedstawiono sposób opracowania modelu obliczeniowego płyty oporowej, jego podział na elementy skończone i dobór poszczególnych warunków brzegowych do symulacji numerycznych. Scharakteryzowano również metodologię zastosowanej iteracji.

Rozdział siódmy zawiera analizę i interpretację otrzymanych wyników. W oparciu o globalny rozkład naprężeń na całej powierzchni płyty oporowej i ich wartości zaobserwowano trzy główne obszary, których lokalizacja miała charakter obwodowy. Wartości naprężeń rosły

w kierunku od gniazda montażowego trzonu lufy mózdzierza do obrysu zewnętrznego, stanowiącego kołnierz płyty oporowej. Na zakończenie przedstawiono całościową analizę oraz graficzną wizualizację otrzymanych danych w ujęciu statystycznym.

Rozdział ósmy pod tytułem „Modyfikacja konstrukcji płyty oporowej” obejmuje charakterystykę prac analitycznych związanych z przygotowaniem modelu obliczeniowego zmodyfikowanej konstrukcji oraz doбором warunków brzegowych do symulacji. Istotnym aspektem opracowania jest redukcja kumulujących się dotychczas naprężeń i zmniejszenie masy płyty oporowej, celem zapewnienia jej większej trwałości oraz mobilności w warunkach bojowych. Zawarte porównawcze symulacje rozkładu naprężeń i maksymalnej deformacji w czasie strzału na obecnie stosowanej oraz zmodyfikowanej konstrukcji płyty, potwierdzają prawidłowość przyjętych rozwiązań.

Zakończenie niniejszej pracy stanowi podsumowanie oraz zawiera wnioski końcowe, sformułowane na podstawie wyników z przeprowadzonych badań i analiz.

1. Wprowadzenie

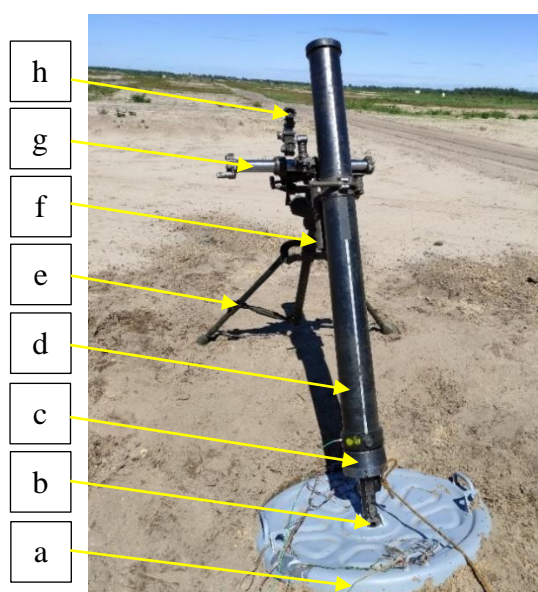
1.1. Charakterystyka płyt oporowych moździerzy ciągnionych

Przedmiotem niniejszej pracy jest płyta oporowa moździerza ciągnionego M98, która służy do podtrzymywania trzonu lufy moździerza i wyhamowywania odrzutu podczas strzału, poprzez przenoszenie energii na grunt, z którym pozostaje w bezpośrednim kontakcie [1].

1.1.1. Opis moździerza ciągnionego M98

Moździerz ciągniony M98 to broń nieautomatyczna, ładowana ręcznie od strony wylotowej. Posiada gładko ścienną lufę kalibru 98 mm połączoną z zamkiem i trzonem, w którym znajdują się mechanizm igliczny, uderzeniowy i ustalający położenie iglicy. Kuliste zakończenie trzonu umożliwia przegubowe połączenie lufy z płytą oporową. Górną część lufy podpira podstawa zamocowana na dwójnogu, wyposażona w dwa osłabiacze odrzutu typu sprężynowego oraz mechanizm podniesieniowy i kierunkowy [2].

Prowadzenie ognia z moździerza jest możliwe w dwóch trybach: „na żądło” polegające na grawitacyjnym zetknięciu naboju z iglicą po bezpośrednim załadunku lub „na sznur”, opierające się na załadunku naboju do lufy i czekaniu na kontakt z iglicą [3]. Na rysunku 1.1 przedstawiono moździerz M98 z oznaczeniem jego poszczególnych elementów, natomiast w tabeli 1.1 zamieszczono jego dane taktyczno techniczne.



Rys. 1.1. Moździerz M98 i jego elementy: a) płyta oporowa, b) trzon kulisty lufy, c) zamek, d) lufa, e) dwójnog, f) osłabiacz odrzutu, g) mechanizm podniesieniowy i kierunkowy, h) celownik

Tabela 1.1. Dane taktyczno – techniczne moździerza ciągnionego M98 [4]

| Poszczególne dane | Jednostka | Wartość |
|--|------------|------------|
| Donośność | m | 400 ÷ 7000 |
| Kąt ostrzału | ° | 45 ÷ 85 |
| Azymut bez przestawiania dwójnogu | ° | ± 7,5 |
| Szybkostrzelność zwykła | strzał/min | ~ 15 |
| Szybkostrzelność z korektą wycelowania | strzał/min | 8 ÷ 10 |
| Masa w położeniu bojowym | kg | 135 |
| Masa z wózkiem transportowym | kg | 300 |
| Maksymalna prędkość początkowa pocisku | m/s | ~ 320 |
| Maksymalne ciśnienie gazów prochowych | MPa | ~ 120 |

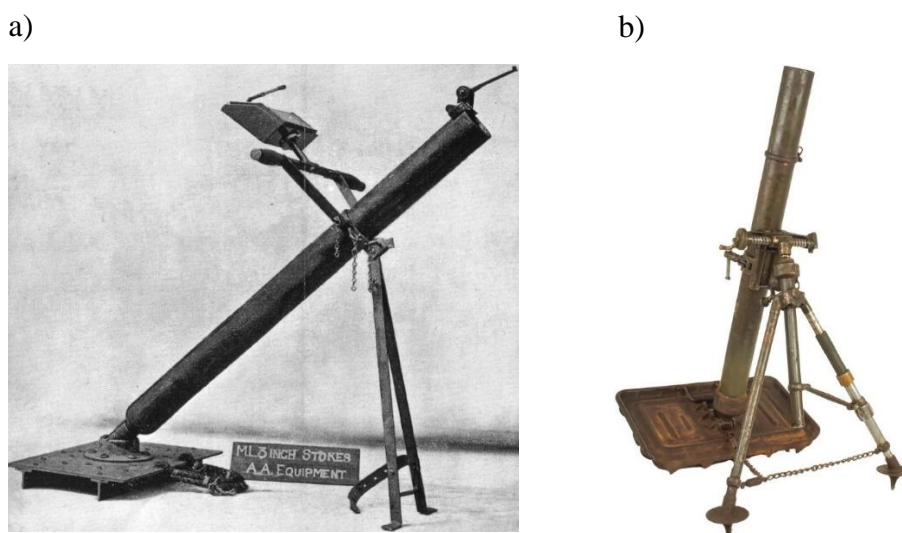
Zapalenie ładunku miotającego zasadniczego rozpoczyna się od nakłucia spłonki przez iglicę moździerza. Płomień ładunku zasadniczego przedostaje się przez otwory wykonane na trzonie stabilizatora i zapala ładunki dodatkowe zmienne, wykonane z pudełek (w pełni spalających się) zasypanych prochem [5]. Zapalenie ładunków miotających powoduje wytworzenie ciśnienia wewnątrz lufy, za pośrednictwem którego dochodzi do wystrzelenia pocisku. Niepożądanym i nieodłącznym zjawiskiem każdego strzału jest odrzut, którego energia w przypadku moździerza zostaje odebrana przez płytę oporową, a następnie przekazana na podłoże. Współczesne konstrukcje moździerzy posiadają hamulce wylotowe oraz osłabiacze odrzutu, nie mniej jednak są to elementy, które w niewielkim stopniu wspierają fundamentalną pracę płyt oporowych.

1.1.2. Rozwój technologiczny stosowanych płyt oporowych

W niniejszej pracy badaniom poddano płytę oporową pełną, okrągłą ze względu na jej czynne zastosowanie, jako elementu uzbrojenia do kompletacji ciągnionego moździerza M98, będącego na wyposażeniu sił zbrojnych RP. Krajowy przemysł obronny posiada tylko takie rozwiązania płyt oporowych, które zastosowano do moździerzy kalibru 98 mm i 60 mm. Innym przykładem moździerza posiadającego płytę oporową pełną, okrągłą, będącego na uzbrojeniu naszych jednostek wojskowych jest radziecki moździerz kalibru 120 mm. W 2022 roku na stanie naszej armii pozostawało 65 szt. ciągnionych 120 mm moździerzy. Produkcja seryjna 60 mm moździerzy obejmowała lata 2000 ÷ 2017, natomiast 98 mm moździerzy rozpoczęła się w 2000 roku i trwa do chwili obecnej. W tym czasie na wyposażenie

polskiej armii trafiło 500 moździerzy kalibru 60 mm oraz 93 moździerze kalibru 98 mm [6]. Pozostałe egzemplarze są nadal produkowane i sprzedawane poza granice naszego państwa.

Prekursorem wszystkich współczesnych moździerzy, skonstruowanym w czasach I Wojny Światowej był brytyjski Moździerz Stokesa kalibru 81 mm, w przypadku którego zastosowano płytę oporową o obrys prostokątnym [7]. Następcą wyżej wymienionego był francuski moździerz tego samego kalibru Mle 27/31 Brandt, który wyznaczył nowy standard. Na jego wzór większość głównych armii świata wprowadziło na swoje wyposażenie moździerze o analogicznym kalibrze, jak również o kalibrach: 60 mm, 107 mm i 120 mm. Zmodernizowany moździerz wyróżniał się na tle poprzednika brakiem konieczności ustawiania płyty oporowej pod określonym kątem i ulepszoną konstrukcją dwójnogu. Kształt płyty oporowej pozostał prostokątny, lub miał obrys kwadratu [8]. Zmodyfikowana płyta oporowa umożliwiała osadzenie w niej pięty kulistej zamka moździerza od strony dna lufy. Gniazdo pięty kulistej było przesunięte względem środka płyty w kierunku oddawanego strzału, co w znaczący sposób poprawiło stabilizację moździerza [9]. Wyżej opisane konstrukcje pierwszych moździerzy, przedstawiono na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. Moździerze kalibru 81 mm: a) Stokesa [10], b) Mle 27/31 Brandta [11]

W ślad za wyżej opisanym rozwiązaniem opracowano radzieckie moździerze z okrągłą płytą oporową. Obejmowały one kalibry 107 mm wzór 1938 [12], 120 mm wzór 1938 oraz zmodernizowany wzór 1943 [13]. Pierwsza wersja radzieckiego moździerza kalibru 120 mm została w całości skopiowana przez wojska niemieckie podczas II Wojny Światowej jako 12 cm Granatwerfer 42 [14]. Biorąc pod uwagę niezawodność, konstrukcja 120 mm moździerza wzór 1943 była uznawana za najdoskonalszą spośród wszystkich moździerzy

stosowanych podczas wojny [15]. Stąd też 120 mm moździerz wzór 1943 był punktem odniesienia do produkcji moździerzy na całym świecie, w tym również przez inną potęgę militarną, czyli Stany Zjednoczone [16]. Opracowane przez USA moździerze ciągnięte posiadały okrągłe płyty oporowe dla kalibrów 60 mm (M224) [17], 81 mm (M252) [18] oraz 120 mm (M120) [19]. Najnowsza konstrukcja amerykańskiego moździerza kalibru 120 mm obecnie składa się z płyty oporowej M9 o kształcie trójkątnym i masie 62 kg. Rezygnacja z okrągłego kształtu płyty umożliwiła redukcję jej dotychczasowej masy [20]. Konstrukcje ciągniętych moździerzy kalibru 120 mm wzór 1943 oraz zmodernizowanego M120, przedstawiono na rysunku 1.3.

a)



b)



Rys. 1.3. Moździerz kalibru 120 mm: a) wzór 1943 [21], b) zmodernizowany M120 [22]

W Polsce również podjęto próby opracowania moździerza kalibru 120 mm (M120) ukończonego w okrągłą płytę oporową, nie mniej jednak pozostał w wersji prototypowej i nie trafił on do produkcji seryjnej [23].

Po wielu latach stosowania okrągłych płyt oporowych na wzór radzieckiego moździerza z 1943 roku, wiele armii zmieniło ich konstrukcję w celu zmniejszenia masy. Głównym celem poczynionego zabiegu miała być redukcja załóg obsługujących moździerz na polu walki. Poczynione zmiany dotyczyły najczęściej kalibru 120 mm, a nowy kształt płyt przypominał najczęściej obrys trapezu, bądź trójkąta. Poszczególne rozwiązania: czesko-słowackie, izraelsko-amerykańskie, niemieckie, finlandzkie oraz chińskie płyt oporowych moździerzy ciągniętych kalibru 120 mm, przedstawiono na rysunku 1.4.



Rys. 1.4. Płyty oporowe moździerzy kalibru 120 mm: a) M1982 PRAM-L [24], b) Soltam K6 [25], c) Mörser 120 [26], d) 120 KRH-92 [27], e) 120 KRH/40 [28], f) typ W86 [29]

Na podstawie badań symulacyjnych prowadzonych przez F. Wang'a i in. [30] coraz częstszym rozwiązaniem stanowiącym zmniejszenie masy płyty oporowej jest nie tylko zmiana jej kształtu, ale także wprowadzanie materiału kompozytowego.

Inną alternatywą płyty oporowej była propozycja konstrukcji żebrowej z centralnie wykonanym gniazdem kulistym umożliwiającym zamocowanie trzonu zamka lufy moździerza, zgłoszona jako patent przez Sayir H. i in. [31]. Nie mniej jednak rozwiązanie to nie doczekało się wdrożenia do seryjnej produkcji wojskowej.

1.2. MES w projektowaniu konstrukcji

Metoda elementów skończonych (MES) ma zasadnicze znaczenie w procesie projektowania różnego rodzaju konstrukcji, ponieważ daje możliwość oceny jej wielu własności jeszcze przed fizycznym wykonaniem. Jest jednym z elementarnych narzędzi używanych w inżynierii mechanicznej. Stosując analizy MES istnieje możliwość identyfikacji „słabych punktów” w projekcie i wprowadzenia odpowiednich modyfikacji, mających na celu poprawę jakości i trwałości konstrukcji. Ponadto, symulacje numeryczne pozwalają na oszczędne zarządzanie czasem oraz finansami związanymi z testowaniem prototypów, w zastępstwie prowadzenia fizycznych prób. Zatem zastosowanie analiz MES umożliwia optymalizację procesu projektowania i wpływa na zwiększenie efektywności produkcji [32].

1.2.1. Charakterystyka metody elementów skończonych

Metoda elementów skończonych jest techniką numeryczną mającą zastosowanie do modelowania oraz symulowania zachowań obiektów fizycznych, poddanych różnym warunkom. Jej istotą jest podział badanego obiektu na mniejsze elementy, nazywane skończonymi, które są połączone ze sobą w węzłach. Każdy element skończony definiują równania, uwzględniające jego właściwości fizyczne, materiałowe oraz geometrię. Podczas analiz MES następuje rozwiązanie tych równań dla każdego elementu z osobna, po czym dochodzi do ich połączenia w celu otrzymania globalnego rozwiązania. Dzięki temu MES jest wyjątkowo skuteczny w razie problemów, których rozwiązanie analityczne jest niemożliwe, bądź bardzo skomplikowane do uzyskania [33].

Metoda elementów skończonych jest stosowana w wielu gałęziach współczesnego przemysłu, jak również obejmuje najnowsze technologie wspomagane komputerowo. Do jej głównych odbiorców należy przemysł: lotniczy, raketowy, zbrojeniowy, motoryzacyjny, stoczniowy i maszynowy. Oprócz inżynierii mechanicznej jest niezbędnym wsparciem dla mechatroniki, medycyny, biomechaniki i inżynierii materiałowej. Umożliwia rozwiązywanie skomplikowanych problemów matematycznych oraz równań takich jak: różniczkowe, ruchu, przewodnictwa cieplnego, mechaniczne i wiele innych [34].

Analizy MES dzielą się na pięć podstawowych etapów, z których pierwszy obejmuje przygotowanie modelu numerycznego poprzez zdefiniowanie geometrii badanego obiektu, jego właściwości materiałowych, warunków brzegowych i działających na niego obciążeń.

W ramach drugiego etapu następuje podział badanego obiektu na elementy skończone, czyli utworzona zostaje siatka dyskretyzacyjna. Etap trzeci umożliwia wyznaczenie równań opisujących zachowanie się obiektu pod wpływem działania obciążeń. Równania te mają bardzo złożoną postać, ponieważ uwzględniają wiele czynników takich jak warunki brzegowe oraz właściwości materiałowe. W czwartym etapie analiz wykonywane są rozwiązania numeryczne, które pozwalają na określenie rozkładów naprężeń, odkształceń oraz innych charakterystyk badanego obiektu w wybranych punktach. Ostatni, piąty etap stanowi analizę wyników, na podstawie której istnieje możliwość weryfikacji czy badany obiekt spełnia wymagania projektowe. Jest to również etap pozwalający na identyfikację obszarów wymagających zmian. Każdy z wyżej wymienionych etapów analizy MES jest kluczowy dla otrzymania dokładnych wyników oraz może mieć wpływ na wynik końcowy [35].

W celu uzyskania dokładnych wyników symulacji numerycznych, należy mieć na uwadze, że metoda elementów skończonych wymaga zaawansowanej wiedzy matematycznej i komputerowej oraz znacznych zasobów obliczeniowych [36].

Złożoność analizy MES i jej przybliżony charakter stawiają znaczne wymagania użytkownikowi oprogramowania. Warunkiem koniecznym uzyskania poprawnych wyników jest właściwe zdefiniowanie modelu obliczeniowego w oparciu o jego specyfikę i podstawy dotyczące elementów skończonych [37].

Do głównych zalet stosowania analiz numerycznych w projektowaniu konstrukcji zalicza się [38]:

- zapewnienie bardzo dokładnych wyników,
- oszczędność czasową i finansową poprzez zastąpienie badań doświadczalnych symulacjami,
- możliwość symulacji rozmaitych warunków, zjawisk fizycznych, obciążeń itp.,
- umożliwienie analizy niestandardowych geometrii,
- skuteczność w rozwiązywaniu skomplikowanych modeli matematycznych,
- poprawa jakości produktu poprzez optymalizację projektu.

Ponadto programy MES umożliwiają automatyczne przeliczanie danych, zapobiegające wystąpieniu ewentualnym pomyłkom, lub prowadzeniu żmudnych obliczeń oraz tworzenie raportów z wykonanych analiz [39].

Zatem podsumowując, analiza w oparciu o metodę elementów skończonych jest jedną z istotniejszych metod numerycznych w inżynierii mechanicznej, a jej zastosowanie do projektowania i wspomagania systemów mechanicznych dynamicznie się powiększa. Istotą MES jest dokładne zrozumienie reakcji badanego obiektu, poddanego działaniu różnym siłom i obciążeniom, a także przewidywanie jego zachowań w rozmaitych warunkach.

1.2.2. Praktyczne przykłady zastosowania MES

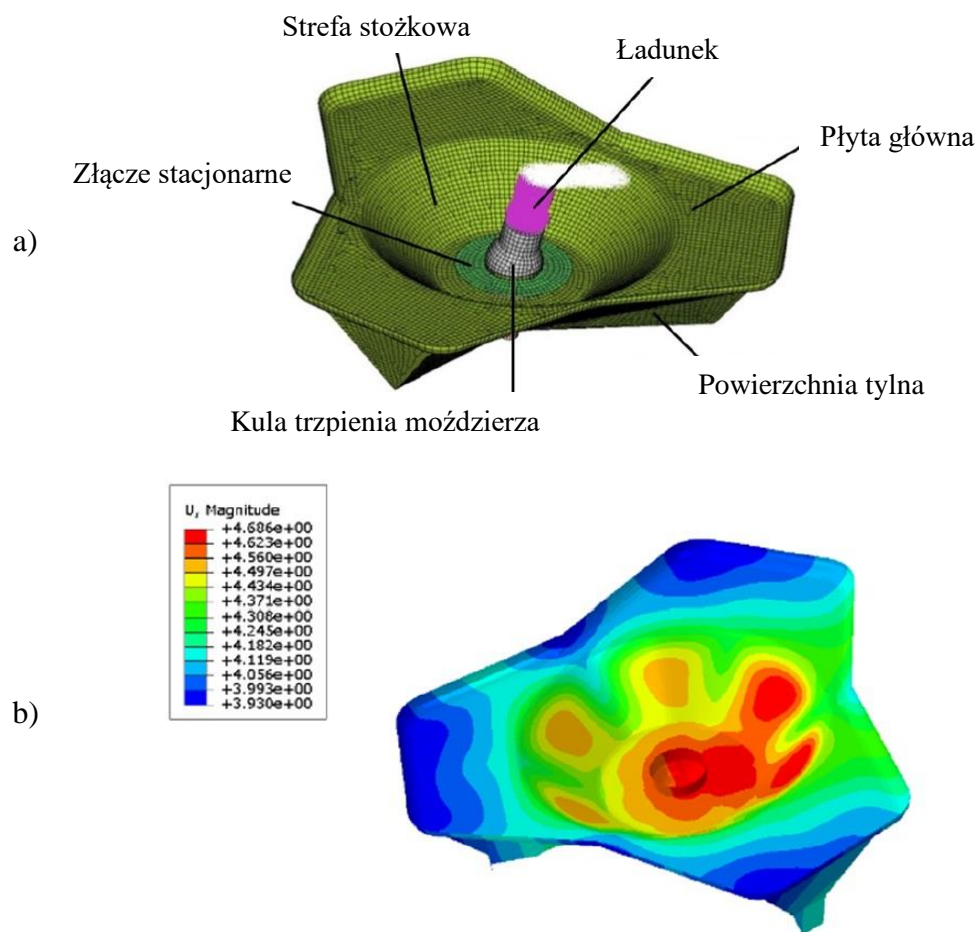
Ciągły rozwój technologii i względy ekonomiczne coraz częściej sprowadzają się do wykonywania symulacji numerycznych na modelach obliczeniowych, w zastępstwie badań konwencjonalnych. Jest to ogromna oszczędność dla przedsiębiorców, która ogranicza się do inwestycji związanej z zatrudnieniem wykwalifikowanej załogi oraz zakupem oprogramowania umożliwiającego stosowanie metody elementów skończonych, powszechnie używanej do analiz konstrukcji [40 - 48].

W pracy Rusińskiego i in. [49] zastosowano metodę elementów skończonych do opracowania modeli numerycznych zjawiska ostrzału blach pancernych wybranymi pociskami broni strzeleckiej. Warunki brzegowe takie jak twardość blachy, prędkość i materiał pocisku przyjęto w oparciu o rzeczywiste próby ostrzału. Przeprowadzona analiza MES umożliwiła globalny pogląd na procesy oraz mechanizmy deformacji blach, które umieszczone pod zdefiniowanymi kątami miały stanowić osłony samochodu specjalnego.

Uniwersalność symulacji numerycznych pozwala na rozwiązywanie skomplikowanych problemów konstrukcyjnych elementów, poddawanych eksploatacji w bardzo trudnych warunkach. Przykładem takiego zastosowania jest publikacja Murzynowskiego [50], dotycząca optymalizacji łopatek turbiny gazowej. Ze względu na skomplikowany kształt łopatek zastosowano skan 3D, umożliwiający późniejsze utworzenie modelu numerycznego. Na podstawie przeprowadzonych analiz dowiedziono, że rzeczywiste deformacje łopatek są większe od obliczeniowych. Jest to spowodowane okresową pracą łopatek w temperaturze wyższej od projektowanej.

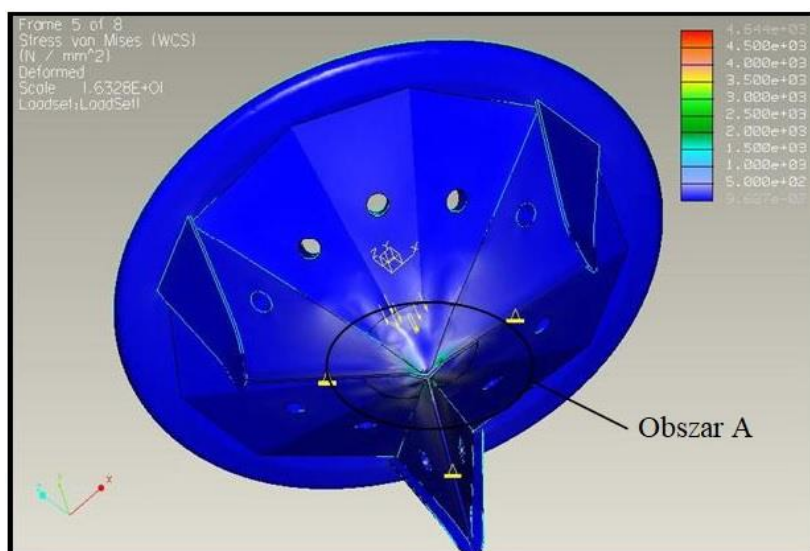
Innym przykładem zastosowań MES z dziedziny przemysłu motoryzacyjnego jest praca Lewkowicza [51], która przedstawia symulacje numeryczne wybranych podłużnic samochodowych podczas zderzenia i ich wpływ na bezpieczeństwo pasażerów.

Tematycznym odniesieniem do scharakteryzowanej metody elementów skończonych są publikacje Wang'a X. [52] i Wang'a F. i in. [53], w których modele obliczeniowe stanowią mózdzierzowe płyty oporowe. Finalnym efektem optymalizacji projektów jest możliwość wykonania płyt z lekkich warstw kompozytowych. Przeliczeń mających decydujący wpływ na dokładność wyników końcowych dokonano jedynie w oparciu o przyjęte założenia oraz opracowaną przez autorów funkcję celu. Wobec takiego podejścia, nie można całkowicie stwierdzić słuszności zaproponowanego rozwiązania. Model obliczeniowy płyty oporowej z naniesioną siatką elementów skończonych (a) oraz rozkładem naprężeń (b), przedstawiono na rysunku 1.5.



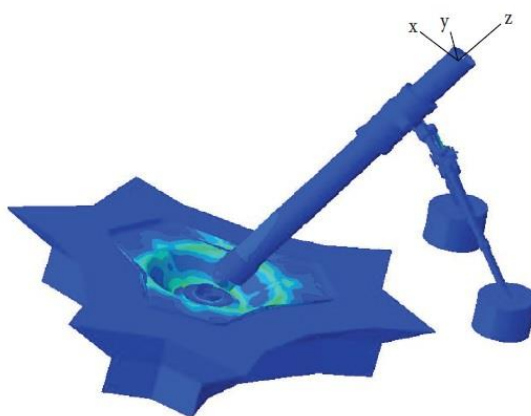
Rys. 1.5. Model obliczeniowy płyty odporowej: a) z naniesioną siatką elementów skończonych, b) z rozkładem naprężeń [53]

Kolejnym przykładem zastosowania MES na modelu obliczeniowym w postaci płyty odporowej moździerza jest praca Ristić'a Z. i in. [54], w której użyto oprogramowania Pro/Engineer Wildfire. Na podstawie przeprowadzonych symulacji dokonano analizy naprężeń występujących na płycie odporowej moździerza kalibru 120 mm dla różnych podłoży. Zastosowano również zmienną w postaci kąta podniesienia lufy moździerza wynoszącego 45°, 60° i 85°. Dane wejściowe do symulacji numerycznych starano się pozyskać z pomiarów tensometrycznych, nie mniej jednak przedstawione w publikacji szacunkowe wyniki z przeprowadzonych pomiarów, wskazują na niedostatecznie odpowiednio dobraną instalację tensometryczną. W oparciu o całościowe przedsięwzięcie badawcze ustalono, że największe naprężenia na badanej konstrukcji płyty odporowej występują podczas ostrzału z podłoża twardego przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60°. Model obliczeniowy płyty odporowej moździerza kalibru 120 mm z zastosowanego oprogramowania komputerowego, przedstawiono na rysunku 1.6.



Rys. 1.6. Model obliczeniowy płyty oporowej mózdzierza kalibru 120 mm z zastosowanego oprogramowania komputerowego [54]

W pracy Wang’a F. i in. [55] przedstawiono topograficzny projekt płyty oporowej mózdzierza kalibru 120 mm wykonany w oparciu o metodę elementów skończonych. Model płyty o kształcie trójkątnym poddano optymalizacji topologii dynamicznej jej struktury ciągłej na podstawie wyników pozyskanych z laboratoryjnych prób. W tym celu wykonano stanowisko umożliwiające zadanie obciążenia uderowego płyty oporowej oraz pomiaru tej siły. Pozyskane wyniki z przeprowadzonych analiz stanowiły podstawę do optymalizacji modelu pierwotnego. W niniejszej publikacji opracowano model obliczeniowy mózdzierza, który przedstawiono na rysunku 1.7. Są to innowacyjne rozwiązania, nie mniej jednak stosowanie ich w przypadku prototypów płyt oporowych jest nie do końca uzasadnione. Przewidzenie obliczeniowe wszystkich zjawisk fizycznych zachodzących podczas rzeczywistego ostrzału dla danego wyrobu nie jest możliwe bez wstępnych badań eksperymentalnych.



Rys. 1.7. Model obliczeniowy mózdzierza do badań symulacyjnych płyty oporowej [55]

Istotną rolę w prowadzonych symulacjach numerycznych stanowiły warunki brzegowe, z których kluczowym było uwzględnienie sił zewnętrznych działających na płytę oporową oraz interakcji płyty oporowej z podłożem podczas strzału. Zagadnienie interakcji płyty oporowej moździerza z podłożem ze względu na utajniony charakter wyrobów wojskowych nie jest obszernie opisywane w literaturze o tematyce militarnej, a jeśli już prowadzone są badania strzelaniem to zazwyczaj z jednego rodzaju podłoża [20, 56]. W związku z tym wyznaczenie parametrów geotechnicznych gruntów oraz ich przydatności do badań moździerzy ukończonych w płyty oporowe staje się złożonym zagadnieniem.

Odnosząc się do mechaniki gruntów ważnym kryterium oceny podłoża jest jego zagęszczenie, określane na podstawie wskaźnika odkształcenia, będącego ilorazem modułu odkształcenia wtórnego E_1 od pierwotnego E_0 [57]. Do sposobów wyznaczania stopnia zagęszczenia gruntów stosowane są laboratoryjna metoda Proctora [58] i polowe metody: pisaku kalibrowanego [59], płyty statycznej VSS [60] oraz płyty dynamicznej [61].

Ocena odkształcalności gruntu in situ obejmuje metody obciążenia płytą statyczną oraz dynamiczną, które umożliwiają bezpośredni pomiar modułu ściśliwości i dynamicznego modułu odkształcenia będących odpowiedzią gruntu na przyłożone obciążenie [62].

Próba obciążenia statycznego prowadzona przy użyciu aparatu VSS skonstruowanego w Szwajcarii, umożliwia wyznaczenie modułu odkształcenia gruntu jako zależności przyrostu obciążenia jednostkowego do przyrostu badanej warstwy w zadanym przedziale obciążeń. Obliczenie pierwotnego modułu odkształcenia E_0 oraz wtórnego modułu odkształcenia E_1 będących odpowiednio modułami początkowym i przeciążenia jest możliwe po ustawieniu podwójnego obciążenia statycznego badanego podłoża na stosowanym aparacie [63].

Alternatywą próby statycznej jest badanie dynamiczne płytą obciążoną za pomocą lekkiego ugięcia, spowodowanego pojedynczym impulsem uderzeniowym. Podczas testu mierzona jest amplituda przemieszczenia płyty. Zaletami metody są mobilność i krótki czas testu [64].

Na uwagę zasługuje praca [65], w której dokonano badania modułu odkształcenia gruntu za pomocą płyty statycznej, jak również lekkiej płyty dynamicznej. Na podstawie badań stwierdzono, że płyta dynamiczna wykazała większą czułość pomiarową.

W publikacjach [66, 67] przedstawiono alternatywne podejście do analiz geotechnicznych wybranych podłoży, polegające na zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych. Metoda ta opiera się na pracach analitycznych związanych z tworzeniem algorytmów i prowadzeniem obliczeń na modelach matematycznych przy zastosowaniu elementów skończonych.

Prowadzenie analiz metodą elementów skończonych na modelach numerycznych jest procesem zapewniającym wyłącznie przybliżony wynik, obarczony błędem [68]. Uzyskanie wyników zbieżnych w jak największym stopniu z rzeczywistością, wymaga weryfikacji doświadczalnej. Jest to najlepszy sposób pozwalający na otrzymanie realnych wskazań pomiarowych, które następnie można zaimplementować do symulacji w formie danych wejściowych.

Ze względu na skomplikowane w zdefiniowaniu warunki brzegowe dotyczące pracy płyty oporowej oraz jej interakcję z podłożem, najlepszym rozwiązaniem okazuje się zastosowanie tensometrii.

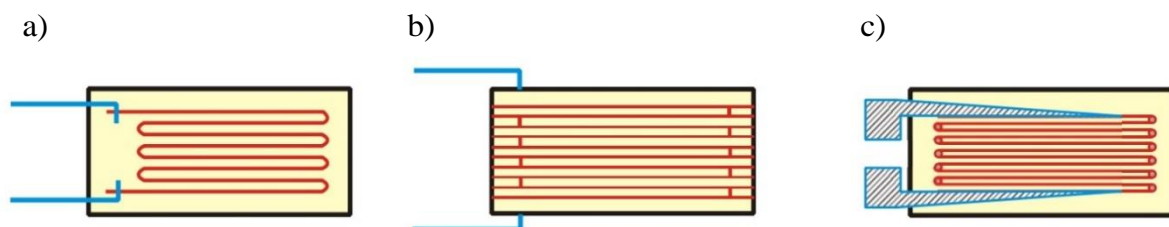
1.3. Pomiary tensometryczne

Tensometria jest jedną z najczęściej stosowanych metod służących do pomiaru odkształceń na wybranej powierzchni. Umożliwia wyznaczenie naprężeń w celu późniejszego określenia wytrzymałości całej konstrukcji, lub jej poszczególnych elementów. Pomiary tensometryczne pozwalają również na pośrednie wyznaczanie sił i momentów działających w warunkach eksploatacyjnych. Zastosowanie tensometrii we współczesnych badaniach z zakresu inżynierii mechanicznej i materiałowej stanowi nieodłączny element, który umożliwia prowadzenie precyzyjnych analiz odkształceń. Ze względu na jej zaawansowane możliwości pomiarowe i elastyczność, jest cenioną metodą pomiarową w wielu dziedzinach nauki oraz gałęziach przemysłu [69 – 73].

1.3.1. Charakterystyka tensometrii oporowej

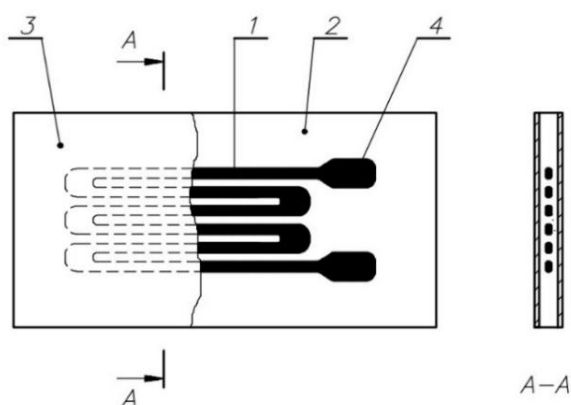
Najbardziej powszechnym rodzajem tensometrii stosowanym do wykonywania pomiarów odkształceń i monitorowania zmian geometrycznych obiektów pod wpływem zewnętrznych obciążeń jest tensometria elektrooporowa. Głównym elementem pomiarowym tej metody są elektryczne tensometry oporowe, które po przyklejeniu do powierzchni badanej próbki i podłączeniu do jednostki sterującej, pozwalają na rejestrację odkształceń na wybranej powierzchni. Zasada ich działania bazuje na zmianie oporu elektrycznego przewodnika w zależności od jego długości oraz przekroju poprzecznego. Tensometry mają zastosowanie w różnych warunkach środowiskowych, umożliwiając zbieranie danych pomiarowych zarówno w laboratorium, jak i w terenie [74].

W przypadku elektrycznych tensometrów oporowych, wykorzystuje się zależność między zmianą wielkości elektrycznych, a odkształceniami. Na ogół stosowane są trzy typy elektrycznych tensometrów: wężykowe (a), kratowe (b) oraz foliowe (c), które schematycznie, przedstawiono na rysunku 1.8 [75].



Rys. 1.8. Typy elektrycznych tensometrów oporowych: a) wężykowy, b) kratowy, c) foliowy [75]

Obecnie największą popularność zyskują tensometry foliowe, wykonywane z cienkiej folii, techniką podobną do tej, która jest stosowana przy produkcji płytek drukowanych. Sposób ten pozwala na wytwarzanie precyzyjnych, a zarazem tanich sensorów. Przykładowy schemat tensometru foliowego z uwzględnieniem jego elementów, przedstawiono na rysunku 1.9 [76].

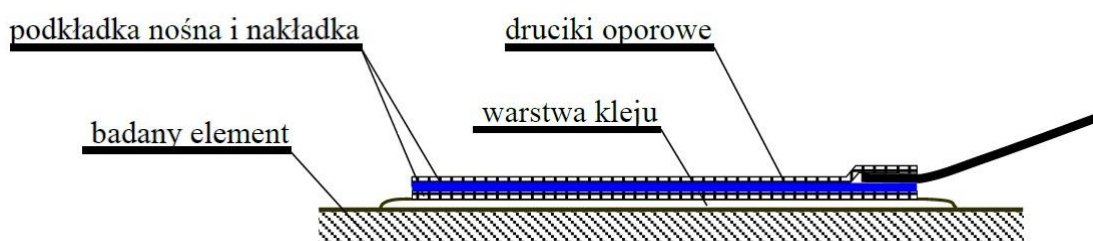


Rys. 1.9. Schemat tensometru foliowego i jego elementy: 1) siatka rezystancyjna, 2) podkładka nośna, 3) nakładka ochronna, 4) zakończenia przewodnika [76]

Małe wymiary oraz niewielka masa tensometrów, umożliwiają ich montaż w rozmaitych punktach badanych obiektów bez powodowania zakłóceń ich pracy, ani wpływu na właściwości mechaniczne. Ponadto prowadzenie pomiarów tensometrycznych sprzyja precyzyjnemu monitorowaniu odkształceń na badanych obiektach poddanych różnym warunkom eksploatacyjnym [77].

Istotnym jest, aby podczas prowadzonych pomiarów tensometry stanowiły integralną całość z badanym obiektem, w związku z tym zachodzi konieczność bardzo starannego ich przyklejenia, poprzedzonego odpowiednim przygotowaniem podłoża. Powierzchnia do której będzie przyklejony tensometr musi zostać starannie oczyszczona (z farby, izolacji), a następnie odtłuszczona. Warstwa kleju powinna być niewielka, nanoszona równomiernie, tak aby jednocześnie zapewnić dokładne przyleganie tensometru oraz doskonałą izolację elektryczną pomiędzy tensometrem, a badanym obiektem. Zastosowany klej musi być więc odporny na zmiany temperatury oraz czynniki atmosferyczne działające w czasie. W celu zwiększenia ochrony tensometru przed czynnikami zewnętrznymi, stosuje się warstwę zabezpieczającą, która nakładana jest bezpośrednio na tensometr, po jego przyklejeniu [78].

Schematyczny sposób przyklejenia tensometru do powierzchni badanego obiektu, przedstawiono na rysunku 1.10 [79].



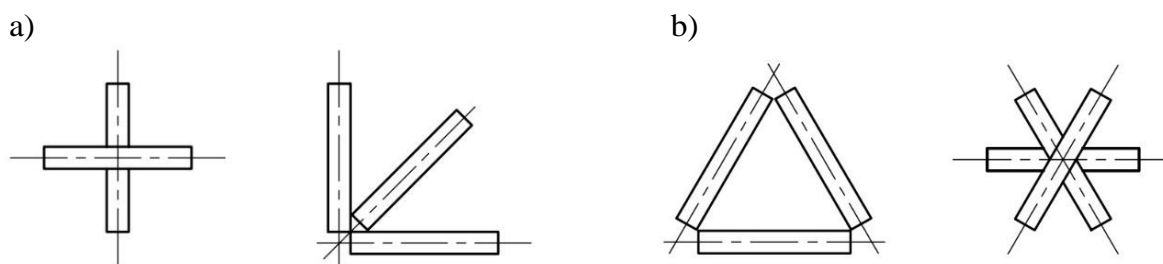
Rys. 1.10. Schemat przyklejenia tensometru do powierzchni badanego obiektu [79]

Tensometria oporowa jest metodą pomiaru odkształceń, którą charakteryzuje znaczna dokładność. Za względu na dużą czułość, umożliwia pomiar bardzo małych odkształceń [77]. Do zalet stosowania elektrycznych tensometrów zalicza się ich stosunkowo niski koszt i możliwość prowadzenia pomiarów na obiektach o bardzo małych powierzchniach oraz skomplikowanych kształtach i krzywiznach. Ponadto wyróżnia je łatwa instalacja, konserwacja, użytkowanie i odporność na błędy pomiarowe. Odporność tensometrów oporowych na działanie wysokiego ciśnienia i temperatury oraz możliwość zastosowania na ruchomych elementach sprawia, że pomiar tą techniką jest szeroko stosowany w różnych gałęziach przemysłu i dziedzinach nauki [80 – 85].

Pomiary przy zastosowaniu elektrycznych tensometrów oporowych mają również pewne wady, które obejmują długotrwały czas montażu oraz wrażliwość na zmiany temperatury i wilgotności. Ponadto tego rodzaju tensometry są jednorazowego użycia, co oznacza że po ich odklejeniu nie nadają się do ponownego montażu [80].

W przypadku gdy nieznana jest wartość odkształceń (naprężeń), ani kierunek główny ich działania w badanym elemencie, wówczas zastosowanie jednego tensometru jest nieefektywne. Określenie składowych stanu odkształcenia (naprężenia) jest możliwe dopiero przy użyciu rozety tensometrycznej. Rozeta jest zestawem tensometrów rozmieszczonych pod określonymi kątami, które umożliwiają jednoczesny pomiar odkształceń w różnych kierunkach. Jej zastosowanie pozwala badać wieloosiowe stany naprężeń i monitorować bardziej złożone warunki eksploatacyjne weryfikowanych elementów, takie jak skręcanie [78].

Rozeta tensometryczna stanowi zestaw najczęściej dwóch lub trzech, rzadziej czterech tensometrów, których nazwy związane są ze sposobem ułożenia w nich elementów składowych. Najczęściej stosowane są rozety tensometryczne prostokątne (a) oraz typu delta (b), które schematycznie przedstawiono na rysunku 1.11 [76].



Rys. 1.11. Rozety tensometryczne: a) prostokątne, b) typu delta [76]

1.3.2. Istota pomiarów tensometrycznych w praktyce

Ze względu na utajniony charakter produkcji wyrobów wojskowych oraz bardzo wysokie koszty badań związane z ich wdrożeniem, skomplikowanym okazuje się znalezienie wielu przykładów zastosowania tensometrii elektrooporowej podczas ostrzału sprzętu uzbrojenia, bądź amunicji. W zdecydowanej większości opisywanych przypadków środki finansowe związane z zakupem amunicji oraz realizacją badań strzelaniem w certyfikowanych ośrodkach badawczych są zastępowane laboratoryjnymi stanowiskami imitującymi warunki ostrzału, lub odbywają się poprzez symulacje MES na modelach numerycznych [86 – 90]. Takie podejście daje jedynie przybliżone wyniki pomiarowe. Wyniki pozyskiwane z pomiarów tensometrycznych odzwierciedlają rzeczywiste dane, nie mniej jednak względy ekonomiczne coraz częściej są przyczyną rezygnacji z ich wykonywania.

Zastosowanie pomiarów tensometrycznych do analiz wytrzymałościowych zbiornika umożliwiającego transport materiałów wybuchowych stanowi bezpieczne rozwiązanie, czego dowodem jest praca Krysiaka i in. [91]. Na podstawie uzyskanych pomiarów dokonano analizy doświadczalnej wyężenia konstrukcji zbiornika. Powstałe naprężenia w elementach konstrukcyjnych mają wartości na poziomie granicy plastyczności bądź nieznacznie ją przekraczają, przy czym mieszczą się w zakresie granicy wytrzymałości. Wynika z tego, że pojemnik transportowy jest przystosowany do pracy w założonych warunkach narażenia.

Tematycznym przykładem pomiaru odkształceń tensometrami przyklejonymi na płycie oporowej moździerza kalibru 120 mm jest praca Ristić'a i in. [54]. Pomiary prowadzono podczas badań strzelaniem z różnych rodzajów podłoża opowiadających gruntom miękkim, średnim i twardym oraz przy zmiennym kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45°, 60° i 85°. W pracy tej podjęto próbę porównania symulacji z rzeczywistymi pomiarami, nie mniej jednak niewystarczająco dobrze przygotowana instalacja tensometryczna i jej lokalizacja dostarczyły szczątkowe wyniki odkształceń.

Na uwagę zasługuje praca Toivola J. i in. [92] opisująca prowadzenie pomiarów odkształceń rozetami tensometrycznymi złożonymi z dwóch i trzech tensometrów podczas ostrzału moździerza kalibru 120 mm. Miejsca pomiarów odkształceń podczas strzału stanowiły płyta oporowa moździerza i specjalnie wykonany element zamka umożliwiający pomiar siły z lufy moździerza. Podczas całości prac prowadzono również pomiar ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy moździerza za pomocą czujnika piezoelektrycznego, który szczegółowo opisano w publikacjach [93, 94].

Pomiar odkształceń tensometrami jednokierunkowymi na płycie oporowej moździerza kalibru 81 mm zastosowano w pracy Littlefield'a A.G. i in. [20]. W tym przypadku pomiar stanowił porównanie otrzymanych odkształceń płyty oporowej podczas ostrzału w warunkach poligonowych oraz w czasie prób na specjalnie zaprojektowanym stanowisku laboratoryjnym. Istotą badania było udowodnienie, że prowadzenie prób w laboratorium przy zastosowaniu specjalnego stanowiska opierającego się na zadawaniu obciążenia hydraulicznego na płytę oporową jest porównywalne, co do wielkości uzyskiwanej ze strzału w celu ograniczenia kosztów badań poligonowych.

Pokrewnym przykładem zastosowania tensometrii elektrooporowej, będącym punktem odniesienia dla wyżej wymienionych publikacji jest praca Flynn'a P.D. [95], która dotyczy testów amunicji. Badania przeprowadzono dla zdefiniowanej konfiguracji tensometrów zlokalizowanych na zewnętrznej powierzchni lufy w odniesieniu do uzyskiwanych wartości

ciśnienia gazów prochowych. Wyniki obejmowały zarówno dane ze strzałów, jak i z testów hydraulicznych wykonywanych w warunkach laboratoryjnych, co umożliwiło późniejsze porównanie.

Wiele spośród opisywanych badań uwzględniało znaczną rolę interakcji płyty oporowej z podłożem. W podjętych próbach doświadczalnych mających na celu weryfikację funkcjonowania płyty w zmiennych warunkach stosowano różne podparcia gruntowe. Podczas prób poligonowych lub na zaprojektowanych laboratoryjnych stanowiskach prowadzono pomiary tensometryczne.

W szczególności warto odnieść się do pracy Ristić'a Z. i in. [54], w której do ostrzału płyty oporowej 120 mm moździerza zastosowano trzy rodzaje podłoża: piasek, ubitą ziemię i beton. Na podstawie uzyskanych pomiarów tensometrycznych, ostatni z wymienionych rodzajów podłoża okazał się najbardziej wymagający dla badanej płyty oporowej.

W pracy Toivola J. i in. [92] przeprowadzono ostrzał płyty oporowej 120 mm moździerza na podłożu żwirowym i piaszczystym. Stanowisko piaszczyste uzyskano poprzez wykonanie wykopu w gruncie żwirowym i zasypaniu go piaskiem. Autorzy niniejszej publikacji stwierdzili, że rodzaj zastosowanego podłoża nie miał istotnego wpływu na maksymalne wartości głównych odkształceń płyty oporowej.

W publikacjach [56] i [20] badaniu strzelaniem poddano płyty oporowe moździerzy kalibrów 60 mm i 81 mm przy zastosowaniu jednego rodzaju podłoża, którym był odpowiednio grunt piaszczysty i ziemny. A zatem tylko grunty o drobnych ziarnach, bez uwzględnienia ekstremalnych warunków ostrzału. Z tego względu uzyskano niepełne dane badawcze w przypadku porównania dwóch płyt oporowych, co opisano w pracy [56] oraz zastosowano materiał zastępczy do budowy stacjonarnego stanowiska badawczego odzwierciedlający wyłącznie jedno podłoże [20].

Na uwagę zasługuje praca Bartnika G. i in. [96], w której na podstawie obliczeń teoretycznych, jak i badań poligonowych z zastosowaniem metod geotechnicznych obejmujących testy statyczne i dynamiczne podjęto próby określenia parametrów poszczególnych podłoży do badań moździerzy. Poligonowe badania obejmowały ostrzał 98 mm moździerza z podłoża piaszczystego, natomiast próby statyczne przeprowadzono na podłożu torfowym, stanowiącym grunt miękkie nie wykorzystywany w budownictwie. Podczas wszystkich prób doświadczalnych prowadzono pomiary odkształceń moździerza i jego elementów za pomocą elektrycznych tensometrów oporowych. Parametryzacja warunków gruntowych umożliwiającą utworzenie jednolitej procedury do badania moździerzy nie powiodła się ze względu na znaczną ilość zmiennych i złożoność podjętego zagadnienia.

Autorzy publikacji nie wzięli pod uwagę różnych konstrukcji płyt oporowych zastosowanych do badań oraz zmiennej sztywności gruntu, co mogło wpłynąć na uzyskanie lepszej korelacji pomiędzy przedstawionymi metodami badawczymi, a wyniki uzyskanymi z ostrzału.

Odnosząc się do powyższych przykładów oraz dążąc do uzyskania pewnych wyników, warto przed przystąpieniem do symulacji numerycznych, zwłaszcza konstrukcji prototypowych przeprowadzić jednostkowe badania eksperymentalne. Uzyskane wyniki z rzeczywistych pomiarów odkształceń, działających sił, interakcji z podłożem i innych wielkości znacznie ułatwią modelowanie warunków brzegowych dla modeli obliczeniowych podczas analiz MES.

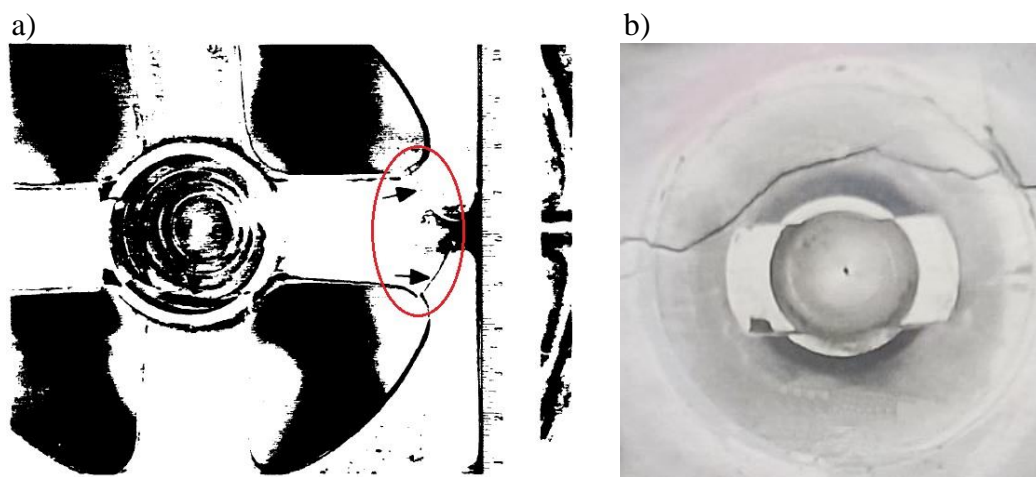
1.4. Wymagania stawiane współczesnym płytom oporowym

Zarówno płyta oporowa, jak i sam moździerz powinien być przystosowany do strzelania we wszystkich możliwych warunkach eksploatacyjnych uwzględniających czynniki atmosferyczne i różne rodzaje podparcia. Dlatego produkcja wojskowa nakłada restrykcyjne wymagania dla amunicji i sprzętu uzbrojenia, który powinien prawidłowo funkcjonować w skrajnych temperaturach eksploatacji oraz dla każdego sklasyfikowanego podłoża. Powołując się do zapisów norm NO-06-A103:2021 [97] i NO-10-A216:2021 [98] moździerz powinien spełniać wymagania związane z poprawnym działaniem podczas strzelania prowadzonego zarówno z różnych stref klimatycznych, jaki i gruntów o rozmaitych cechach fizycznych, pogrupowanych jako grunty miękkie, średnie i twarde.

Płyty oporowe o konstrukcji symetrycznej we wszystkich kierunkach w większości w kształcie okręgu, posiadają wiele zalet związanych z ich produkcją, a przede wszystkim z użytkowaniem. Nie wymuszają na załodze specjalnej pozycji ustawiania oraz są bardziej ergonomiczne i łatwiejsze do zamocowania na wózku transportowym. Przedstawione atuty mogą wydawać się niezbyt wymiernymi korzyściami, nie mniej jednak na polu walki, kiedy do obsługi sprzętu uzbrojenia przez żołnierza dochodzi stres, mają istotne znaczenie wpływające na szybkość operacyjną załogi, przekładającą się bezpośrednio na jej bezpieczeństwo.

Na mobilność żołnierzy podczas działań operacyjnych wpływa najbardziej masa poszczególnych konstrukcji płyt oporowych. W przypadku 120 mm moździerza wzór 1943 masa płyty oporowej wynosi 95 kg, co wymaga większej liczebności załóg obsługujących, a to z kolei stanowi łatwiejszy cel dla wroga.

Problemem napotykanym w cyklu eksploatacyjnym płyt oporowych moździerzów jest występowanie ich pęknięć. Na rysunku 1.12 przedstawiono zdjęcie rentgenowskie pękniętej płyty oporowej 81 mm moździerza (a) [99] oraz fragment pękniętej płyty moździerzowej, której identyfikacja techniczna nie może zostać ujawniona (b).



Rys. 1.12. Przykłady pęknięć płyt oporowych a) obwodowe [97], b) poprzeczne

Praca Tuscher'a S. [99] dotyczy badań nad pękniętą płytą oporową moździerza kalibru 81 mm. Na podstawie przeprowadzonych testów dowiedziono, że materiał płyty powstały w procesie wytwórczym nie posiadał wad, ani wcześniejszych pęknięć spowodowanych dotychczasową eksploatacją. Przyczyną powstania pęknięcia było natomiast wystąpienie dużego obciążenia w miejscu spiętrzenia się największych naprężeń, mających bezpośredni wpływ na odkształcenia płyty oporowej.

Mimo, że na etapie projektowania płyt oporowych uwzględnia się ich dłuższą żywotność, niż pozostałych elementów moździerza, dochodzi do jednostkowych uszkodzeń uniemożliwiających dalszą eksploatację. Zapewnienie dłuższej żywotności płycie oporowej jest celowym działaniem, ponieważ zużytą lufę moździerza, z której oddano około dwa tysiące strzałów można wymienić, dwójnóg i osłabiacze odrzutu zregenerować, natomiast płytę oporową nadal stosować. Zdarza się jednak, że rozwiązania konstrukcyjne i materiały użyte do wykonania płyty oporowej znacznie wcześniej przestają prawidłowo funkcjonować, co ma wpływ na bezpieczeństwo załogi oraz dokładność prowadzonego ostrzału. Publikacje [100, 101] przybliżają warunki pracy luf sprzętu uzbrojenia i wpływu poszczególnych czynników na ich zużycie, które pośrednio oddziałują na pozostałe elementy wchodzące w skład kompletnej armaty, lub moździerza.

Na podstawie wyżej wymienionych danych literaturowych, przedstawiających badania płyt oporowych mózdzierzy dotychczas jednoznacznie nie zdiagnozowano przyczyn występowania pęknięć. Analizowane przez nielicznych badaczy metody pomiaru i sposoby symulacji odkształceń płyt oporowych oraz ich interakcji z podłożem są niekompletne i w wielu przypadkach nie są skorelowane z danymi eksperymentalnymi.

2. Teza, cel i zakres pracy

Tematyka militarna oraz jej problemy nie są powszechnie opisywane ze względu na tajemnice przedsiębiorstw produkcyjnych i sprawujących nad nimi kontrolę narodowych służb, czuwających nad bezpieczeństwem państw. Kolejnym powodem jest duża rywalizacja związana ze sprzedażą wyrobów na światowym rynku uzbrojenia. Ze względu na liczne ograniczenia w publikowaniu, trudno o znalezienie szczegółowych informacji dotyczących badań realizowanych w tym obszarze.

Na podstawie analizy stanu zagadnienia można stwierdzić, że problem korelacji materiału podłoża, kąta podniesienia lufy moździerza oraz odkształceń (naprężeń) płyty oporowej moździerza nie jest dobrze poznany. Dotychczasowe badania prowadzone były przy stosowaniu znacznych uproszczeń, zarówno w przypadku ostrzału płyt oporowych, jak również podczas prowadzonych symulacji komputerowych.

Opisywane w literaturze badania eksperymentalne płyt oporowych prowadzono dla niepełnej ilości wariantów eksploatacyjnych, obejmujących zmienne podłoża, lub kąty ostrzału. W większości przypadków badania wykonywano z jednego, lub dwóch rodzajów gruntu przy stałym kącie podniesienia lufy moździerza. Prowadzone pomiary tensometryczne często dostarczały jedynie szczątkowych wyników wartości odkształceń badanych płyt oporowych. Było to związane z doбором tensometrów, ich lokalizacją oraz wykonaniem instalacji tensometrycznej.

W publikacjach w dużej mierze prowadzono symulacje numerycznie niepodparte rzeczywistymi wynikami. Ostrzał płyty oporowej w warunkach poligonowych usiłowano zastąpić hydraulicznymi uderzeniami na laboratoryjnych stanowiskach kontrolno-pomiarowych. Wiele spośród proponowanych inicjatyw zastąpienia badań eksperymentalnych miało ekonomiczny sens jednakże, aby poznać cechy badanego obiektu przynajmniej raz należy poddać go badaniom w rzeczywistych warunkach, zgodnych z jego późniejszym przeznaczeniem. Wówczas możliwe będzie pozyskanie realnych danych wejściowych do symulacji komputerowych.

Żadne z opisywanych w literaturze badań symulacyjnych nie uwzględniało zmiennej sztywności gruntu mającej znaczny wpływ na rozkład naprężeń na poszczególnych obszarach płyty oporowej podczas ostrzału.

W oparciu o analizę aktualnego stanu wiedzy, sformułowano następującą tezę pracy:
Możliwe jest szacowanie wartości naprężeń płyty oporowej mózdzierza na podstawie modelu numerycznego uwzględniającego dane eksperymentalne uzyskane w warunkach poligonowych.

Celem naukowym pracy było opracowanie metodyki badań eksperymentalnych płyty oporowej mózdzierza w warunkach poligonowych i modelu numerycznego umożliwiającego szacowanie naprężeń w symulacji MES płyty oporowej mózdzierza. Opracowana metodyka badań eksperymentalnych oraz metodyka tworzenia analizy MES powinny być wykorzystane do opracowania typoszeregu modeli numerycznych płyt oporowych mózdzierzy.

Celem użytkowym pracy było opracowanie bazy danych eksperymentalnych płyty oporowej mózdzierza na podstawie przeprowadzonych prób poligonowych, uzyskanie rozkładu naprężeń w opracowanym modelu numerycznym płyty oporowej i przeprowadzenie symulacji MES dla zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej.

Wyniki symulacji dla zmodyfikowanej konstrukcji powinny zostać uwzględnione w procesie projektowania nowej konstrukcji płyty oporowej mózdzierza M98, co wpłynęłoby na redukcję naprężeń przy równoczesnym obniżeniu jej masy, zapewniając większą mobilność płyty oporowej w warunkach bojowych.

Weryfikacji postawionej tezy badawczej dokonano na podstawie zrealizowanego zakresu badań podjętych w pracy:

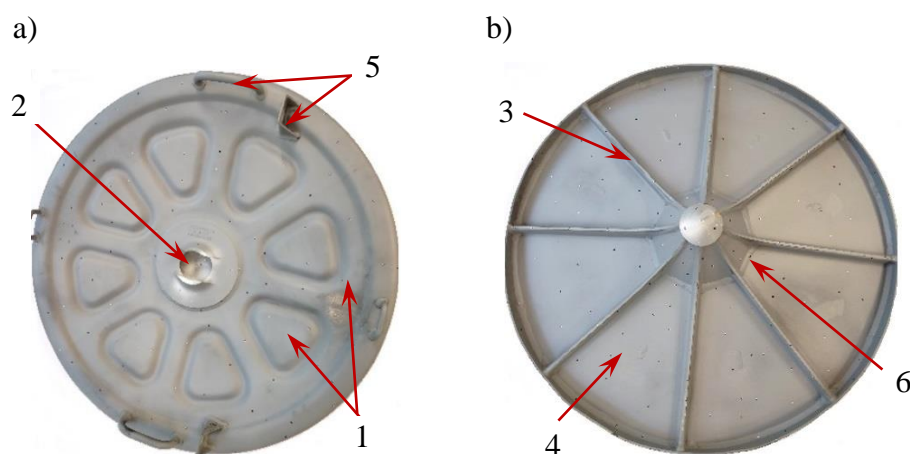
1. Przeprowadzenie analizy stanu zagadnienia dotyczącego badań płyt oporowych, wykonywania pomiarów tensometrycznych oraz stosowania metody elementów skończonych do rozpatrywania naprężeń i odkształceń występujących na płycie podczas ostrzału prowadzonego z mózdzierza.
2. Opracowanie metodyki badań wstępnych, zbudowanie stanowiska do ich realizacji oraz przeprowadzenie wstępnych badań poligonowych ostrzału płyty oporowej z pomiarem jej odkształceń i parametrów balistycznych zastosowanej amunicji.
3. Opracowanie metodyki badań eksperymentalnych na podstawie wyników uzyskanych z badań wstępnych, uwzględniających zastosowanie rozet tensometrycznych oraz amunicji zapewniającej ekstremum eksploatacyjne.
4. Przygotowanie amunicji balistycznej, stanowisk ogniowych na terenie poligonu z podziałem na trzy różne rodzaje podłoży oraz instalacji tensometrycznej na płycie oporowej do badań eksperymentalnych.

5. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych płyty oporowej z podłoża ziemnego, piaszczystego i kamienistego przy zmiennym kącie podniesienia lufy moździerza, wraz z pomiarem odkształceń płyty rozetami tensometrycznymi oraz parametrów balistycznych zastosowanej amunicji.
6. Opracowanie bazy danych w oparciu o uzyskane dane pomiarowe (odkształcenia, maksymalne ciśnienie gazów prochowych, naprężenia zredukowane) z badań eksperymentalnych prowadzonych w warunkach poligonowych.
7. Wykonanie badań materiałowych płyty oporowej stanowiących dane wejściowe do symulacji numerycznych MES.
8. Opracowanie modelu CAD, modelu obliczeniowego płyty oporowej i zdefiniowanie warunków brzegowych do symulacji numerycznych MES, uwzględniających dane pozyskane z rzeczywistych pomiarów prowadzonych podczas ostrzału płyty oporowej.
9. Przeprowadzenie symulacji numerycznych MES modelu płyty oporowej moździerza celem uzyskania rozkładu naprężeń.
10. Analizy wyników symulacji numerycznych MES w odniesieniu do pomiarów tensometrycznych oraz ze względu na poszczególne obszary płyty oporowej.
11. Analizy statystyczne otrzymanych wyników w oparciu o moduł ANOVA w celu określenia istotności wpływu poszczególnych parametrów na wartości naprężeń płyty oporowej i zastosowanie najkorzystniejszego modelu neuronowego do modelowania odkształceń płyty.
12. Opracowanie zmodyfikowanej konstrukcji modelu płyty oporowej (w aspekcie redukcji naprężeń i obniżenia masy) na podstawie symulacji numerycznych MES oraz analizy wyników w odniesieniu do dotychczasowej konstrukcji płyty.

3. Materiał badawczy

Materiał do badań stanowiła płyta oporowa moździerza M98, przedstawiona na rysunku 3.1. Jest ona wykorzystywana do podtrzymywania trzonu lufy moździerza oraz wyhamowywania odrzutu podczas strzału, poprzez przenoszenie energii na grunt. Płyty oporowe moździerza M98 wykonywane są ze stali 30HGSA [102]. Jest to niskostopowa stal konstrukcyjna przeznaczona do ulepszania cieplnego, która charakteryzuje się wysoką hartownością, wytrzymałością i odpornością na zużycie. Ze względu na występujące spadki wytrzymałości po przekroczeniu pewnej grubości, wykorzystuje się ją do produkcji elementów o grubości do 60 mm. Po ulepszaniu cieplnym polegającym na hartowaniu i odpuszczaniu, uzyskuje wysokie wskaźniki wytrzymałościowe, przy równie korzystnych pozostałych właściwościach mechanicznych. Stal 30HGSA znajduje zastosowanie przede wszystkim w przypadku elementów części maszyn oraz konstrukcji pracujących w warunkach silnego obciążenia. Z uwagi na podwyższoną zawartość węgla oraz obecność dodatków stopowych, jej spawalność jest ograniczona, stąd celem uzyskania wysokiej jakości połączeń spawanych, stosuje się wstępne podgrzewanie blach.

Na rysunku 3.1 przedstawiono widok płyty oporowej moździerza M98 mm z obu stron.



Rys. 3.1. Płyta oporowa moździerza M98: a) widok z wierzchu, b) widok od spodu. Elementy płyty: 1 – część górna z przetłoczeniami, 2 – gniazdo kuliste, 3 – żebra, 4 – pokrywy międzyżebrowe, 5 – uchwyty transportowe, 6 – spoiny

Główny element płyty oporowej stanowi blacha tłoczona na zimno o grubości 3,5 mm w kształcie koła z przetłoczeniami usztywniającymi (1). Blacha następnie łączona jest z gniazdem kulistym (2), żebrami (3) i pokrywami wzmacniającymi (4) oraz pokrywami

międzyżebrowymi usztywniającymi i elementami transportowymi (5) w procesie spawania spoinami pachwinowymi (6). Po zakończonym procesie spawaniu płyta poddawana jest obróbce cieplnej. Zewnętrzna średnica płyty oporowej wynosi 807 mm, a jej całkowita masa jest równa 53 kg.

3.1. Skład chemiczny oraz wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne materiału płyty oporowej

Zakres składu chemicznego stali 30HGSA zgodnie z normą PN-89/H-84030/04 [102], podano w tabeli 3.1. Właściwości mechaniczne w stanie po ulepszaniu cieplnym, zgodnie z PN-H-92135:1981 [103] podano w tabeli 3.2.

Tab. 3.1. Skład chemiczny stali 30HGSA [102]

| Zawartość pierwiastków, % mas | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|---------|----------|----------|
| C | Mn | Si | P | S max | Cr | Ni | Cu |
| 0,28-0,34 | 0,8-1,1 | 0,9-1,2 | max 0,025 | max 0,025 | 0,8-1,1 | max 0,30 | max 0,30 |

Tab. 3.2. Właściwości mechaniczne stali 30HGSA po ulepszaniu cieplnym [102-104]

| Właściwości mechaniczne i fizyczne stali 30HGSA | | | | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|---------|---------------------------|----------------|-----------|
| R _m , MPa | R _e , MPa | A ₅ , % | Z, % | KCU, J/cm ² | Twardość HB | E, GPa |
| 1080 | 830 | 10 | 45 | 50 | 295-360 | 215 |

Złącza spawane wykonano z wykorzystaniem metody MAG, stosując niskostopowe stopiwo OK AristoRod 69, zgodnie z EN ISO 16834-A [105]: GMn3Ni1CrMo. Jego skład chemiczny podano w tabeli 3.3, natomiast właściwości mechaniczne w tabeli 3.4.

Tab. 3.3. Skład chemiczny stopiwa OK AristoRod 69 wg EN ISO 16834-A [105]

| Zawartość pierwiastków, % mas | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| C | Mn | Si | Cr | Ni | V |
| 0,08 | 1,60 | 0,60 | 0,30 | 1,40 | 0,07 |

Tab. 3.4. Właściwości mechaniczne stopiwa OK AristoRod 69 wg EN ISO 16834-A [105]

| Właściwości mechaniczne stopiwa OK AristoRod 69 | | |
|--|----------------|--------------|
| R_m , MPa | R_e , MPa | A_5 , % |
| 800 | 730 | 19 |

W celu uzyskania rzeczywistych danych wejściowych do przeprowadzenia analiz numerycznych, na materiale próbek pobranych z płyty oporowej (po zakończonych badaniach poligonowych) zrealizowano badania składu chemicznego materiału płyty i stopiwa. Ponadto wykonano statyczną próbę rozciągania i ocenę twardości próbek pobranych z materiału płyty oporowej oraz stopiwa.

Badania składu chemicznego

Badania składu chemicznego materiału płyty oporowej ze stali 30HGSA wykonano z zastosowaniem spektrometru emisyjnego Q4 Tasman firmy Bruker, przedstawionego na rysunku 3.2. Badania przeprowadzono na wycinku o wymiarach 50 mm x 50 mm, pobranym z materiału płyty oporowej. Wyniki tych badań zestawiono w tabeli 3.5.



Rys. 3.2. Spektrometr emisyjny Q4 Tasman firmy Bruker

Tab. 3.5. Wyniki badania składu chemicznego materiału płyty oporowej ze stali 30HGSA

| Zawartość pierwiastków, % mas | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|----------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| C | Mn | Si | P | S max | Cr | Ni | Cu |
| 0,32 | 0,86 | 1,12 | 0,021 | 0,006 | 1,09 | 0,21 | 0,20 |

Statyczna próba rozciągania

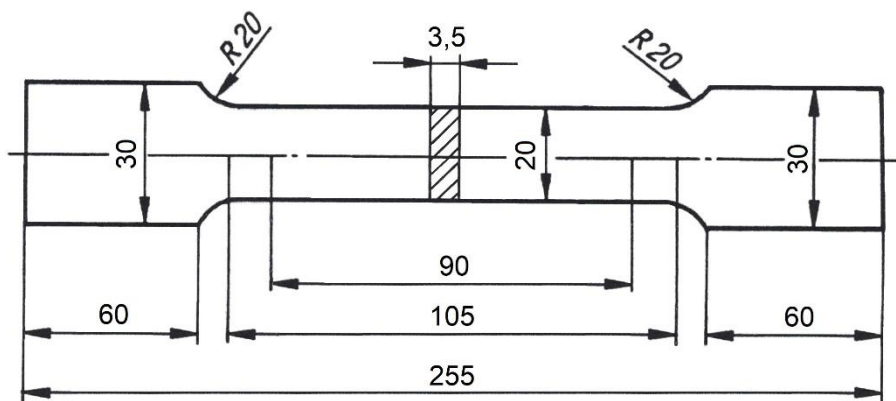
Statyczną próbę rozciągania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 przedstawionej na rysunku 3.3, zgodnie z normą DIN EN ISO 6892-1 [106]. Z płyty oporowej mózdzierza wycięto (za pomocą szlifierki kątovej) fragmenty materiału celem odpowiedniego przygotowania próbek do badań. Następnie z fragmentów materiału, z zastosowaniem wycinarki elektroerozyjnej BP95d firmy ZAP bp, przedstawionej na rysunku 3.4, wycinano próbki do badań właściwości mechanicznych. Kształt oraz wymiary próbki do statycznej próby rozciągania, przedstawiono na rysunku 3.5, natomiast wyniki badań podano w tabeli 3.6.



Rys. 3.3. Maszyna wytrzymałościowa firmy Zwick/Roell Z100



Rys. 3.4. Wycinarka elektroerozyjna BP95d firmy ZAP bp



Rys. 3.5. Kształt i wymiary próbek do statycznej próby rozciągania [107]

Tab. 3.6. Wyniki właściwości mechanicznych próbek pobranych z płyty oporowej mózdzierza wykonanej ze stali 30HGSA

| R_m, MPa | R_e, MPa | A₅, % | Z, % | E, GPa |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------|------------------|
| 1085,1±23,2 | 830,3±17,5 | 10,3±1,1 | 46±3,1 | 210 ± 12,5 |

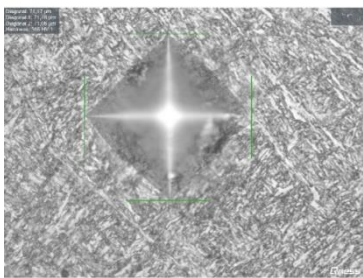
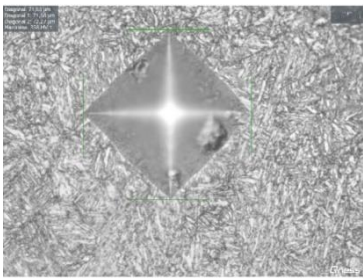
Ocena twardości

Ocenę twardości wykonano z zastosowaniem twardościomierza Qness 60 EVO, przedstawionego na rysunku 3.6 stosując obciążenie wgłębnika HV1. Pomiary twardości wykonywano na zglądzie metalograficznym, który przygotowano identycznie, jak do badań mikroskopowych. Ocenę twardości HV1 prowadzono dla materiału płyty oporowej oraz spoiny w stanie po ulepszaniu cieplnym. Stanowią one średnią z trzech pomiarów. Wyniki tych badań zestawiono w tabeli 3.7.



Rys. 3.6. Twardościomierz Qness 60 EVO

Tab. 3.7. Wyniki badań oceny twardości materiału płyty oporowej oraz spoiny

| Rodzaj materiału | Widok odcisku | Średnia wartość twardości |
|---|---|--|
| Materiał płyty oporowej – stal 30HGSA w stanie po ulepszaniu cieplnym |  | HV1 = 366 ± 6 (≈ 348 HB) |
| Materiał spoiny wykonanej ze stopiwa OK AristoRod 69, w stanie po ulepszaniu cieplnym |  | HV1 = 358 ± 8 (≈ 340 HB) |

Wyniki badań twardości materiału płyty oporowej oraz materiału spoiny praktycznie nie wykazują znaczących różnic. Świadczy to o prawidłowym przeprowadzeniu zabiegu ulepszania cieplnego, w wyniku którego nastąpiło ujednorodnienie mikrostruktury i uzyskanie zbliżonych do siebie wartości twardości.

3.2. Badania mikroskopowe materiału płyty oporowej

Badania mikroskopowe przeprowadzono na próbkach pobranych z obszaru złącza spawanego, celem określenia mikrostruktury materiału rodzimego płyty oraz mikrostruktury materiału spoiny wraz mikroanalizą składu chemicznego. Publikacje [108, 109] przedstawiają sposób prowadzenia mikroanaliz chemicznych oraz badań mikroskopowych, umożliwiających znalezienie wad materiałowych i poprawę wybranych własności poszczególnych parametrów materiałowych.

Próbki do badań metalograficznych wycinano na przecinarce metalograficznej Labotom 3 firmy Struers, stosując tarczę typu Supra TRD 15. W trakcie cięcia próbki i tarcza były chłodzone strumieniem wody. Próbki inkludowano w żywicy przewodzącej prąd elektryczny z wykorzystaniem praski IPA 30 firmy Remet, przedstawionej na rysunku 3.7. Następnie szlifowano je z zastosowaniem szlifierko-polerki metalograficznej ATM Saphir 320E z głowicą Rubin 550 (rys. 3.8) na papierach o ziarnistości 150, 500 i 1000, cyklicznie zmieniając kierunki

szlifowania. Prędkość obrotowa tarczy polerskiej wynosiła 150 obrotów na minutę. Następnie próbki polerowano stosując tarczę firmy LAM PLAN, pokrytej zawiesiną diamentową 9 oraz 1 μm . Dla ujawnienia mikrostruktury próbek stosowano 4 % roztwór kwasu azotowego i alkoholu etylowego.

Badania mikroskopowe wykonywano z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego MIRA3 firmy Tescan, wyposażonego w detektor EDS do mikroanalizy składu chemicznego X-Max^N firmy Oxford Instruments, który przedstawiono na rysunku 3.9.



Rys. 3.7. Praska IPA 30 firmy Remet do inkludowania próbek

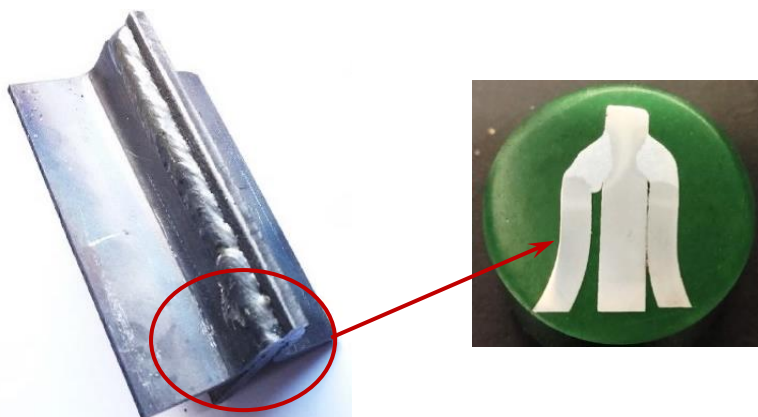


Rys. 3.8. Szlifierko-polerka metalograficzna ATM Saphir 320E z głowicą Rubin 550



Rys. 3.9. Skaningowy mikroskop elektronowy MIRA3 firmy Tescan, wyposażony w detektor EDS do mikroanalizy składu chemicznego X-Max^N firmy Oxford Instruments

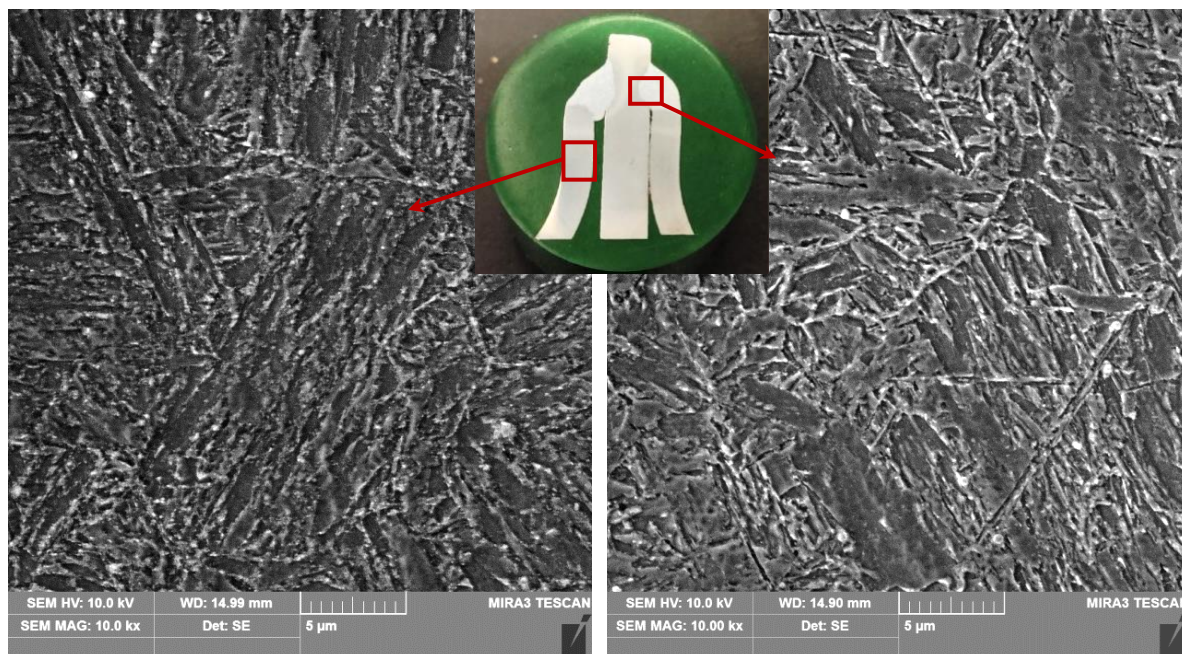
Na rysunku 3.10 przedstawiono widok wyciętego fragmentu złącza spawanego płyty oporowej oraz przygotowany zgląd metalograficzny do badań mikroskopowych, natomiast na rysunku 3.11 pokazano przykładowe mikrostruktury obszaru materiału rodzimego płyty oporowej oraz materiału spoiny w stanie po ulepszeniu cieplnym. Wyniki badań EDS z tych obszarów, przedstawiono na rysunku 3.12.



Rys. 3.10. Wycięty fragment płyty oporowej oraz przygotowany zgląd metalograficzny do badań mikroskopowych

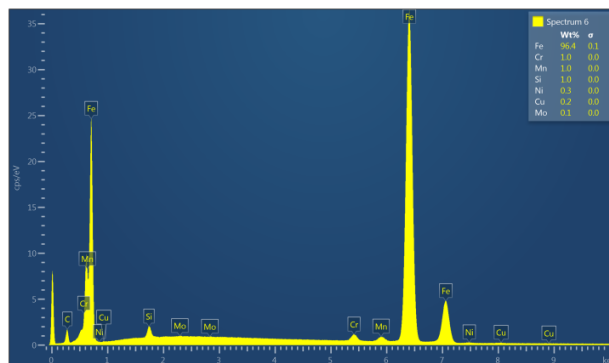
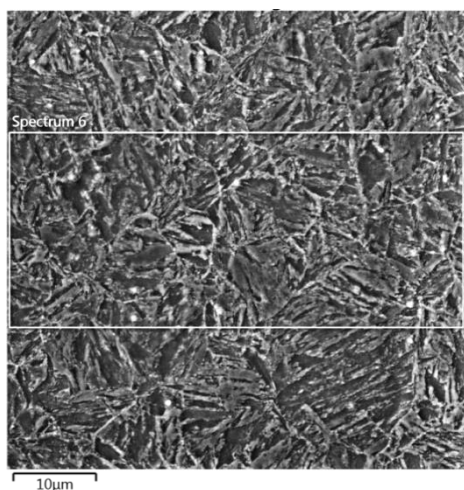
Materiał płyty oporowej

Materiał spoiny

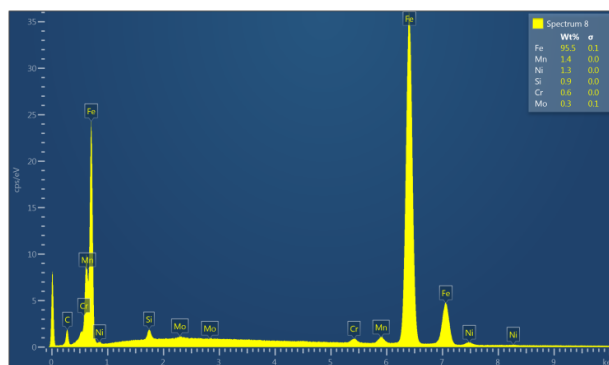
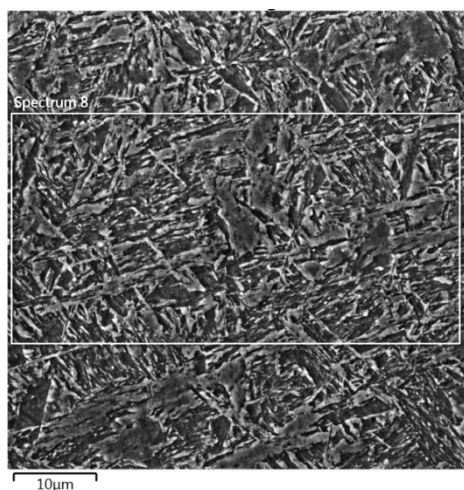


Rys. 3.11. Przykładowa mikrostruktury obszaru materiału rodzimego płyty oporowej oraz materiału spoiny w stanie po ulepszeniu cieplnym

a) Materiał płyty oporowej



b) Materiał spoiny



Rys. 3.12. Wyniki badań EDS materiału płyty oporowej (a) oraz spoiny (b)

Zarówno w materiale rodzimym, jaki i w materiale spoiny mikrostruktura składa się z martenzytu wysoko odpuszczonego. Wyniki badań mikroanalizy składu chemicznego materiału płyty oporowej są zgodne z wynikami badań uzyskanymi z zastosowaniem spektrometru emisyjnego.

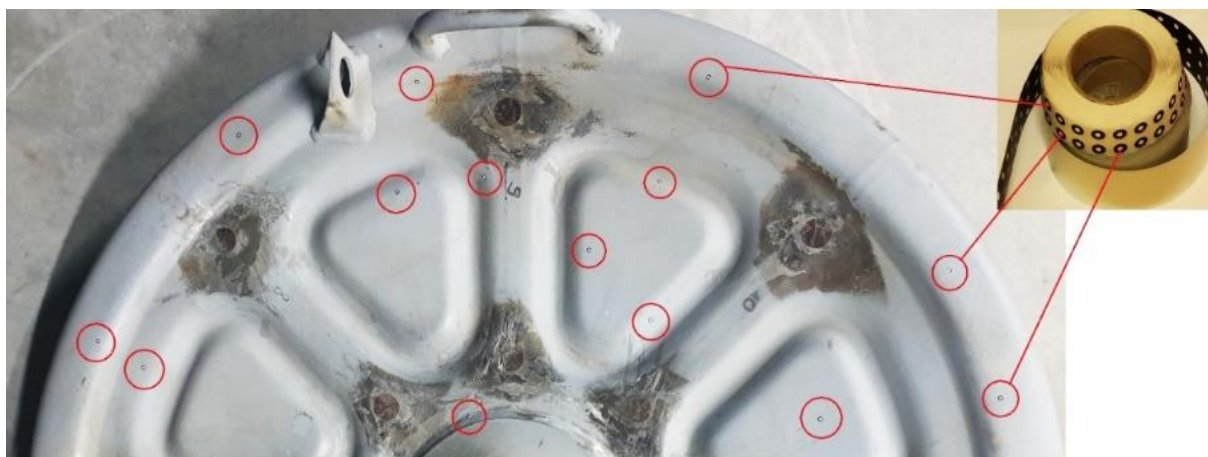
Podsumowując dotychczasowe wyniki badań materiału płyty oporowej zaobserwowano, że materiał płyty oraz materiał spoiny charakteryzują się mikrostrukturą martenzytu odpuszczonego o zbliżonej wartości twardości zawierającej się w zakresie 358-366 HV1 (340-348 HB), charakterystycznej dla tego materiału w stanie ulepszonym cieplnie. W analizowanym złączu spawanym nie zaobserwowano obecności strefy wpływu ciepła, która uległa ujednolicieniu w wyniku obróbki cieplnej.

Ze względu na brak informacji odnośnie własności mechanicznych spoiwa dla różnych wariantów obróbki cieplnej, na podstawie analizy mikrostruktury, mikroanalizy składu chemicznego oraz bardzo zbliżonych do materiału rodzimego płyty oporowej wartości twardości przyjęto, że materiały te mają podobną wartość granicy plastyczności. Na podstawie uzyskanych wyników badań, do analiz numerycznych przyjęto następujące wartości: granica plastyczności $R_e = 830 \text{ MPa}$, moduł Younga $E = 210 \text{ GPa}$. Natomiast z danych literaturowych przyjęto współczynnik Poissona $\nu = 0,3$ [110].

3.3. Opracowanie modelu 3D płyty oporowej

W celu otrzymania modelu 3D płyty oporowej dokonano skanowania jej rzeczywistej konstrukcji przy zastosowaniu skanera GOM Compact Scan Atos 5M, na którym zamontowano wspornik o długości 300 mm oraz dwie kamery Schneider 300/MV300 o objętości pomiarowej $300 \times 230 \times 230 \text{ mm}$ i kącie 25 stopni. Stosowanie skanera 3D umożliwia odtworzenie skomplikowanych kształtów oraz weryfikację pomiarową elementów poddanych zużyciu w odniesieniu do ich wymiarów nominalnych [111, 112].

Proces skanowania rozpoczęto od umieszczenia na płycie markerów (punktów referencyjnych) o średnicy 1,5 mm. Fragment płyty oporowej z naniesionymi markerami, przedstawiono na rysunku 3.13.



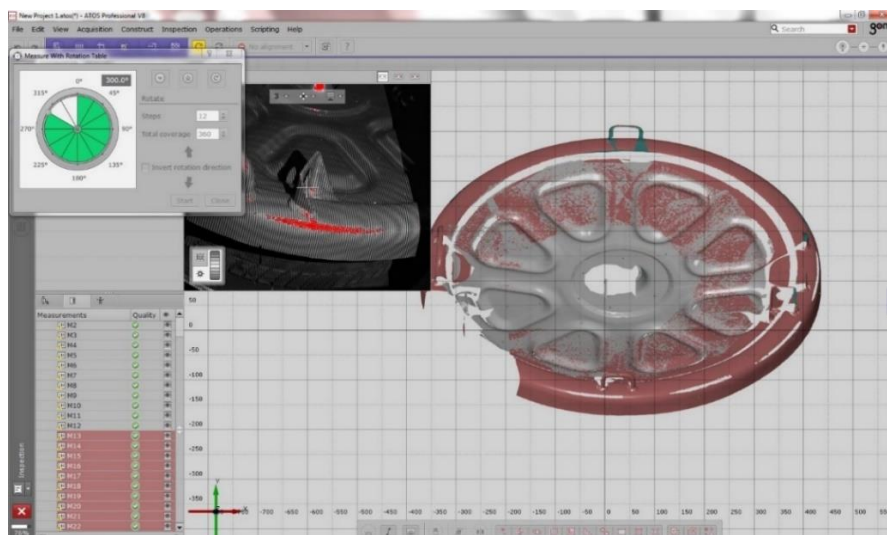
Rys. 3.13. Fragment płyty oporowej z przyklejonymi markerami

Skanowanie przeprowadzono skanerem światła strukturalnego (niebieskiego) umożliwiającym rejestrację przebiegu prążków przemieszczających się po powierzchni skanowanego przedmiotu [113]. Oprogramowanie skanera obliczało współrzędne punktu dla każdego piksela. Płytę oporową z przyklejonymi wcześniej punktami referencyjnymi umieszczono na stole obrotowym skanera. Każdorazowo po wykonanym pomiarze stół obracał się o zadany kąt, aby zarejestrować wszystkie zadane obszary płyty. Wykonane pomiary w całości zostały zaimportowane do wspólnego układu współrzędnych, co pozwoliło wygenerować chmurę punktów [114]. Przykładowy widok płyty oporowej mózdzierza w trakcie skanowania, przedstawiono na rysunku 3.14.



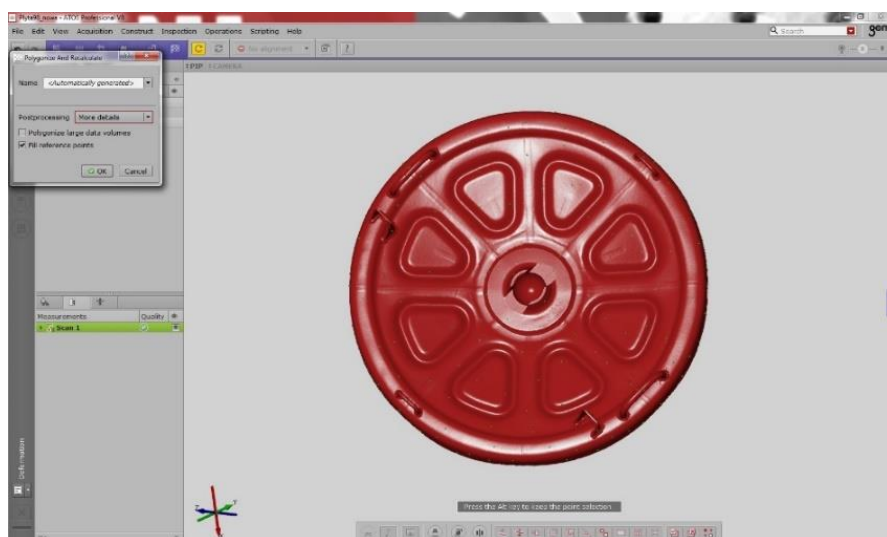
Rys. 3.14. Płyta oporowa mózdzierza M98 w trakcie skanowania

Intensywność światła generowanego przez skaner dobrano tak, aby zapewnić odpowiednią jakość procesu. Skanowanie i edycję danych prowadzono w programie ATOS Professional V8. Proces skanowania przeprowadzono w 12 krokach w celu zapewnienia pełnego obrotu stołu z umieszczoną na nim płytą oporową. Na rysunku 3.15 przedstawiono sposób rejestracji danych podczas prowadzonego skanowania.



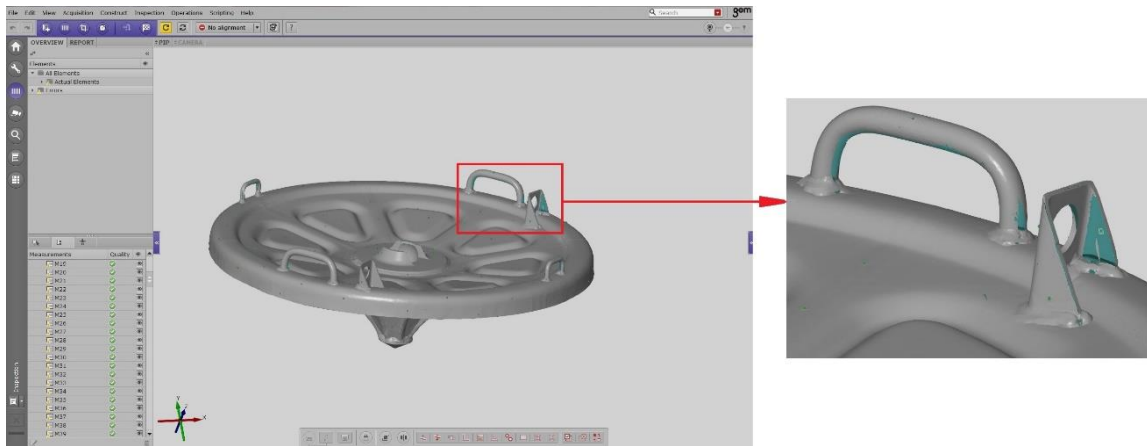
Rys. 3.15. Proces skanowania płyty oporowej

Po wykonanym skanowaniu otrzymane dane poddano edycji, polegającej na usunięciu niepożądanych fragmentów powstałych w pobliżu modelu płyty oporowej. Następnie dokonano poligonizacji modelu, czyli automatycznej optymalizacji i uśrednienia punktów, czego wynikiem była jednolita i precyzyjna siatka trójkątów STL. Model płyty oporowej w trybie poligonizacji, przedstawiono na rysunku 3.16.

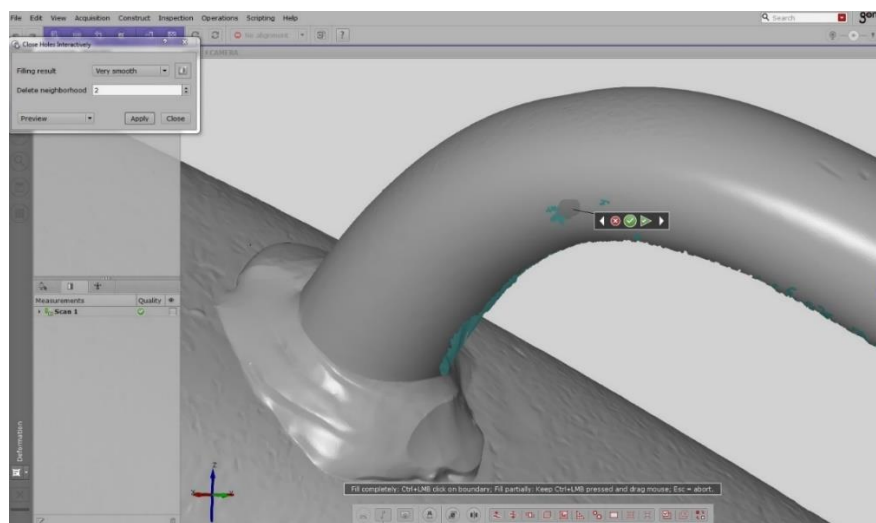


Rys. 3.16. Model płyty oporowej w trybie poligonizacji

Kolejnym etapem prac była naprawa siatki modelu powierzchniowego polegająca na usuwaniu nieciągłości. Przykładowe nieciągłości siatki na zeskanowanym modelu płyty oporowej (w pobliżu uchwytu transportowego) przedstawiono na rysunku 3.17, natomiast działania naprawcze na rysunku 3.18.

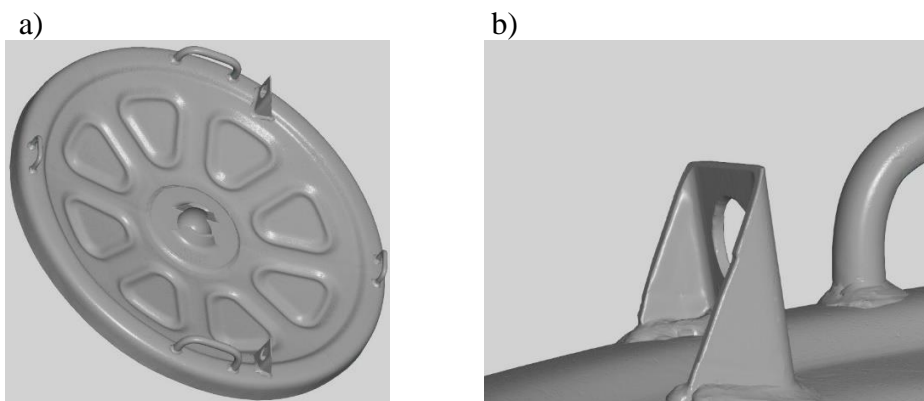


Rys. 3.17. Nieciągłość siatki na zeskanowanym modelu płyty oporowej



Rys. 3.18. Naprawa siatki zeskanowanego modelu płyty oporowej

Model płyty oporowej po przeprowadzonej edycji danych związanych z poligonizacją i naprawą siatki, przedstawiono na rysunku 3.19.



Rys. 3.19. Model płyty oporowej po przeprowadzonej edycji danych a) widok w całości od strony wierzchniej, b) widok wybranych elementów transportowych

Zastosowanie skanera umożliwiło uzyskanie modelu 3D płyty oporowej mózdzierza w formacie stl., który następnie przekształcono na plik CAD za pomocą programu NX 11. Wykorzystując moduł do modelowania inżynierii odwrotnej, otrzymano sparametryzowaną bryłę 3D wraz z informacjami dotyczącymi jej zewnętrznego kształtu. Wewnętrzny kształt poszczególnych elementów płyty uzyskano po ich bezpośrednim zwymiarowaniu. Działan tych dokonano dopiero po zakończeniu badań poligonowych. Wówczas przebadaną płytę oporową rozcięto w celu zebrania dokładnych danych wymiarowych i kształtowych. W ten sposób uzyskano kompletny model 3D płyty oporowej mózdzierza, który wykorzystano do przeprowadzenia analiz numerycznych.

4. Wstępne badania poligonowe płyty oporowej

Celem badań wstępnych było sprawdzenie możliwości pomiaru odkształceń płyty oporowej podczas jej ostrzału. Do prób wstępnych zastosowano tensometry umożliwiające pomiar odkształceń w jednym kierunku, które przyklejono w różnych obszarach płyty na jej wierzchniej i spodniej powierzchni, aby uzyskać jak najwięcej danych. Chcąc przybliżyć możliwe do wystąpienia, rzeczywiste warunki eksploatacyjne dla badanej płyty oporowej, do ostrzału zastosowano różne rodzaje naboju moździerzowych, które poddano przechowywaniu w skrajnych temperaturach eksploatacji. Podczas wstępnych badań strzelaniem, oprócz pomiaru odkształceń występujących na płycie oporowej, mierzono również parametry balistyczne zastosowanej amunicji.

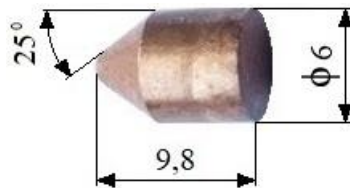
4.1. Metodyka pomiaru parametrów balistycznych

Zdefiniowanie parametrów balistycznych naboju moździerzowych polega na pomiarze ciśnienia gazów prochowych ze spalanych ładunków miotających w przewodzie lufy moździerza i na pomiarze prędkości początkowej wystrzeliwanych pocisków. Na podstawie zmierzonych wielkości możliwe jest określenie najbardziej ekstremalnych warunków ostrzału oraz wyznaczenie sił przenoszonych przez trzpień lufy moździerza na płytę oporową. Podczas badań mających na celu ostrzał płyty oporowej zastosowano dwie metody pomiaru ciśnienia gazów prochowych – metodę zgmiotową i piezoelektryczną. Ograniczeniem pierwszej z nich jest możliwość uzyskania jedynie maksymalnej wartości ciśnienia gazów prochowych [115]. W związku z tym, aby zapewnić rejestrację przebiegu ciśnienia gazów prochowych w czasie, zastosowano również metodę piezoelektryczną. Pomiar ciśnienia wkręcany przyrządem zgmiotowym, jak i wkręcany czujnikiem piezoelektrycznym jest możliwy ze względu na specjalny zamek moździerza M98, posiadający gniazda montażowe z otworami przelotowymi. Pomiar prędkości początkowej wystrzeliwanych pocisków przeprowadzono przy użyciu mobilnego systemu radiolokacyjnego [116].

Analogiczne sposoby pomiaru parametrów balistycznych, na przykładzie amunicji artyleryjskiej przedstawiono w pracach [92, 117].

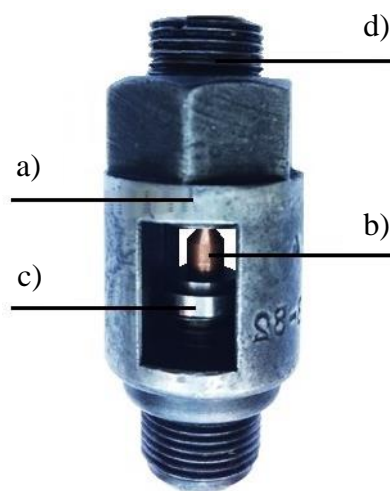
4.1.1. Pomiar ciśnienia gazów prochowych metodą zgniotową

Pomiar ciśnienia metodą zgniotową opiera się na zastosowaniu wkręcanego przyrządu zgniotowego typu M20 wyposażonego w jednorazowe zgniotki miedziane stożkowe o wymiarach $\phi 6$ mm x 9,8 mm. Zwymiarowany zgniotek miedziany stożkowy, przedstawiono na rysunku 4.1.



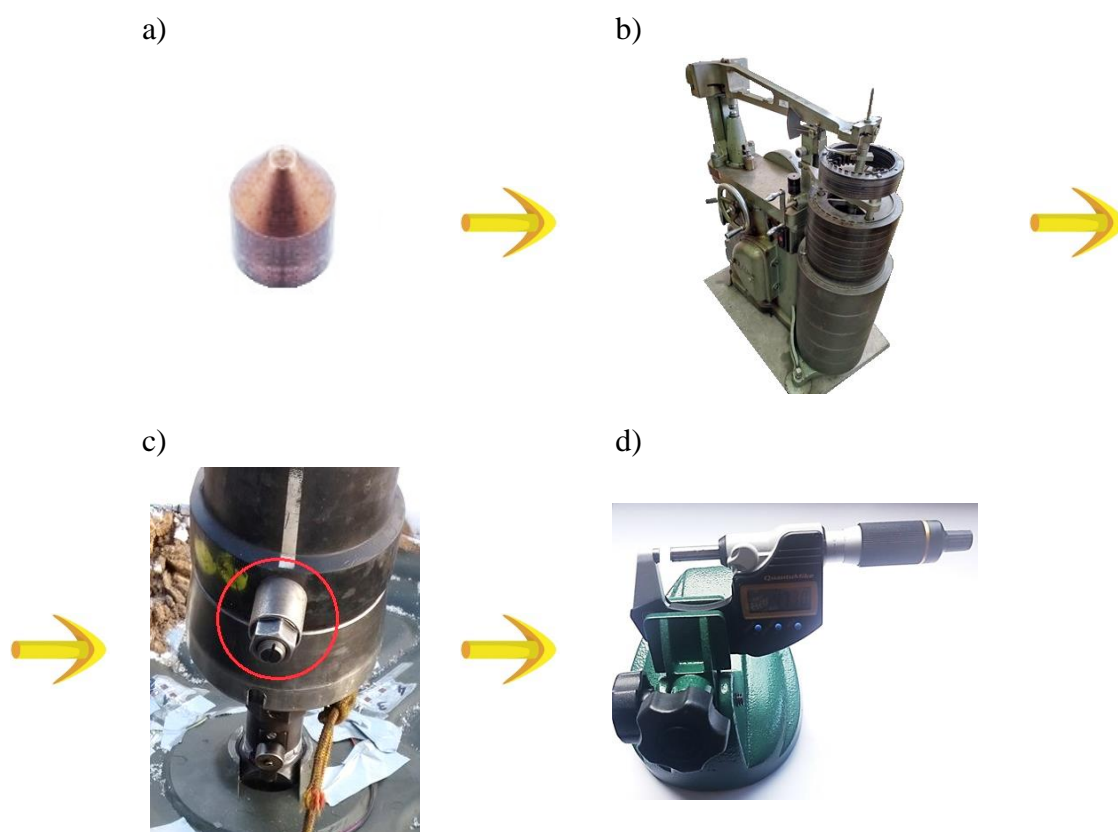
Rys. 4.1. Zgniotek miedziany stożkowy o wymiarach $\phi 6$ mm x 9,8 mm

Zastosowanie metody zgniotowej wymaga przygotowania stożkowych zgniotków miedzianych. Czynności te wykonano za pomocą prasy Baranowskiego typu PB-5-50 zgodnie z Wojskową Normą Branżową WBN-91/1003-54 [118]. Przyrząd zgniotowy (rys. 4.2.), wkręcany w zamek moździerca składa się z korpusu (a), wewnątrz którego umieszczany jest stożkowy zgniotek miedziany (b). W dolnej części przyrządu wykonane jest tłoczysko umożliwiające przemieszczanie tłoczka (c) wyposażonego w sprężynę. Śruba dociskowa (d) pozwala na dokładne ustawienie zgniotka w przyrządzie. Przyrząd zgniotowy typu M20 wraz ze zgniotkiem miedzianym stożkowym, przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Wkręcany przyrząd zgniotowy typu M20: a) korpus, b) zgniotek miedziany stożkowy, c) tłoczek, d) śruba dociskowa

Podczas strzału dochodzi do osiowego odkształcenia plastycznego, stożkowego zgniotka miedzianego wskutek ruchu tłoczka w kierunku śruby dociskowej. Po wyciągnięciu zgniotka z przyrządu, prowadzono pomiar jego wysokości mikrometrem. Na tej podstawie dokonano odczytu wartości ciśnienia maksymalnego z tabeli cechowania, odpowiadającej użytej partii zgniotków [118]. Na rysunku 4.3 schematycznie przedstawiono tor pomiarowy zastosowany podczas pomiaru metodą zgniotową.



Rys. 4.3. Metodyka pomiaru ciśnienia maksymalnego metodą zgniotową: a) zgniotek miedziany stożkowy o wymiarach $\phi 6 \text{ mm} \times 9,8 \text{ mm}$, b) prasa Baranowskiego typu PB-5-50, c) wkręcany przyrząd zgniotowy typu M20, d) mikrometr cyfrowy

Powyższa metoda pomiaru ciśnienia gazów prochowych może wydawać się przestarzałą, nie mniej jednak podczas projektowania i badań mających na celu wdrożenie moździerza M98 do produkcji była jedyną stosowaną metodą. Na podstawie pomiaru ciśnienia wkręcany przyrządem zgniotowym sporządzona została dokumentacja techniczna moździerza zawierająca jego parametry użytkowe i graniczne wartości maksymalne. W związku z powyższym podczas ostrzału płyty odporowej pociskami uкомплекowanymi w ładunki miotające wzmocnione stosowano powyższą metodę, aby mieć kontrolę nad maksymalnym, bezpiecznym ciśnieniem w przewodzie lufy moździerza.

Ładunek wzmocniony nie jest wykorzystywany podczas standardowej eksploatacji, co może stanowić zagrożenie dla mózdzierza oraz załogi go obsługującej. Wobec tego pomiar przyrządem zgmiotowym umożliwiał monitorowanie uzyskiwanych wyników w odniesieniu do granicznej wartości bezpiecznej, zgodnie z dokumentacją techniczną.

4.1.2. Pomiar ciśnienia gazów prochowych metodą piezoelektryczną

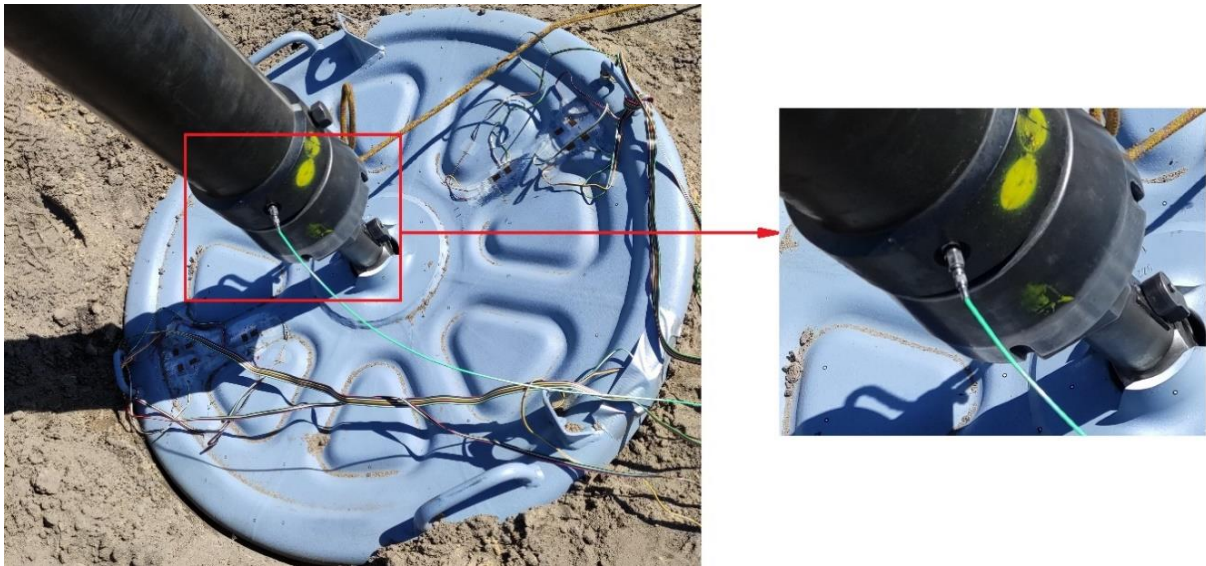
Kolejną metodą pomiaru ciśnienia gazów prochowych zastosowaną podczas ostrzału płyty oporowej była metoda piezoelektryczna. Pomiary przeprowadzono przy użyciu czujnika piezoelektrycznego firmy Kistler typu 6215, dedykowanego przez producenta do badań balistycznych. Czujnik piezoelektryczny z zestawem elementów ochronnych przedstawiono na rysunku 4.4, natomiast jego podstawowe dane techniczne zestawiono w tabeli 4.1. Miejsce instalacji czujnika w zamku mózdzierza M98, przedstawiono na rysunku 4.5.

Tab. 4.1 Dane techniczne czujnika piezoelektrycznego Kistler typu 6215 [119]

| Dane techniczne | Jednostka | Wartość |
|-------------------|-----------|--------------|
| Zakres pomiarowy | bar | 0 ÷ 6 000 |
| Czułość | pC / bar | - 1,412 |
| Liniiowość | % | ± 0,6 |
| Zakres temperatur | ° C | - 50 ÷ + 200 |

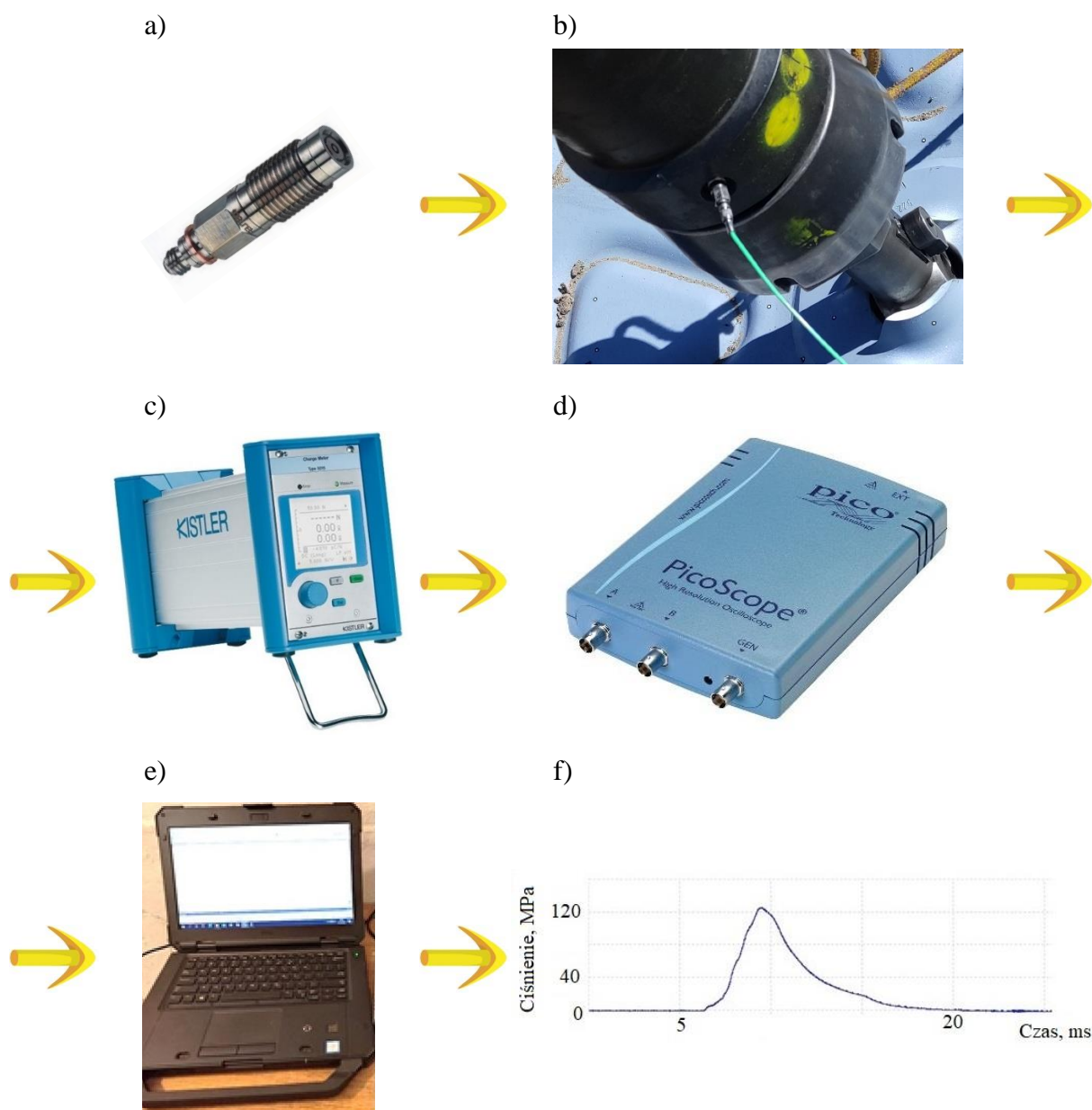


Rys. 4.4. a) czujnik piezoelektryczny Kistler typu 6215, b) nakładka ochronna, c) pierścień dystansowy, d) osłona termiczna



Rys. 4.5. Miejsce instalacji czujnika piezoelektrycznego w zamku moździerza M98

W odróżnieniu od poprzedniej metody, pomiar czujnikiem piezoelektrycznym w trakcie strzału pozwala uzyskać nie tylko maksymalną wartość ciśnienia gazów prochowych, ale również całosciowy przebieg ciśnienia w funkcji czasu. Przed rozpoczęciem pomiaru zabezpieczono czujnik piezoelektryczny przed działaniem ognia ze spalanych ładunków miotających. W tym celu zastosowano dedykowane przez producenta elementy składające się z nakładki ochronnej, osłony termicznej i pierścienia dystansowego (rys. 4.4). Kolejną istotną czynnością, którą wykonano przed aplikacją czujnika piezoelektrycznego była weryfikacja stanu technicznego gwintu gniazda i zapewnienie drożności otworu przelotowego w zamku moździerza. Dodatkowo w skład zestawu pomiarowego wchodzi wzmacniacz ładunku Kistler typu 5015A [120], oscyloskop Pico [121], dedykowane oprogramowanie komputerowe oraz przewody sygnałowe. Po podłączeniu oscyloskopu do wzmacniacza ładunku i komputera rejestrowano przebieg mierzonego ciśnienia w funkcji czasu. Metodykę pomiaru ciśnienia metodą piezoelektryczną, schematycznie przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Metodyka pomiaru ciśnienia metodą piezoelektryczną: a) czujnik piezoelektryczny Kistler typu 6215, b) czujnik wkręcony w zamek móżdziejca, c) wzmacniacz ładunku Kistler typu 5015A, d) oscyloskop Pico, e) komputer z dedykowanym oprogramowaniem, f) przykładowy wykres przebiegu ciśnienia w czasie

4.1.3. Pomiar prędkości pocisków mobilnym systemem radiolokacyjnym

Pomiar prędkości początkowej pocisków wystrzeliwanych z móżdziejca M98 prowadzono z zastosowaniem mobilnego systemu radiolokacyjnego wyposażonego w radar Dopplera firmy Weibel typ SL-520P, w celu weryfikacji stabilności spalania się ładunków miotających. Prowadzenie jednoczesnego pomiaru ciśnienia gazów prochowych i prędkości początkowej wystrzeliwanych pocisków umożliwia kontrolę podczas badań strzelaniem

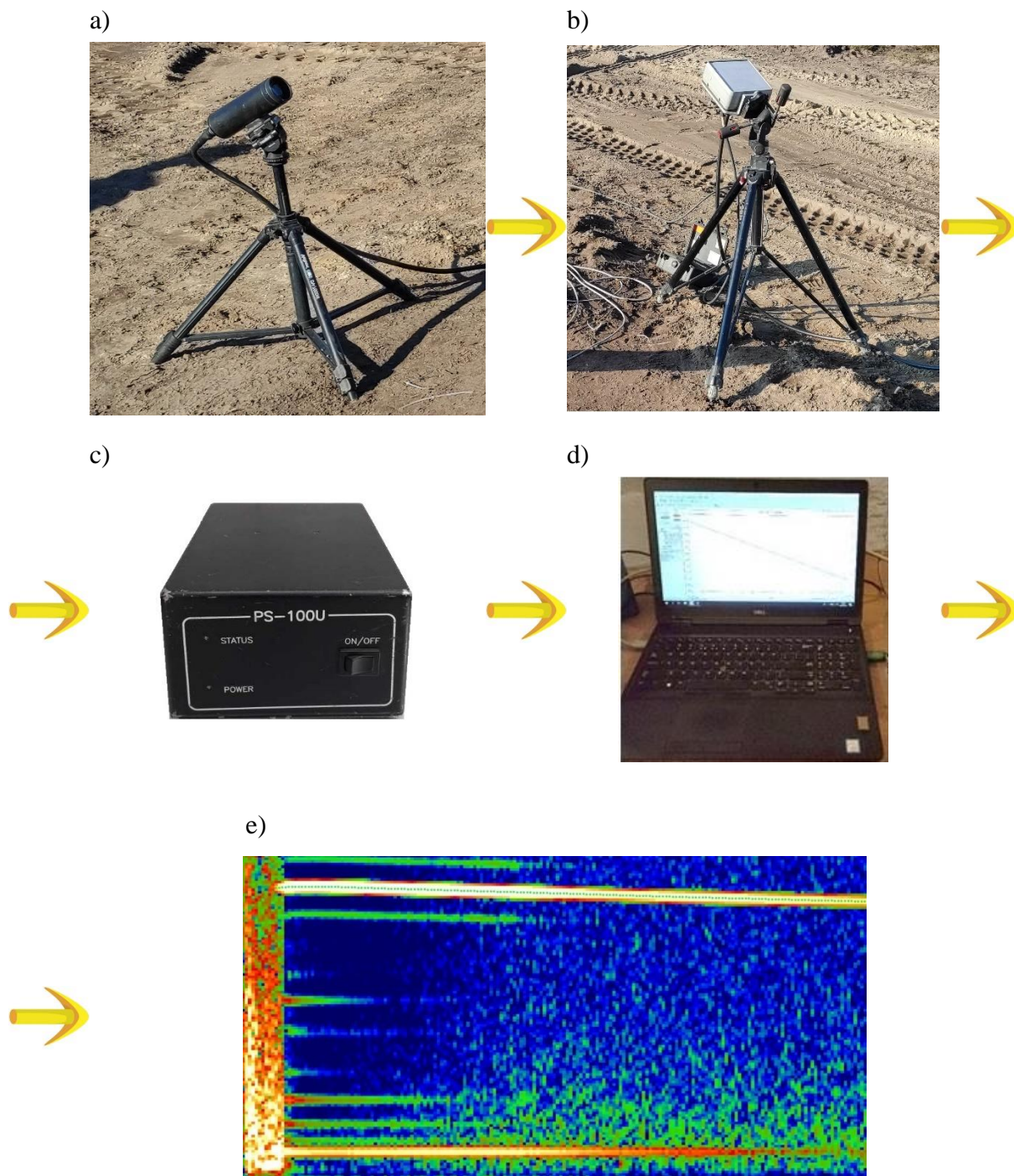
zarówno na stanowisku ogniowym, jak również na stanowisku obserwacyjnym, gdzie dochodzi do uderzenia pocisków w teren. Na podstawie prędkości początkowej dobierany jest kąt podniesienia lufy moździerza, generujący zasięg wystrzelanych pocisków [122]. W skład systemu radiolokacyjnego wchodzi: radar, urządzenie optyczne – trigger, kontroler, przewody sygnałowe oraz dedykowane oprogramowanie komputerowe. Na rysunku 4.7 przedstawiono położenie poszczególnych urządzeń mobilnego systemu radiolokacyjnego względem lufy moździerza M98 podczas ostrzału.



Rys. 4.7. Lokalizacja urządzeń mobilnego systemu radiolokacyjnego względem moździerza:
a) radar, b) trigger

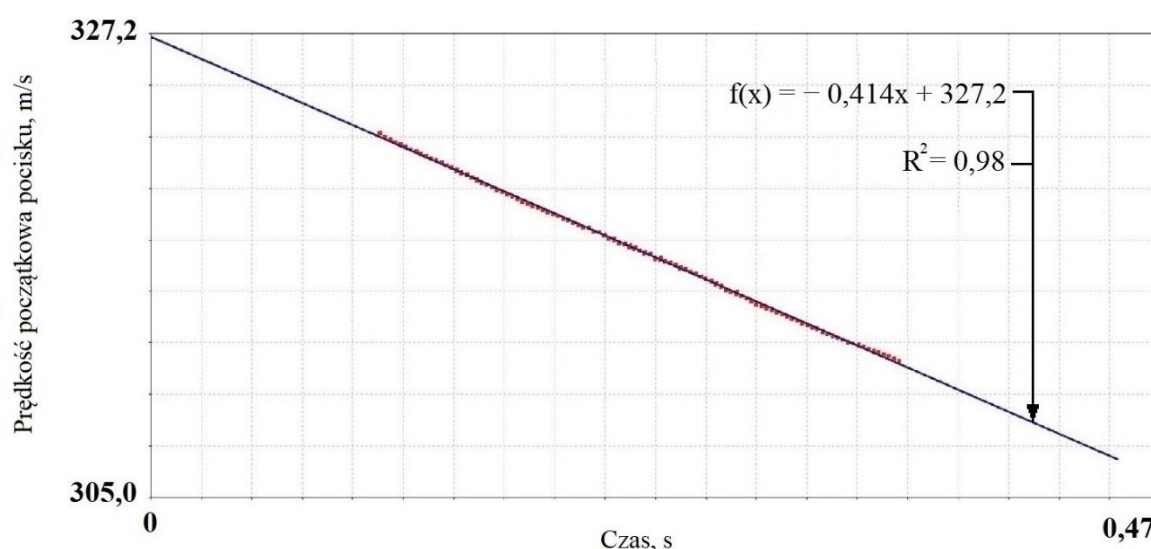
Pozycja radaru w odniesieniu do kierunku i kąta podniesienia lufy moździerza M98 wpływa na dokładność uzyskiwanych wyników. W ramach przygotowania układu do pomiaru, położenie radaru zdefiniowano w oprogramowaniu komputerowym. Ważnym aspektem użytkowym było zapewnienie odpowiedniej widoczności śledzenia radaru w początkowej fazie lotu pocisku, uzyskanej przez przygotowanie stanowiska ogniowego na otwartej przestrzeni. Pomiar prędkości rozpoczyna się od momentu rejestracji błysku płomienia spalanych gazów prochowych wychodzących z lufy wraz z wystrzelanym pociskiem przez urządzenie

optyczne (trigger), natomiast kończy się po wyjściu pocisku z wiązki śledzenia radaru. Na rysunku 4.8 schematycznie przedstawiono metodykę pomiaru prędkości pocisków mobilnym systemem radiolokacyjnym typu SL-520P.



Rys. 4.8. Metodyka pomiaru prędkości mobilnym systemem radiolokacyjnym typu SL-520P: a) trigger, b) radar, c) kontroler typu PS-100U, d) komputer z dedykowanym oprogramowaniem, e) – zarejestrowane punkty pomiarowe

W celu otrzymania wartości prędkości początkowej z zarejestrowanych punktów pomiarowych podczas strzału (rys 4.8 e), dokonano ich aproksymacji za pomocą funkcji liniowej, która została automatycznie wygenerowana przez oprogramowanie systemu radiolokacyjnego. Poczyniony zabieg polegał na usunięciu najbardziej skrajnych punktów pomiarowych należących do otrzymanego wykresu prędkości w czasie [123]. Niepożądane punkty pomiarowe wpływające na dokładność są spowodowane charakterem pracy radaru, który mierzy zarówno prędkość pocisku, jak i prędkość dodatkowych obiektów znajdujących się w wiązce śledzenia tj. dopalające się pojemniki ładunków miotających dodatkowych zmiennych [124]. Na rysunku 4.9 przedstawiono przykładowy wykres prędkości początkowej pocisku po przeprowadzonej aproksymacji, z uwzględnieniem współczynnika determinacji R^2 .



Rys. 4.9. Wykres prędkości początkowej pocisku po przeprowadzonej aproksymacji

4.1.4. Parametry balistyczne w badaniu wstępnym

Badanie wstępne przeprowadzono na nowej, wcześniej nie ostrzelanej płycie oporowej. Podczas badania oddano dwanaście strzałów, z czego dziesięć nabojami dymnymi i dwa balistycznymi nabojami odłamkowo-burzącymi, pod kątem podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° . Wszystkie naboje moździerzowe ukompletowano w ładunki miotające pełne. Pięć naboji dymnych i jeden nabój odłamkowo-burzący przechowywano w temperaturze $+50^\circ\text{C}$, natomiast pozostałą identyczną część amunicji przechowywano w temperaturze -40°C . Narażeniom klimatycznym z zakresu wyżej wymienionych temperatur poddano amunicję poprzez jej umieszczenie w komorach klimatycznych na czas co najmniej 48 godzin.

Przechowywanie amunicji w skrajnych temperaturach eksploatacji zgodnie z normą obronną NO-06-A107:2021 [125] i jej ostrzał miał na celu weryfikację wpływu zastosowanych rodzajów pocisków i temperatury ładunków miotających na wielkość mierzonych parametrów balistycznych. W trakcie badania wykonano pomiary prędkości początkowej wystrzeliwanych pocisków mobilnym systemem radiolokacyjnym i pomiary ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy 98 mm moździerza przy użyciu czujnika piezoelektrycznego i przyrządu zgmiotowego. Wyniki z wykonanych pomiarów parametrów balistycznych zamieszczono w tabeli 4.2. Płytę oporową oklejono z obu stron tensometrami w celu uzyskania pomiarów odkształceń, co opisano w rozdziale 4.2. Na rysunku 4.10 przedstawiono płytę oporową przygotowaną do ostrzału przed i po kompletacji z pozostałymi elementami moździerza M98. Warunki meteorologiczne panujące podczas strzelania: temperatura +18 °C, wilgotność względna powietrza 45 %, ciśnienie atmosferyczne 1004 hPa, prędkość wiatru 2,1 m/s z kierunku 322 ÷ 349 °.

Tab. 4.2. Wyniki badania wstępnego

| Lp. | Rodzaj pocisku | Masa pocisku, kg | T, °C | V ₀ , m/s | P _{pz} , MPa | P _{cp} , MPa |
|-----|----------------|---------------------|----------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | PZ-181 | 10,568 | +50 | 326,1 | 109,6 | 127,0 |
| 2 | | 10,566 | | 327,2 | 111,0 | 127,4 |
| 3 | | 10,575 | | 325,8 | 109,8 | 127,1 |
| 4 | | 10,556 | | 325,6 | 109,1 | 126,9 |
| 5 | | 10,559 | | 325,8 | 111,0 | 127,3 |
| 6 | OB-98 | 10,115 | +50 | 310,4 | 96,9 | 100,7 |
| 7 | | 10,127 | -40 | 297,5 | 88,7 | 96,9 |
| 8 | PZ-181 | 10,563 | -40 | 311,8 | 95,4 | 105,4 |
| 9 | | 10,579 | | 310,7 | 93,8 | 103,2 |
| 10 | | 10,560 | | 313,6 | 95,4 | 106,3 |
| 11 | | 10,562 | | 316,3 | 98,4 | 111,8 |
| 12 | | 10,559 | | 314,3 | 97,2 | 109,4 |

gdzie:

PZ-181 – pocisk dymny,

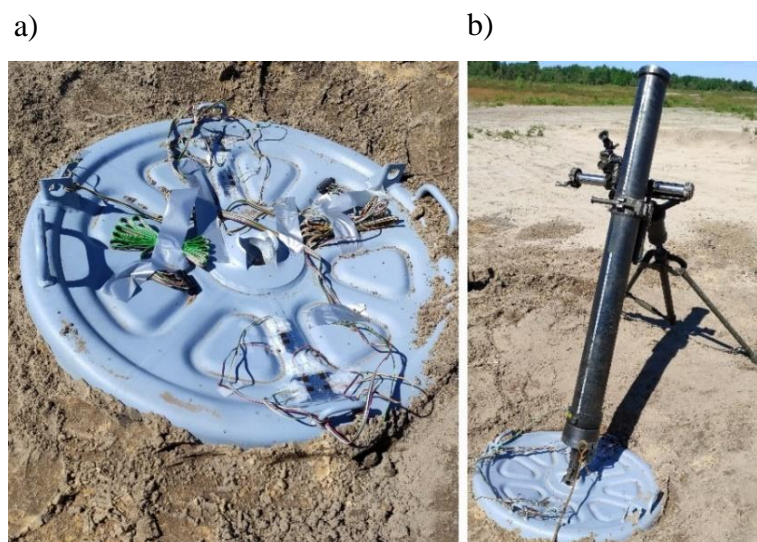
OB-98 – balistyczny pocisk odłamowo-burzący,

T – temperatura ładunku miotającego,

V₀ – prędkość początkowa pocisków,

P_{pz} – ciśnienie maksymalne zmierzone przyrządem zgmiotowym,

P_{cp} – ciśnienie maksymalne zmierzone czujnikiem piezoelektrycznym.



Rys. 4.10. Płyta oporowa przygotowana do ostrzału przed (a) i po kompletacji z pozostałymi elementami moździerza M98 (b)

Różnice we wskazaniach zmierzonych maksymalnych wartości ciśnień gazów prochowych zastosowanymi metodami pomiarowymi przyjmują standardowy trend. W przypadku wszystkich oddanych strzałów, wartości ciśnienia zmierzonego metodą piezoelektryczną były większe o około $10 \div 13 \%$ od wartości ciśnienia z pomiaru metodą zgmiotową. Różnice pomiarowe wynikają z charakteru pomiaru – mechaniczny przy metodzie zgmiotowej i mechaniczno-elektryczny w przy metodzie piezoelektrycznej.

4.2. Metodyka pomiaru odkształceń płyty oporowej

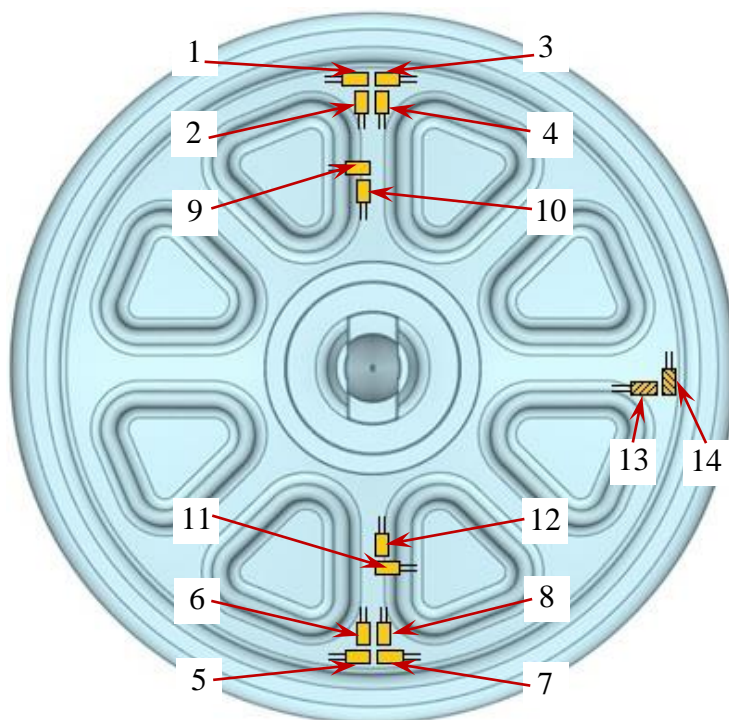
W celu weryfikacji obciążeń przenoszonych na płytę oporową przez trzon lufy moździerza w momencie wystrzału, przeprowadzono pomiar odkształceń płyty za pomocą tensometrów. Próby te zrealizowano w ramach poligonowych badań wstępnych na podstawie, których ustalono rodzaj tensometrów oraz rozmieszczenie instalacji na płycie oporowej do kolejnego ostrzału, czyli badań eksperymentalnych.

Do pomiaru odkształceń zastosowano czternaście tensometrów typu TF-2, z których dwanaście przyklejono na wierzchniej stronie płyty oporowej, natomiast dwa ostatnie od spodu płyty. Do montażu tensometrów zastosowano klej cyjanoakrylowy TB 1731. Dane techniczne tensometru typu TF-2 zestawiono w tabeli 4.3.

Tab. 4.3. Dane techniczne tensometru typu TF-2

| Dane techniczne | Jednostka | TF-2 |
|--|--------------------|---------------------------|
| Rezystancja | Ω | $351,0 \pm 0,2 \%$ |
| Współczynnik czułości odkształceniowej k | - | $2,1 \div 2,2 \pm 0,5 \%$ |
| Maksymalne natężenie prądu pomiarowego | mA | 40 |
| Zakres temperatur | $^{\circ}\text{C}$ | $-40 \div +200$ |

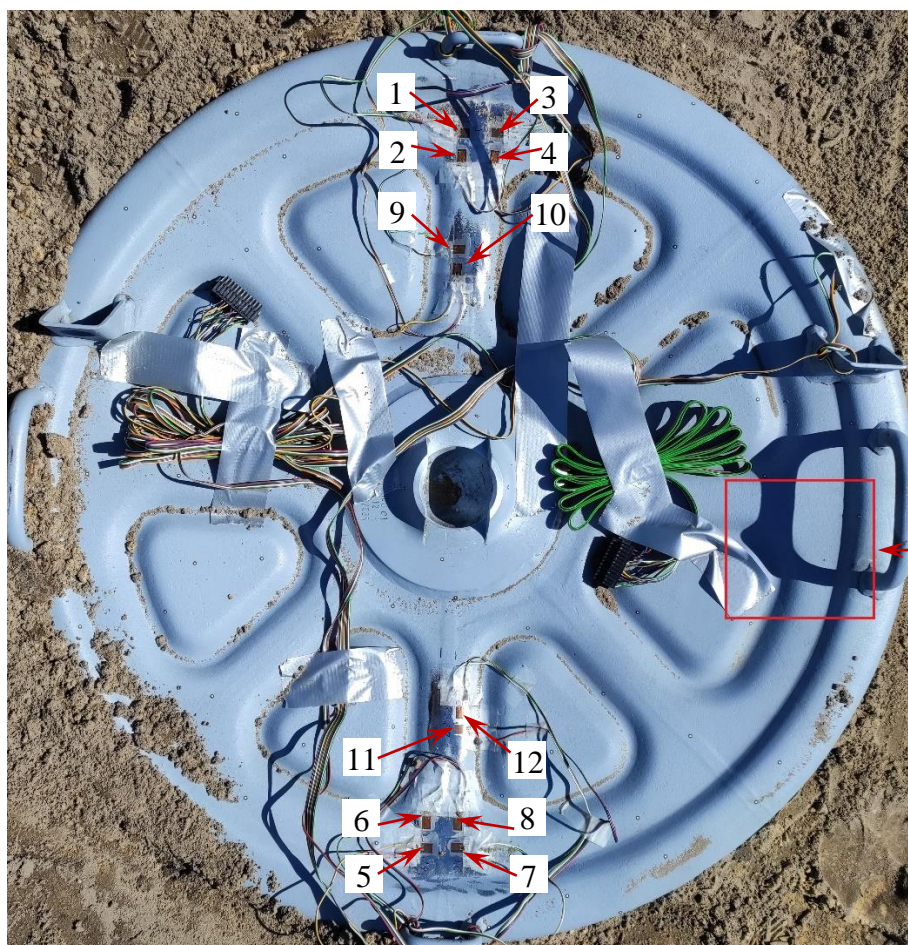
W odniesieniu do warunków związanych z przygotowaniem płyty oporowej do ostrzału (pochyleniem płyty względem podłoża o kąt 45°), wpływającym na nierównomierne jej podparcie oraz ze względu na symetryczny kształt płyty oporowej zdecydowano, aby tensometry rozmieścić w wierzchnim oraz spodnim obszarze płyty oporowej. Weryfikacji odkształceń poddano najsłabsze ze względu konstrukcyjnego, połączenia elementów spawanych na kierunku prostopadłym i równoległym. Znaczną większość, bo dwanaście spośród czternastu tensometrów przyklejono na wierzchniej stronie płyty, aby w jak najmniejszym stopniu uniknąć ich kontaktu z gruntem i nie dopuścić do przedwczesnego uszkodzenia. Dwa ostatnie tensometry przyklejono od spodu płyty w pobliżu żebra, w analogicznych kierunkach, w celu porównania wskazań i sprawdzenia żywotności tensometrów bezpośrednio stykających się z podłożem. Na rysunku 4.11 schematycznie przedstawiono rozmieszczenie poszczególnych tensometrów.



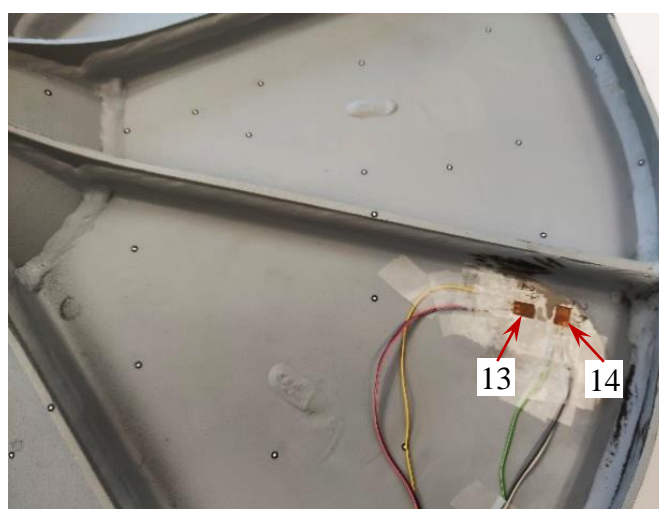
Rys. 4.11. Schematyczne rozmieszczenie tensometrów przyklejonych na badanej płycie oporowej

■ = wierzchnia płyty, ■ = spód płyty

Na rysunkach 4.12 oraz 4.13 przedstawiono lokalizację wykonanej instalacji tensometrycznej odpowiednio na wierzchniej i spodniej stronie płyty oporowej.



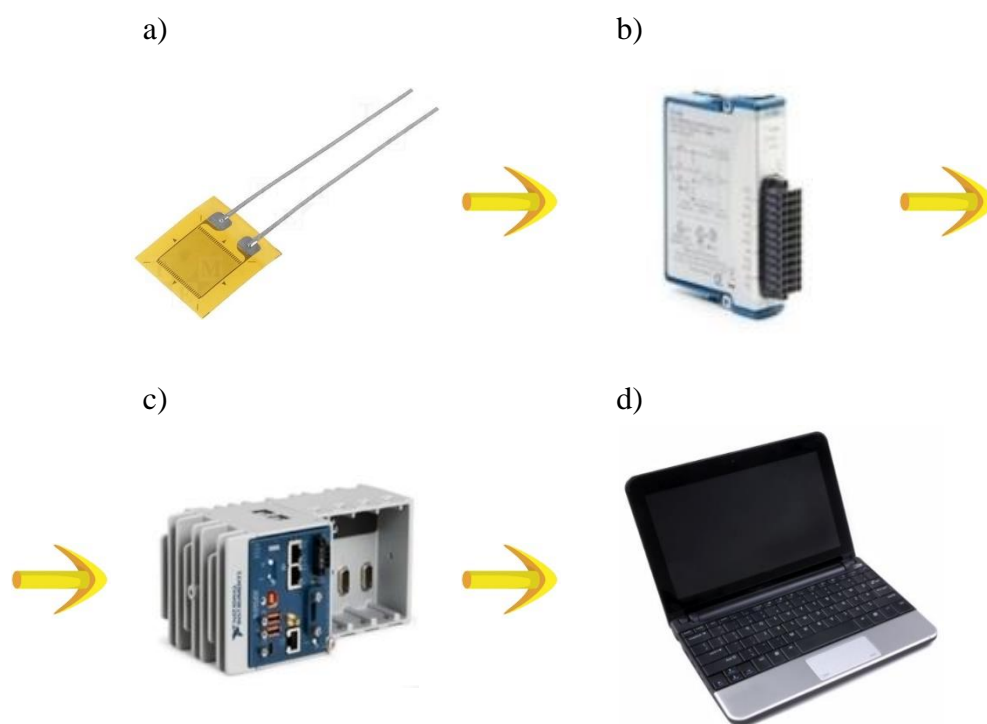
Rys. 4.12. Lokalizacja tensometrów na wierzchniej stronie płyty oporowej



Rys. 4.13. Lokalizacja tensometrów od spodu płyty oporowej

Tensometry połączone przewodami sygnałowymi do siedmiu modułów pomiarowych typu NI9236, które następnie wpięto do kontrolera NI cDAQ 9132. Stosując dedykowane oprogramowanie komputerowe możliwa była rejestracja odkształceń na płycie oporowej w czasie strzału.

Na rysunku 4.14 schematycznie przedstawiono metodykę pomiaru odkształceń na płycie oporowej mózdzierza.



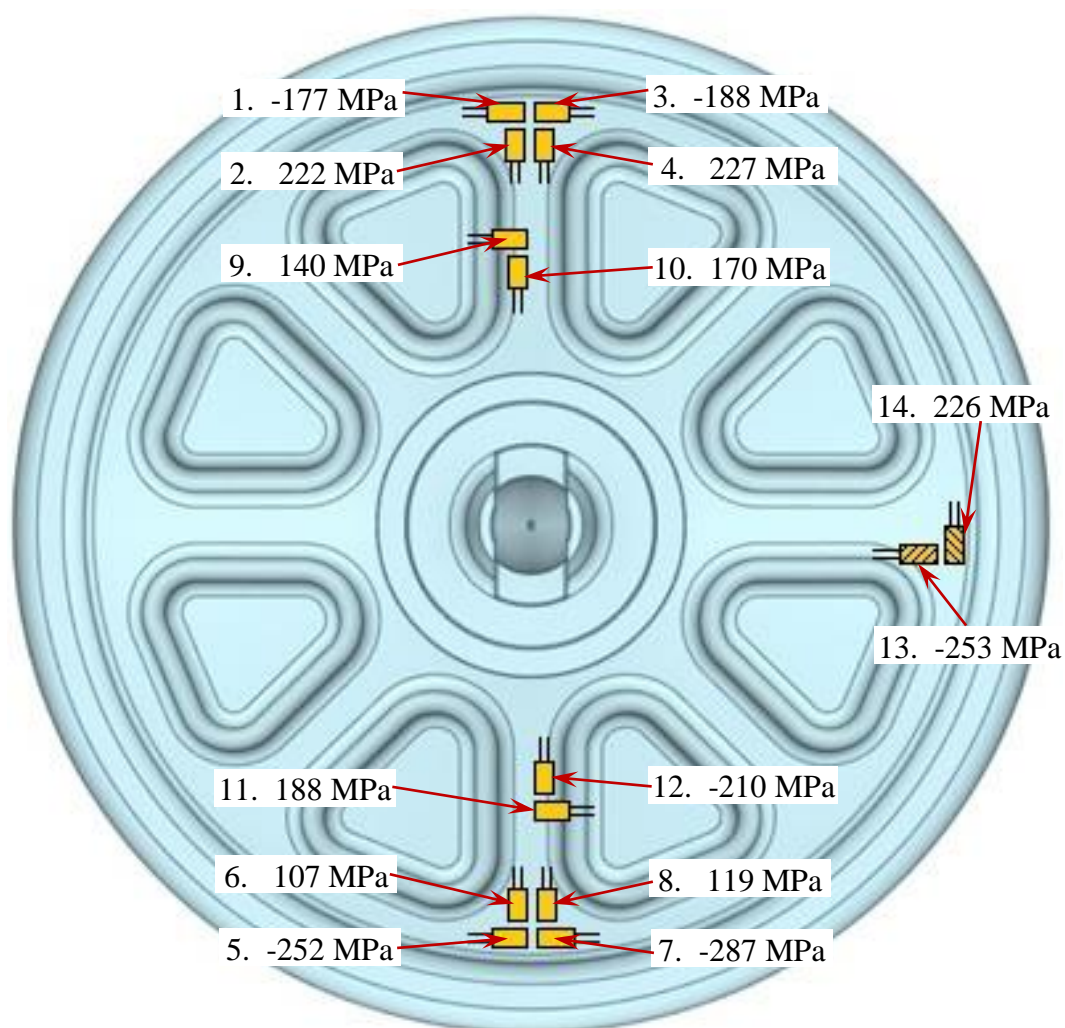
Rys. 4.14. Metodyka pomiaru odkształceń na płycie oporowej: a) tensometr TF-2, b) moduł pomiarowy NI 9236, c) kontroler NI cDAQ 9132, d) komputer z dedykowanym oprogramowaniem

W tabeli 4.4 zestawiono wartości naprężeń uzyskane na podstawie pomiaru odkształceń poszczególnych obszarów płyty zarejestrowanych tensometrami podczas strzału nr 2, który oddano pociskiem dymnym na ładunku miotającym pełnym, przechowywanym w temperaturze +50 °C. Wybór rozpatrywanego strzału został podyktowany uzyskaniem kompletnych wyników odkształceń z przyklejonych tensometrów, jak również największych wartości zmierzonych parametrów balistycznych z serii oddanych strzałów, czyli prędkości początkowej wystrzelonych pocisków i ciśnienia gazów prochowych obiema metodami (tab. 4.2).

Tab. 4.4. Wartości naprężeń dla strzału nr 2

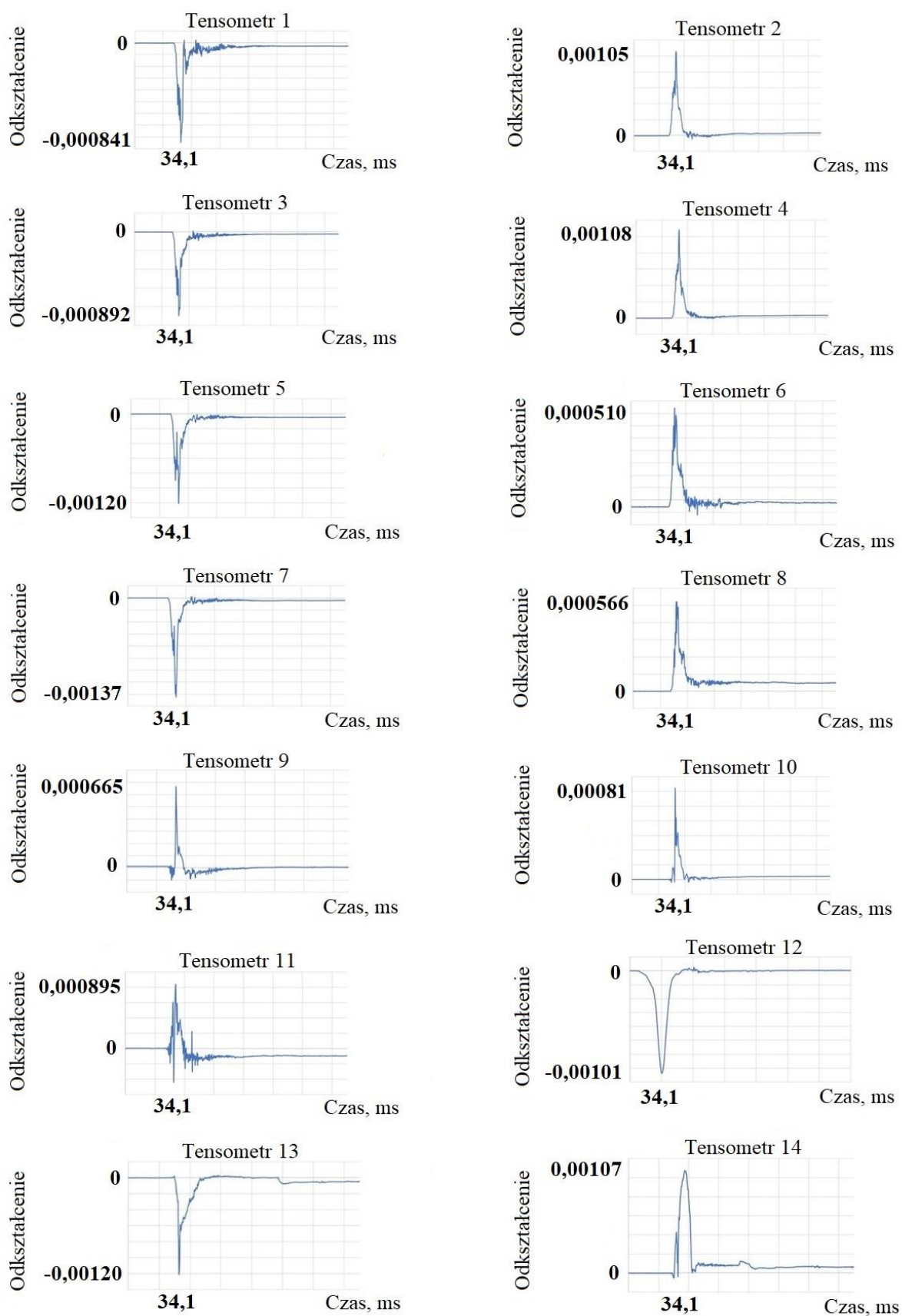
| | | | | | |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| MPa | Tensometr 1 | Tensometr 2 | Tensometr 3 | Tensometr 4 | Tensometr 5 |
| σ_x | -176,715 | -9,366 | -187,509 | -1,932 | -252,903 |
| σ_y | 4,893 | 222,222 | 2,772 | 227,22 | 3,885 |
| MPa | Tensometr 6 | Tensometr 7 | Tensometr 8 | Tensometr 9 | Tensometr 10 |
| σ_x | -13,419 | -286,647 | -2,877 | 139,776 | -8,148 |
| σ_y | 107,511 | 4,116 | 119,305 | -21,189 | 169,245 |
| MPa | Tensometr 11 | Tensometr 12 | Tensometr 13 | Tensometr 14 | |
| σ_x | 187,99 | 11,508 | -252,924 | -14,469 | |
| σ_y | -4,898 | -210,023 | 6,279 | 225,624 | |

Na rysunku 4.15 przedstawiono wartości naprężeń uzyskane podczas strzału nr 2, w odniesieniu do lokalizacji poszczególnych punktów pomiarowych schematycznie naniesionych na badanej płycie oporowej.



Rys 4.15. Wartości naprężeń dla strzału nr 2 w odniesieniu do lokalizacji punktów pomiarowych na płycie oporowej

Wykresy przebiegu odkształceń w czasie dla strzału nr 2, przedstawiono na rysunku 4.16.



Rys. 4.16. Wykresy przebiegu odkształceń w czasie dla strzału nr 2

Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań ostrzału płyty oporowej dowiedziono, że po odpowiednim przygotowaniu instalacji tensometrycznej istnieje możliwość pomiaru odkształceń na płycie za pomocą tensometrów. Zastosowane tensometry typu TF-2 pozwoliły jednak jedynie na określenie naprężeń na kierunkach ich działania. Nie wyznaczono natomiast naprężeń na kierunkach głównych i nie określono naprężeń zredukowanych, co byłoby możliwe przy zastosowaniu rozet tensometrycznych.

Ze względu na trudne warunki pracy płyty oporowej i jej ciągły kontakt z podłożem, instalacja tensometryczna powinna być wykonywana wyłącznie na wierzchniej stronie płyty oraz odpowiednio zabezpieczona izolacją. Dowodem na to są tensometry przyklejone od spodu płyty oporowej, które przestały mierzyć odkształcenia na skutek uszkodzeń mechanicznych odpowiednio po trzecim i po czwartym strzale. Dla analizowanego strzału, którego parametry balistyczne miały najwyższe wartości, wskazania odkształceń z tensometrów po uwzględnieniu modułu Younga wynoszącego 210 GPa przekraczały wartość naprężenia 200 MPa dla punktów 2, 4, 5, 7, 12, 13 i 14. Zastosowanie tensometrów umożliwiających pomiar w jednym kierunku okazał się mało dokładny i niewystarczający. W oparciu o analizę wyników odkształceń zaplanowano zmiany w sposobie pomiaru. Do następnych badań poligonowych, stanowiących badania eksperymentalne zastosowane zostaną rozety tensometryczne, które pozwolą na wyznaczenie kierunków głównych.

W oparciu o uzyskane wartości parametrów balistycznych podczas ostrzału płyty oporowej stwierdzono, że pocisk dymny ze względu na większą masę i inną konfigurację ładunku miotającego generuje większe wartości ciśnienia gazów prochowych, niż pocisk odłamkowo-burzący, co bezpośrednio przekłada się na siłę nacisku działającą na płytę oporową. W celu uzyskania najbardziej ekstremalnych warunków eksploatacyjnych płyty oporowej, możliwych do wystąpienia podczas ostrzału (zgodnie z wytycznymi normatywnymi) zdecydowano, że do kolejnych badań płyty stosowane będą wyłącznie pociski dymne ukompletowane w ładunki miotające pełne przechowywane w temperaturze +50 °C, czyli w ładunki wzmocnione.

5. Badania zasadnicze strzelaniem z płyty oporowej

Celem zasadniczych badań poligonowych polegających na ostrzale płyty oporowej, było zebranie pomiarów odkształceń występujących na płycie oraz parametrów balistycznych dla różnych warunków strzelania z moździerza. Uwzględniając analizę wyników odkształceń płyty oporowej z przeprowadzonych badań wstępnych, do zasadniczego ostrzału płyty zastosowano rozety tensometryczne. Badanie zasadnicze prowadzono z różnych podłoży przy zmiennym kącie podniesienia lufy moździerza, stosując balistyczne pociski dymne wyposażone w ładunki miotające wzmocnione. Przeprowadzenie ostrzału wiązało się z realizacją licznych prac przygotowawczych, mających na celu zabezpieczenie amunicji, zorganizowanie stanowisk ogniowych oraz wykonanie instalacji tensometrycznej na płycie oporowej.

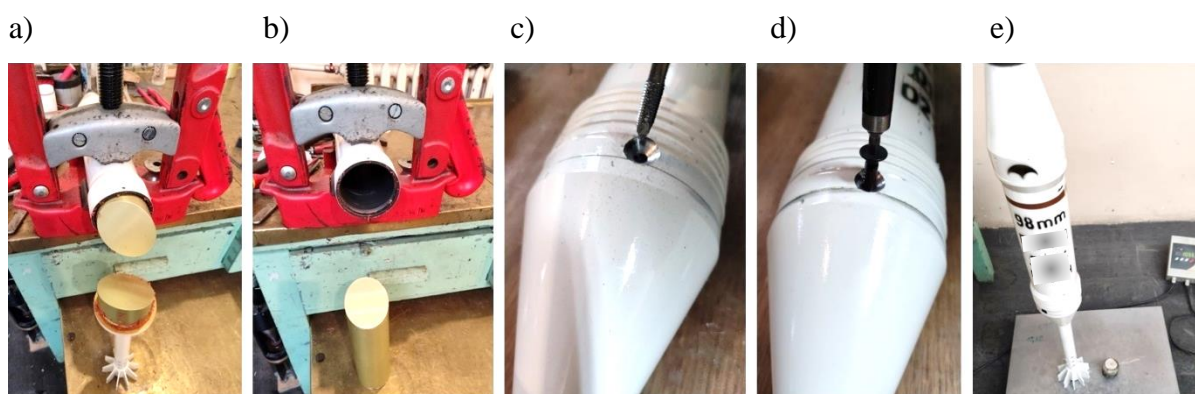
5.1. Prace związane z przygotowaniem amunicji do badań

Na podstawie uzyskanych parametrów balistycznych podczas wstępnych badań strzelaniem oraz w celu narzucenia (w cyklu eksploatacyjnym) maksymalnych możliwych obciążeń działających na płytę oporową podczas ostrzału, zdecydowano że do kolejnych badań poligonowych stosowane będą pociski moździerzowe o największej masie, czyli pociski dymne. Ostatecznie do badań pozyskano pociski moździerzowe dymne PZ-181 [126, 127] oraz oświetlające PZ-191 [128, 129] ukompletowane w bojowe elementy pirotechniczne. Z uwagi na bojowe cechy wyżej wymienionych pocisków, zostały one przeznaczone do zniszczenia. Dysponując odpowiednimi uprawnieniami i możliwościami technicznymi w Instytucie, podjęto działania związane z przebrojeniem pocisków bojowych w celu otrzymania pocisków balistycznych, bezpiecznych do strzelania. W ramach prac związanych z przebrojeniem 98 mm moździerzowych pocisków bojowych dokonano szeregu zabiegów polegających na:

- a) odkręceniu trzonów stabilizatora od korpusów pocisków,
- b) dekompletacji elementów pirotechnicznych oświetlających i dymnych z pocisków,
- c) wykonaniu po trzech nagwintowanych otworów pod śruby wzmacniające, rozmieszczonych co 120° po obwodzie pustej skorupy pocisku i kielicha montażowego trzonu stabilizatora,

- d) skręceniu trzonów stabilizatora z korpusami pocisków śrubami, w celu uniknięcia rozcalenia pocisków podczas strzału w przewodzie lufy moździerzowej i na torze lotu,
- e) elaboracji pocisków materiałem obojętnym o masie równej 10,55 kg, odpowiadającej wartości z dokumentacji technicznej wyrobu [126],
- f) kompletacji zaelaborowanych pocisków w makiety masowe zapalników MZR, w celu nadania pociskom opływowego kształtu wpływającego na redukcję sił oporu powietrza na torze lotu,
- g) kompletacji pocisków w zakupione przez Instytut ładunki miotające zasadnicze i dodatkowe zmienne.

W odniesieniu do powyższych punktów, na rysunku 5.1 chronologicznie przedstawiono wykonane prace związane z przebrojeniem pocisków moździerzowych.



Rys. 5.1. Prace związane z przebrojeniem 98 mm pocisków moździerzowych do badań płyty oporowej

Skręcenie trzonów stabilizatora z korpusami pocisków za pomocą śrub było konieczne ze względu na konstrukcję moździerzowych pocisków dymnych i oświetlających. Zasada działania tych pocisków polega na ich automatycznym rozcaleniu [130] (w miejscu wzmocnionym trzema śrubami) na torze lotu, poprzez zadziałanie programowalnego zapalnika czasowego MZR-96 [131]. Mając na uwadze wyżej opisane funkcjonowanie pocisków, wykonano wzmocnienie połączenia, aby nie dopuścić do przedwczesnego ich rozcalenia w przewodzie lufy i tuż po jej opuszczeniu. Sumaryczną ilość przebrojonych pocisków, przedstawiono na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Sumaryczna ilość przebrojonych 98 mm pocisków moździerzowych

Makietę masową zapalnika MZR, ładunek miotający zasadniczy i ładunki miotające dodatkowe zmienne umożliwiające kompletację 98 mm naboju moździerzowego, przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Elementy naboju moździerzowego: a) ładunek miotający zasadniczy, b) ładunki miotające dodatkowe zmienne, c) makiet masowa zapalnika MZR

Kompletne 98 mm naboje moździerzowe przeznaczone do ostrzału płyty odporowej, złożone z balistycznych 98 mm pocisków elaborowanych materiałem obojętnym (o masie pocisku dymnego PZ-181), makiet masowych zapalników MZR, ładunków miotających zasadniczych i ładunków miotających dodatkowych zmiennych dostarczono na stanowisko ogniowe w mobilnej komorze klimatycznej Inclimate Heat, z ustawioną temperaturą wynoszącą +50 °C. Zakres pracy komory to temperatura z przedziału +10 °C ÷ +70 °C. Przechowywanie amunicji do badań rozpoczęto co najmniej 48 godzin przed pierwszym wystrzałem, a zakończono równocześnie z przekazaniem ostatniego naboju do strzału.

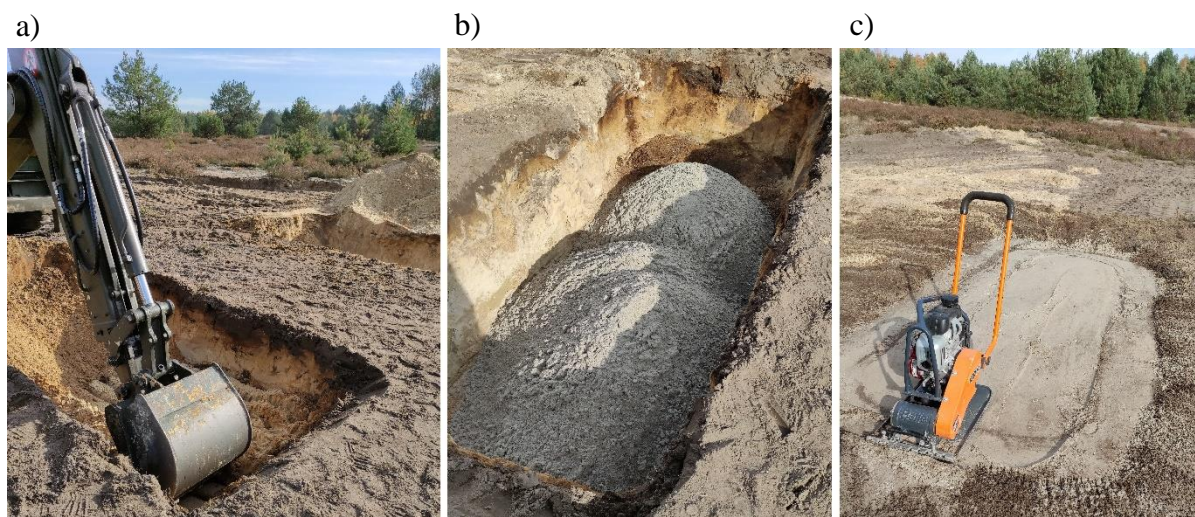
Amunicję zastosowaną podczas badań strzelaniem, poddaną narażeniom klimatycznym w komorze klimatycznej, przedstawiono na rysunku 5.4.



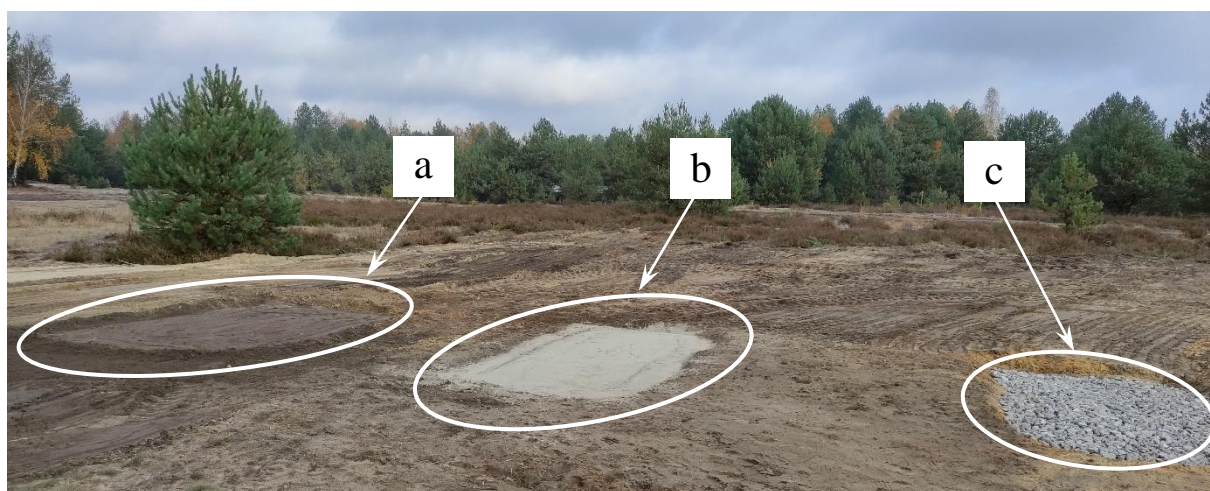
Rys. 5.4. Amunicja do ostrzału płyty poddana narażeniom klimatycznym w komorze klimatycznej

5.2. Przygotowanie stanowisk do ostrzału płyty

Powołując się na normę obronną NO-10-A216:2021 [98] oraz w celu zapewnienia różnorodnych warunków ostrzału płyty odporowej możliwych do wystąpienia podczas jej eksploatacji, do badania strzelaniem przygotowano trzy rodzaje podłoża odpowiadające gruntom miękkim, średnim i twardym. W związku z powyższym wykonano trzy sąsiednie stanowiska ogniowe na terenie poligonu Dęba, charakteryzujące się różnym materiałem podłoża. Organizacja stanowisk ogniowych obejmowała usunięcie rodzimego gruntu poligonu poprzez wykonanie wykopów o wymiarach: długości 280 cm, szerokości 160 cm oraz głębokości 100 cm. Pierwsze stanowisko zasypano ziemią, drugie piaskiem płukanym o frakcji ziaren $0 \div 2$ mm, a trzecie kamieniem o ziarnach wielkości $31,5 \div 63$ mm. Dobór materiału użytego do zasypania wykopów stanowił odpowiednio grunt miękki, średni i twardy zgodnie z zapisami wyżej wymienionej normy. Zasypywanie wykopów odbywało się etapami, pomiędzy którymi wsypywany materiał ubijano za pomocą zagęszczarki spalinowej. Zabiegi te miały na celu utwardzenie wykonywanego podłoża poprzez szczelne rozłożenie zastosowanego materiału wewnątrz wykopu. Na rysunku 5.5 przedstawiono prace związane z przygotowaniem podłoża, natomiast na rysunku 5.6 gotowe stanowiska przeznaczone do ostrzału płyty odporowej moździerza M98.



Rys. 5.5. Prace związane z przygotowaniem podłoża do ostrzału płyty oporowej: a) wykonanie wykopu, b) zasypanie odpowiednim materiałem, c) utwardzenie podłoża

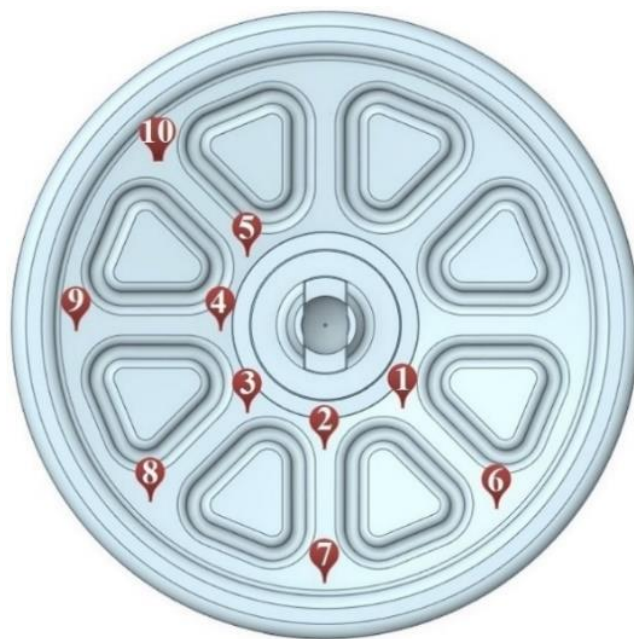


Rys. 5.6. Stanowiska ogniowe przeznaczone do ostrzału płyty oporowej: a) podłoże ziemne, b) podłoże piaszczyste, c) podłoże kamieniste

5.3. Wykonanie instalacji tensometrycznej do pomiaru naprężeń

Biorąc pod uwagę dotychczasowe wyniki naprężeń (uzyskane z badań wstępnych), zdefiniowane wyłącznie na kierunku działania przyklejonego tensometru, do badań zasadniczych zastosowano rozety tensometryczne umożliwiające obliczanie naprężeń zredukowanych. Instalacja tensometryczna składała się z dziesięciu rozet, pozwalających na pomiar naprężeń w trzech kierunkach głównych 0° , 45° i 90° . Ilość zastosowanych rozet dostosowano do możliwości pomiarowych opracowanego toru pomiarowego do rejestracji sygnałów.

Ze względu na trudne warunki pomiaru obejmujące ostrzał płyty z różnych rodzajów podłoża, rozety zabezpieczono powłoką silikonową, stanowiącą ochronę przed zewnętrznymi czynnikami mechanicznymi i atmosferycznymi. Z uwagi na bardzo wysokie koszty amunicji oraz poligonowych badań strzelaniem, rozety tensometryczne rozmieszczono tak, aby umożliwiały pozyskanie jak największej ilości danych dotyczących obciążeń działających na różne obszary płyty oporowej w trakcie strzału. Na podstawie dotychczasowych prób ostrzału płyty oporowej moździerza M98 zaobserwowano symetryczny rozkład naprężeń w układzie wertykalnym, w oparciu o który wyznaczono rozmieszczenie punktów pomiarowych. Większość punktów stanowiących miejsca aplikacji rozet tensometrycznych umieszczono w dolnej części płyty oporowej, z uwagi na większą interakcję z gruntem, będącą następstwem wstępnego ustawienia płyty względem podłoża. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na płycie oporowej moździerza M98, przedstawiono na rysunku 5.7.



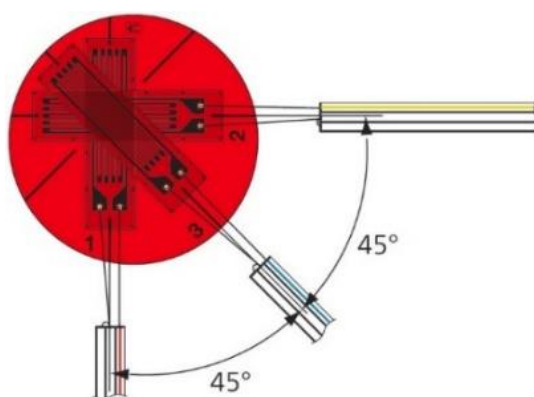
Rys. 5.7. Lokalizacja punktów pomiarowych na płycie oporowej

Wykonanie instalacji tensometrycznej na wierzchniej stronie płyty oporowej moździerza M98 było podyktowane kierunkiem działania siły wystrzału. Zrezygnowano natomiast z montażu tensometrów na stronie stykającej się z podłożem, z powodu braku możliwości skutecznego zabezpieczenia instalacji. W ramach prac związanych z wykonaniem instalacji tensometrycznej, w miejscach punktów pomiarowych przyklejono rozety KYOWA typ KFGS-10-120-D17-11 L3M3S za pomocą kleju CC-33A. Płytę z gotową instalacją tensometryczną, przedstawiono na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Instalacja tensometryczna do pomiaru odkształceń podczas ostrzału

Zastosowaną rozetę tensometryczną w powiększeniu przedstawiono na rysunku 5.9, natomiast jej specyfikację techniczną wyszczególniono w tabeli 5.1.



Rys. 5.9. Rozeta tensometryczna o kierunkach głównych 0°, 45° i 90° [132]

Tab. 5.1. Specyfikacja techniczna rozety KYOWA typ KFGS-10-120-D17-11 L3M3S [133]

| Charakterystyka | Jednostka | Wartość |
|---|--------------------|-----------------------|
| Współczynnik czułości odkształceniowej K | - | $2,11 \pm 1,0 \%$ |
| Oporność R | Ω | $120,0 \pm 0,7 \%$ |
| Długość pomiarowa L | mm | 10 |
| Możliwa do uzyskania rozszerzalność cieplna | $^{\circ}\text{C}$ | $11,7 \times 10^{-6}$ |

5.4. Pomiar odkształceń płyty oporowej uwzględniający różne warunki jej eksploatacji

Pomiar odkształceń płyty oporowej moździerza przeprowadzono podczas jej eksploatacji z różnych podłoży i przy zmiennych kątach podniesienia lufy moździerza. Podczas badania wystrzelono sumarycznie 35 naboji, które dostarczono na stanowisko ogniowe w komorze klimatycznej zapewniającej temperaturę przechowywania wynoszącą +50 °C. Strzelanie zrealizowano z balistycznego moździerza MB-98 wyposażonego w lufę numer 0021151, z której dotychczas oddano 620 strzałów. Ostrzał płyty oporowej moździerza M98 serią badanych strzałów prowadzono w następującej kolejności:

1) 9 strzałów z podłoża ziemnego, z czego:

- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 45°,
- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 60°,
- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 75°.

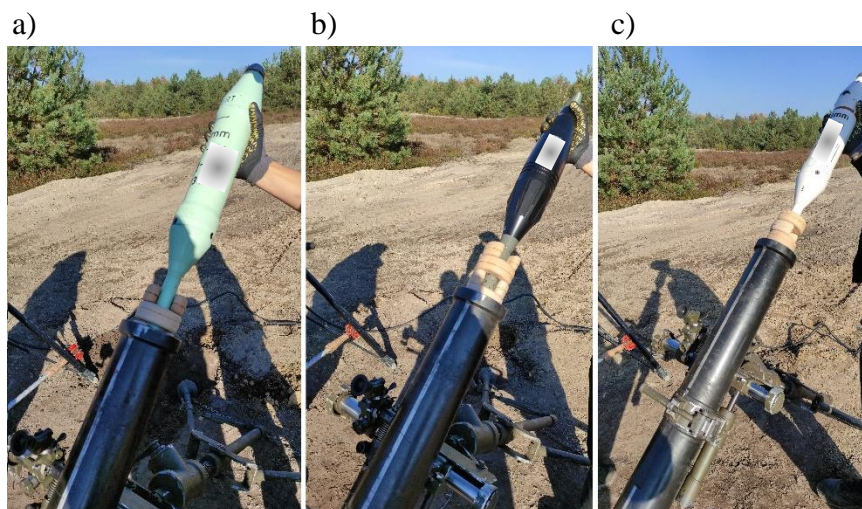
2) 9 strzałów z podłoża piaszczystego, z czego:

- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 60°,
- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 75°,
- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 45°.

3) 9 strzałów z podłoża kamienistego, z czego:

- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 60°,
- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 75°,
- trzy strzały balistycznymi pociskami dymnymi na ładunku wzmocnionym pod kątem 45°.

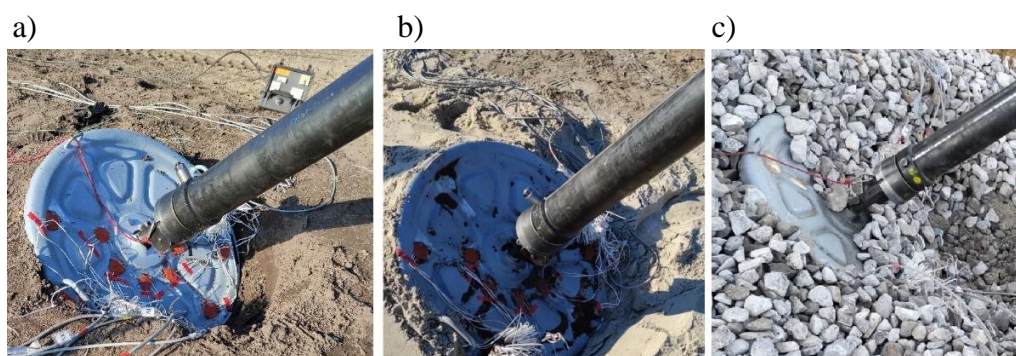
Podczas serii strzałów z podłoża ziemnego, oddano dodatkowo dwa strzały: balistycznym pociskiem odłamkowo-burzącym [134] oraz pociskiem oświetlającym, które w odniesieniu do pocisków dymnych miały potwierdzić założenia balistyki wewnętrznej, dotyczące wpływu masy pocisku na wartość ciśnienia gazów prochowych ze spalanych ładunków miotających [122]. Na podstawie otrzymanych wyników dowiedziono, że najcięższe pociski – dymne, generują najwyższe wartości ciśnienia gazów prochowych. W celu zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa oraz czasu potrzebnego do wyzwolenia aparatury pomiarowej przed każdym strzałem cofano iglicę moździerza. W ten sposób załadowany pocisk czekał w lufie na zdalne odpalenie prowadzone sposobem „na sznur”. Na rysunku 5.10 przedstawiono załadunek moździerza poszczególnymi rodzajami pocisków.



Rys. 5.10. Załadunek moździerza M98 balistycznym pociskiem: a) dymnym, b) odłamowo-burzącym, c) oświetlającym

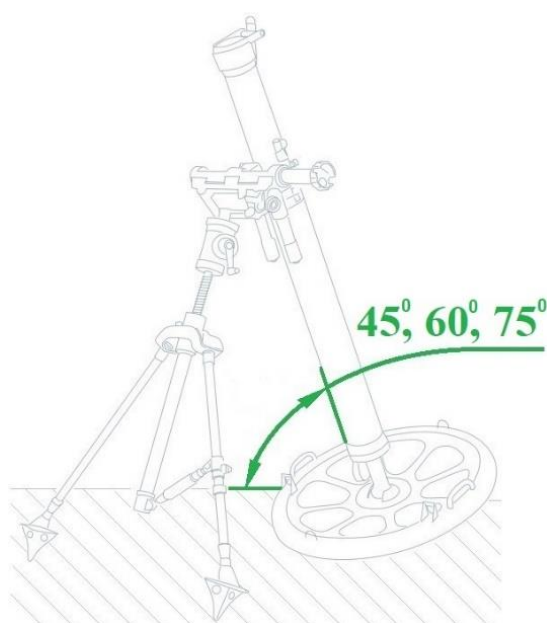
Przed każdą badaną serią strzałów oddawano po dwa strzały osadczo rozgrzewające na ładunkach miotających pośrednich. Strzały osadczo rozgrzewające są nieodłącznym elementem badań balistycznych strzelaniem, zapewniającym bezpieczną eksploatację sprzętu uzbrojenia poprzez stopniowe wchodzenie płyty oporowej w głąb gruntu, co zapobiega gwałtownej zmianie położenia dwójnogu połączonego z lufą. Rozgrzanie przewodu lufy moździerza wpływa natomiast na wartości parametrów balistycznych późniejszych strzałów, które są wyższe przy strzelaniu z lufy nierozgrzanej [135].

Istotną czynnością przygotowawczą jest zachowanie kąta pochylenia płyty oporowej względem podłoża wynoszącego 45° . Przy każdorazowej zmianie podłoża prowadzono adaptację płyty oporowej zgodnie z wytycznymi dokumentacji technicznej moździerza M98, za pomocą kwadrantu artyleryjskiego. Na rysunku 5.11 przedstawiono ustawienie płyty oporowej względem poszczególnych podłoży przed rozpoczęciem ostrzałem.



Rys. 5.11. Ustawienie płyty przed ostrzałem z podłoża: a) ziemnego, b) piaszczystego, c) kamienistego

Ostrzał płyty oporowej rozpoczęto od podłoża ziemnego przy kącie podniesienia lufy wynoszącym 45° zapewniającym maksymalną donośność [136]. Nie mniej jednak zastosowany kąt powodował znaczne przemieszczanie płyty oporowej względem dwójnogu. Aby nie dopuścić do ewentualnego uszkodzenia elementów mocujących lufę moździerza, kolejne etapy badania z podłoża piaszczystego i kamienistego rozpoczynano od kąta wynoszącego 60° . Kąt podniesienia lufy moździerza, mierzono każdorazowo przed załadowaniem naboju, za pomocą kwadrantu artyleryjskiego [137]. Na rysunku 5.12 graficznie przedstawiono kąt podniesienia lufy moździerza M98 z zachowaniem wartości zastosowanych podczas ostrzału płyty oporowej.



Rys. 5.12. Schematyczne oznaczenie kąta podniesienia lufy moździerza M98

Analogicznie jak w przypadku dotychczas prowadzonych badań wstępnych, w trakcie ostrzału płyty oporowej dokonano pomiaru maksymalnego ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy moździerza za pomocą przyrządu zgmiotowego uкомплекowanego w zgmiotki miedziane stożkowe i przy zastosowaniu wkręcanego czujnika piezoelektrycznego. Pomiar prędkości początkowej wystrzeliwanych pocisków przeprowadzono za pomocą mobilnego systemu radiolokacyjnego. Dodatkowo każdy strzał rejestrowano za pomocą szybko klatkowej kamery Phantom V710 ustawionej w obszarze pracy płyty oporowej w celu stałej weryfikacji jej stanu technicznego. Stosowanie szybko klatkowej kamery do rejestracji obrazu podczas strzału przedstawiono w publikacjach [96, 138].

Wskazania warunków meteorologicznych w dniu strzelania, około południa: temperatura +16 °C, wilgotność względna powietrza 44 %, ciśnienie atmosferyczne 1012 hPa, prędkość wiatru 0,8 m/s z kierunku 312 - 337°. Szczegółowe wyniki badania obejmujące zmierzone parametry balistyczne, zamieszczono w tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Parametry balistyczne uzyskane podczas badania zasadniczego płyty oporowej

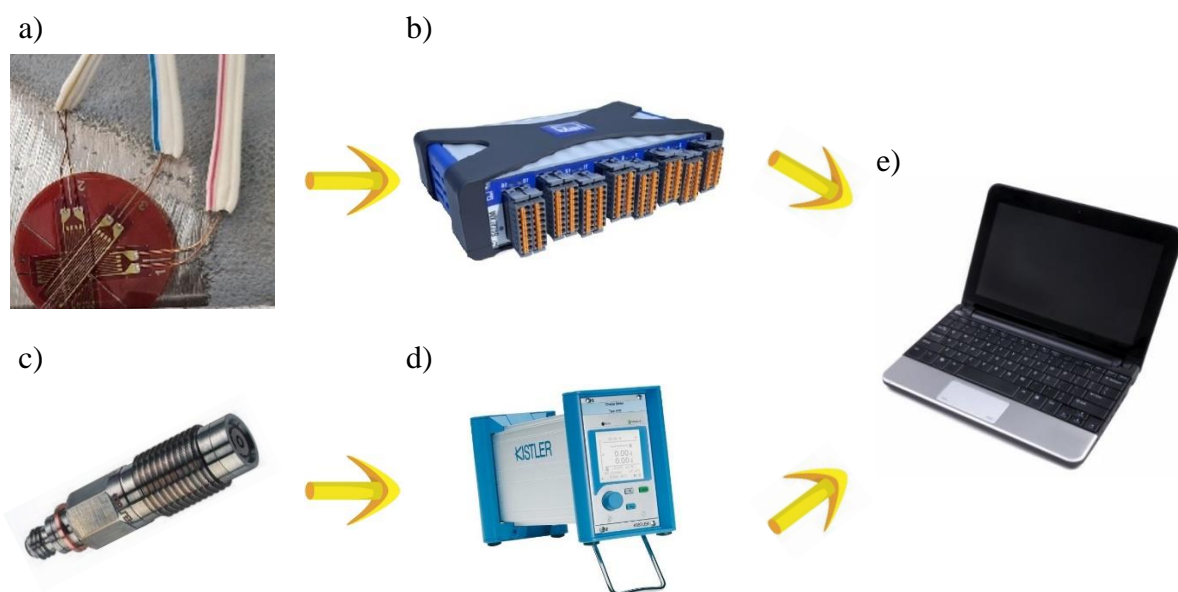
| Lp. | Rodzaj podłoża | Kąt podniesienia lufy moździerza | P _{cp} śr., MPa | P _{zg} śr., MPa | V ₀ śr., m/s |
|-----|----------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | Ziemne | 45 ° | 118,6 | 105,6 | 327,2 |
| 2 | | | ± | ± | ± |
| 3 | | | 1,6 | 0,7 | 0,7 |
| 4 | | 60 ° | 124,3 | 110,8 | 332,6 |
| 5 | | | ± | ± | ± |
| 6 | | | 1,4 | 0,4 | 0,6 |
| 7 | | 75 ° | 123,2 | 111,6 | 331,9 |
| 8 | | | ± | ± | ± |
| 9 | | | 0,7 | 1,0 | 2,0 |
| 10 | Piaszczyste | 45 ° | 117,0 | 107,1 | 327,3 |
| 11 | | | ± | ± | ± |
| 12 | | | 2,2 | 1,7 | 1,9 |
| 13 | | 60 ° | 116,1 | 106,5 | 327,8 |
| 14 | | | ± | ± | ± |
| 15 | | | 0,4 | 0,5 | 0,3 |
| 16 | | 75 ° | 117,4 | 107,2 | 328,3 |
| 17 | | | ± | ± | ± |
| 18 | | | 2,4 | 1,9 | 2,4 |
| 19 | Kamieniste | 45 ° | 127,0 | 112,9 | 325,4 |
| 20 | | | ± | ± | ± |
| 21 | | | 3,2 | 2,5 | 0,9 |
| 22 | | 60 ° | 118,2 | 110,5 | 325,8 |
| 23 | | | ± | ± | ± |
| 24 | | | 1,8 | 1,4 | 1,5 |
| 25 | | 75 ° | 127,5 | 113,0 | 327,7 |
| 26 | | | ± | ± | ± |
| 27 | | | 4,0 | 2,7 | 1,9 |

gdzie:

P_{cp} śr – średnie ciśnienie gazów prochowych w przewodzie lufy moździerza, zmierzone czujnikiem piezoelektrycznym dla trzech oddanych strzałów z określonego podłoża przy danym kącie podniesienia lufy,

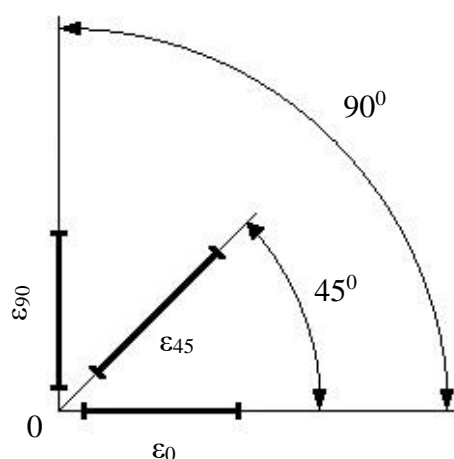
- $P_{pz\ \acute{s}r}$ – średnie ciśnienie gazów prochowych w przewodzie lufy moździerza zmierzone przyrządem zgmiotowym dla trzech oddanych strzałów z określonego podłoża przy danym kącie podniesienia lufy,
- $V_{0\ \acute{s}r}$ – średnia prędkość początkowa pocisków moździerzowych, zmierzona mobilnym systemem radiolokacyjnym dla trzech oddanych strzałów z określonego podłoża przy danym kącie podniesienia lufy.

Rozety wchodzące w skład instalacji tensometrycznej wykonanej na płycie oporowej pracowały w ćwierć-mostku Wheatstone’a z pasmem przenoszenia równym 1200 Hz. Podczas prowadzonych pomiarów, rejestrowano sygnały z częstotliwością graniczną 19200 Hz przy użyciu dwóch wzmacniaczy HBM (model QuantumX MX1615B) [139] i dedykowanego do nich oprogramowania komputerowego. Usunięcie zakłóceń nastąpiło poprzez zastosowanie dolnoprzepustowej filtracji sygnałów, polegającej na przepuszczeniu sygnałów o częstotliwości niższej, niż częstotliwość graniczna i tłumieniu sygnałów o wyższej częstotliwości. Na czas prowadzenia ostrzału i pomiarów odkształceń poddano weryfikacji temperaturę płyty oporowej kamerą termowizyjną Flir E6xt. Wartości zmierzonej temperatury płyty oporowej podczas całości badań nie przekraczały 1 °C. Wraz z rejestracją odkształceń prowadzono równoległe pomiar ciśnienia gazów prochowych synchronizowany w identycznym przedziale czasowym. Na rysunku 5.13 przedstawiono metodykę pomiaru odkształceń płyty oporowej podczas poligonowych badań strzelaniem.

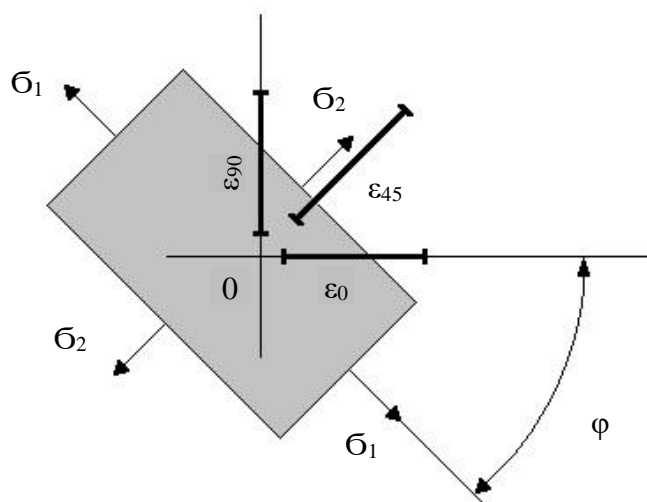


Rys. 5.13. Metodyka pomiaru odkształceń płyty oporowej podczas badań zasadniczych: a) rozety typu KFGS-10-120-D17-11, b) wzmacniacz HBM QMX1615B, c) czujnik piezoelektryczny Kistler typu 6215, d) wzmacniacz ładunku Kistler typu 5015A, e) komputer

Na podstawie prowadzonych pomiarów tensometrycznych, do przeliczenia naprężeń występujących na badanej płycie oporowej, przyjęto płaski stan naprężeń. Na rysunku 5.14 schematycznie przedstawiono rozkład odkształceń w punkcie. Działanie płaskiego stanu naprężeń, przedstawiono na rysunku 5.15.



Rys. 5.14. Rozkład odkształceń w punkcie



Rys. 5.15. Działanie płaskiego stanu naprężeń na punkt

Odkształcenia ε_1 , ε_2 w kierunkach głównych naprężeń wynoszą:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} \quad (5.2)$$

skąd

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2) \quad (5.3)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1) \quad (5.4)$$

Naprężenia normalne σ_φ w przekroju przechodzące przez punkt 0, którego normalna tworzy kąt φ z kierunkiem naprężeń głównych σ_1 wynoszą:

$$\sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi \quad (5.5)$$

Zatem naprężenia normalne w przekroju prostopadłym do φ będą wynosić:

$$\sigma_{\varphi+90} = \sigma_1 \sin^2 \varphi + \sigma_2 \cos^2 \varphi \quad (5.6)$$

Odształcenia jednostkowe ε_φ w kierunku tworzącym kąt φ z kierunkiem naprężenia σ_1 (tj. w kierunku naprężeń σ_φ) wynoszą:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\sigma_\varphi}{E} - \nu \frac{\sigma_{\varphi+90}}{E} \quad (5.7)$$

czyli

$$\varepsilon_\varphi = \left(\frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} \right) \cos^2 \varphi + \left(\frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} \right) \sin^2 \varphi \quad (5.8)$$

ostatecznie otrzymano:

$$\varepsilon_\varphi = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi \quad (5.9)$$

W rozpatrywanym przypadku oznaczając przez φ nieznany kąt, kierunek jaki ε_0 tworzy z kierunkiem σ_1 (albo ε_1) wyrażono następująco:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi \quad (5.10)$$

Przy czym dodatni kąt φ mierzony jest od σ_1 (albo ε_1) do ε_0 w kierunku trygonometrycznym. Otrzymano więc:

$$\varepsilon_{45} = \varepsilon_1 \cos^2(\varphi + 45^\circ) + \varepsilon_2 \sin^2(\varphi + 45^\circ) \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{90} = \varepsilon_1 \cos^2(\varphi + 90^\circ) + \varepsilon_2 \sin^2(\varphi + 90^\circ) \quad (5.12)$$

Mając zatem zmierzone odkształcenia ε_0 ε_{45} ε_{90} do określenia ε_1 ε_2 i kąta φ otrzymano poniższy układ równań:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi \quad (5.13)$$

$$\varepsilon_{45} = \varepsilon_1 \frac{1 - \sin^2 \varphi}{2} + \varepsilon_2 \frac{1 + \sin^2 \varphi}{2} \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_{90} = \varepsilon_1 \sin^2 \varphi + \varepsilon_2 \cos^2 \varphi \quad (5.15)$$

Sumując pierwsze i trzecie z tych równań otrzymano:

$$\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (5.16)$$

Suma odkształceń jednostkowych w dwóch dowolnych wzajemnie prostopadłych kierunkach leżących w płaszczyźnie stanu naprężenia jest więc stała i równa sumie odkształceń jednostkowych ε_1 i ε_2 w kierunkach głównych.

Rozwiązując powyższy układ równań otrzymano:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \quad (5.17)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \quad (5.18)$$

oraz kąt φ , jaki kierunek ε_0 tworzy z kierunkiem ε_1 (czyli z kierunkiem σ_1)

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_{90} - \varepsilon_0} \quad (5.19)$$

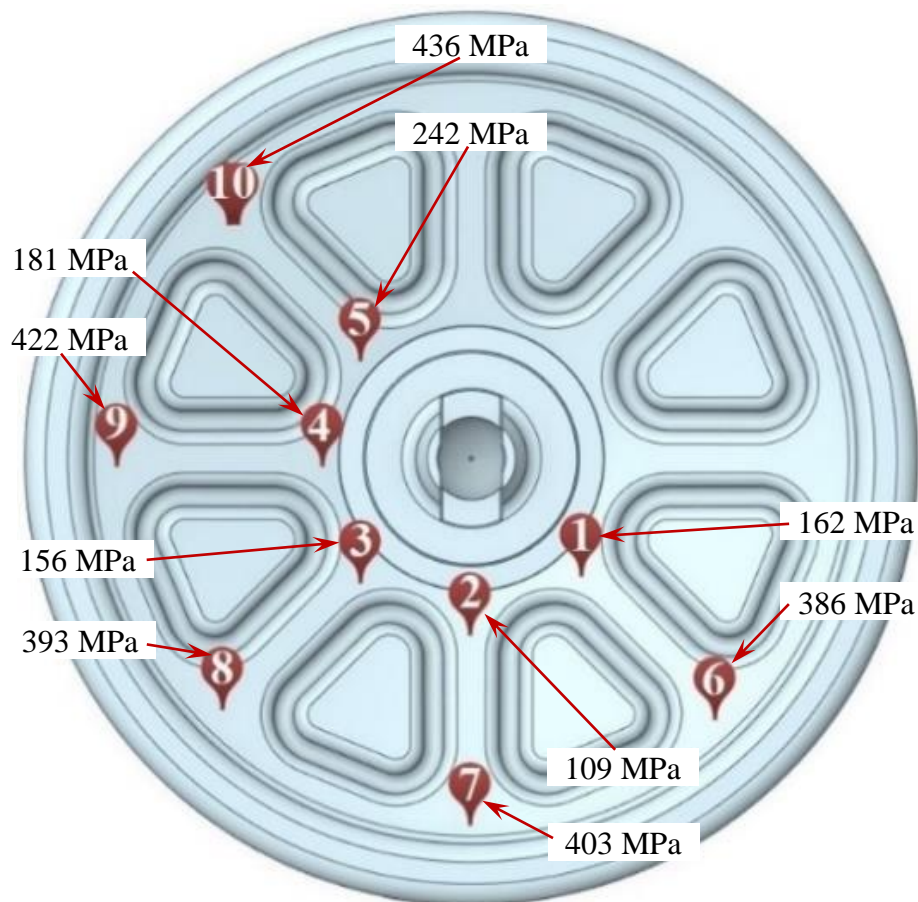
Naprężenia minimalne i maksymalne działające w jednym kierunku można obliczyć z poniższego układu równań:

$$\sigma_{max} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1-\nu} + \frac{1}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + [2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})]^2} \right] \quad (5.20)$$

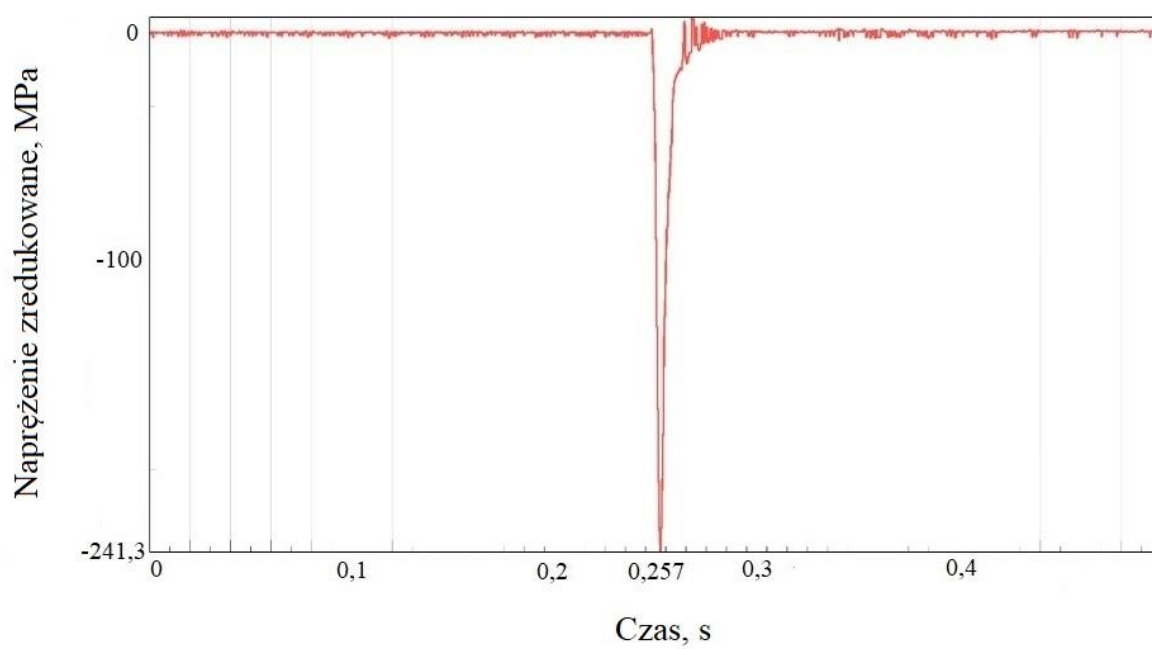
$$\sigma_{min} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1-\nu} - \frac{1}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + [2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})]^2} \right] \quad (5.21)$$

Przy prowadzeniu analiz wytrzymałości, wyniki z pomiarów sprowadzono do naprężeń zredukowanych zgodnie z hipotezą Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H). W programie obliczeniowym, zamiany naprężeń dla poszczególnych kierunków na naprężenia zredukowane dokonano za pomocą modułu Von Mises. Zredukowane wartości naprężeń zostały obliczane bez uwzględniania kierunków naprężenia. Moduł Younga przyjęty do obliczeń wynosił $E = 210$ GPa. Na rysunku 5.16 graficznie przedstawiono wartości naprężeń zredukowanych występujących w dziesięciu rozpatrywanych punktach pomiarowych zlokalizowanych na badanej płycie oporowej, dla strzału nr 3.

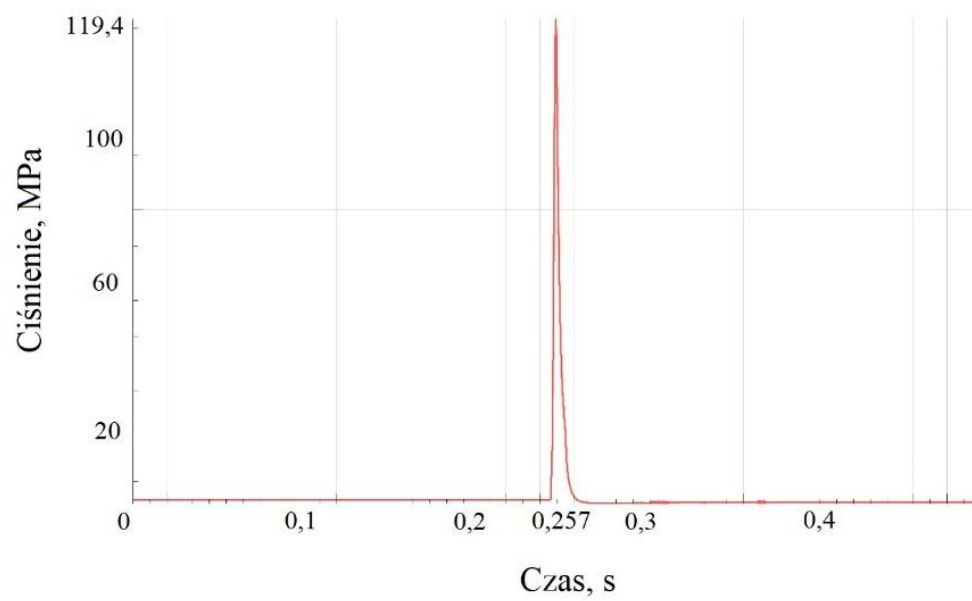
Dla tego samego strzału, na rysunku 5.17 pokazano przykładowy przebieg naprężeń zredukowanych w czasie dla rozety R5. Podczas ostrzału płyty oporowej prowadzono również pomiar ciśnienia maksymalnego w przewodzie lufy 98 mm moździerza za pomocą czujnika piezoelektrycznego, zsynchronizowanego w czasie z aparaturą tensometryczną. Przykładowy wykres przebiegu ciśnienia w funkcji czasu dla strzału nr 3, przedstawiono na rysunku 5.18.



Rys. 5.16 Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych występujące na płycie oporowej podczas strzału nr 3



Rys. 5.17 Przebieg naprężeń zredukowanych w czasie dla rozety R5 podczas strzału nr 3



Rys. 5.18. Przebieg ciśnienia w czasie mierzony czujnikiem piezoelektrycznym podczas strzału nr 3

6. Analizy numeryczne MES

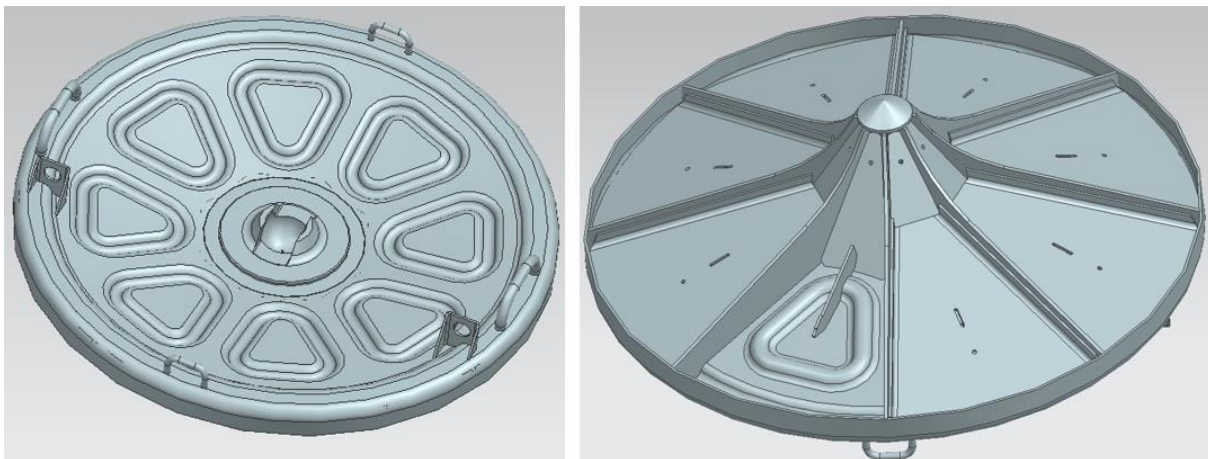
Zastosowanie badań strzelaniem umożliwia pozyskanie rzeczywistych pomiarów. Nie mniej jednak ze względu na bardzo wysokie koszty związane z zakupem amunicji i realizacją ostrzału w certyfikowanych ośrodkach naukowo-badawczych, poligonowe badania są coraz częściej zastępowane symulacjami komputerowymi na modelach numerycznych [140-143]. Rozwój technologii i względy ekonomiczne sprzyjają inwestycjom ograniczającym się wyłącznie do zakupu oprogramowania oraz stosowania metody elementów skończonych MES [144-146].

Przeprowadzenie analiz numerycznych w oparciu o metodę MES stanowiło weryfikację, w jakim stopniu realne obciążenia działające na płytę oporową 98 mm moździerza można odzwierciedlić na modelu obliczeniowym. Badania empiryczne pozwoliły na pozyskanie danych, które uwzględniono do opracowania modelu obliczeniowego płyty oporowej moździerza. Zastosowanie symulacji komputerowych MES umożliwiło określenie rozkładów naprężeń występujących na płycie pod wpływem zadanych obciążeń. W rezultacie pozyskano wartości naprężeń zredukowanych, których rozkład pozwolił na ujawnienie stref maksymalnego wyężenia płyty oporowej moździerza.

6.1. Model obliczeniowy

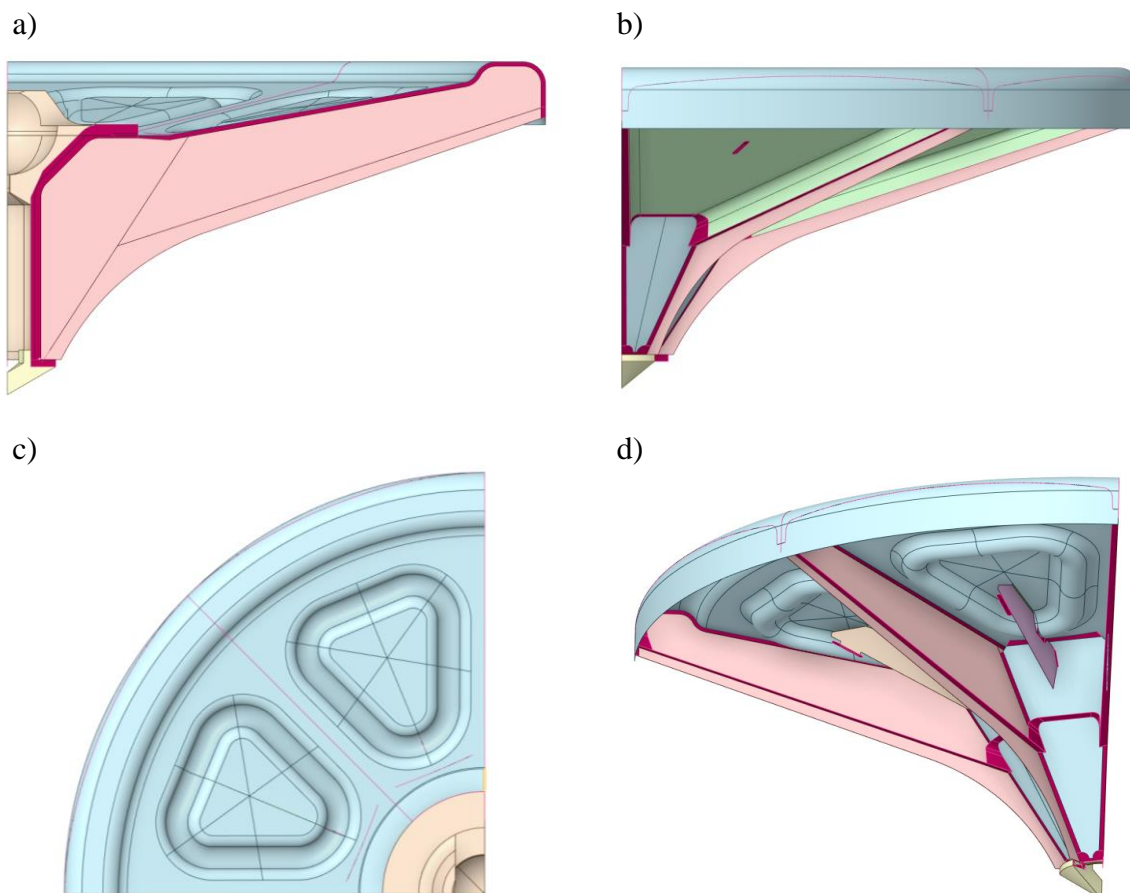
W celu przeprowadzenia analiz numerycznych przygotowano model obliczeniowy płyty oporowej moździerza kalibru 98 mm, składający się z modelu geometrycznego oraz modelu dyskretnego.

Model geometryczny płyty oporowej, czyli model powłokowo bryłowy utworzono w programie Ansys Space Claim 2023 R1 [147] na wcześniej wykonanym trójwymiarowym modelu CAD w programie NX 11 [148]. Model CAD, przedstawiony na rysunku 6.1 opracowano za pomocą modułu do inżynierii odwrotnej ze skanu 3D rzeczywistej płyty oporowej, uwzględniającej wszystkie elementy konstrukcyjne płyty.



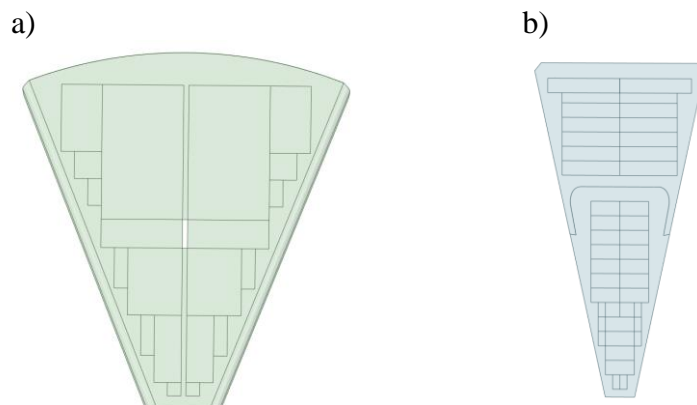
Rys. 6.1. Model CAD płyty oporowej ze wszystkimi jej elementami konstrukcyjnymi

Geometria przygotowana do obliczeń w programie Ansys obejmowała jedną z czterech części płyty ze względu na symetryczny kształt całej konstrukcji. Na rysunku 6.2 przedstawiono fragmenty geometrii płyty oporowej mózdzierza M98, przygotowanej na potrzeby obliczeń numerycznych.



Rys. 6.2. Pierwotna geometria uproszczona płyty oporowej mózdzierza M98: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) widok z góry, d) widok izometryczny bez pokryw międzyżebrowych

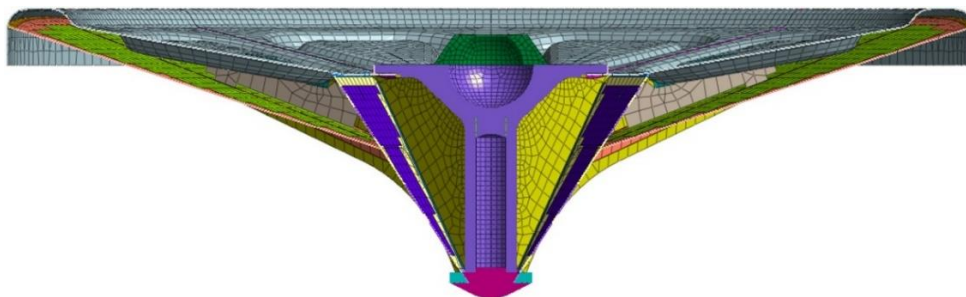
Geometrie płaszczyzn konstrukcji płyty oporowej mózdzierza, stanowiące pokrywy międzyżebrowe usztywniająco-wzmacniające przygotowane do naniesienia siatki elementów skończonych, przedstawiono na rysunku 6.3.



Rys. 6.3. Geometrie płaszczyzn konstrukcji płyty oporowej (pokryw międzyżebrowych usztywniająco-wzmacniających): a) większych, b) mniejszych

Po uzyskaniu modelu geometrycznego, dokonano jego dyskretyzacji na podstawie, której otrzymano modele podzielone na skończoną ilość elementów w programie Midas NFX 2023 R1 [149]. Modele numeryczne zbudowano z elementów trójkątnych oraz czworokątnych odpowiadających za powłoki. Obszary płyty o kształcie nieregularnym odwzorowano elementami skończonymi typu 3D: hexa, penta i tetra. Wielkość siatki elementów skończonych została tak dobrana, aby w możliwie najlepszy sposób oddać rzeczywisty kształt badanego elementu, jednocześnie nie powodując znacznego wydłużenia czasu analiz. W związku z tym zasadniczą wielkość siatki przyjęto jako 8 mm, z maksymalną wielkością 20 mm na większych powierzchniach płaskich.

Zachowując powyższe wielkości, przy analizowanej konstrukcji płyty oporowej wygenerowano 60205 elementów skończonych. Na rysunkach 6.4 i 6.5 przedstawiono modele numeryczne analizowanej płyty oporowej mózdzierza M98.

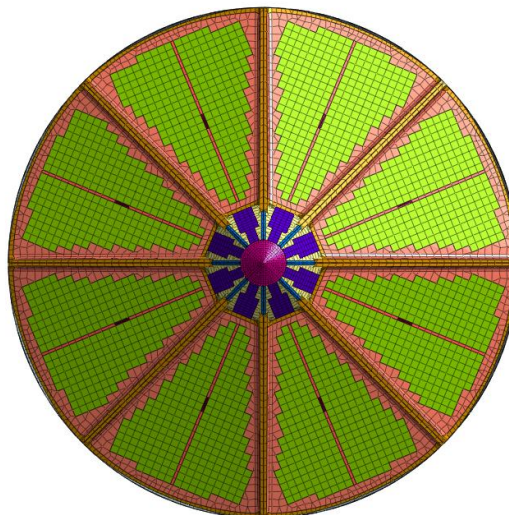


Rys. 6.4. Wizualizacja siatki elementów skończonych w przekroju konstrukcji płyty

a)



b)



Rys. 6.5. Wizualizacja siatki elementów skończonych płyty: a) widok z wierzchu, b) widok od spodu

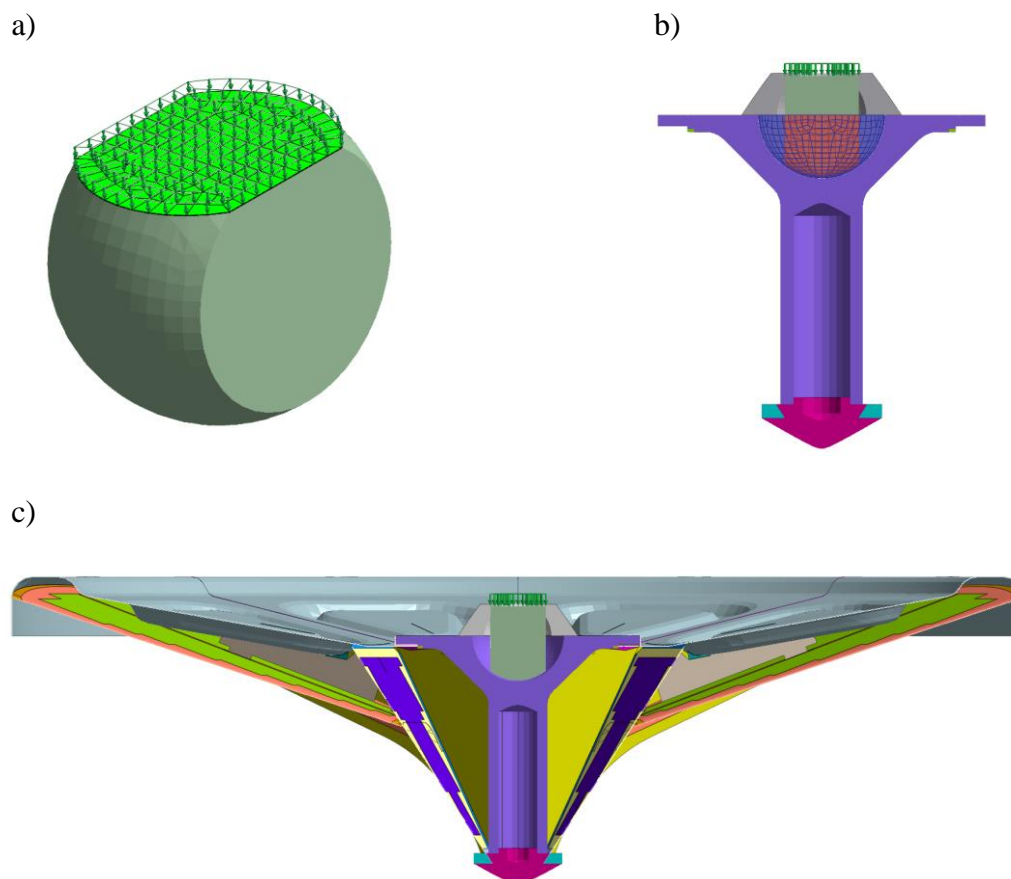
6.2. Warunki brzegowe

Do poprawnego zamodelowania odkształceń występujących na płycie oporowej mózdzierza podczas strzału niezbędne było narzucenie odpowiednich warunków brzegowych, co stanowiło ostatni etap przygotowania modelu obliczeniowego do analiz numerycznych. W tym celu zdefiniowano rodzaj, kierunek i miejsce przyłożenia siły działającej na płytę oporową oraz rozkład, wielkość i charakter oddziaływania sił stanowiących opór gruntu. Kolejnym bardzo ważnym aspektem było odzwierciedlenie dynamicznego charakteru wystrzału oraz określenie danych materiałowych konstrukcji i zastosowanego rodzaju podłoża.

6.2.1. Siły działające na układ

W miejscu występowania kontaktu kulistej części trzonu tzw. „pięty” lufy mózdzierza oraz gniazda wykonanego w płycie oporowej nadany został kontakt typu „General”, który pozwolił na odwzorowanie rzeczywistych warunków przekazywania obciążenia na płytę bez uwzględnienia współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi elementami. Jest to najbardziej ogólny typ kontaktu używany przy numerycznych analizach dynamicznych [150]. Odróżnieniem kontaktu typu General są więzy, które charakteryzują się wyłącznie sztywnym przyleganiem do siebie stykających się powierzchni.

W celu najbardziej precyzyjnego odwzorowania obciążenia płyty oporowej, siły działające na układ zadano na ściętej powierzchni elementu mózdzierza współpracującego z gniazdem płyty, co przedstawiono na rysunku 6.6.

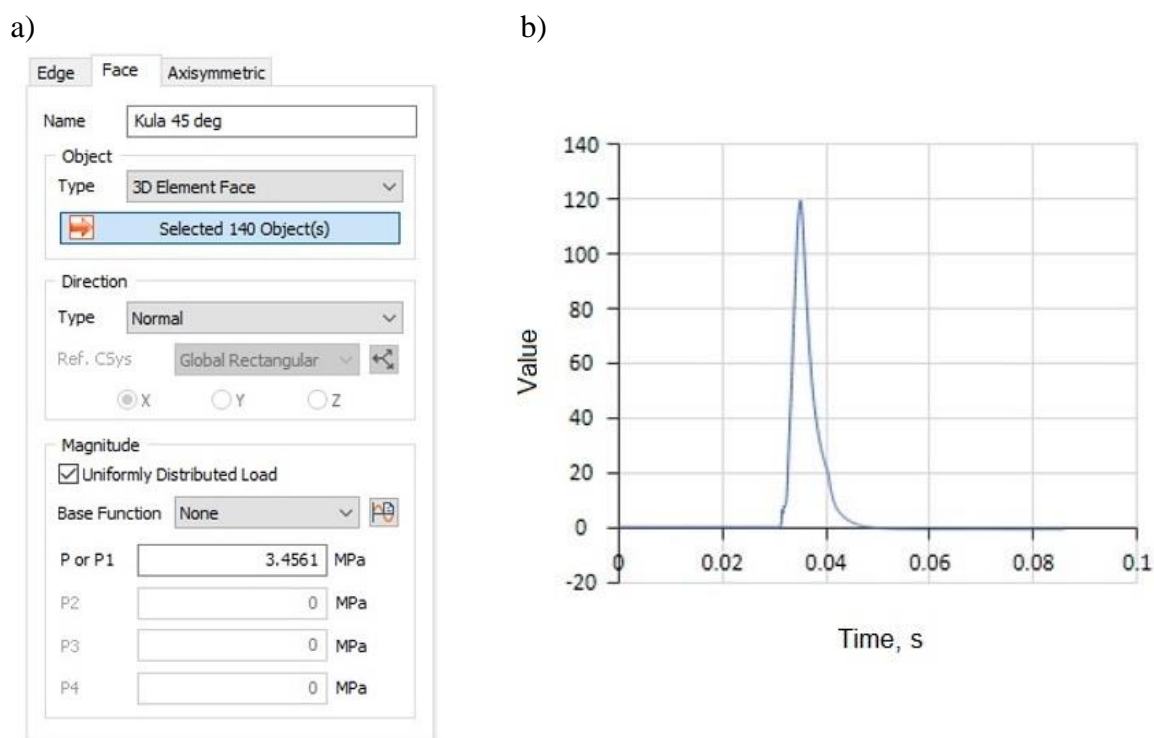


Rys. 6.6. Poddane obciążeniu przyłożoną siłą: a) trzpień mózdzierza, b) gniazdo kuliste, c) płyta oporowa w przekroju

Siła przyłożona do trzpienia mózdzierza, powodująca obciążenie gniazda kulowego płyty oporowej wynikała z zarejestrowanej maksymalnej wartości ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy mózdzierza, mierzonej przy zastosowaniu czujnika piezoelektrycznego podczas ostrzału.

W celu odwzorowania rzeczywistego przebiegu ciśnienia w czasie, do programu Midas NFX zaimplementowano krzywą otrzymaną z badań strzelaniem. W programie została ona wprowadzona jako bezwymiarowy współczynnik wartości ciśnienia w danym czasie. Aby uzyskać wypadkową siłę równą tej, która występowała w czasie strzałów, zastosowano współczynnik o wartości 3,4561. Po pomnożeniu pola przekroju ściętej kuli (rys. 6.6 a) przez stałą wartość ciśnienia (3,4561 MPa) oraz odpowiadającą jej wartość w danym czasie z krzywej przebiegu, uzyskiwano siłę wypadkową równą rzeczywistej.

Funkcja ciśnienia w programie Midas NFX jest wprowadzana jako funkcja bez jednostkowa, której przebieg jest obecny w czasie. Wówczas ciśnienie, które działa na powierzchnię trzpienia mózdzierza jest skalowane. Na rysunku 6.7 przedstawiono parametry wsadowe do programu, gdzie w rubryce zadano jednostkę obciążenia – MPa, ponieważ wykres jest bez jednostkowy i wyłącznie skalujący. Wprowadzana wartość współczynnika 3,4561 odpowiada jednostce powierzchni, ale jest zamieniona na MPa, żeby uzyskać konkretną wartość ciśnienia.



Rys. 6.7. Ustawienia programu Midas NFX: (a) okno wprowadzania wartości współczynnika 3,4561, (b) przykładowa, bez jednostkowa funkcja ciśnienia

6.2.2. Zdefiniowanie podłoża

Ze względu na brak identyfikacji sztywności podłoży, z których prowadzono ostrzał płyty oporowej, kolejnym etapem było wyznaczenie szacunkowych wartości sztywności gruntu wyrażonych w N/mm. Zastosowanie tych jednostek było konieczne ze względu na wymagania programu obliczeniowego Midas NFX do definiowania sztywności gruntu.

Poprzez nadanie parametrów materiałowych (moduł Younga, współczynnik Poissona) wyznaczonych z normy PN - 81 - B03020 [151], opisującej różne rodzaje gruntu stworzono model osiowosymetryczny, w który wciskano wgłębnik w kształcie piramidy, co miało odwzorowywać w przybliżeniu kształt płyty (test ten w znacznym uproszczeniu przypominał

badanie mikrotwardości). Następnie po przyłożeniu założonej wartości siły do wglębniaka, odczytano wartość zagłębienia, co umożliwiło przejście z parametrów materiałowych na parametr sztywności o jednostce N/mm. Działania te pozwoliły ustalić przybliżony rząd wielkości poszczególnych sztywności, jakie powinny mieć elementy typu Bush, będące kontaktami pełniącymi funkcje sprężyn podczas modelowania podparcia [152].

Na tej podstawie ustalono rodzaj podłoża, natomiast z wyżej wymienionej normy odczytano moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 , zależny od stopnia zagęszczenia I_D , który następnie wprowadzono do programu obliczeniowego. Przeliczenia przeprowadzono tak, aby sztywność gruntu wyrażona była wartością sprężystości liniowej, w jednostkach siły odniesionych do przemieszczenia elementu sprężystego [153]. W tabeli 6.1 podano zalecane przez normę PN-81-B03020 współczynniki Poissona, jak również ilorazy modułów δ , odkształcenia E_0 oraz ścisłości gruntów M_0 .

Tab. 6.1. Współczynnik Poissona i relacje pomiędzy modułem odkształcenia oraz ścisłości gruntu dla klasyfikacji wg PN-81-B03020 [151]

| Typ gruntu | Grunty niespoiste | | | Grunty spoiste | | | |
|---------------|-------------------|--------------|----------------|----------------|------|------|-------|
| | \dot{Z}', P_o' | P_r', P_s' | P_d', P_π' | A' | B' | C' | D' |
| ν | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,25 | 0,29 | 0,32 | 0,37 |
| δ | 0,90 | 0,83 | 0,74 | 0,83 | 0,76 | 0,70 | 0,565 |
| β | 1,0 | 0,90 | 0,80 | 0,90 | 0,75 | 0,60 | 0,80 |

gdzie:

ν – współczynnik Poissona,

$$\delta = \frac{E_0}{M_0} = \frac{E_1}{M_1} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} - \text{iloraz modułów} \quad (6.1),$$

$$\beta = \frac{E_0}{E_1} = \frac{M_0}{M_1} - \text{wskaźnik skonsolidowania gruntu} \quad (6.2),$$

E_0 / E_1 – moduł pierwotnego / wtórnego odkształcenia gruntu,

M_0 / M_1 – edometryczny moduł ścisłości pierwotnej / wtórnej gruntu,

\dot{Z}' – żwir,

P_o' – grunt pólśypki,

P_r' – piasek gruboziarnisty,

P_s' – piasek średnioziarnisty,

P_d' – piasek drobnoziarnisty,

P_π' – piasek pylasty,

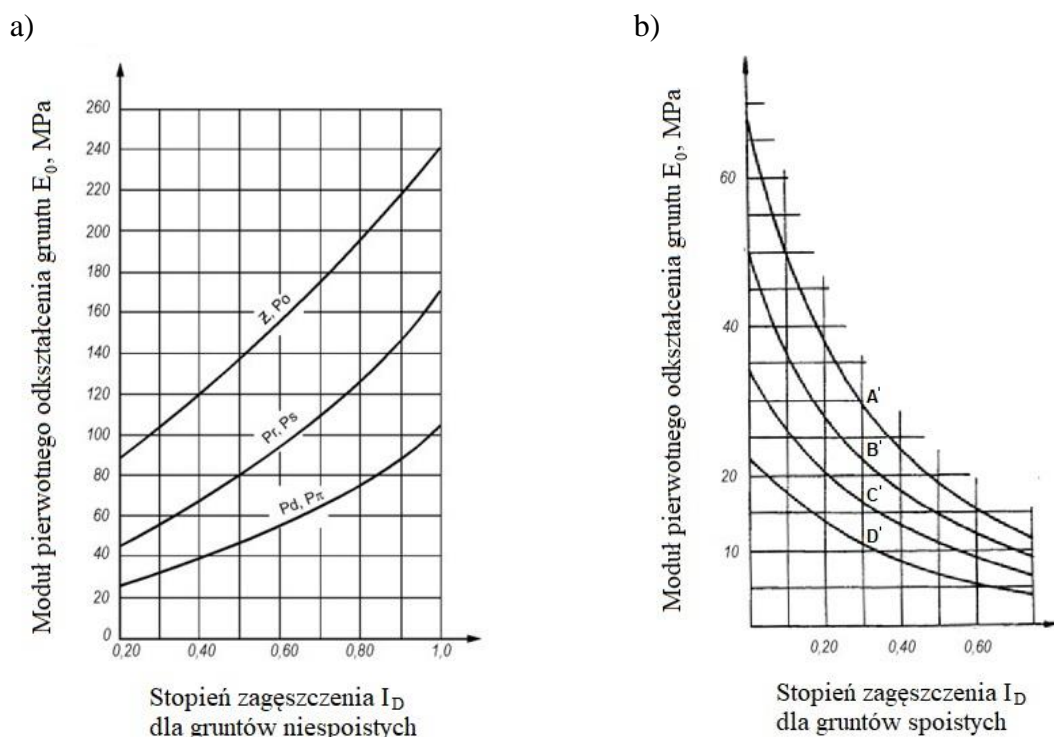
A' – grunty morenowe skonsolidowane,

B' – grunty inne skonsolidowane oraz morenowe nieskonsolidowane,

C' – grunty inne nieskonsolidowane,

D' – ły, niezależnie od pochodzenia geologicznego.

Na rysunku 6.8 przedstawiono zależności korelacyjne pierwotnego modułu odkształcenia gruntu E_0 od stopnia zagęszczenia I_D dla gruntów niespoistych i spoistych. Zarówno tabela 6.1, jak i rysunek 6.8 posłużyły do doboru wstępnych założeń sprężystości gruntów podczas prac analitycznych. Stanowiło to punkt odniesienia do zastosowanych podłoży w trakcie ostrzału płyty oporowej młotem M98.



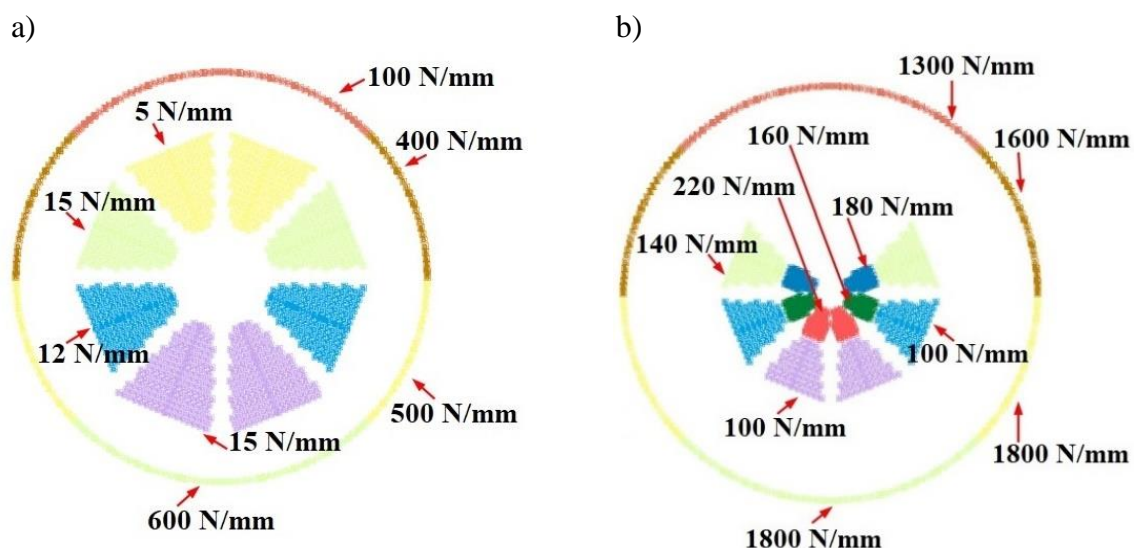
Rys. 6.8. Zależność korelacyjna pierwotnego modułu odkształcenia gruntu E_0 od stopnia zagęszczenia I_D dla: a) gruntów niespoistych, b) gruntów spoistych

6.2.3. Podparcie płyty oporowej

Do zamodelowania sztywności gruntu i odwzorowania podparcia płyty oporowej zastosowano elementy typu „Bush”, czyli kontakty jednowymiarowe pełniące funkcje sprężyn. W przeprowadzonych symulacjach dostosowano typ elementu tak, aby jeden z jego końców był sztywno utwierdzony, natomiast drugi koniec połączony z konstrukcją płyty, co odpowiada gruntowemu modelowi podparcia. Element typu Bush jeśli jest zdefiniowany w jednym węźle, wykorzystuje informacje o położeniu węzłów i zachowuje te same właściwości, co element skalarny. Możliwość zastosowania elementu typu Bush w jednym węźle znacznie ułatwia symulowanie podparcia gruntowego, ponieważ jeden z jego węzłów przylega do powierzchni modelu numerycznego płyty, natomiast drugi jest automatycznie podpierany [152].

Pracę omawianych elementów zdefiniowano w odniesieniu do ich sztywności, wyrażonej w jednostce N/mm, a sprężystość zadano jako liniową.

W tym etapie prac poszukiwano także odpowiedniego rozmieszczenia elementów typu Bush stanowiących podparcie na różnych obszarach płyty oporowej. Metodą iteracyjną dobierano miejsca, w których należy uwzględnić podparcie. Następnie badając trend rozkładu naprężeń w poszczególnych obszarach płyty oraz poprzez porównanie ich z wartościami zmierzonymi, określano czy zadane podparcie przyczynia się do lepszego odwzorowania rzeczywistych warunków. Przykładowo na rysunku nr 6.9 graficznie przedstawiono podparcia płyty oporowej dla podłoża kamienistego, które zmieniały się w zależności od kąta podniesienia lufy moździerza. Poprzez badanie różnych punktów podparcia starano się odwzorowywać odpowiedni rozkład naprężeń na płycie oporowej, zbliżony do rzeczywistych pomiarów.



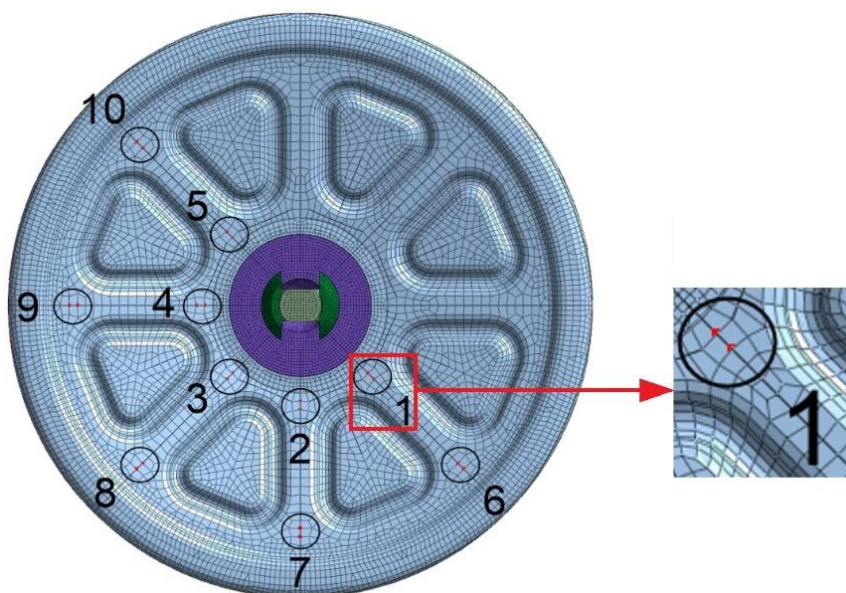
Rys. 6.9. Podparcia płyty oporowej przy zastosowaniu podłoża kamienistego dla kąta podniesienia lufy moździerza wynoszącego: a) 60°, b) 75°

Kiedy wyznaczono odpowiedni rozkład podparcia dla danego gruntu, które spełniało generalny trend rozkładu naprężeń na płycie, skupiono się na dopasowaniu konkretnych wartości naprężeń w punktach pomiarowych. W tym celu posługiwano się zmianą sztywności danej grupy elementów. Poprzez odpowiednie sterowanie poszczególnymi sztywnościami na konkretnych częściach modelu starano się uzyskać wartości naprężeń zbliżone do tych, które zarejestrowano dla poszczególnych strzałów na poziomie minimum 70 % dopasowania. Zbieżność porównywanych wartości naprężeń uzyskano poprzez zastosowanie iteracji.

6.2.4. Lokalizacja punktów pomiarowych

W celu zachowania korelacji rozmieszczenia rozet tensometrycznych względem siatki elementów skończonych wyznaczono punkty, z których odczytywane były rzeczywiste naprężenia występujące na płycie oporowej. W tym celu wyselekcjonowano dwa węzły, które składały się na jeden punkt, co przedstawiono na rysunku 6.10. Ich wybór podyktowany był odległością rozety tensometrycznej od charakterystycznych punktów na konstrukcji. Przykładowy dystans rozety R1 od obwodowego elementu stanowiącego gniazdo kuliste pod trzpień lufy 98 mm moździerza, przedstawiono na rysunku 6.11.

Z dwóch wybranych węzłów wyliczano średnią arytmetyczną naprężeń, a następnie dokonywano porównania wartości występującej w analizie numerycznej względem naprężeń zarejestrowanych podczas poligonowych badań strzelaniem.



Rys. 6.10. Rozmieszczenie punktów pomiarowych odpowiadających rozetom tensometrycznym



Rys. 6.11. Określenie odległości rozet w stosunku do charakterystycznych obszarów płyty

6.2.5. Dane materiałowe

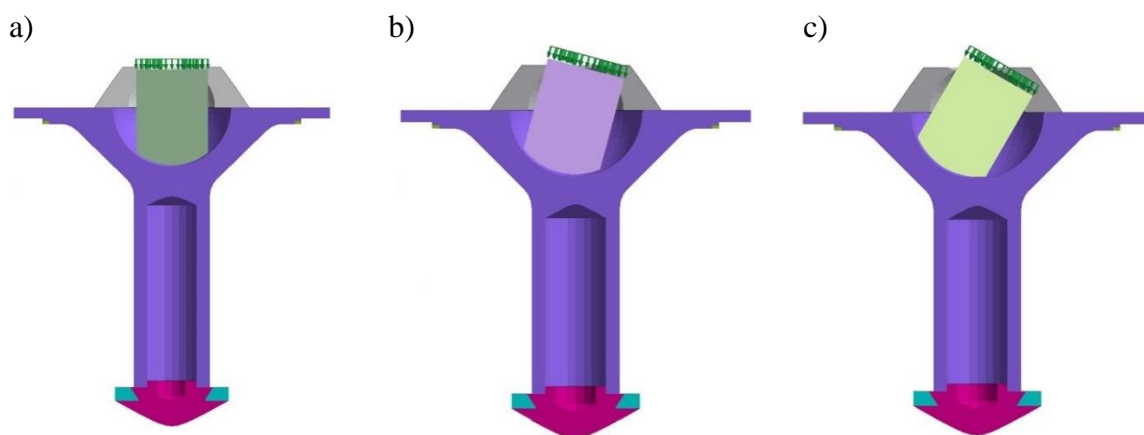
Do obliczeń numerycznych przyjęto dane materiałowe zgodne wynikami badań materiałowych przedstawionych w rozdziale 3 dla stali o oznaczeniu 30HGSA, z której wykonano wszystkie elementy płyty oporowej i spoiwa spawalniczego o oznaczeniu Mn4Ni2,5CrMo, zastosowanego do wykonania spoin.

W związku z powyższym, przyjęte wartości danych do symulacji numerycznych wynosiły:

- granica plastyczności $R_e = 830 \text{ MPa}$,
- moduł Younga $E = 210 \text{ GPa}$,
- współczynnik Poissona $\nu = 0,3$.

6.2.6. Kąty ostrzału

Ostrzał płyty oporowej prowadzono przy trzech różnych kątach podniesienia lufy młóździerza, wynoszących 45° , 60° oraz 75° . Zmienne wartości kąta podniesienia zostały uwzględnione w obliczeniach numerycznych poprzez odpowiednie przyłożenie siły na ściętą powierzchnię trzpienia młóździerza, przekazującą obciążenie na płytę oporową. Na rysunku 6.12 przedstawiono modele numeryczne uwzględniające położenie trzpienia młóździerza względem gniazda płyty oporowej, w zależności od kąta podniesienia zastosowanego podczas ostrzału.

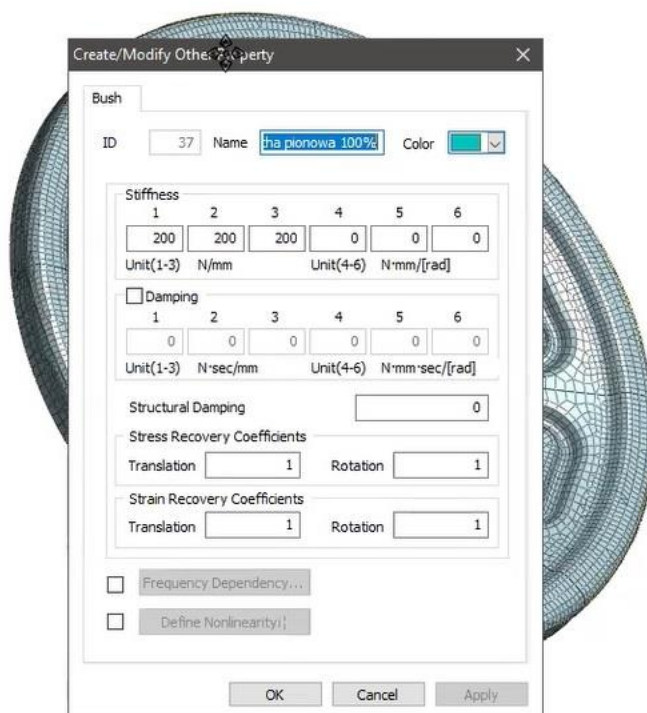


Rys.6.12. Modele numeryczne uwzględniające rozkład sił dla kąta podniesienia lufy młóździerza wynoszącego: a) 45° , b) 60° , c) 75°

6.2.7. Istota prowadzonych iteracji

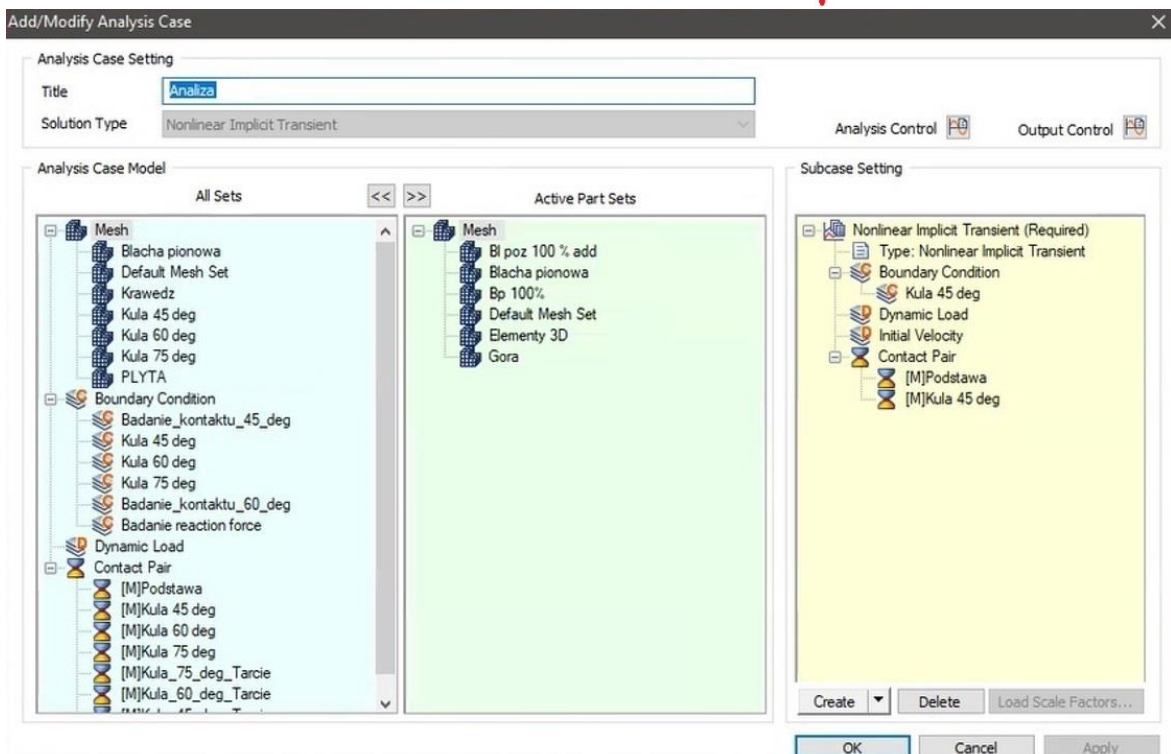
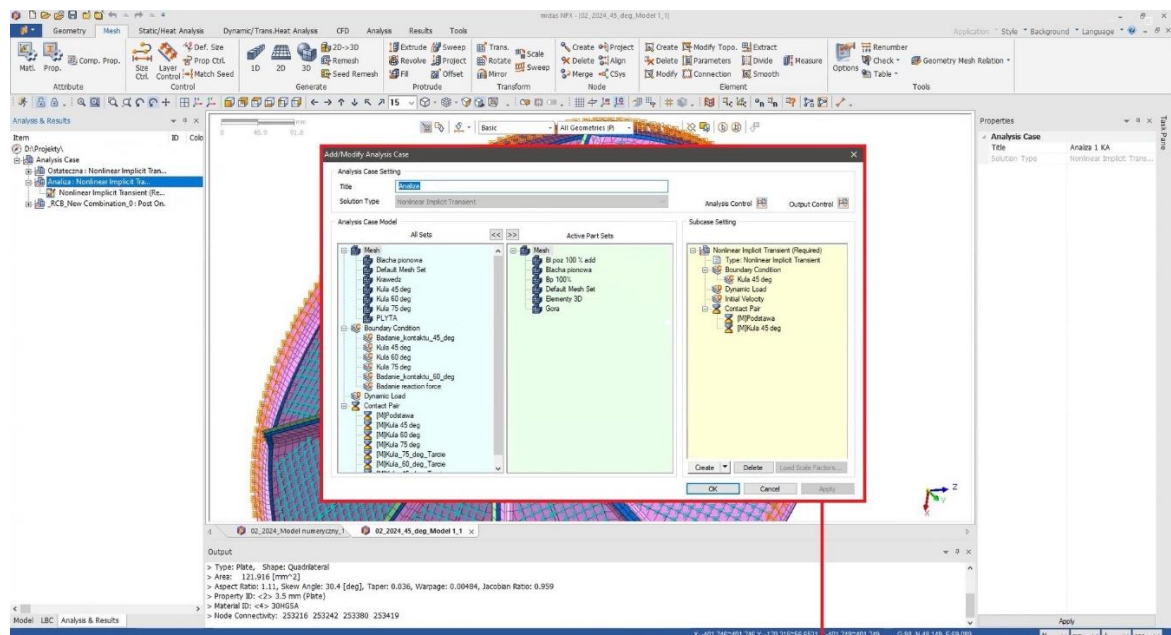
W celu uzyskania zbliżonych wartości naprężeń występujących na modelu numerycznym płyty, w porównaniu z wartościami otrzymanymi z rzeczywistych pomiarów tensometrycznych podczas poligonowych badań strzelaniem, dokonywano modyfikacji ustawień związanych ze sposobem podparcia płyty oporowej. Następnie prowadzono analizy wytrzymałości, a uzyskane wyniki rozpatrywano w odniesieniu do punktów pomiarowych, stanowiących miejsca przyklejenia rozet tensometrycznych. Powyższe działania, służące jak najlepszemu odzwierciedleniu przez model numeryczny płyty rzeczywistych warunków pracy wykonywanej przez płytę oporową w czasie strzału, określono mianem iteracji.

Iteracje obejmujące zmiany sztywności podłoża, obszar podparcia płyty oraz analizy numeryczne prowadzono w oprogramowaniu Midas NFX. Przykładowy proces iteracji rozpoczęto od przyjęcia założeń wstępnych dla gruntu ziemnego, (przyjętych z normy PN - 81 - B03020 [151]) przy ostrzale prowadzonym pod kątem podniesienia lufy równym 45°. Założono, że do pierwszej iteracji płyta oporowa będzie w pełni oparta na gruncie, zarówno jej części powierzchniowe, jak i krawędziowe przy stałej sztywności gruntu. Wartość sztywności płyty oporowej na powierzchniach przyjęto 200 N/mm, a na krawędziach 1400 N/mm. Na rysunku 6.13 przedstawiono ustawienia elementów typu Bush w programie Midas NFX, odpowiadające za wartość sztywności.



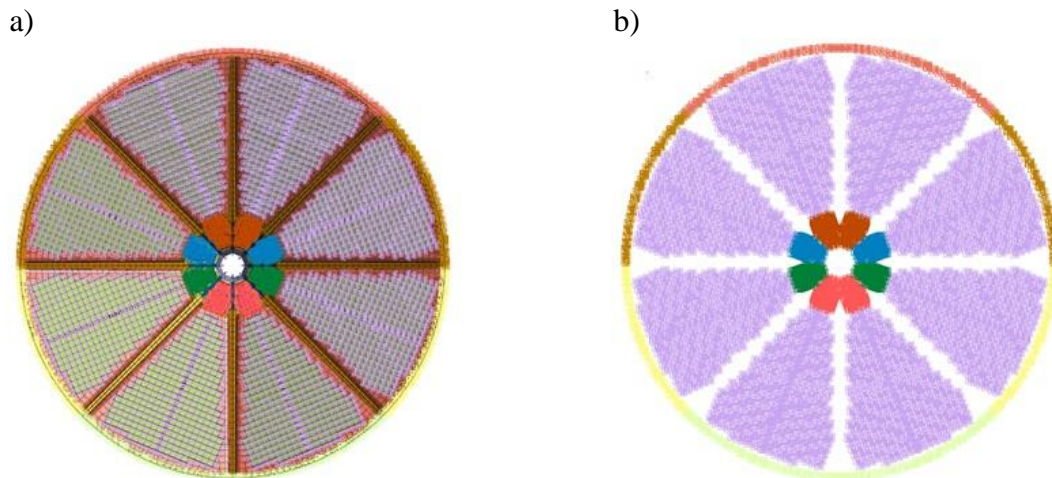
Rys. 6.13. Definiowanie elementów typu Bush w programie Midas NFX

Sztywność zadano na kierunkach translacyjnych (x, y, z) w miejscach zetknięcia płyty oporowej z gruntem. Odpowiednio zdefiniowane charakterystyki sztywności znajdowały się w elementach powierzchniowych, jak również w krawędziowych. Przyjęte założenia wraz z pozostałymi warunkami brzegowymi uwzględniającymi działanie sił zewnętrznych na układ, siatkę elementów skończonych i materiał płyty, zaimplementowano do modułu obliczeniowego umożliwiającego wykonanie analiz numerycznych, co przedstawiono na rysunku 6.14.



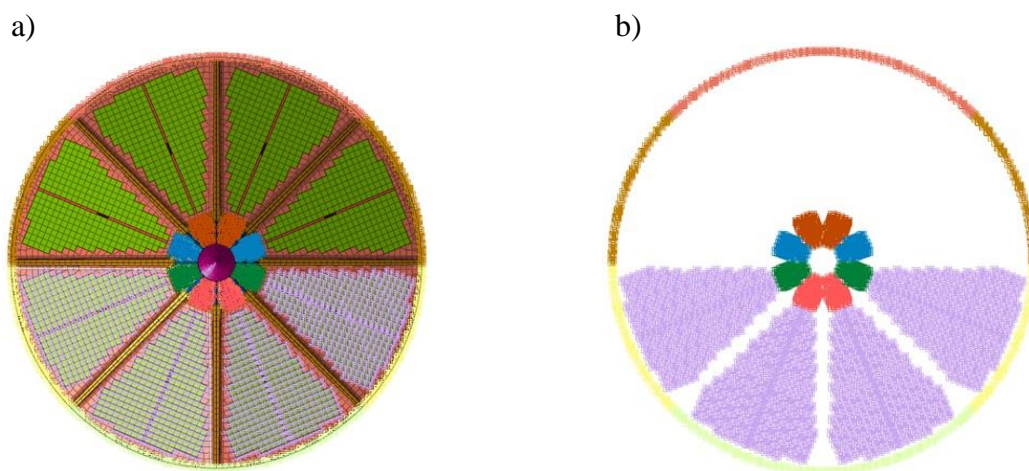
Rys. 6.14. Przykładowa analiza numeryczna dla modelu płyty oporowej w programie Midas NFX

Warunki podparcia modelu numerycznego płyty oporowej zgodnie z założeniami pierwszej iteracji przy zastosowaniu elementów typu Bush, przedstawiono na rysunku 6.15.



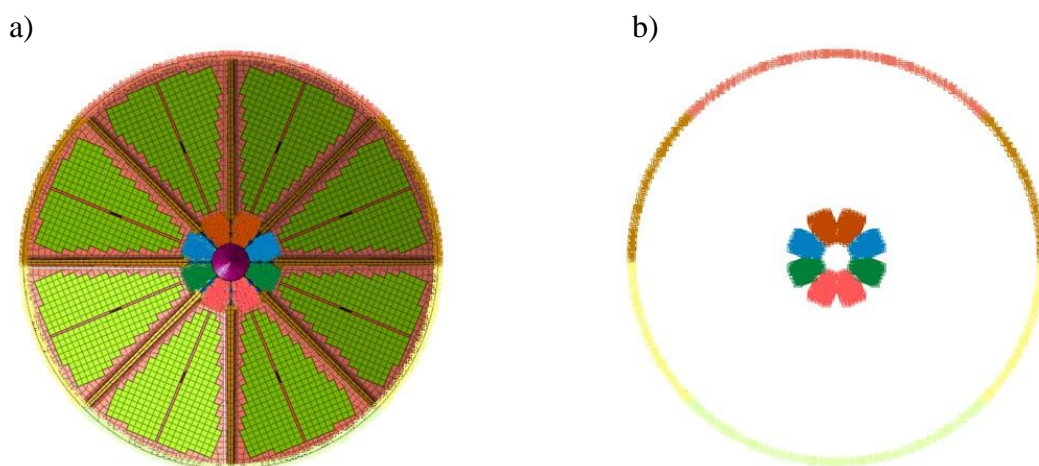
Rys. 6.15. Rozkład elementów typu Bush zgodnie z założeniami pierwszej iteracji: a) widok na płycie z siatką elementów skończonych, b) widok obszaru wygenerowanych sprężystości

Po przeprowadzonych analizach, otrzymane wyniki poddano porównaniu z pomiarami tensometrycznymi. Ze względu na znaczne rozbieżności przystąpiono do drugiej iteracji. Tym razem założono, że płyta oporowa będzie w połowie (w jej dolnej części) oparta na gruncie częściami powierzchniowymi i w pełni oparta częściami krawędziowymi przy stałej sztywności gruntu. Wartość sztywności płyty oporowej na powierzchniach przyjęto 200 N/mm, a na krawędziach 1400 N/mm. Warunki podparcia modelu numerycznego płyty oporowej, zgodnie z założeniami drugiej iteracji przy zastosowaniu elementów typu Bush, przedstawiono na rysunku 6.16.



Rys. 6.16. Rozkład elementów typu Bush zgodnie z założeniami drugiej iteracji: a) widok na płycie z siatką elementów skończonych, b) widok obszaru wygenerowanych sprężystości

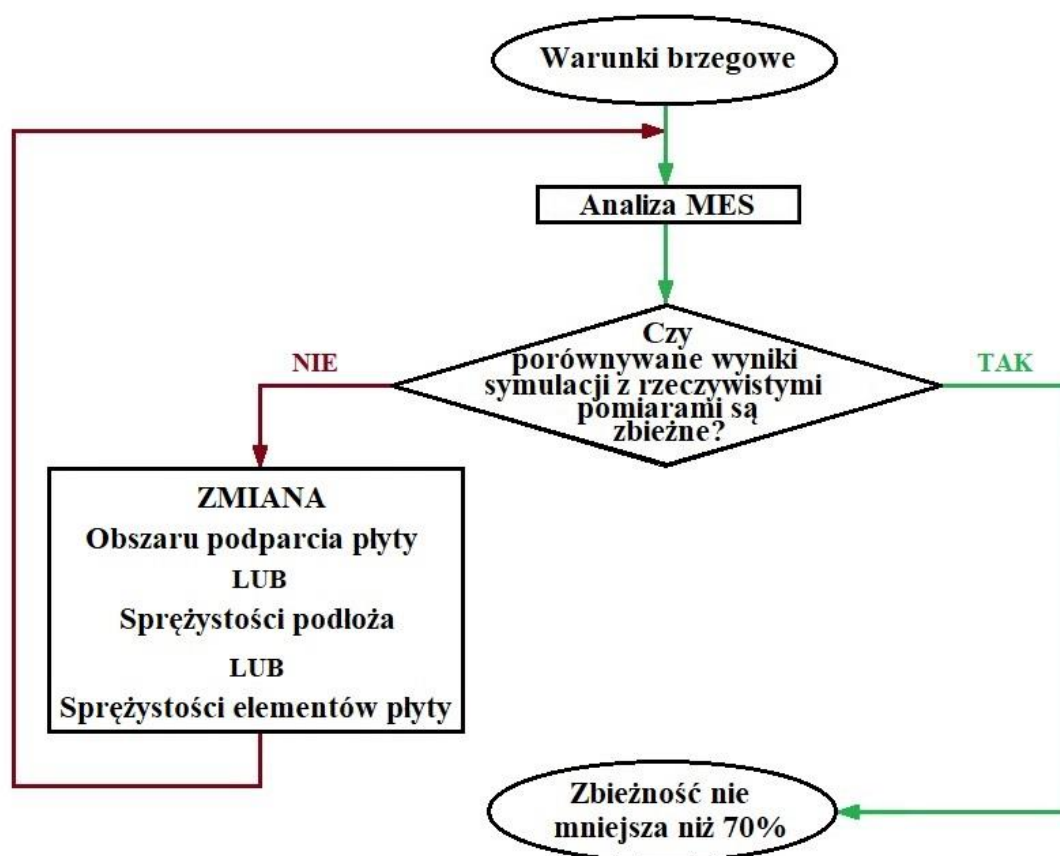
Analiza wytrzymałościowa nie przyniosła poprawy wyników w porównaniu do rzeczywistych pomiarów, stąd przeprowadzono kolejną iterację. W ramach trzeciej iteracji założono że płyta oporowa będzie oparta częściami powierzchniowymi jedynie w obszarze przyśrodkowym i w pełni oparta częściami krawędziowymi przy stałej sztywności gruntu. Wartość sztywności płyty oporowej na powierzchniach przyjęto 200 N/mm, a na krawędziach 1400 N/mm. Warunki podparcia modelu numerycznego płyty oporowej zgodnie z założeniami trzeciej iteracji, przy zastosowaniu elementów typu Bush, przedstawiono na rysunku 6.17.



Rys. 6.17. Rozkład elementów typu Bush zgodnie z założeniami trzeciej iteracji: a) widok na płycie z siatką elementów skończonych, b) widok obszaru wygenerowanych sprężystości

Po przeprowadzonych analizach numerycznych uzyskano wyniki, których wartości były bardziej zbliżone z pomiarami tensometrycznymi niż te z poprzednich iteracji, jednak nadal nie spełniały założonego przedziału zbliżności.

Scharakteryzowane iteracje dotyczyły wyłącznie jednej zmiennej, którą stanowił obszar podparcia dla płyty oporowej w postaci jej elementów powierzchniowych i krawędziowych. Aby uzyskać satysfakcjonującą zbliżność wyników wprowadzono zmienne, które w przypadku dotychczas realizowanych iteracji miały stałą wartość. W związku z tym niezbędne było wykonanie kolejnych iteracji uwzględniających zmienną sztywność gruntu oraz zróżnicowaną sprężystość elementów powierzchniowych i krawędziowych płyty. Wartości sprężystości poszczególnych elementów modelu numerycznego płyty oporowej definiowano za pomocą kontaktów typu Bush. Opis badań, uwzględniających zastosowanie iteracji przedstawiono w pracy [154]. Na rysunku 6.18 przedstawiono schemat blokowy wykonywanych iteracji z wyszczególnieniem stosowanych zmiennych do analiz numerycznych.



Rys. 6.18. Schemat blokowy wykonywanych iteracji

Celem prowadzonych iteracji było osiągnięcie zbieżności wyników naprężeń występujących na modelu numerycznym płyty oporowej z wynikami otrzymanymi z danych eksperymentalnych podczas ostrzału, na poziomie minimum 70 %. Mając do dyspozycji wyłącznie naprężenia płyty oporowej uzyskane z pomiarów tensometrycznych, była to jedyna wartość umożliwiająca skalowanie podczas modelowania numerycznego.

Ze względu na znaczną ilość zmiennych występujących zarówno podczas ostrzału w warunkach poligonowych, jak i przy definiowaniu modelu numerycznego, osiągnięcie pełnej zbieżności wyników okazało się niemożliwe. Potwierdzeniem uzyskania przez model numeryczny satysfakcjonującego poziomu zbieżności, oprócz prowadzonych iteracji był trend związany z powtarzalnością rejestrowanych strzałów, oddanych przy takich samych warunkach (prowadzonych z identycznego podłoża, przy niezmiennym kącie podniesienia lufy moździerza).

7. Wyniki badań i ich analiza

Zestawienie wyników badań obejmuje rzeczywiste pomiary tensometryczne uzyskane podczas ostrzału płyty oporowej w warunkach poligonowych, jak również symulacje w trakcie prowadzonych analiz numerycznych przy zastosowaniu metody elementów skończonych.

7.1. Naprężenia zredukowane z pomiarów rozetami tensometrycznymi

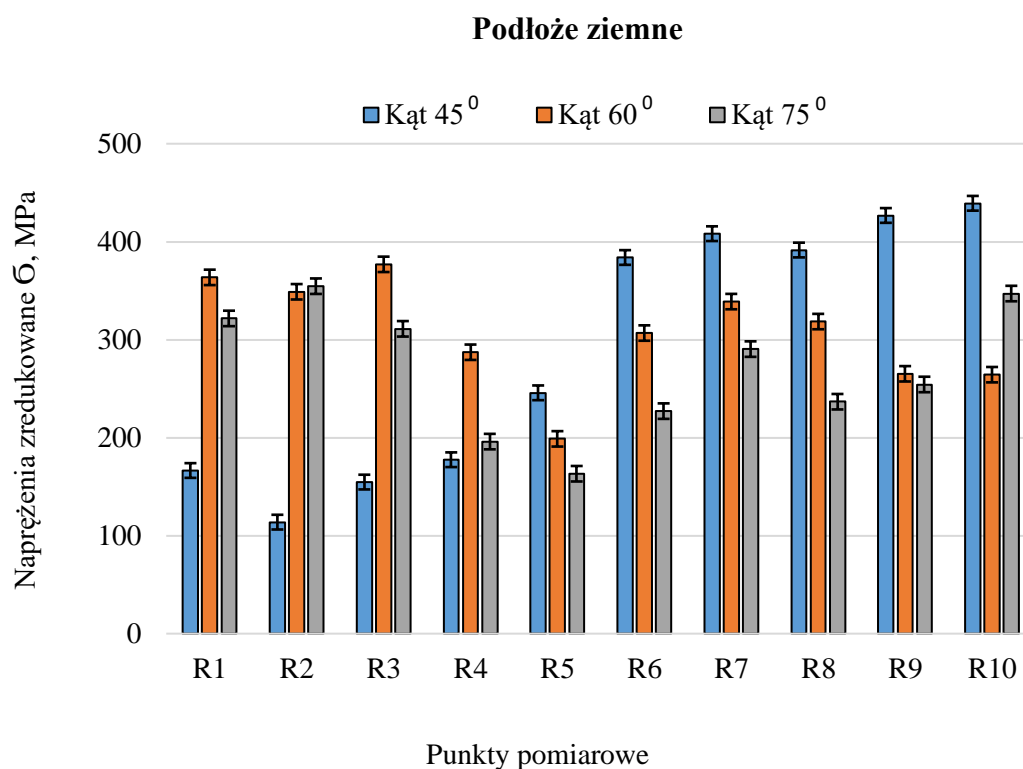
Wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych, zestawiono w tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Wartości średnich maksymalnych naprężeń zredukowanych

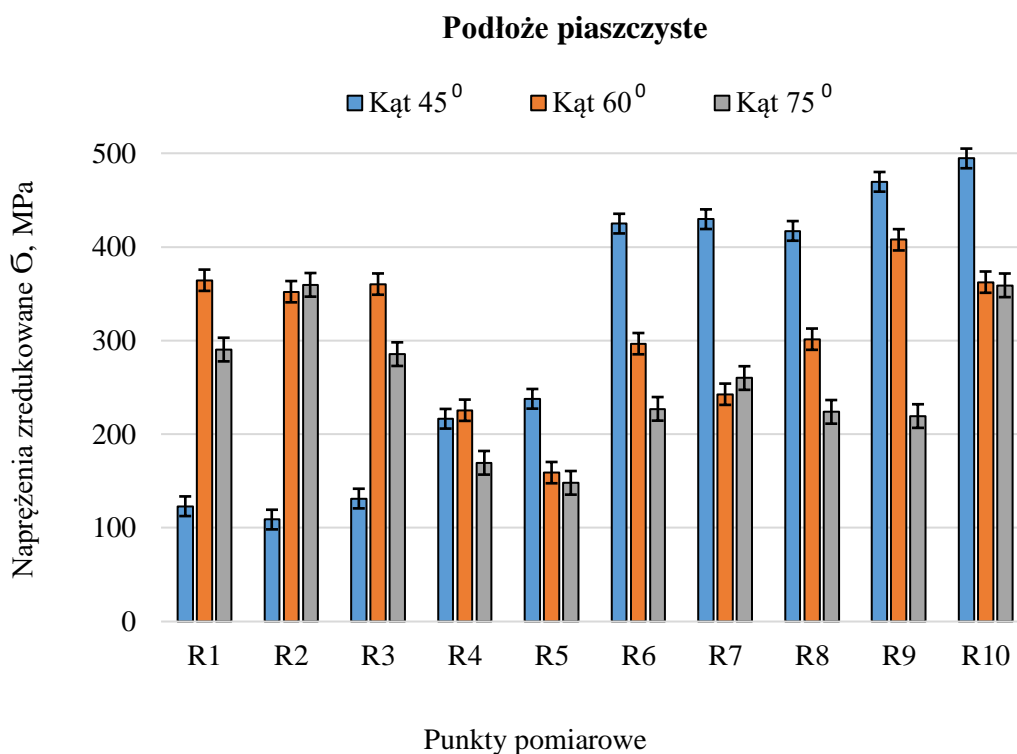
| Lp. | Podłoże | Kąt | Średnie maksymalne naprężenie zredukowane, MPa | | | | | | | | | |
|-----|-------------|-----|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 | R7 | R8 | R9 | R10 |
| 1 | Ziemię | 45° | 166,5 | 113,8 | 154,7 | 177,5 | 245,8 | 383,9 | 408,2 | 391,5 | 426,8 | 439,2 |
| 2 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 3 | | | 3,6 | 4,0 | 2,2 | 4,4 | 3,4 | 2,3 | 7,5 | 6,7 | 5,0 | 5,3 |
| 4 | | 60° | 363,6 | 348,9 | 376,9 | 287,2 | 198,8 | 306,8 | 338,9 | 318,5 | 265,2 | 264,3 |
| 5 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 6 | | | 7,9 | 5,5 | 6,1 | 5,7 | 4,6 | 3,1 | 2,1 | 2,3 | 2,0 | 6,5 |
| 7 | | 75° | 321,7 | 354,6 | 311,1 | 196,0 | 163,2 | 227,1 | 290,4 | 236,7 | 254,3 | 347,1 |
| 8 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 9 | | | 4,2 | 3,2 | 2,9 | 6,1 | 7,9 | 2,3 | 5,1 | 6,1 | 3,8 | 2,2 |
| 10 | Piaszczyste | 45° | 123,1 | 108,9 | 131,3 | 216,5 | 237,8 | 424,9 | 429,6 | 417,1 | 469,5 | 494,5 |
| 11 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 12 | | | 5,1 | 6,9 | 5,4 | 10,2 | 10,6 | 8,2 | 7,3 | 11,4 | 5,4 | 11,0 |
| 13 | | 60° | 364,4 | 352,2 | 360,3 | 225,6 | 159,0 | 296,7 | 242,7 | 301,5 | 407,6 | 362,4 |
| 14 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 15 | | | 8,9 | 7,7 | 8,1 | 11,3 | 6,8 | 7,9 | 11,7 | 10,9 | 12,6 | 9,8 |
| 16 | | 75° | 290,4 | 359,5 | 285,5 | 169,5 | 148,1 | 227,1 | 260,0 | 223,9 | 219,4 | 359,0 |
| 17 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 18 | | | 9,6 | 10,1 | 8,2 | 7,4 | 5,6 | 8,8 | 5,8 | 10,5 | 8,3 | 5,2 |
| 19 | Kamieniste | 45° | 322,7 | 307,3 | 314,2 | 331,0 | 385,9 | 258,3 | 228,8 | 268,0 | 397,9 | 357,8 |
| 20 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 21 | | | 9,2 | 11,5 | 12,1 | 10,4 | 12,4 | 10,0 | 15,5 | 8,9 | 10,7 | 18,2 |
| 22 | | 60° | 271,9 | 243,8 | 280,3 | 369,5 | 377,1 | 448,8 | 358,5 | 443,1 | 475,6 | 413,3 |
| 23 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 24 | | | 10,8 | 7,7 | 7,5 | 12,4 | 17,6 | 13,9 | 8,6 | 12,7 | 12,4 | 14,9 |
| 25 | | 75° | 329,3 | 367,1 | 316,5 | 266,3 | 180,4 | 249,3 | 294,2 | 254,3 | 273,3 | 368,9 |
| 26 | | | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± | ± |
| 27 | | | 9,6 | 12,8 | 8,4 | 10,5 | 9,4 | 17,7 | 14,7 | 17,0 | 18,7 | 12,6 |

Powyższe wartości naprężeń przeliczono na podstawie pomiaru odkształceń rozetami tensometrycznymi, które uzyskano podczas ostrzału płyty oporowej przy zastosowaniu różnych podłoży (ziemnego, piaszczystego i kamienistego) oraz przy zmiennym kącie podniesienia lufy 98 mm młotowca (45°, 60° i 75°).

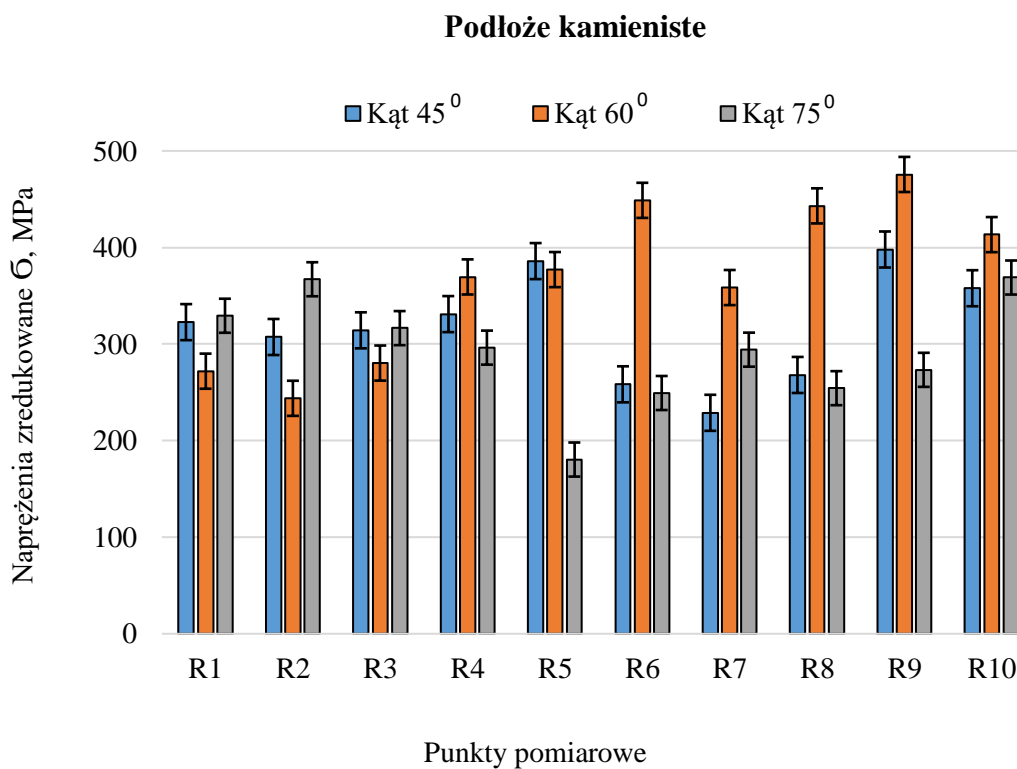
Wartości naprężeń zredukowanych dla poszczególnych dziesięciu punktów pomiarowych płyty oporowej uzyskanych w oparciu o przeliczenia rzeczywistych odkształceń, (zmierzonych za pomocą dziesięciu rozet tensometrycznych o numerach R1 ÷ R10 w warunkach poligonowych) uwzględniających różne rodzaje zastosowanego podłoża oraz zmienne kąty podniesienia lufy młotowca, przedstawiono za pomocą wykresów słupkowych na rysunkach 7.1. ÷ 7.6.



Rys. 7.1. Wartości rzeczywistych naprężeń zredukowanych dla poszczególnych punktów pomiarowych płyty oporowej i kątów podniesienia lufy młotowca, w zależności od zastosowanego podłoża stanowiącego grunt ziemny

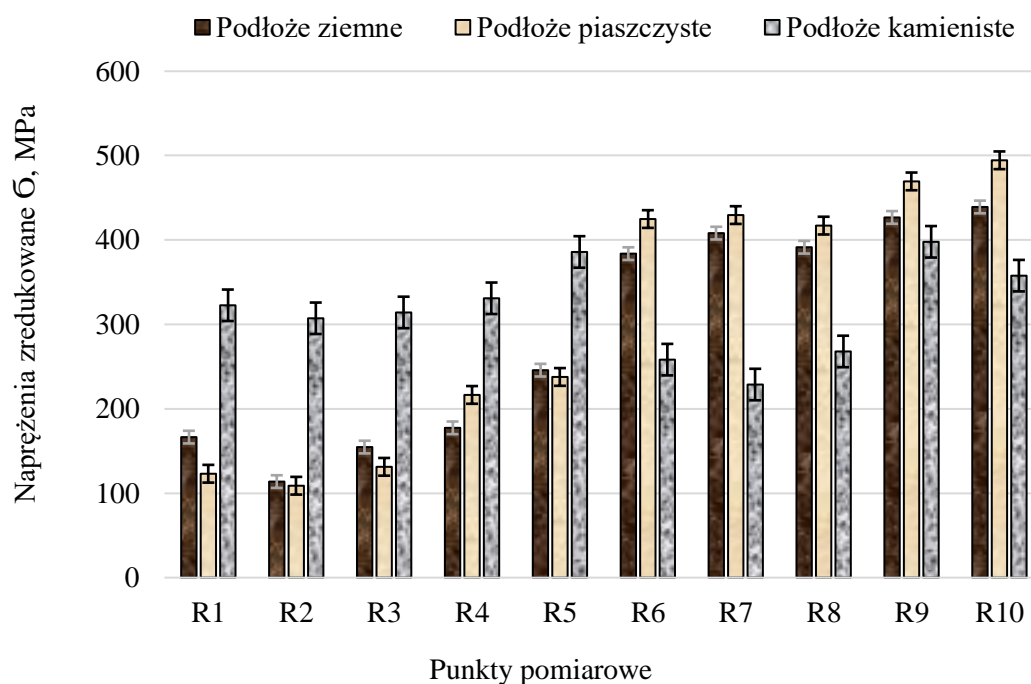


Rys. 7.2. Wartości rzeczywistych naprężeń zredukowanych dla poszczególnych punktów pomiarowych płyty oporowej i kątów podniesienia lufy mózdzierza, w zależności od zastosowanego podłoża stanowiącego grunt piaszczysty



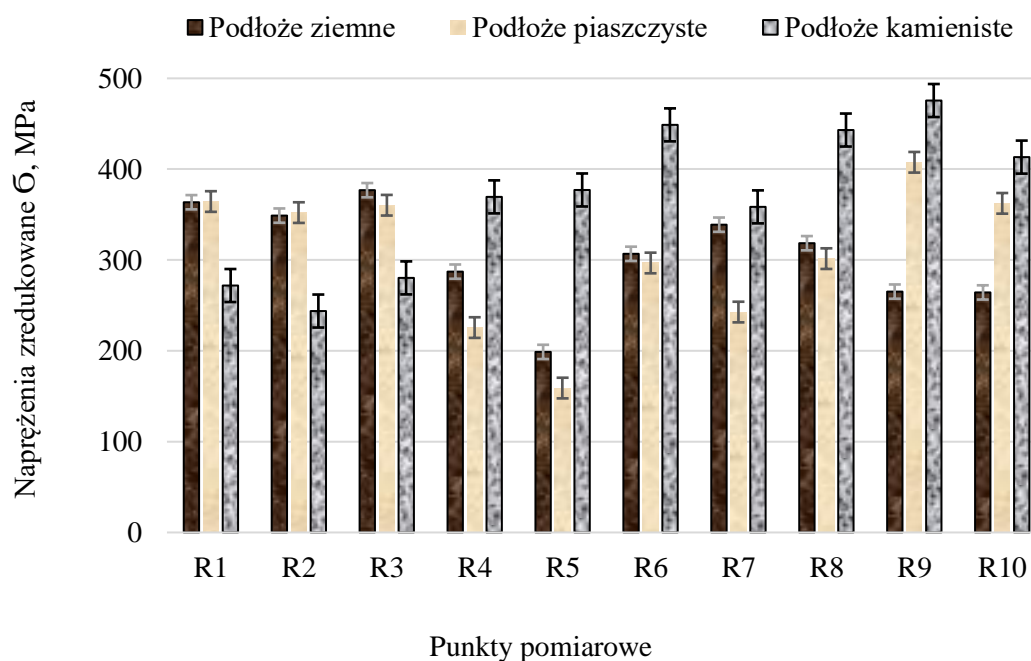
Rys. 7.3. Wartości rzeczywistych naprężeń zredukowanych dla poszczególnych punktów pomiarowych płyty oporowej i kątów podniesienia lufy mózdzierza, w zależności od zastosowanego podłoża stanowiącego grunt kamienisty

Kąt podniesienia lufy moździerza 45°



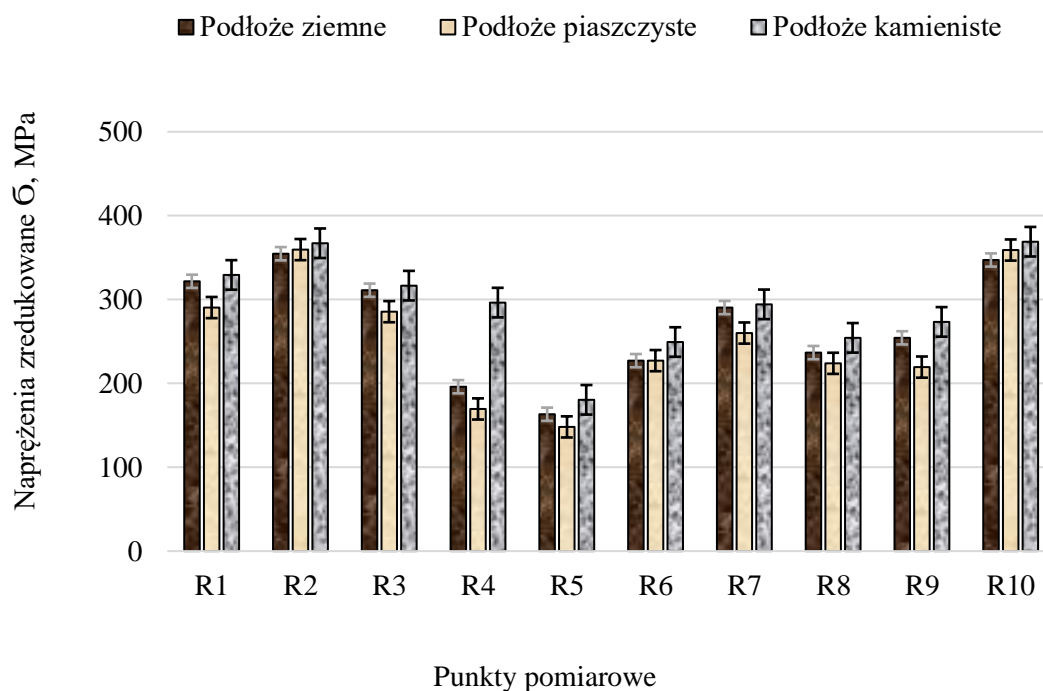
Rys. 7.4. Wartości rzeczywistych naprężeń zredukowanych dla poszczególnych punktów pomiarowych płyty oporowej i zastosowanych podłoży, w zależności od kąta poniesienia lufy moździerza wynoszącego 45°

Kąt podniesienia lufy moździerza 60°



Rys. 7.5. Wartości rzeczywistych naprężeń zredukowanych dla poszczególnych punktów pomiarowych płyty oporowej i zastosowanych podłoży, w zależności od kąta poniesienia lufy moździerza wynoszącego 60°

Kąt podniesienia lufy moździerza 75°

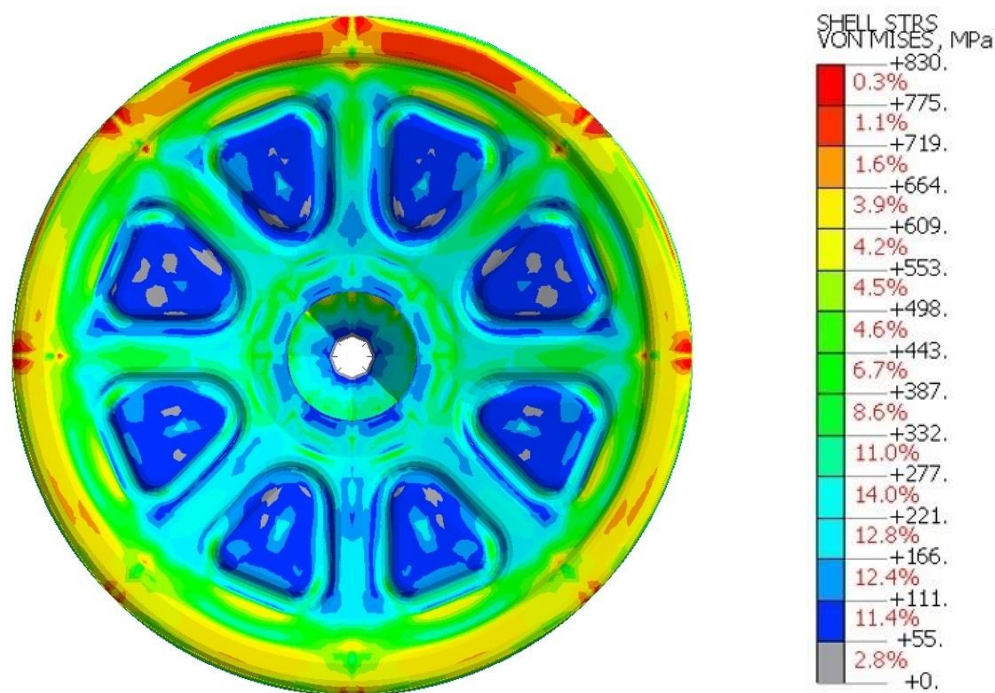


Rys. 7.6. Wartości rzeczywistych naprężeń zredukowanych dla poszczególnych punktów pomiarowych płyty oporowej i zastosowanych podłoży, w zależności od kąta podniesienia lufy moździerza wynoszącego 75°

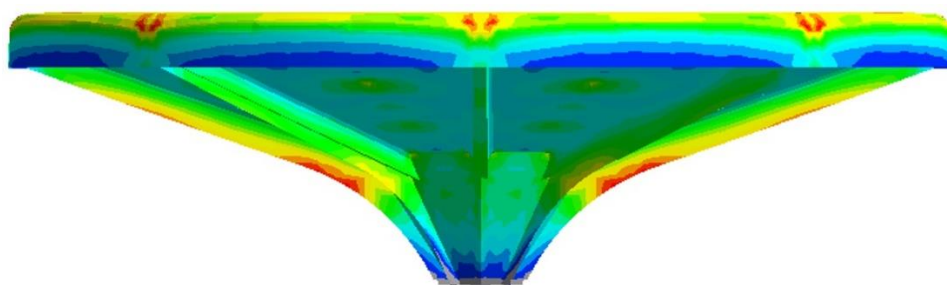
Na podstawie otrzymanych wyników, największe wartości naprężeń zredukowanych występujących na badanej płycie oporowej zaobserwowano dla strzałów oddanych z podłoża ziemnego oraz piaszczystego przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45°, jak również z podłoża kamienistego przy ostrzale prowadzonym pod kątem podniesienia równym 60°. Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych przekraczające 400 MPa były zlokalizowane w punktach pomiarowych, zachowujących większy dystans od środka płyty oporowej.

7.2. Wyniki z symulacji numerycznych MES

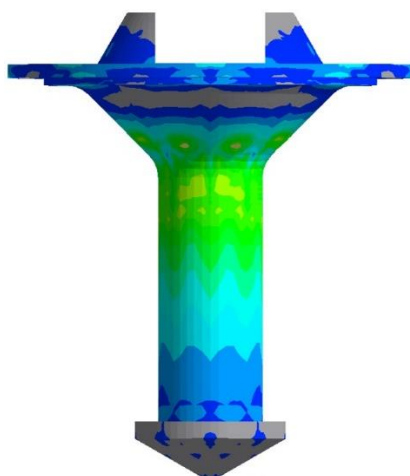
Analogicznie do warunków realizowanego ostrzału płyty oporowej – z podłoża ziemnego, piaszczystego i kamienistego oraz pod kątem podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45°, 60° i 75°, przeprowadzono analizy numeryczne na modelu obliczeniowym płyty oporowej przy zastosowaniu metody elementów skończonych. Na rysunkach 7.2.1 – 7.2.27 przedstawiono poszczególne wyniki analiz w zależności od zastosowanych konfiguracji podłoża i kąta podniesienia.



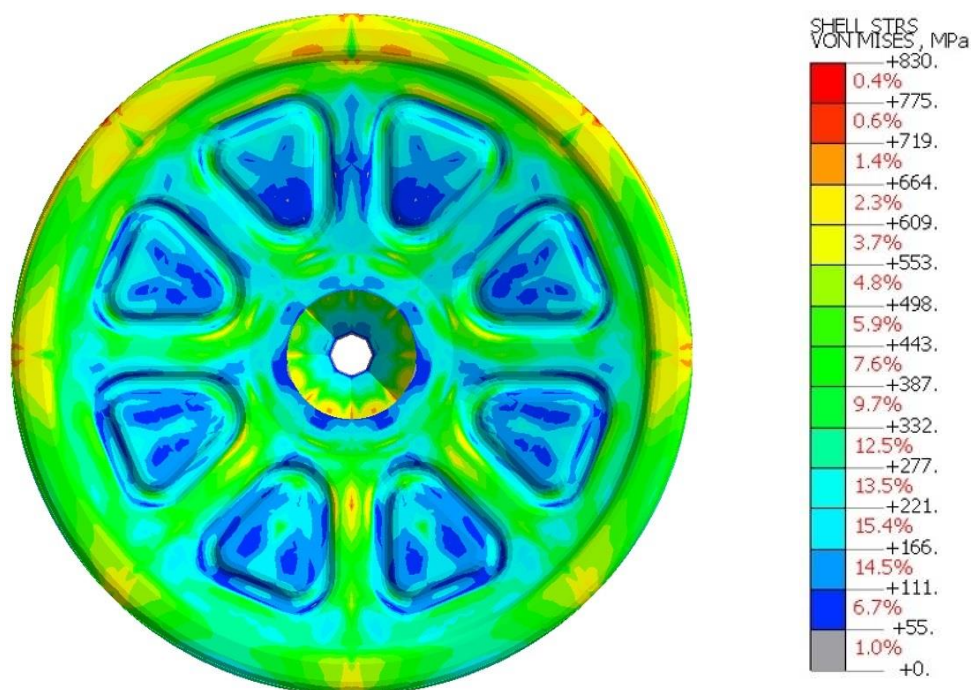
Rys. 7.2.1. Naprężenia występujące na płycie oporowej podczas dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° - widok z góry (z wierzchu płyty)



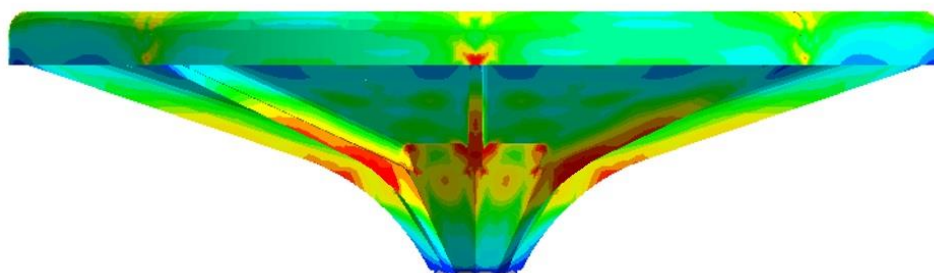
Rys. 7.2.2. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° - widok od boku



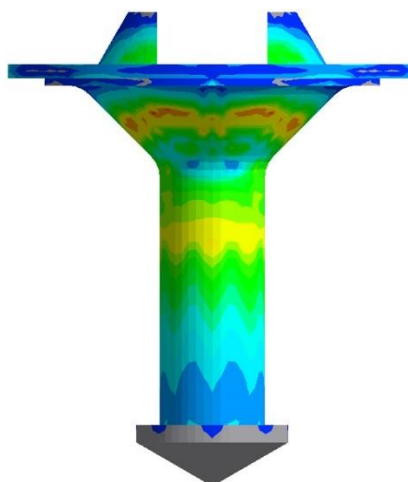
Rys. 7.2.3. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° - widok od boku



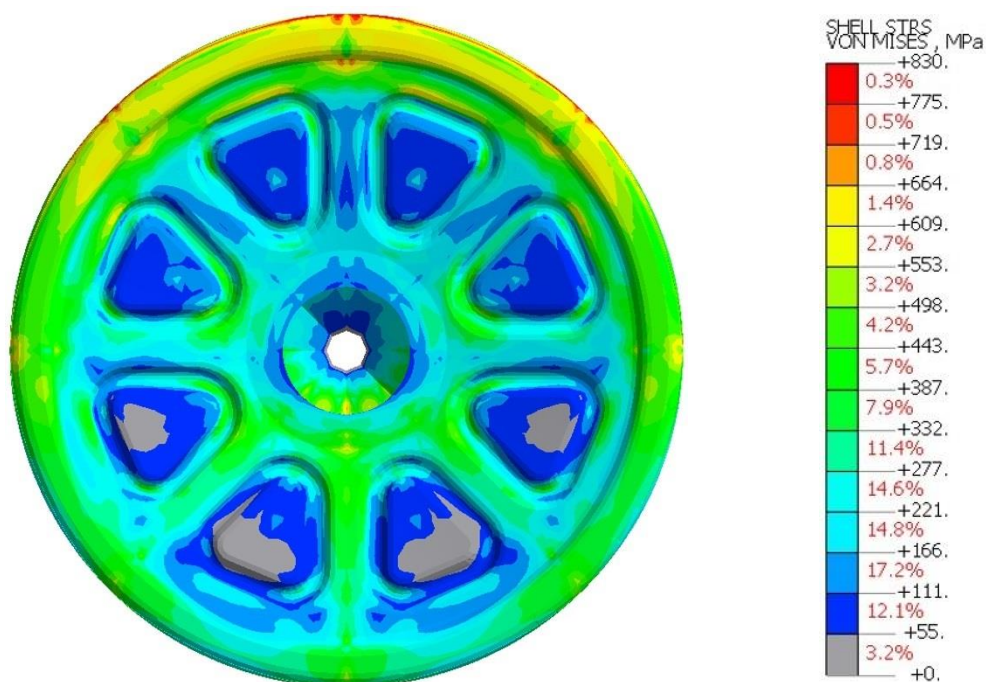
Rys. 7.2.4. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok z góry (z wierzchu płyty)



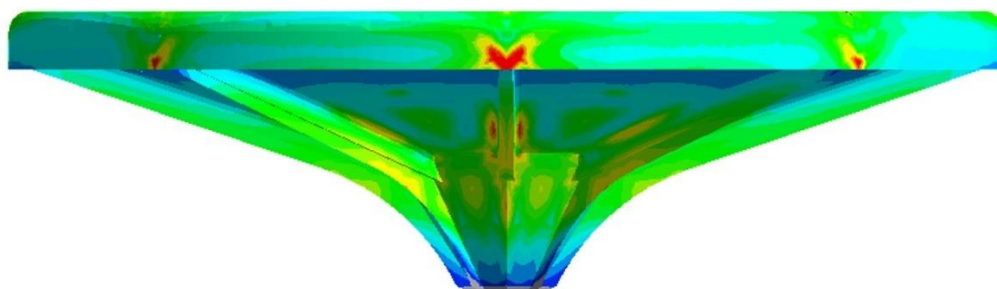
Rys. 7.2.5. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok od boku



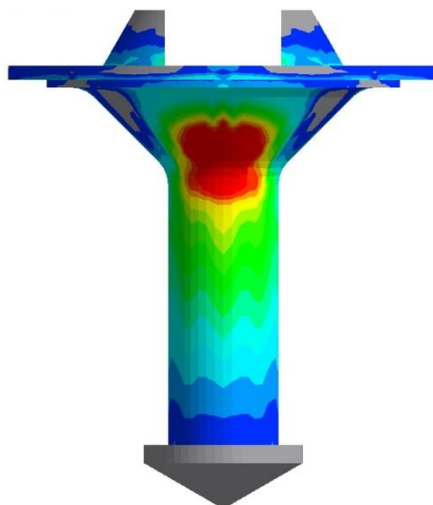
Rys. 7.2.6. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok od boku



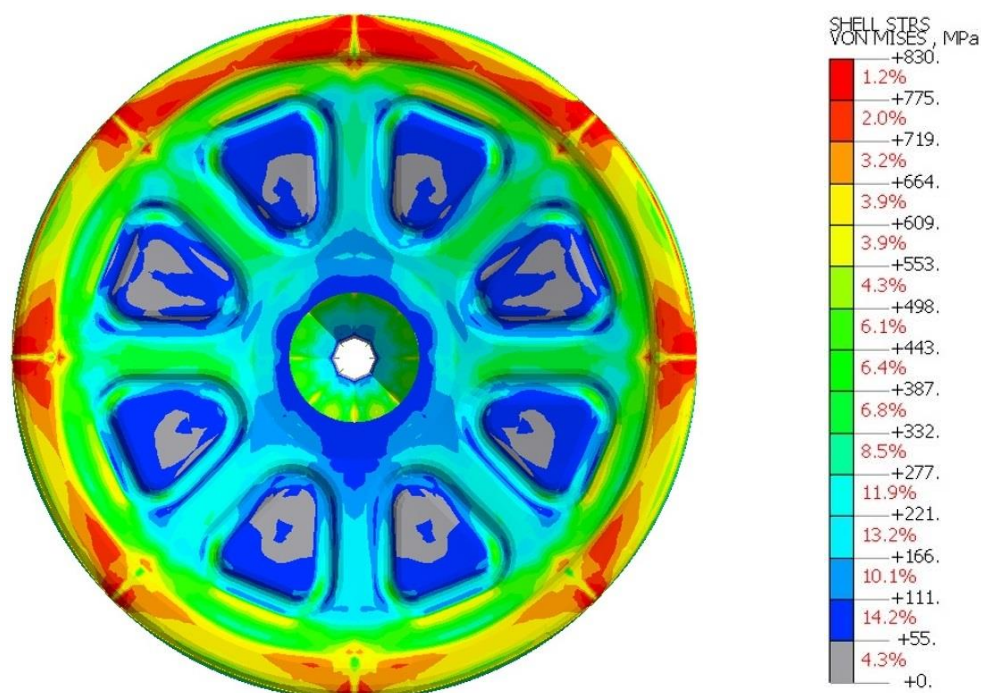
Rys. 7.2.7. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok z góry (z wierzchu płyty)



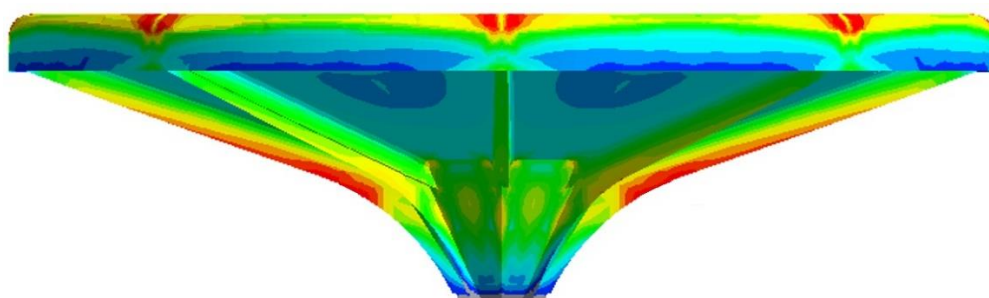
Rys. 7.2.8. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok od boku



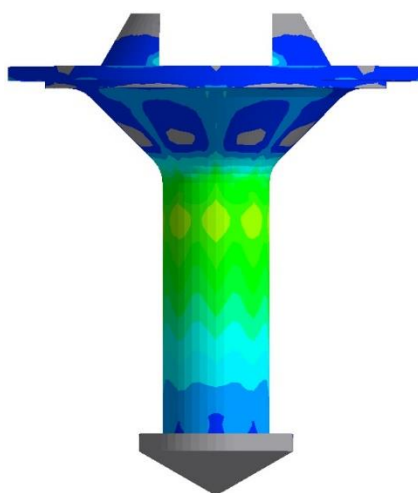
Rys. 7.2.9. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża ziemnego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok od boku



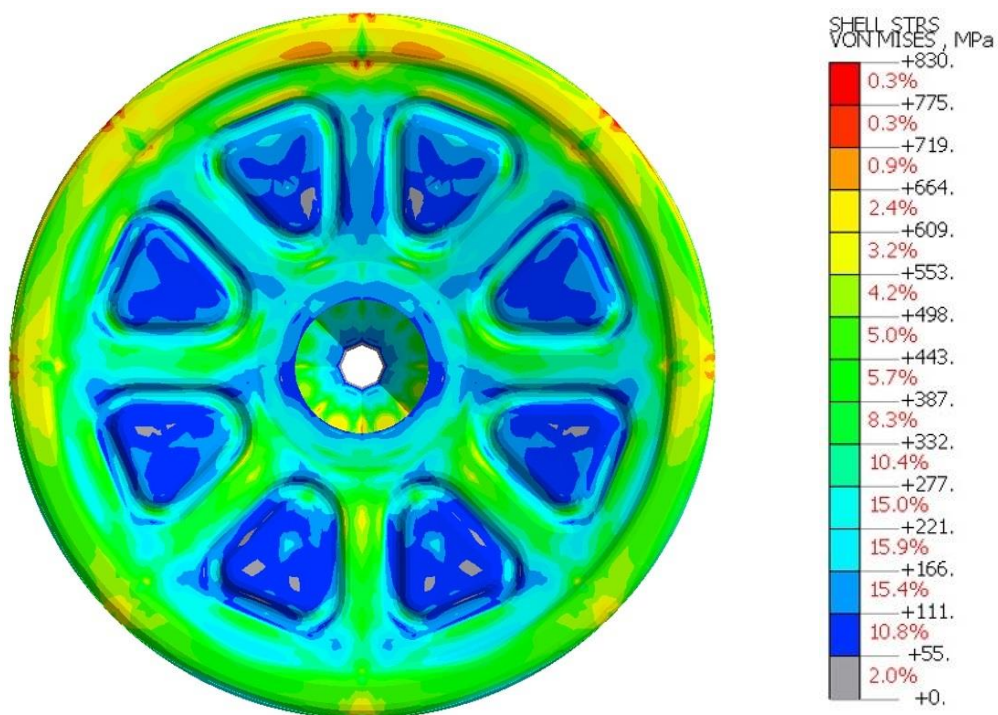
Rys. 7.2.10. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° - widok z góry (z wierzchu płyty)



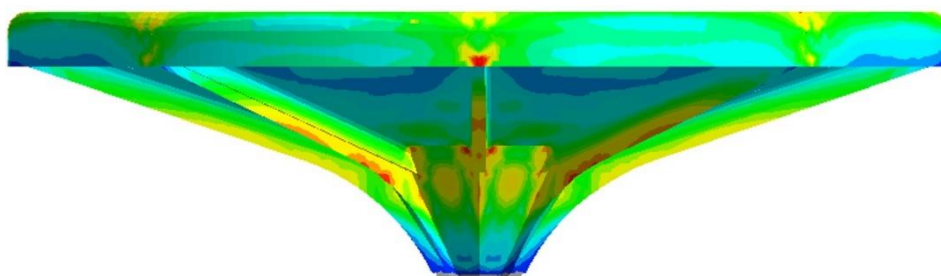
Rys. 7.2.11. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° - widok od boku



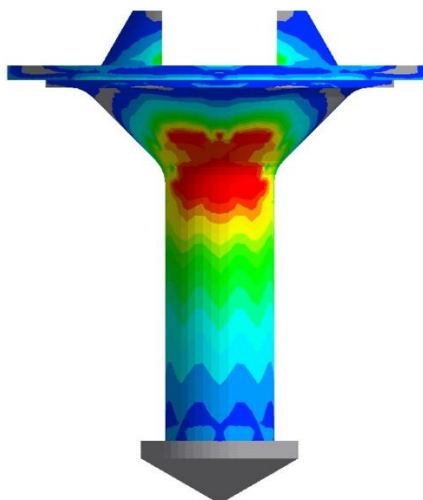
Rys. 7.2.12. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° - widok od boku



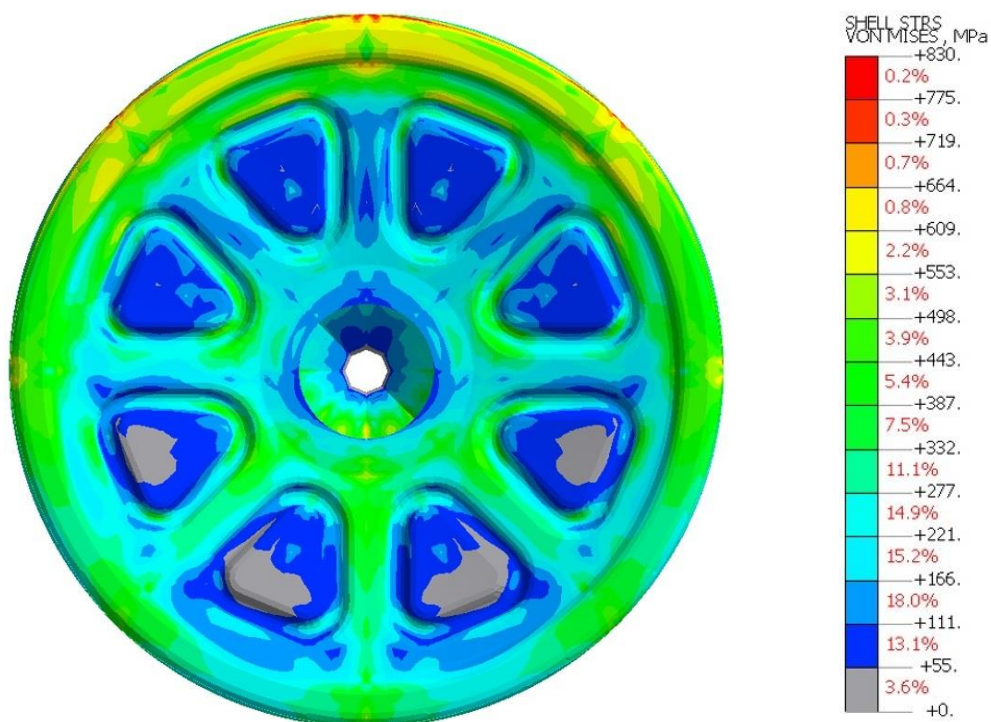
Rys. 7.2.13. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok z góry (z wierzchu płyty)



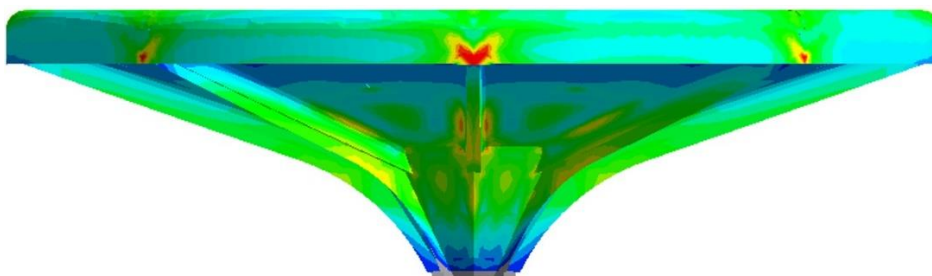
Rys. 7.2.14. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok od boku



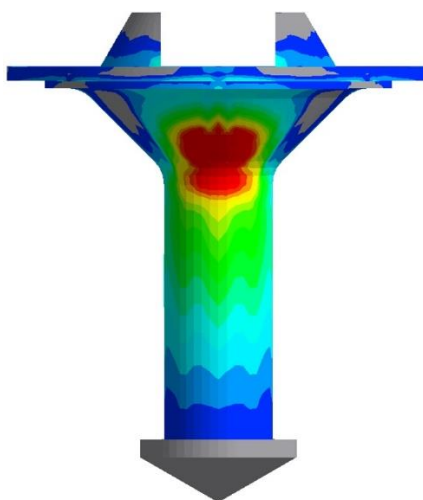
Rys. 7.2.15. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok od boku



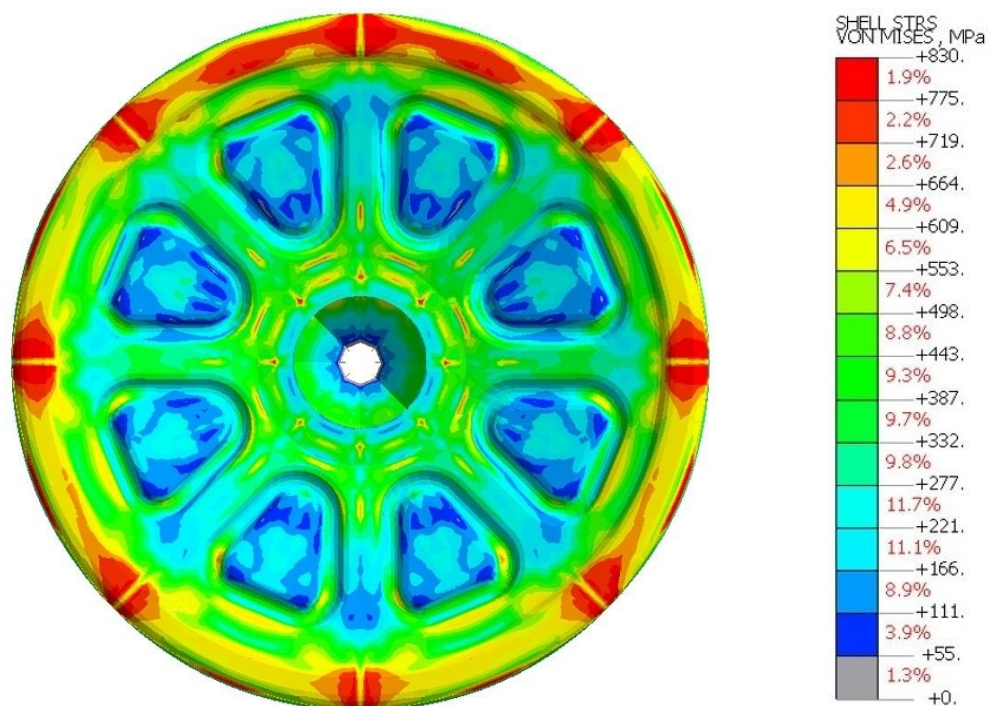
Rys. 7.2.16. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok z góry (z wierzchu płyty)



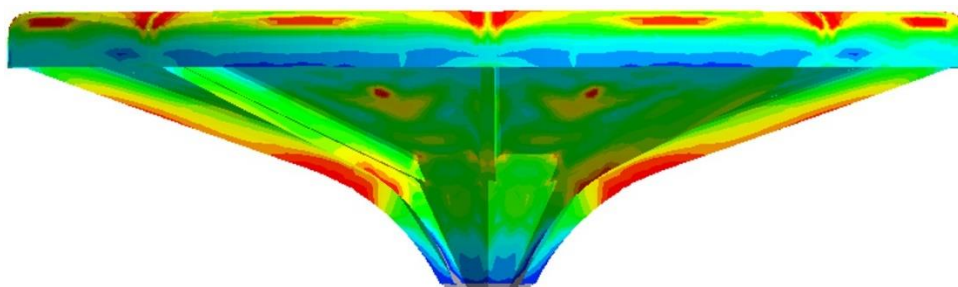
Rys. 7.2.17. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok od boku



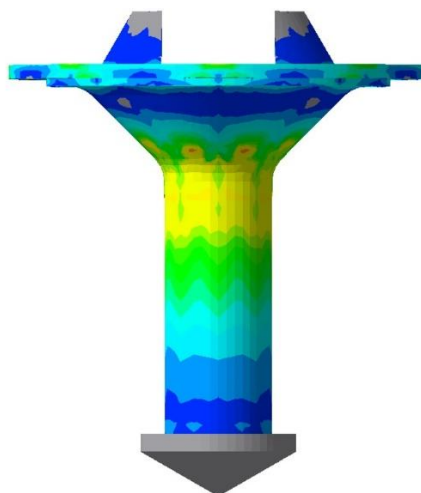
Rys. 7.2.18. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża piaszczystego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok od boku



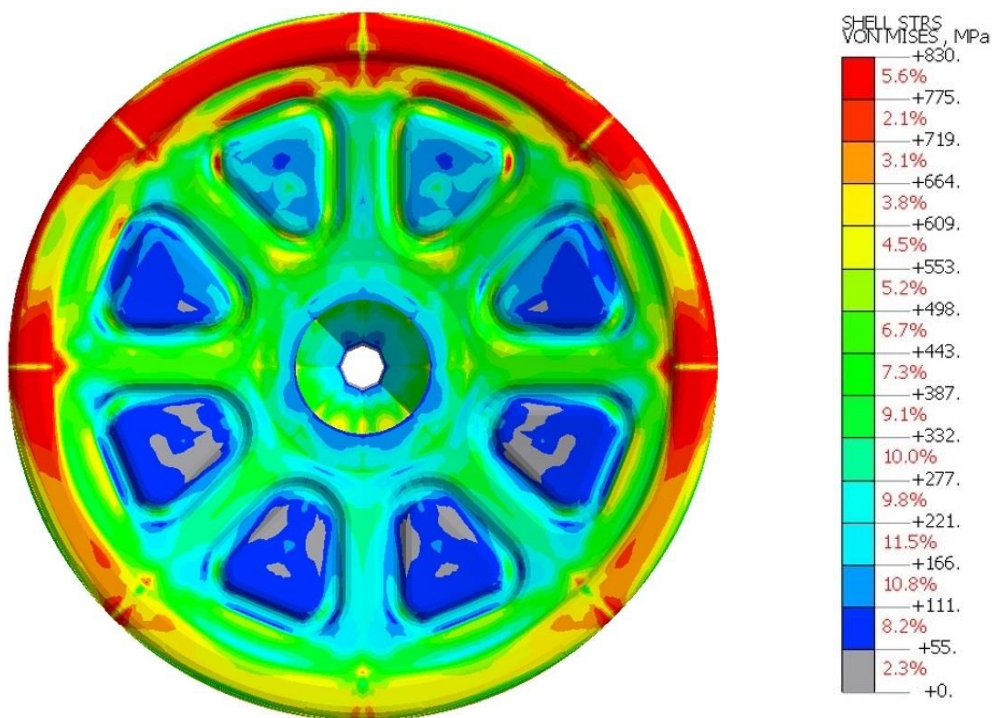
Rys. 7.2.19. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerzowej wynoszącym 45° - widok z góry (z wierzchu płyty)



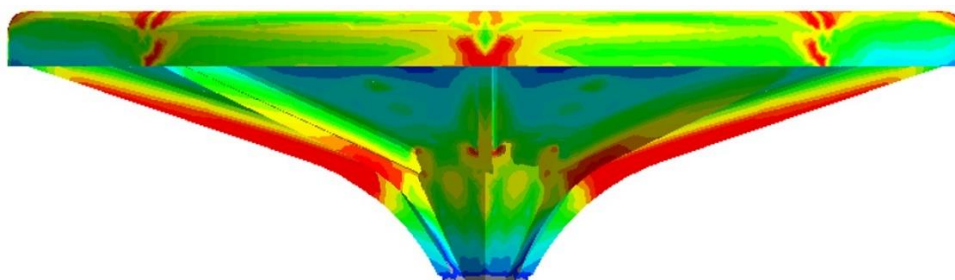
Rys. 7.2.20. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerzowej wynoszącym 45° - widok od boku



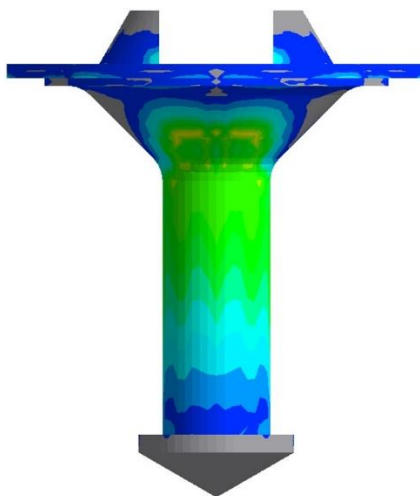
Rys. 7.2.21. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerzowej wynoszącym 45° - widok od boku



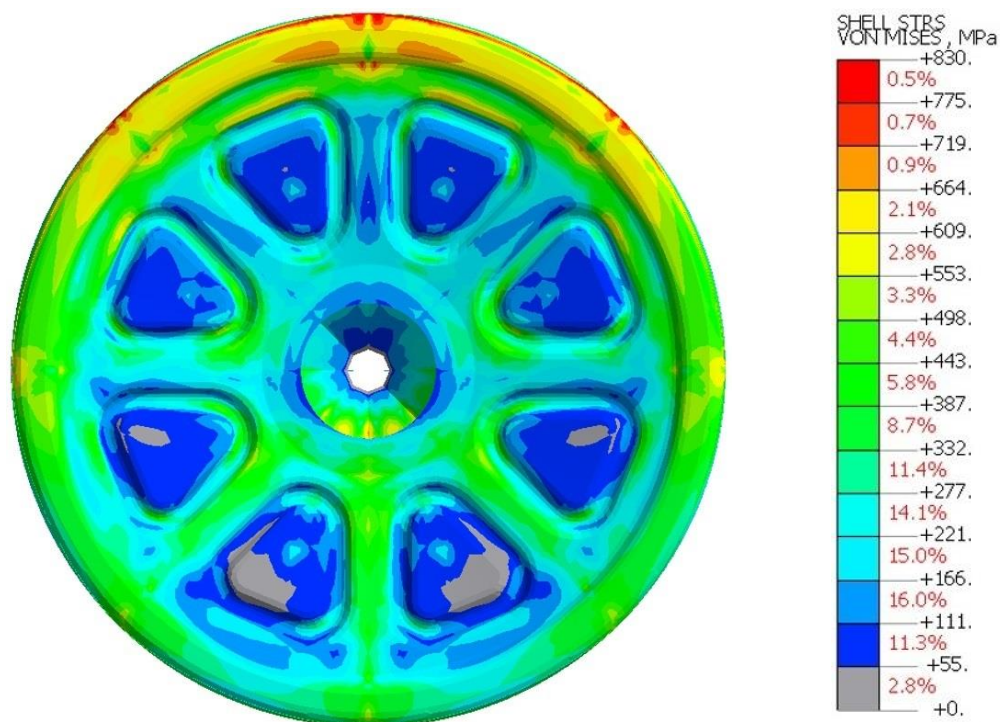
Rys. 7.2.22. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok z góry (z wierzchu płyty)



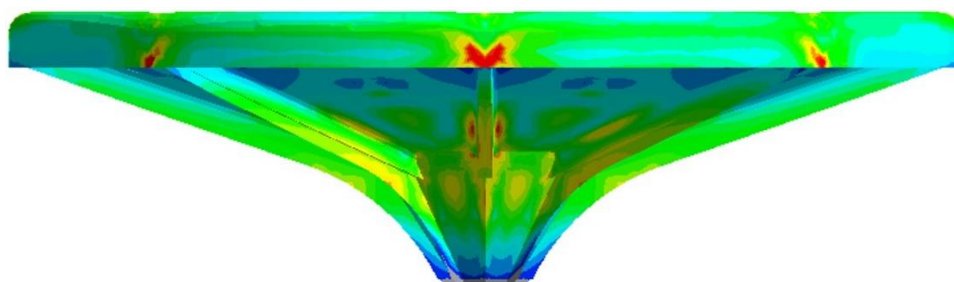
Rys. 7.2.23. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok od boku



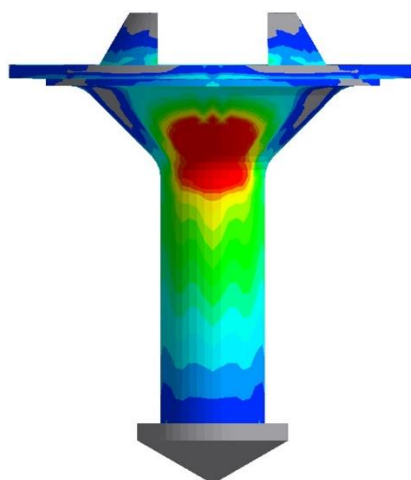
Rys. 7.2.24. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° - widok od boku



Rys. 7.2.25. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok z góry (z wierzchu płyty)



Rys. 7.2.26. Naprężenia występujące na płycie oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok od boku



Rys. 7.2.27. Naprężenia występujące na trzpieniu wewnętrznym płyty oporowej dla strzału z podłoża kamienistego, przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° - widok od boku

W oparciu o przeprowadzone symulacje numeryczne MES zaobserwowano znaczne spiętrzanie się naprężeń po zewnętrznym obrysie płyty oporowej. W wielu przypadkach największe wartości występowały w górnej części płyty. Było to spowodowane jej pozycją podczas ostrzału, uwzględnioną w warunkach brzegowych oraz skrzyniową konstrukcją, mogącą utrudniać tłumienie drgań w obszarze słabszego podparcia [155]. W zależności od rodzaju zastosowanego podłoża, w zróżnicowanym stopniu wyťažone były poszczególne obszary płyty. Przy ostrzale z podłoża ziemnego oraz piaszczystego większe obciążenia przejmowały pokrywy międzyżebrowe, natomiast w przypadku podłoża kamienistego bardziej obciążone były żebra.

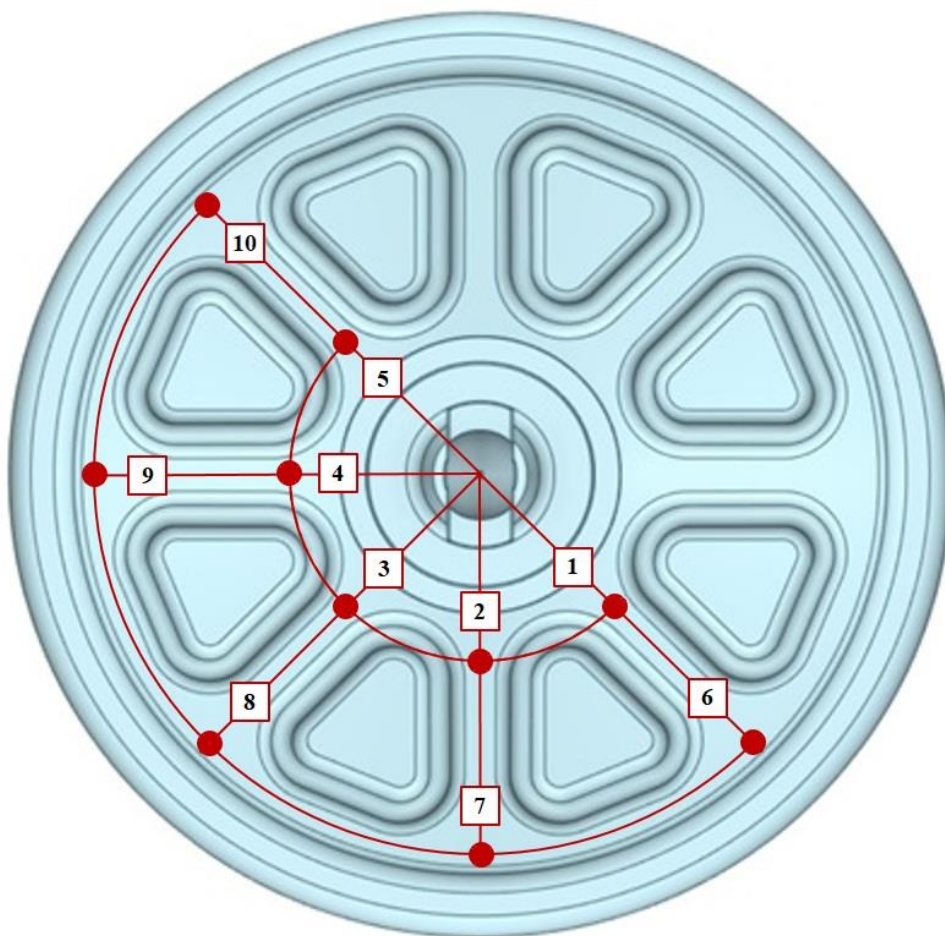
7.3. Analiza wyników symulacji numerycznych MES w odniesieniu do pomiarów tensometrycznych

Mając na uwadze możliwości pomiarowe opracowanego toru do rejestracji sygnałów, (uwzględniającego maksymalną, dostępną ilość kanałów z dwóch użytych wzmacniaczy HBM MX1615B) do pomiarów odkształceń płyty zastosowano 10 rozet tensometrycznych o kierunkach głównych 0° , 45° i 90° . Schematyczną lokalizację punktów pomiarowych w symulacjach MES, stanowiących miejsca przyklejenia rozet tensometrycznych na płycie oporowej podczas ostrzału w warunkach poligonowych, przedstawiono na rysunku 7.3.1.

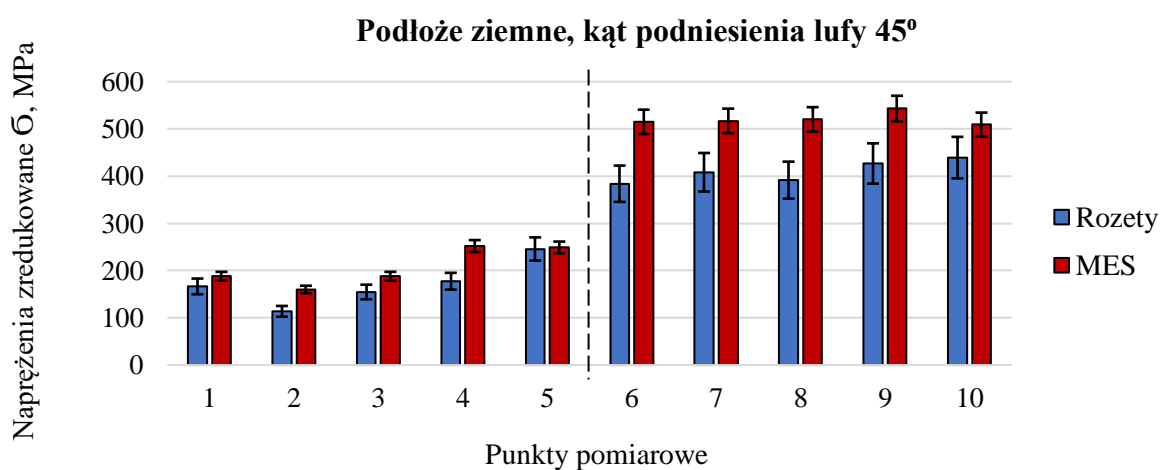
Zgodnie z zamieszczonym schematem rozety rozmieszczono obwodowo, względem dwóch okręgów, na wysokości żeber. Punkty pomiarowe nr 1 i nr 3 oraz nr 6 i nr 8 zdublowano w celu weryfikacji założenia przyjętego po wstępnych badaniach poligonowych, dotyczącego symetrycznego odbierania obciążeń przez płytę oporową w płaszczyźnie wertykalnej.

Przeprowadzone symulacje numeryczne MES uwzględniały warunki brzegowe i iteracje sztywności podłoża w zdefiniowanych punktach pomiarowych przy jednoczesnym zachowaniu zbieżności wyników w odniesieniu do pomiarów rzeczywistych. Porównywanymi wartościami były naprężenia zredukowane uzyskane z symulacji MES oraz z pomiaru rozetami przy eksploatacji płyty oporowej w różnych warunkach ostrzału.

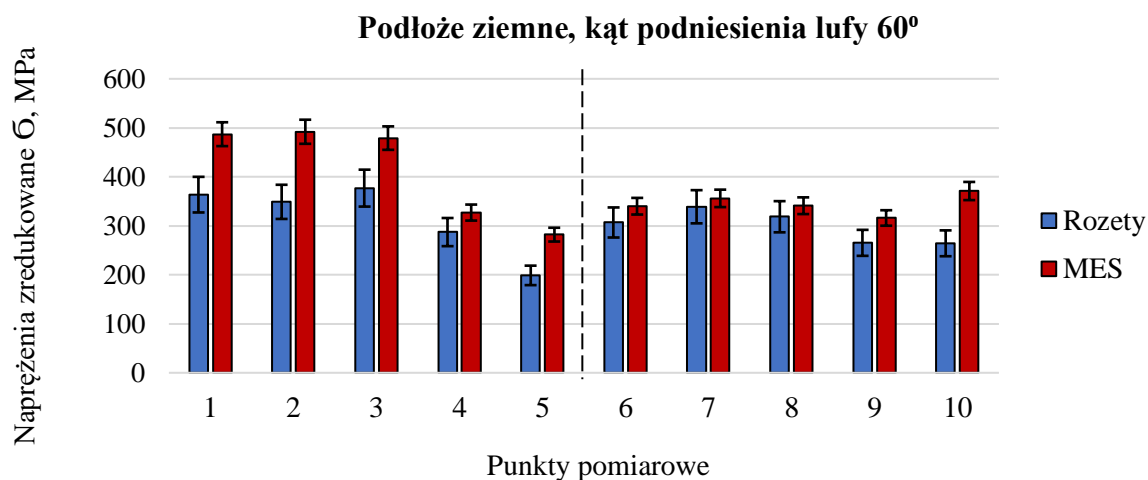
Na rysunkach 7.3.2 ÷ 7.3.10 przedstawiono otrzymane wyniki w formie wykresów w zależności od zastosowanego podłoża i kąta podniesienia lufy moździerza.



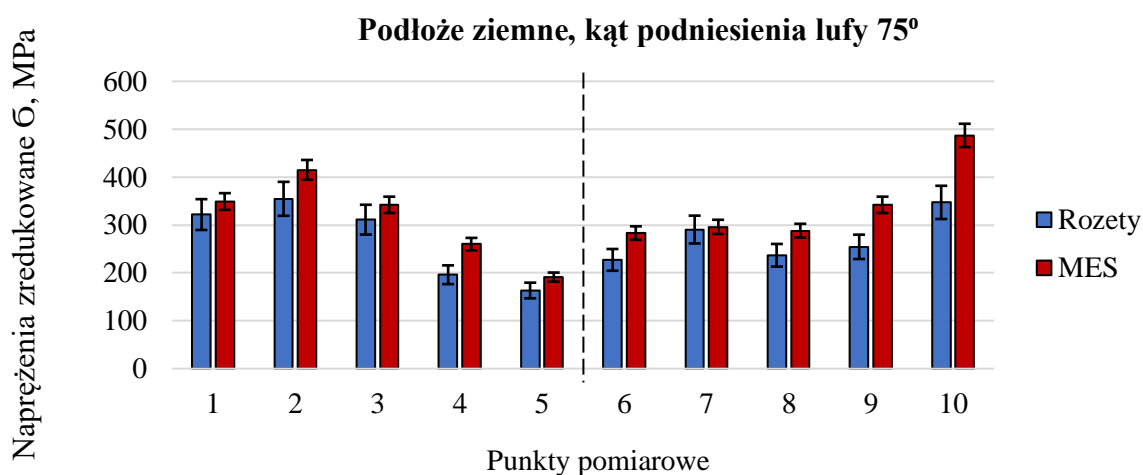
Rys. 7.3.1. Lokalizacja punktów pomiarowych MES, stanowiących miejsca przyklejenia rozet podczas ostrzału płyty oporowej w warunkach poligonowych



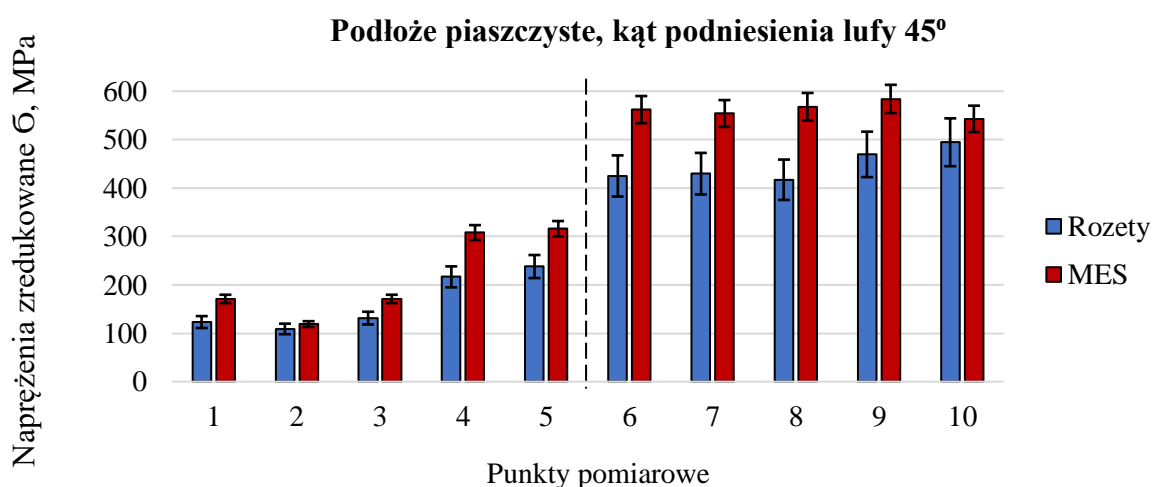
Rys. 7.3.2. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża ziemnego dla kąta podniesienia lufy 45°



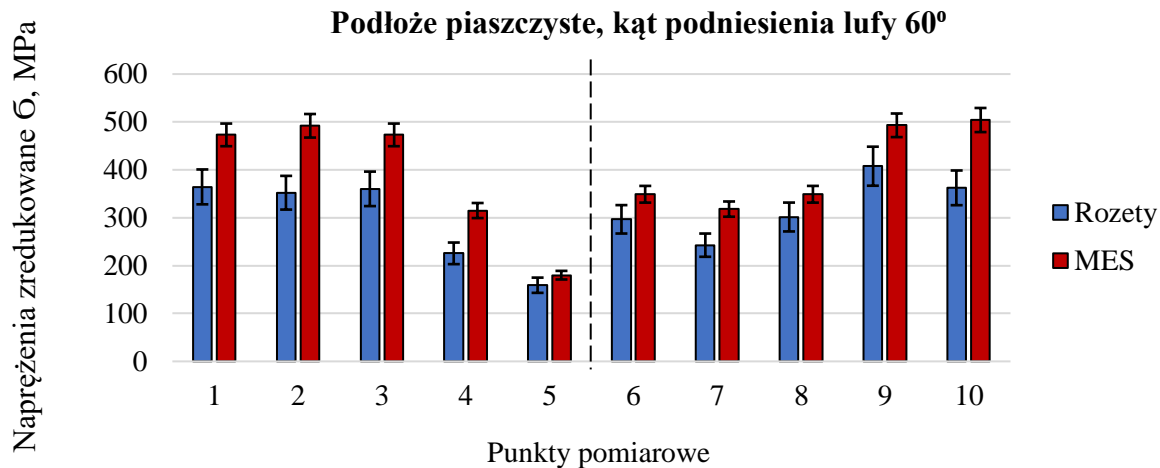
Rys. 7.3.3. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża ziemnego dla kąta podniesienia lufy 60°



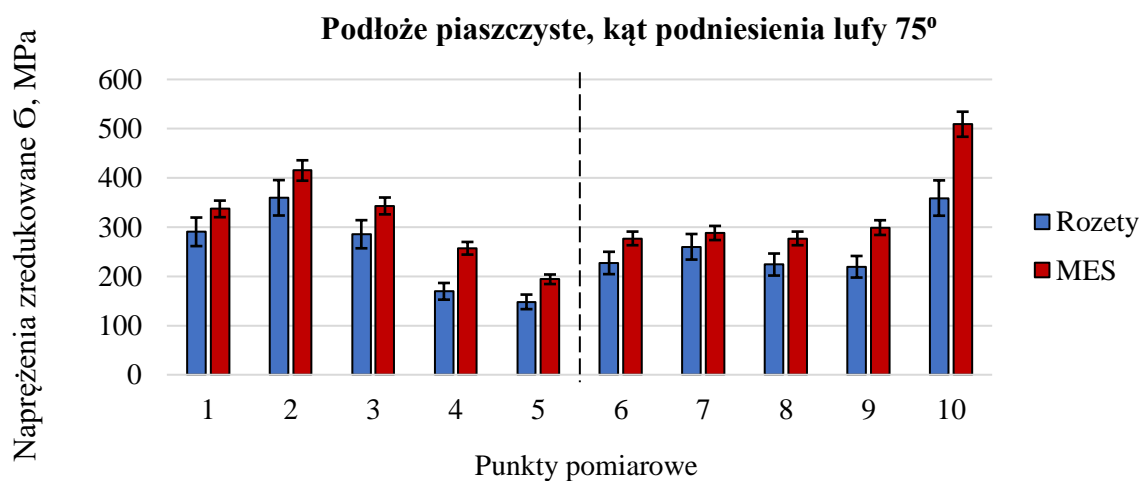
Rys. 7.3.4. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża ziemnego dla kąta podniesienia lufy 75°



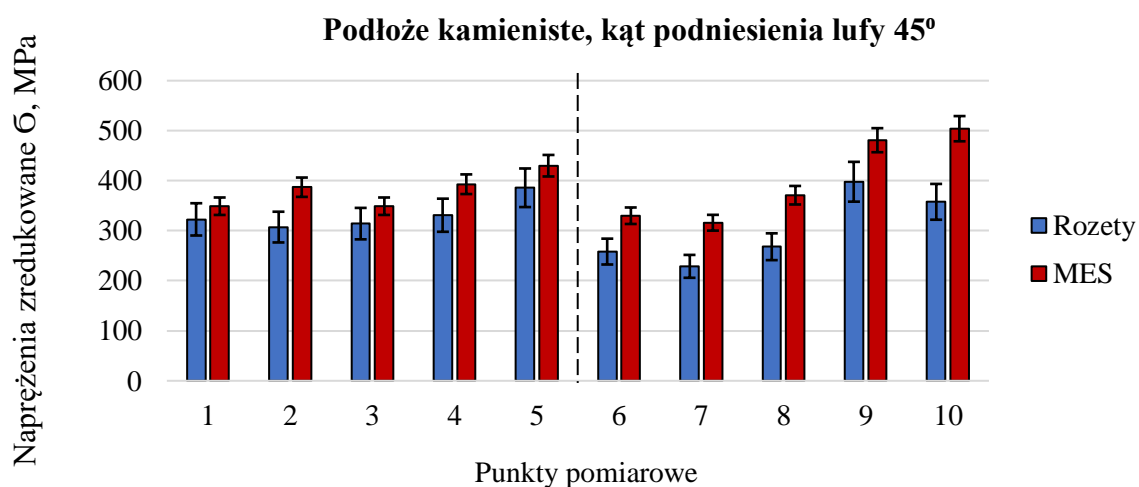
Rys. 7.3.5. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża piaszczystego dla kąta podniesienia lufy 45°



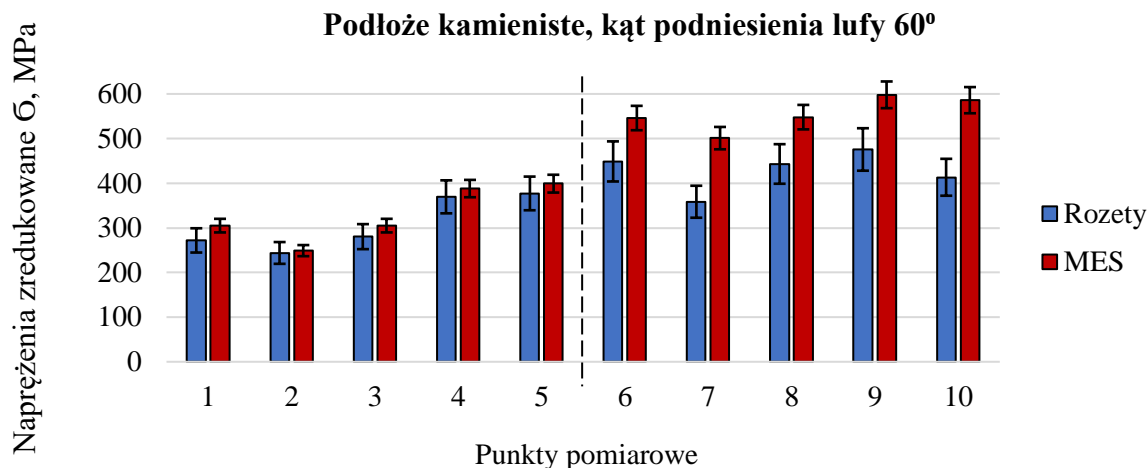
Rys. 7.3.6. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża piaszczystego dla kąta podniesienia lufy 60°



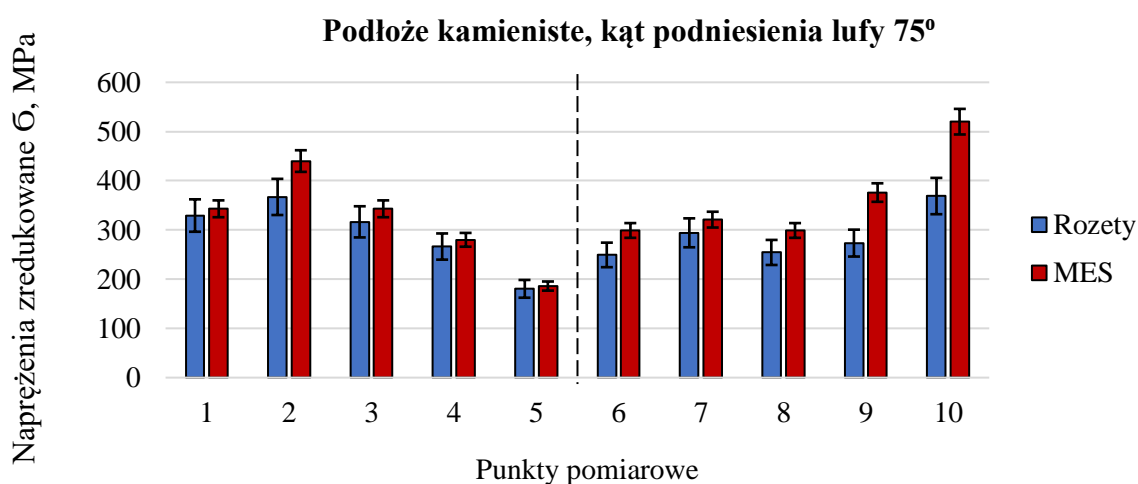
Rys. 7.3.7. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża piaszczystego dla kąta podniesienia lufy 75°



Rys. 7.3.8. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża kamienistego dla kąta podniesienia lufy 45°



Rys. 7.3.9. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża kamienistego dla kąta podniesienia lufy 60°



Rys. 7.3.10. Porównanie wyników z symulacji MES w odniesieniu do pomiarów rozetami przy ostrzale z podłoża kamienistego dla kąta podniesienia lufy 75°

Układ rozmieszczenia poszczególnych punktów pomiarowych, podzielił płytę na dwa obszary. Zgodnie z tym podziałem punkty 1, 2, 3, 4 i 5, należały do obszaru płyty zlokalizowanego bliżej trzpienia lufy mózdzierza, a punkty 6, 7, 8, 9 i 10, będące ich osiowymi odpowiednikami, należały do obszaru znajdującego się przed kołnierzem płyty oporowej.

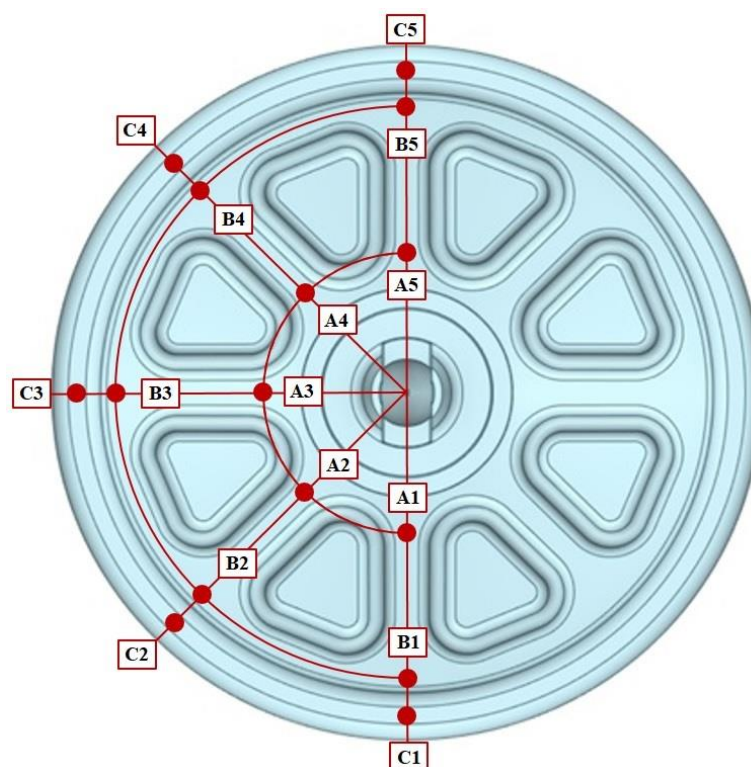
Celem prowadzonych prac było uzyskanie jak największej zbieżności wyników naprężeń w rozpatrywanych punktach pomiarowych modelu numerycznego płyty oporowej, w porównaniu do zmierzonych wartości rzeczywistych podczas ostrzału płyty. Dla zastosowanych warunków pracy płyty oporowej, obejmujących różne podłoża i kąty podniesienia lufy mózdzierza uzyskano zbieżność wyników naprężeń dla poszczególnych konfiguracji zawierającą się w przedziale 72 ÷ 97 %. Uwzględniając znaczną ilość zmiennych takich jak: sztywność gruntów, sposób podparcia płyty, kąt podniesienia lufy mózdzierza

i powierzchnię kontaktu płyty z podłożem, można uznać, że otrzymany poziom korelacji określa dokładne dopracowanie procesów symulacyjnych. Wobec uzyskanego, wysokiego poziomu zbieżności wyników można uznać, że rozkłady naprężeń otrzymane z wyników symulacji pokrywają się z naprężeniami rzeczywistymi, a co za tym idzie w poprawny sposób odzwierciedlają charakter pracy płyty oraz najbardziej wyężone elementy w zależności od analizowanego przypadku.

Zastosowanie po trzech strzałach dla każdej konfiguracji zmiennych, przyniosło korzyści podczas prac projektowych. Umożliwiło uzyskanie najlepszego odzwierciedlenia sposobu podparcia płyty na podstawie powtarzalności strzałów z danej serii, w celu osiągnięcia jak najwyższej zbieżności wyników. Mając na uwadze liczne zmienne występujące podczas badań strzelaniem, jak również w trakcie prac projektowych na modelu numerycznym, osiągnięcie zbieżności wyników na poziomie 100 % okazało się niemożliwe.

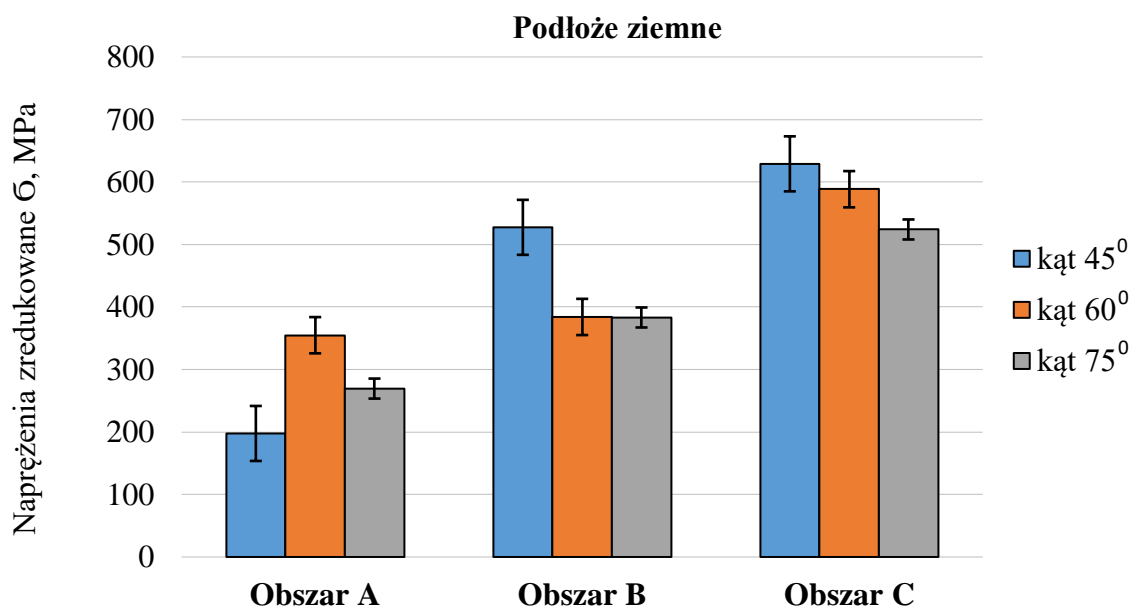
7.4. Analiza wyników symulacji numerycznych MES

Zastosowanie zmiennych warunków ostrzału obejmujących różne rodzaje podłoża i kąty podniesienia lufy moździerza umożliwiły zbudowanie bazy danych, która posłużyła do zamodelowania warunków brzegowych podczas symulacji numerycznych MES. Przyjęty układ rozmieszczenia rozet tensometrycznych potwierdził symetryczny rozkład naprężeń względem osi pionowej płyty. Umożliwiło to rozpatrywanie uzyskanych wyników symulacji na połowie płyty oporowej, co schematycznie przedstawiono na rysunku 7.4.1. Modyfikacja istniejącego układu, związana z naniesieniem dodatkowych punktów pomiarowych była następstwem wyników uzyskanych z symulacji MES. Przeprowadzone symulacje numeryczne wykazały znaczne wartości naprężeń po zewnętrznym obrysie płyty oporowej. Aby właściwie interpretować pracę płyty oporowej w czasie strzału, rozkład naprężeń należy analizować globalnie, na całej jej powierzchni równocześnie. Dlatego też rozpatrywany model obliczeniowy płyty oporowej podzielono na trzy obszary A, B i C, stanowiące półokręgi.

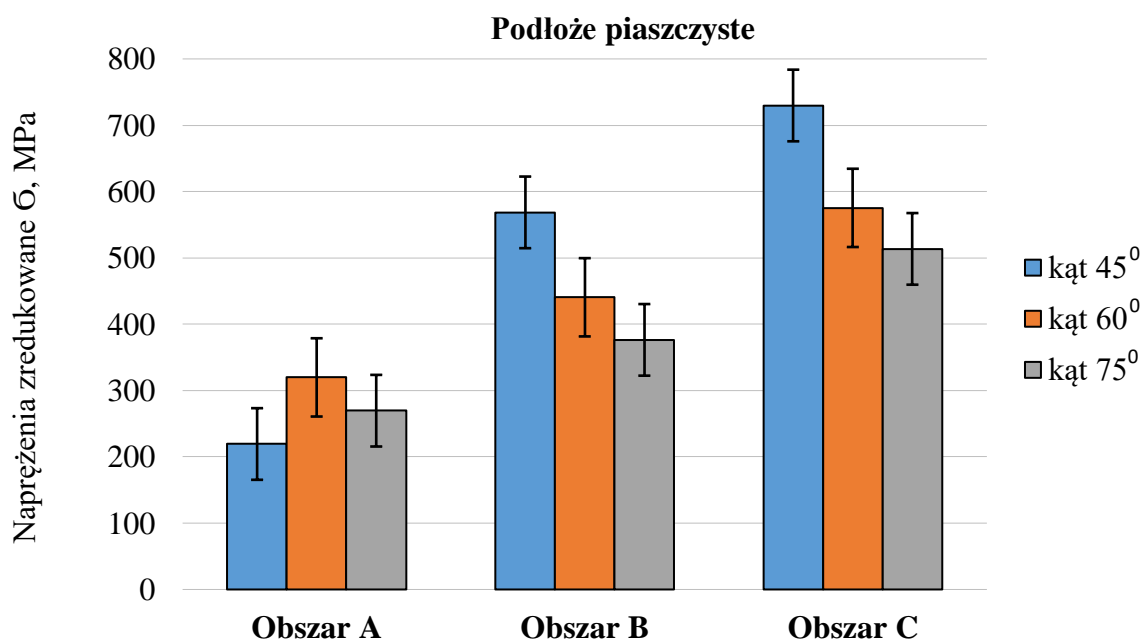


Rys. 7.4.1. Lokalizacja punktów pomiarowych w układzie wertykalnym numerycznego modelu płyty oporowej mózdzierza z uwzględnieniem obszarów A, B i C

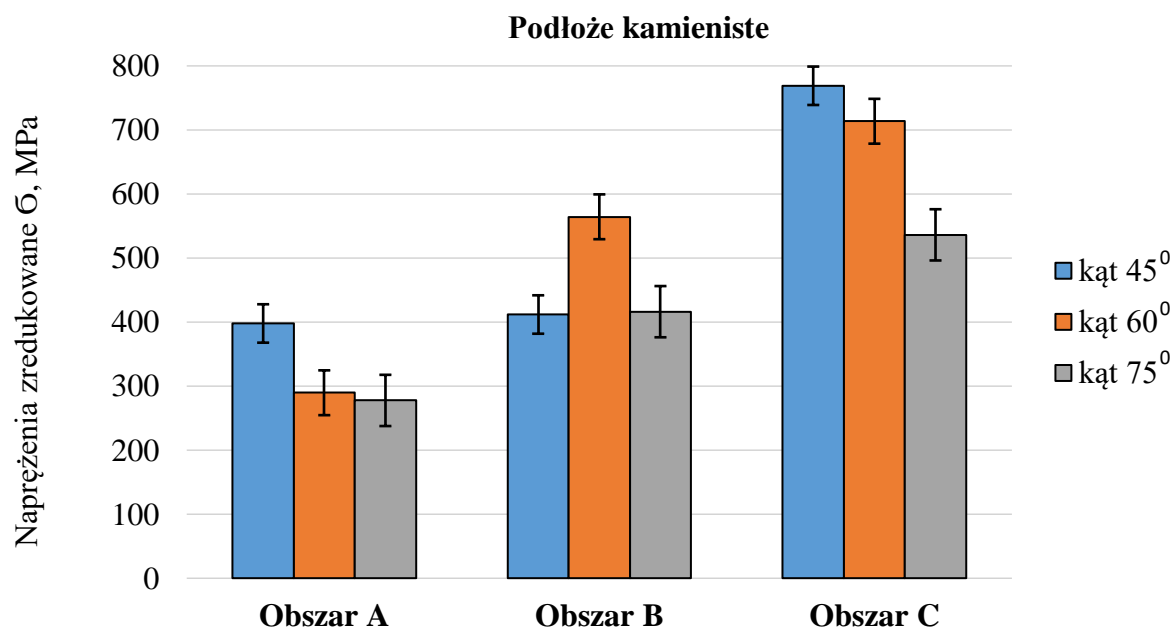
Uwzględniając wartości naprężeń w punktach pomiarowych z obszarów modelu płyty oporowej, zdefiniowanych zgodnie z rysunkiem 7.4.1. dokonano zestawienia wyników symulacji numerycznych w zależności od zastosowanego podłoża oraz kąta podniesienia lufy mózdzierza. W celu przedstawienia różnic w odbieraniu obciążeń przez rozpatrywane obszary modelu numerycznego płyty oporowej – A, B i C, dokonano obliczeń średnich wartości naprężeń z poszczególnych punktów należących do danego obszaru. Osobno dla każdej konfiguracji zmiennych tj. podłoża ziemnego, piaszczystego i kamienistego oraz kąta podniesienia lufy wynoszącego 45° , 60° i 75° dokonano porównania obszarów płyty oporowej: A – zlokalizowanego najbliżej trzpienia lufy mózdzierza, B – przed kołnierzem płyty oraz C – na kołnierzu stanowiącym zewnętrzny obrys płyty. Na rysunkach 7.4.2 ÷ 7.4.7, w formie wykresów słupkowych, przedstawiono uzyskane wyniki naprężeń dla poszczególnych obszarów.



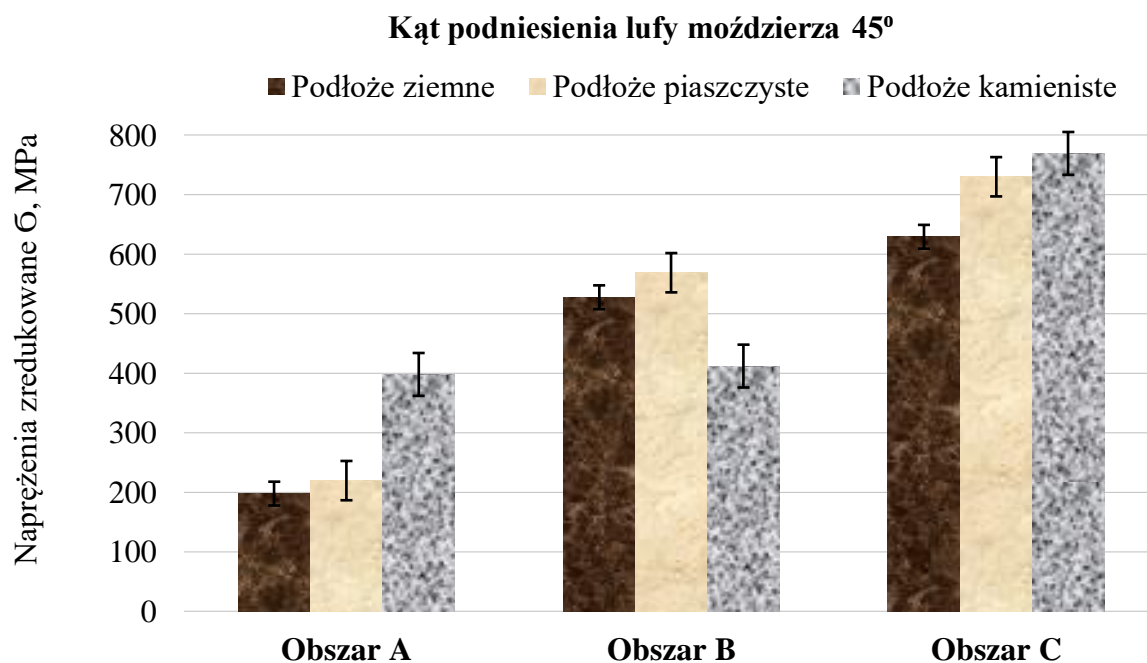
Rys. 7.4.2. Naprężenia poszczególnych obszarów numerycznego modelu płyty oporowej na podłożu ziemnym w zależności od kąta podniesienia lufy moździerza



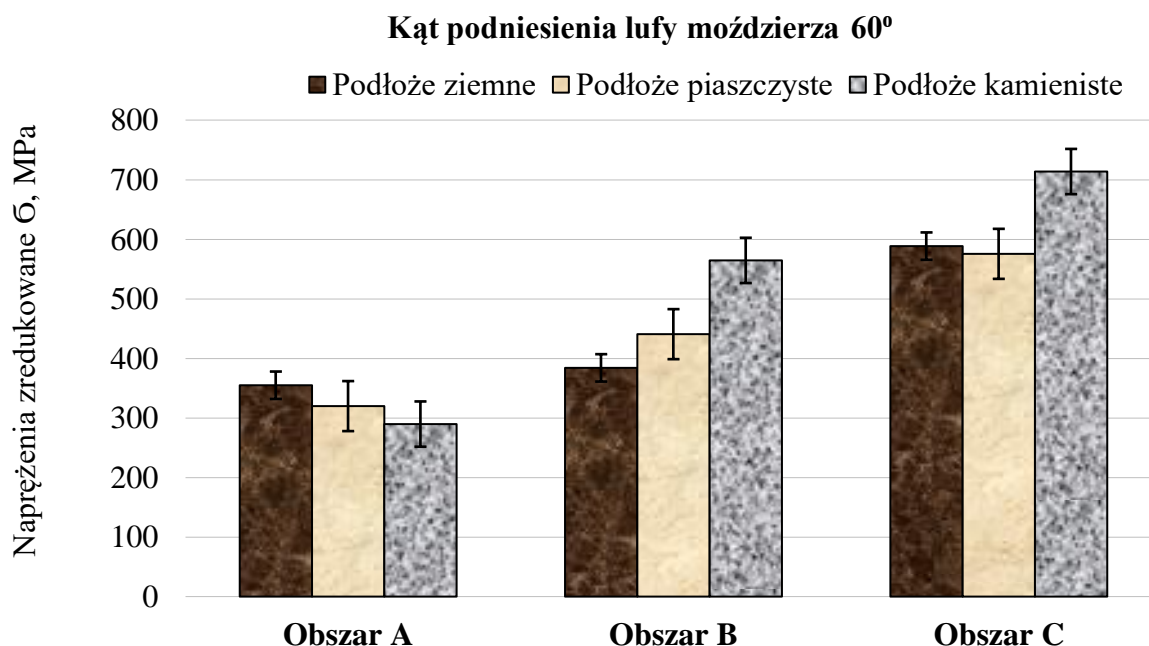
Rys. 7.4.3. Naprężenia poszczególnych obszarów numerycznego modelu płyty oporowej na podłożu piaszczystym w zależności od kąta podniesienia lufy moździerza



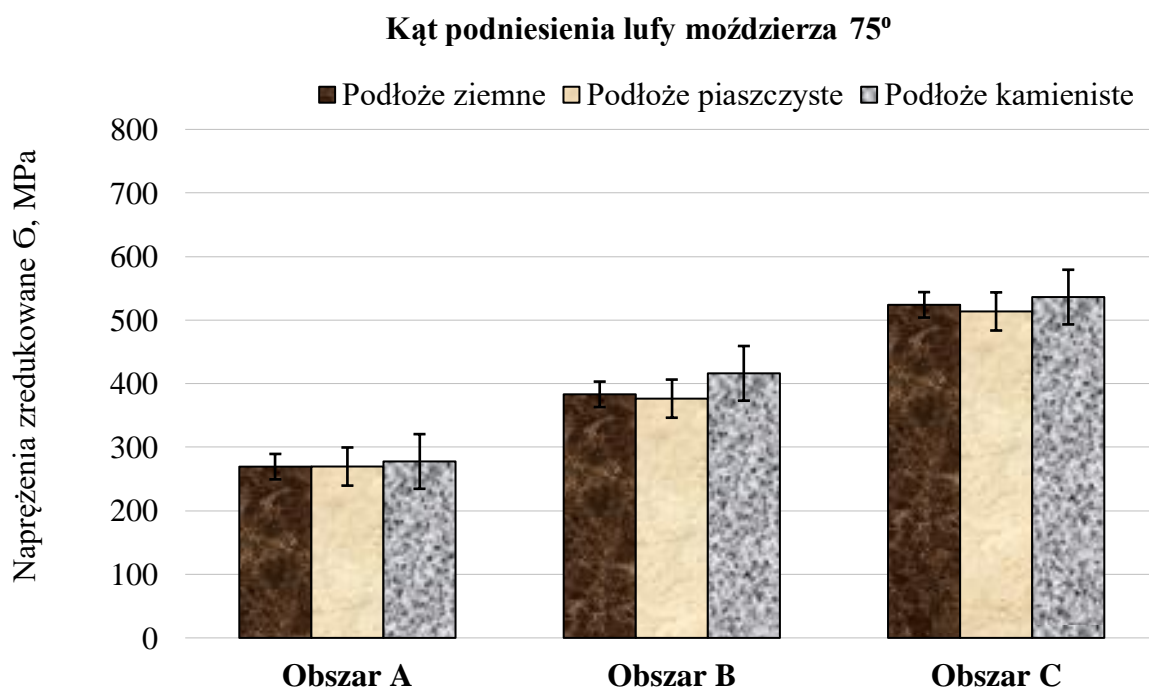
Rys. 7.4.4. Naprężenia poszczególnych obszarów numerycznego modelu płyty oporowej na podłożu kamienistym w zależności od kąta podniesienia lufy moździerza



Rys. 7.4.5. Naprężenia poszczególnych obszarów numerycznego modelu płyty oporowej przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° w zależności od rodzaju podłoża



Rys. 7.4.6. Naprężenia poszczególnych obszarów numerycznego modelu płyty odporowej przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 60° w zależności od rodzaju podłoża

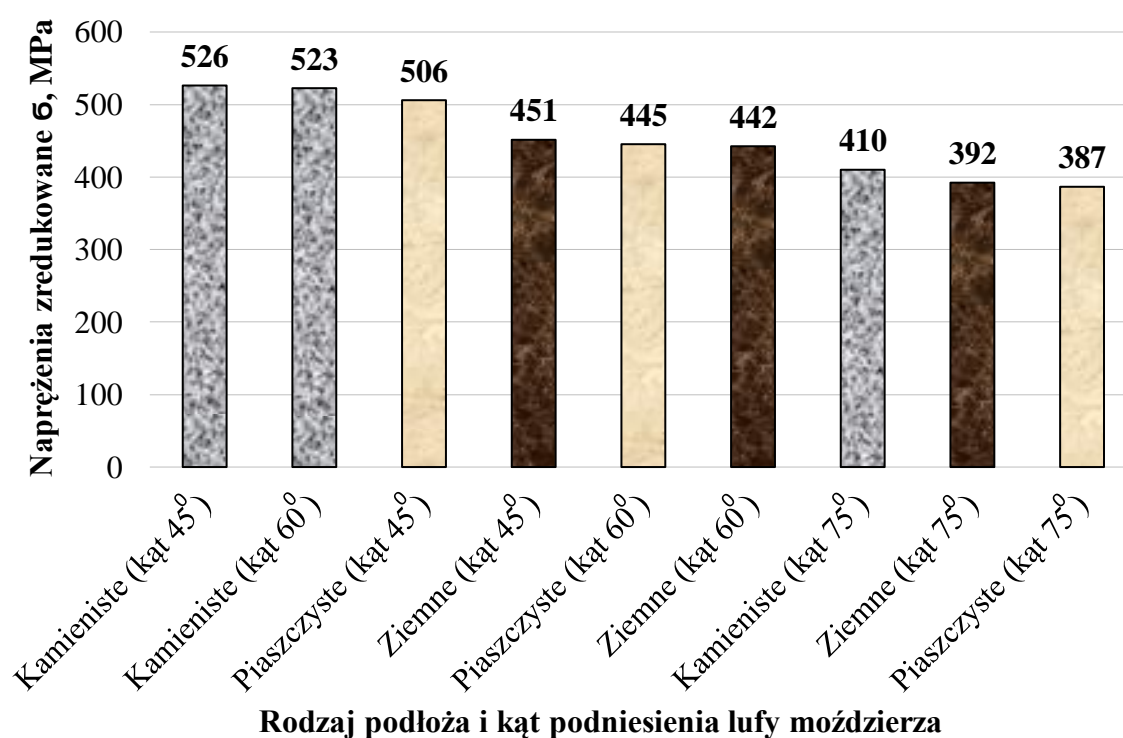


Rys. 7.4.7. Naprężenia poszczególnych obszarów numerycznego modelu płyty odporowej przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 75° w zależności od rodzaju podłoża

Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano, że największe wartości naprężeń występowały na zewnętrznym obrysie numerycznego modelu płyty odporowej, odpowiadającemu obszarowi C i przy ostrzale płyty pod kątem podniesienia lufy moździerza

wynoszącym 45° . Z perspektywy balistyki zewnętrznej jest to bardzo istotny kąt, który zapewnia uzyskanie największego zasięgu wystrzeliwanych pocisków [136]. Wobec takich warunków pracy płyty oporowej, podłożem zapewniającym lepszą współpracę okazał się grunt o drobniejszych ziarnach, czego dowodem były mniejsze wartości naprężeń uzyskiwanych dla podłoża ziemnego i piaszczystego, niż dla gruntu kamienistego cechującego się znaczną sztywnością.

Biorąc pod uwagę sumaryczne zestawienie wartości naprężeń ze wszystkich piętnastu punktów pomiarowych należących do trzech obszarów A, B i C wertykalnego układu numerycznego modelu płyty oporowej (rys. 7.4.1), obliczono średnie wartości naprężeń dla podłoża ziemnego, piaszczystego i kamienistego przy jednoczesnym uwzględnieniu kątów podniesienia lufy moździerza wynoszących 45° , 60° i 75° . Na podstawie uzyskanych wyników utworzono ranking warunków pracy płyty oporowej ze względu na zastosowane zmienne w formie wykresu słupkowego, który przedstawiono na rysunku 7.4.8.



Rys. 7.4.8. Ranking warunków pracy numerycznego modelu płyty oporowej w zależności od zastosowanych podłoży i kątów podniesienia lufy moździerza – średnie wartości naprężeń z analizowanych punktów pomiarowych

W oparciu o ranking sporządzony na podstawie średnich naprężeń występujących w punktach pomiarowych numerycznego modelu płyty oporowej (zgodnie z układem wertykalnym), najbardziej wymagającymi warunkami pracy dla płyty oporowej okazało się

podłoże kamieniste przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° , tuż przed kątem 60° . Prawdopodobnie stanowiąca najtrudniejsze warunki pracy związana z kątem 45° powtarzała się również dla podłoża piaszczystego i ziemnego. Wraz ze wzrostem kąta podniesienia lufy moździerza wartości naprężeń zmniejszały się. Wyjątkiem był wspomniany kąt 60° dla podłoża kamienistego. Przy zastosowaniu kąta podniesienia lufy moździerza wynoszącego 75° , otrzymano porównywalne wartości średnich naprężeń, z których najniższe wystąpiły w przypadku podłoża piaszczystego. Można więc przyjąć, że konfiguracja takich zmiennych stanowi najłatwiejsze warunki pracy płyty oporowej.

7.5. Analiza statystyczna wyników badań

Do analizy statystycznej wpływu warunków ostrzału na wielkość naprężeń występujących na płycie oporowej zastosowano oprogramowanie Statistica 13.3, które umożliwia prowadzenie analiz danych, ich opis oraz wizualizację otrzymanych wyników. Przed rozpoczęciem analiz, opracowano dane wejściowe stanowiące naprężenia płyty oporowej w zależności od różnych rodzajów podłoża i zmiennych kątów podniesienia lufy. W tym celu przygotowano wyniki naprężeń z symulacji numerycznych, które następnie pogrupowano w zależności od konfiguracji zmiennych. Do ustalenia poziomu istotności wpływu tych zmiennych na wartości naprężeń, zastosowano moduł ANOVA pozwalający na prowadzenie analiz wariancji (z ang. analysis of variance). Analiza wariancji z zastosowaniem modułu ANOVA jest powszechnie stosowaną metodą w przemyśle [156, 157] pozwalającą na ocenę istotności wpływu poszczególnych parametrów w zastosowanych procesach technologicznych.

Przeprowadzenie analizy ANOVA umożliwiło uzyskanie cech statystycznie istotnych dla danych wejściowych, takich jak obszar płyty oporowej, kąt podniesienia lufy moździerza i podłoże, mających wpływ na końcowy wynik, czyli naprężenia płyty. Do analizy przyjęto poziom istotności wynoszący 95 %. Wyniki istotności poszczególnych parametrów zestawiono w tabeli 7.5.1.

Tab. 7.5.1. Wyniki analizy statystycznej z oprogramowania ANOVA

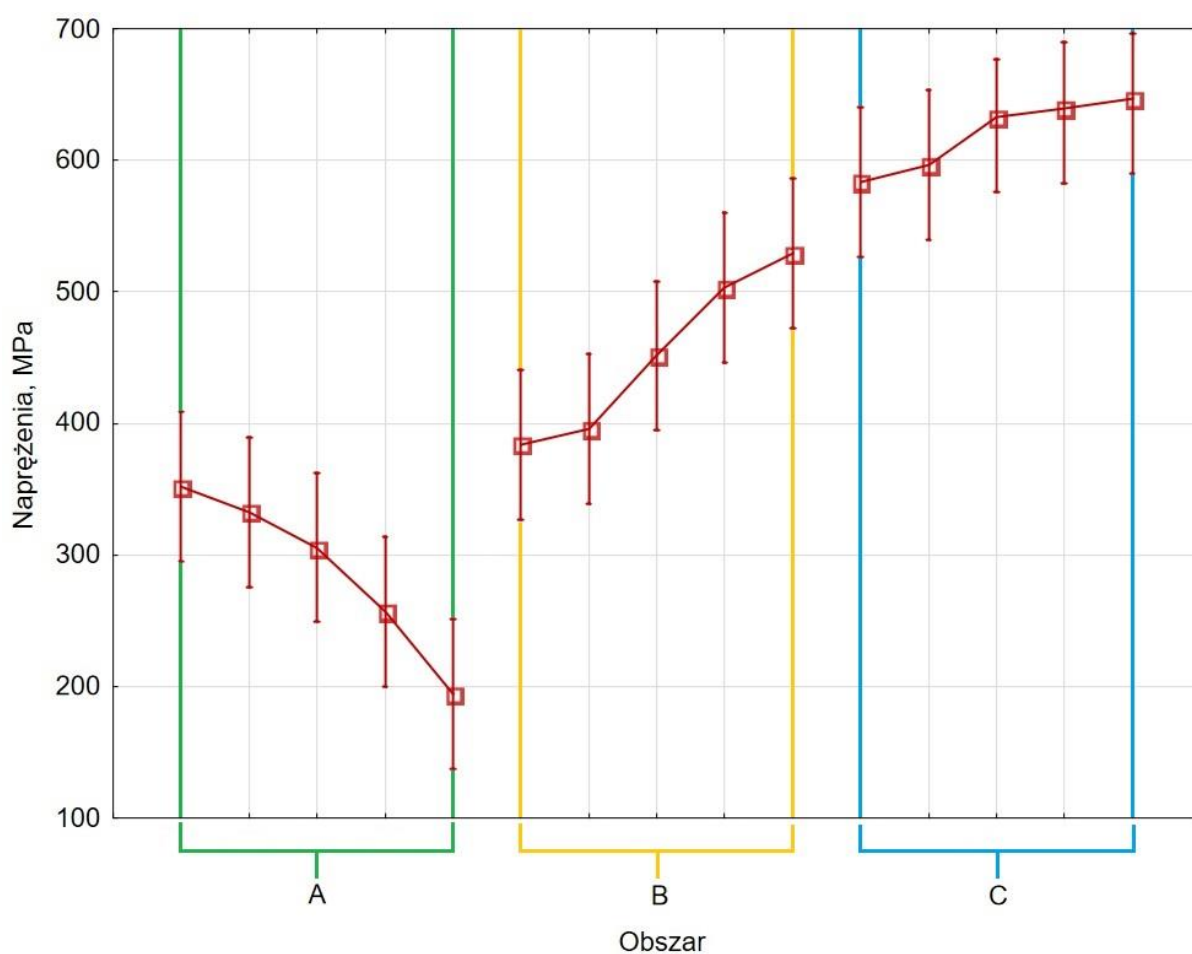
| Parametr | F | p |
|-----------------------|--------|---------|
| Obszar płyty oporowej | 26,915 | 0,00000 |
| Kąt podniesienia lufy | 15,884 | 0,00000 |
| Podłoże | 5,3047 | 0,00625 |

gdzie:

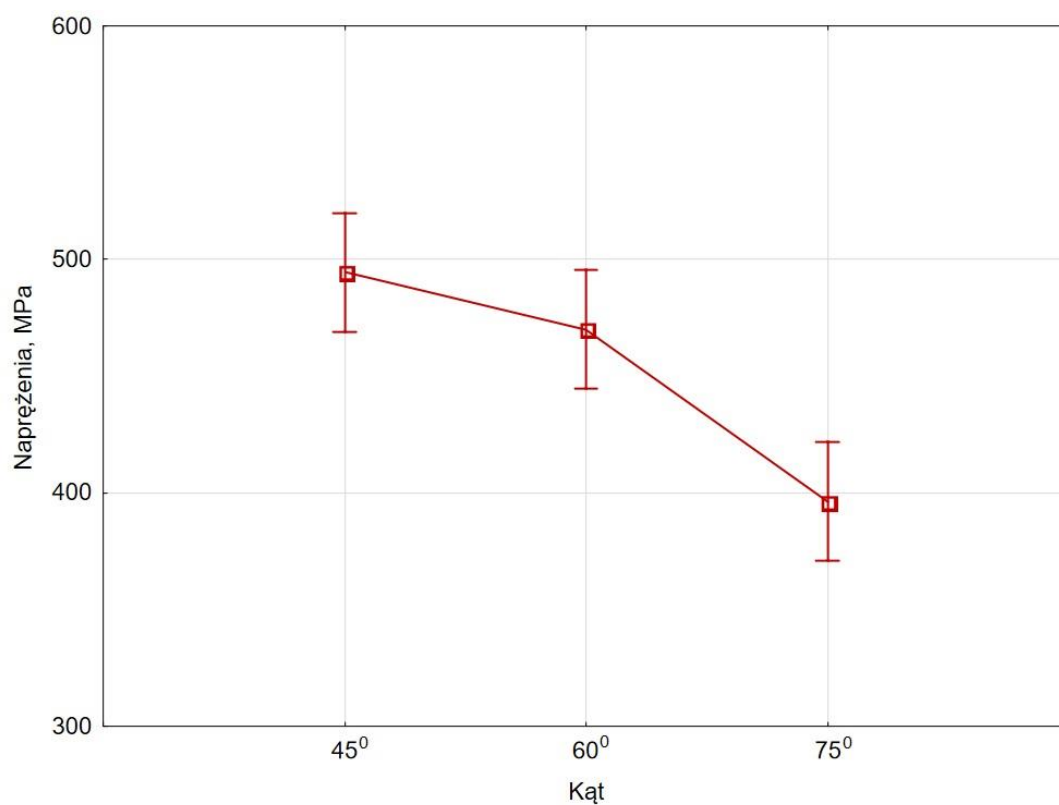
p – poziom istotności,

F – parametr Fishera będący rozkładem prawdopodobieństwa porównującym stosunek co najmniej dwóch wariancji. Jeśli stosunek znacznie odbiega od wartości 1, sugeruje to, że wariancje tych grup nie są równe [158].

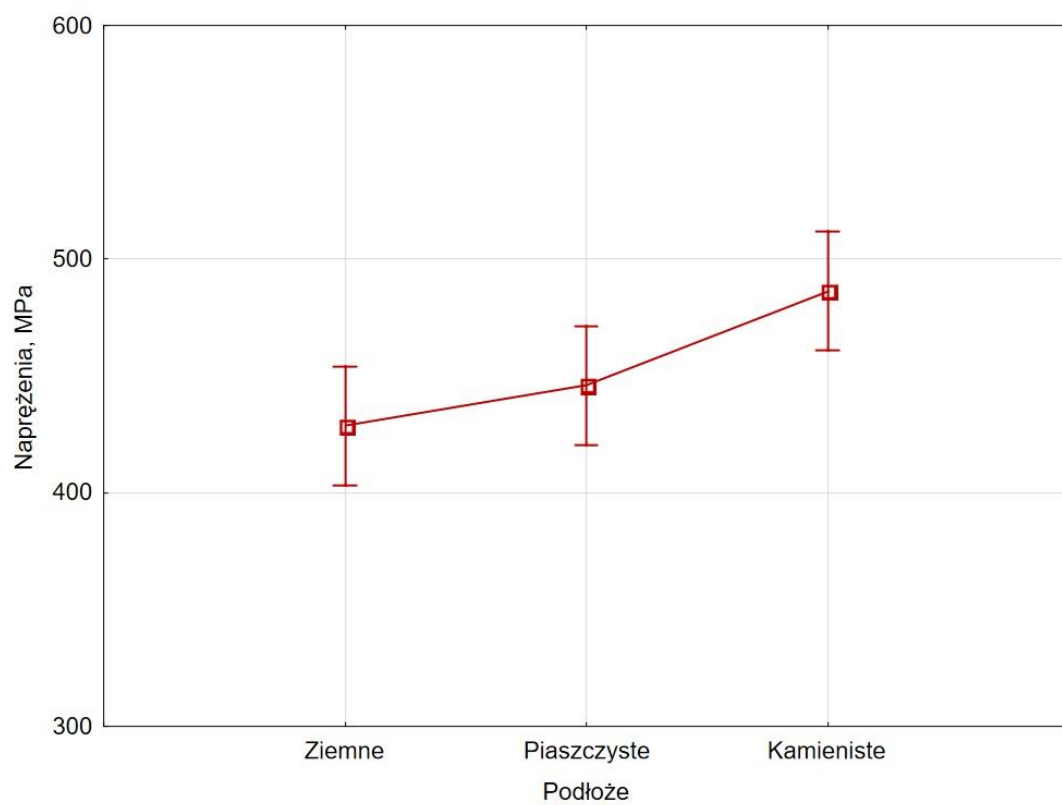
Istotność wpływu wybranych czynników na wartości naprężeń występujących na płycie oporowej określono na poziomie istotności wynoszącym $p \leq 0,05$. W oparciu o ustalony poziom istotności oraz wyniki przedstawione w tabeli 7.5.1. zaobserwowano, że istotnymi parametrami wpływającymi na wartości naprężeń płyty oporowej są jej poszczególne obszary oraz kąt podniesienia lufy. Ponadto przeprowadzone analizy wykazały, że ze względu na wartość parametru Fishera najsilniej wpływającym parametrem na wartości naprężeń płyty oporowej jest jej obszar, kolejnym kąt podniesienia, a najmniejszym podłoże. Wyniki analizy wariancji przedstawiono za pomocą wykresów na rysunkach 7.5.1 ÷ 7.5.3.



Rys. 7.5.1. Wykres naprężeń w zależności od obszarów badanej płyty oporowej



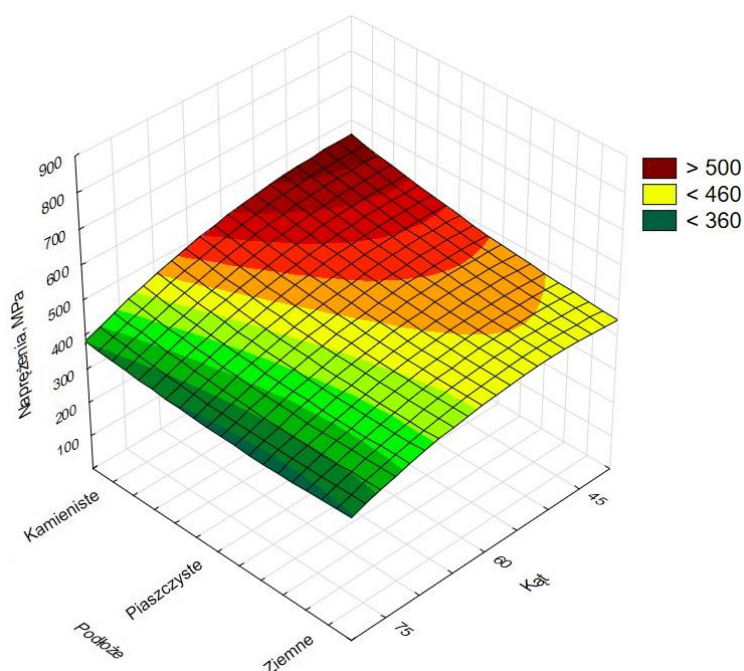
Rys. 7.5.2. Wykres naprężeń w zależności od kąta podniesienia lufy moździerza



Rys. 7.5.3. Wykres naprężeń w zależności od rodzaju podłoża

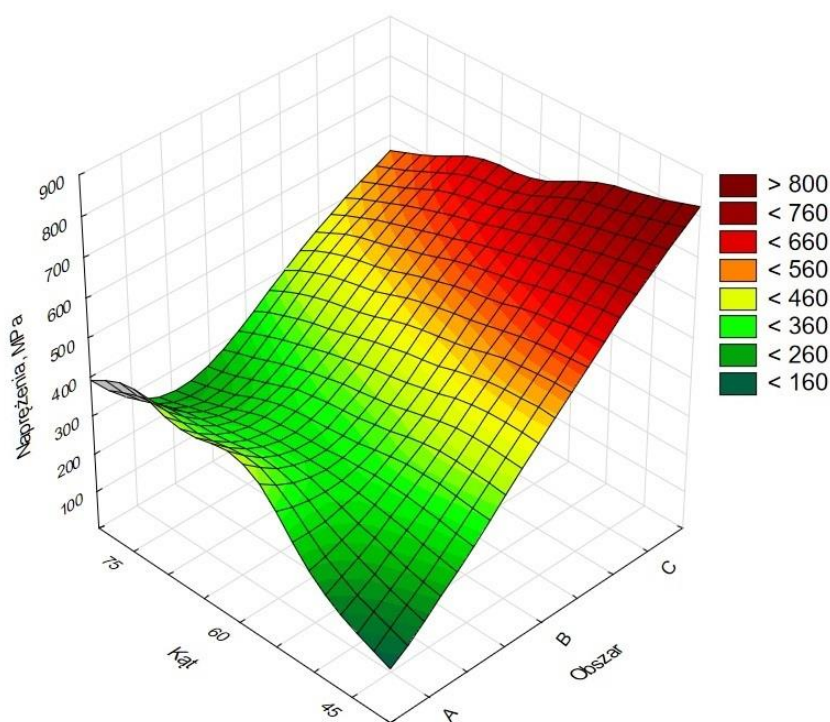
Wykresy przedstawiające analizy wariancji dowodzą, że wszystkie użyte w nich parametry mają istotny wpływ na zmianę wartości naprężeń występujących na płycie oporowej. Na podstawie danych pozyskanych z analiz oraz wykresu przedstawionego na rysunku 7.5.1 zaobserwowano, że największy wpływ na wartość naprężeń ma obszar ich występowania na płycie oporowej. Naprężenia rosną wraz z odległością od środka płyty oporowej, a ich wartości wynoszą $140 \div 410$ MPa dla obszaru A, $330 \div 580$ MPa dla obszaru B i $530 \div 700$ MPa dla obszaru C. W przypadku wykresu naprężeń płyty oporowej w zależności od kąta podniesienia lufy, przedstawionego na rysunku 7.5.2 zauważono, że największy poziom istotności na wartość naprężeń ma kąt wynoszący 75° . Potwierdza to różna wartość zakresu naprężeń płyty oporowej uzyskiwana przy kącie podniesienia równym 75° , w porównaniu do naprężeń otrzymywanych przy zastosowaniu kąta 45° i 60° . Rozpatrując wykres naprężeń występujących na płycie oporowej w zależności od zastosowanego podłoża, przedstawiony na rysunku 7.5.3, stwierdzono że poszczególne wartości naprężeń zawierają się w pojedynczym przedziale wynoszącym $400 \div 520$ MPa. Co oznacza, że rodzaj zastosowanego podłoża nie ma istotnego wpływu na wartość naprężeń.

Stosując wykresy powierzchniowe zobrazowano wpływ poszczególnych parametrów podczas ostrzału płyty oporowej, takich jak: obszar występowania naprężeń, kąt podniesienia lufy moździerza i podłoże na wartość naprężeń płyty oporowej. Wykresy te przedstawiono na rysunkach 7.5.4 ÷ 7.5.6.



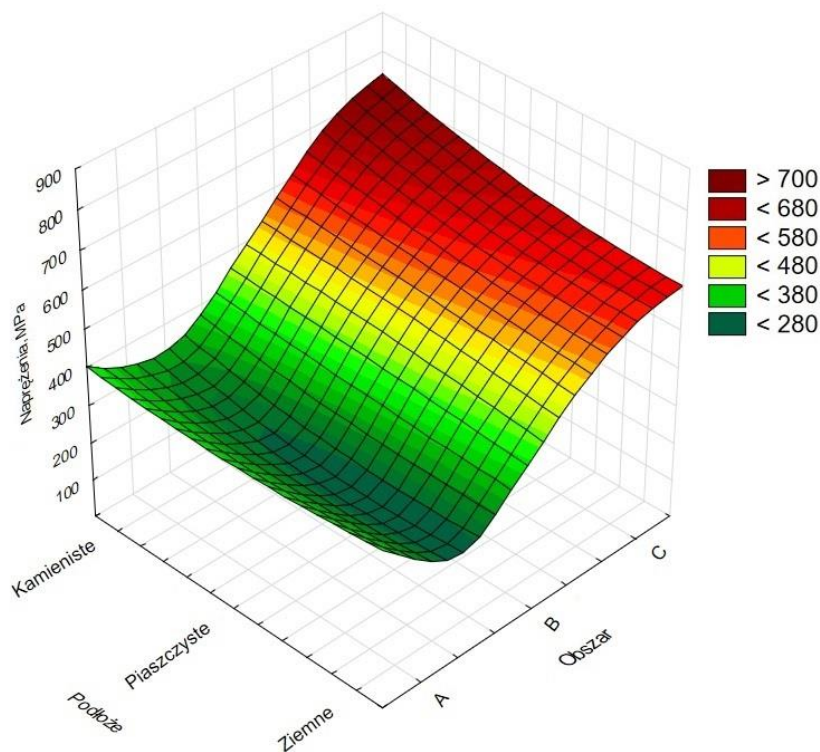
Rys. 7.5.4. Wykres powierzchniowy naprężeń w zależności od zastosowanego rodzaju podłoża i podniesienia lufy moździerza

W przypadku wykresu powierzchniowego przedstawionego na rysunku 7.5.4, największy wpływ na wartość naprężeń występujących na płycie oporowej ma kąt podniesienia lufy moździerza wynoszący 45° oraz podłoże kamieniste. Zmiana podłoża przy zachowaniu kąta podniesienia równego 45° powoduje spadek wartości naprężeń, podobnie jak wzrost kąta podniesienia przy braku zmiany podłoża kamienistego. Wartości naprężeń na wykresie spadają wraz ze wzrostem kąta podniesienia oraz w zależności od podłoża, aż do uzyskania minimum dla kąta wynoszącego 75° oraz podłoża ziemnego.



Rys. 7.5.5. Wykres powierzchniowy naprężeń w zależności od zastosowanego kąta podniesienia lufy moździerza i występowania na poszczególnych obszarach badanej płyty oporowej

Rozpatrując wykres powierzchniowy przedstawiony na rysunku 7.5.5, największy wpływ na wartość naprężeń występujących na płycie oporowej ma jej obszar C oraz kąt podniesienia lufy moździerza wynoszący 45° . Obszar C stanowi zewnętrzny obrys płyty oporowej, a zatem wraz ze wzrostem odległości od środka płyty rośnie również wartość jej naprężeń. Przy zachowaniu kąta podniesienia równego 45° , dochodzi do znacznego spadku naprężeń w pozostałych dwóch obszarach płyty oporowej. Wraz ze wzrostem kąta podniesienia lufy wartość średnich naprężeń dla stref C i B spada, natomiast dla strefy A rośnie. Najmniejsza wartość naprężeń występuje na obszarze A płyty oporowej przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° .



Rys. 7.5.6. Wykres powierzchniowy naprężeń w zależności od zastosowanego rodzaju podłoża i występowania na poszczególnych obszarach badanej płyty oporowej

Na podstawie analizy wykresu powierzchniowego przedstawionego na rysunku 7.5.6, zaobserwowano, że największe wartości naprężeń płyty oporowej występują dla obszaru C oraz podłoża kamienistego. Im większa odległość od środka płyty oporowej co potwierdzają poszczególne obszary, następuje wzrost wartości naprężeń. W mniejszym stopniu wpływ na zmianę średnich wartości naprężeń płyty oporowej ma podłoże. Naprężenia na wykresie powierzchniowym przyjmują minimalne wartości dla obszaru A płyty oporowej oraz przy zastosowanym podłożu ziemnym.

W oparciu o otrzymane wyniki z analizy ANOVA, zdefiniowano równanie regresji w zależności od obszaru płyty oporowej oraz zastosowanego podłoża i kąta podniesienia lufy:

$$y = K + C_N X_1 + C_P X_2 + C_K X_3 \quad (7.5.1)$$

po podstawieniu danych:

$$y = 350,67 + 0,762X_1 + 0,137X_2 - 0,23X_3 \quad (7.5.2)$$

gdzie:

X_1 – obszar płyty oporowej,

X_2 – podłoże,

X_3 – kąt podniesienia lufy moździerza,

K, C_N, C_P, C_K - współczynniki obliczeniowe z analizy ANOVA.

7.6 Zastosowanie sieci neuronowych do modelowania odkształceń płyty oporowej mózdzierza

W kolejnym etapie prac związanych z badaniem zjawiska odkształcenia płyty oporowej zbudowano model neuronowy pozwalający skutecznie i dokładnie wyznaczać wybrane parametry, występujące w trakcie ostrzału płyty.

7.6.1 Ogólne zasady tworzenia modelu neuronowego

Do zbudowania modelu neuronowego zastosowano program Statistica 13.3, który jest wszechstronnym narzędziem, umożliwiającym użytkownikom wykonywanie statycznych analiz danych oraz raportowanie i wizualizację wyników.

Model neuronowy został utworzony na podstawie danych zebranych podczas ostrzału płyty oporowej w warunkach poligonowych, takich jak: naprężenie, ciśnienie, rodzaj podłoża i punkt pomiarowy.

Do uporządkowania danych wejściowych oraz wyjściowych, zapewniających występowanie wartości w pewnym zakresie, przeprowadzono procedurę mającą na celu normalizację danych. Zadaniem zastosowanej normalizacji min/max było sprowadzenie danych do zakresu $0 \div 1$, zgodnie z zależnością (7.6.1):

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7.6.1)$$

gdzie:

x' – wartość znormalizowana należąca do zbioru $x' = \langle 0 ; 1 \rangle$,

x – wartość oryginalna przed normalizacją,

x_{\min} – minimalna wartość dla serii analizowanych danych,

x_{\max} – maksymalna wartość dla serii analizowanych danych.

Po wyznaczeniu danych znormalizowanych do właściwego arkusza przystąpiono do budowy modelu neuronowego w programie Statistica. Pracę rozpoczęto od wyboru typu analizy odpowiadającej sieciom neuronowym oraz zdefiniowania danych. W ustawieniach podstawowych zmienne podzielono na ilościowe wyjścia, czyli wartości wyznaczonych naprężeń dla poszczególnych punktów oraz pozostałe, ilościowe wejścia z wyjątkiem zmiennej dotyczącej rodzaju podłoża, która została sklasyfikowana jako zmienna jakościowa wejścia.

Posiadając zdefiniowane zmienne, określono podzbiory oraz metodę próbkowania w oparciu o metodę losowego próbkowania z podziałem na 70% zbioru uczącego, 15% zbioru testowego i 15% zbioru walidacyjnego. Najlichnieszy, zbiór uczący jest zestawem danych używanym przez algorytm uczenia na podstawie klasyfikowania i budowania zależności pomiędzy danymi. Zbiór walidacyjny jest używany do niezależnej kontroli zbieżności algorytmu uczenia na podstawie zbioru uczącego. Ostatni, testowy zbiór, jest zestawem danych, przy pomocy których testowany jest wytrenowany model sieci neuronowej na podstawie danych zawartych w zbiorach uczącym i walidacyjnym.

Po określeniu procentowego udziału poszczególnych zbiorów w analizowanym zestawie danych, wskazano parametry, takie jak: typ sieci, minimalną i maksymalną liczbę ukrytych neuronów oraz liczbę zamodelowanych i zachowanych sieci. Do analizy wybrano sieć typu MLP (ang. Multilayer Perceptron), czyli perceptron wielowarstwowy składający się z wielu warstw zawierających pojedyncze neurony. W sieci tej wyjścia neuronów warstwy poprzedniej tworzą wektor informacji przekazywanych na wejście każdego z neuronów następnej warstwy, nie łącząc się tym samym między sobą w obrębie danej warstwy [159].

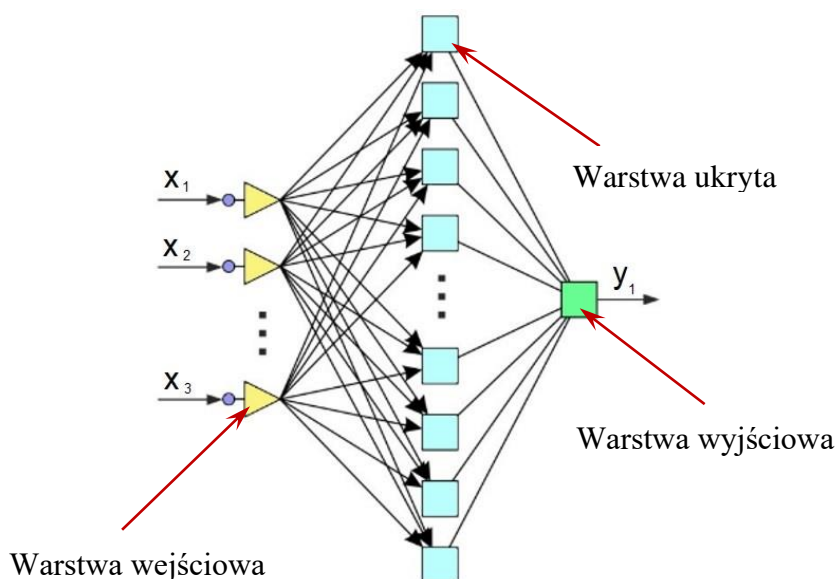
Po określeniu liczby analizowanych i zachowanych sieci program tworzy i analizuje wskazaną ich liczbę, wybierając spośród nich sieci, które według programu najlepiej spełniają rolę w przewidywaniu wyników. Trenowanie sieci neuronowych zostało przeprowadzone przy pomocy różnych funkcji aktywujących neurony warstwy ukrytej i wyjściowej, zastosowano m.in. funkcję linową, logistyczną, tanh, wykładniczą i sinus. Po określeniu wszystkich wyżej opisanych parametrów przeprowadzono procedurę uczenia, w wyniku której program przeprowadził analizę, i zachował 5 sieci charakteryzujących się najlepszym dopasowaniem.

Ostatecznym krokiem tworzenia modelu neuronowego było wybranie sieci neuronowej, która charakteryzowała się najlepszą jakością testowania, określoną za pomocą liczby z przedziału od 0 do 1. Przy czym liczba 0 oznacza brak dopasowania, natomiast wartość 1 odpowiada dokładnemu odzwierciedleniu wartości przewidywanych. Następnie wybrana sieć pozwoliła na otrzymanie wyników analizy w postaci wykresów i danych, które umożliwiły ocenę wrażliwości sieci na wywołane zmiany odnoszące się do zadanych zmiennych, korelacji współczynników, statystyki poszczególnych danych oraz błędów dopasowania.

Sieci neuronowe mają szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki oraz gałęziach przemysłu ze względu na ich praktyczne właściwości, które umożliwiają rozwiązywanie problemów trudnych do wyznaczenia metodami standardowymi [160-165].

7.6.2 Budowa i analiza modelu neuronowego

Zgodnie z opisaną procedurą tworzenia modelu neuronowego zbudowano perceptron wielowarstwowy, przedstawiony na rysunku 7.6.1. W przypadku wybranego typu sieci oraz podczas weryfikacji wpływu poszczególnych typów sieci na uzyskiwane wyniki, stosowano identyczne parametry tworzące, czyli rodzaj i podział na liczbę próbkowania, liczbę neuronów ukrytych (minimalna ilość 4, maksymalna ilość 30), liczbę uczonych i zachowanych sieci (ilość sieci uczących 100, ilość sieci zachowania 15).



Rys. 7.6.1. Architektura sieci wielowarstwowej, gdzie x_1 , x_2 oraz x_3 - sygnały wejściowe, y_1 - sygnał wyjściowy

Perceptron wielowarstwowy

Zbudowany model neuronowy pozwolił na analizę zebranych danych i przewidywanie wyników dla parametrów niebadanych. Konieczny był dobór procedury, na podstawie której zdecydowano o najlepszym dopasowaniu sieci. W tym celu wybrano metodę oceny jakości generowanych sieci, charakteryzującą się największą wartością jakości testowania oraz najmniejszą wartością błędu testowania [166].

Po przeprowadzeniu procesu uczenia sieci, program zachował pięć spośród nich, które charakteryzowały się najlepszym dopasowaniem. Z zestawienia wygenerowanych sieci, przedstawionego w tabeli 7.6.1, wybrano sieć numer 4 o nazwie MLP 3-10-1. Wyboru tego dokonano na podstawie najwyższej jakości testowania, o wartości wynoszącej 0,918581.

Tabela 7.6.1. Zestawienie parametrów wygenerowanych sieci MLP

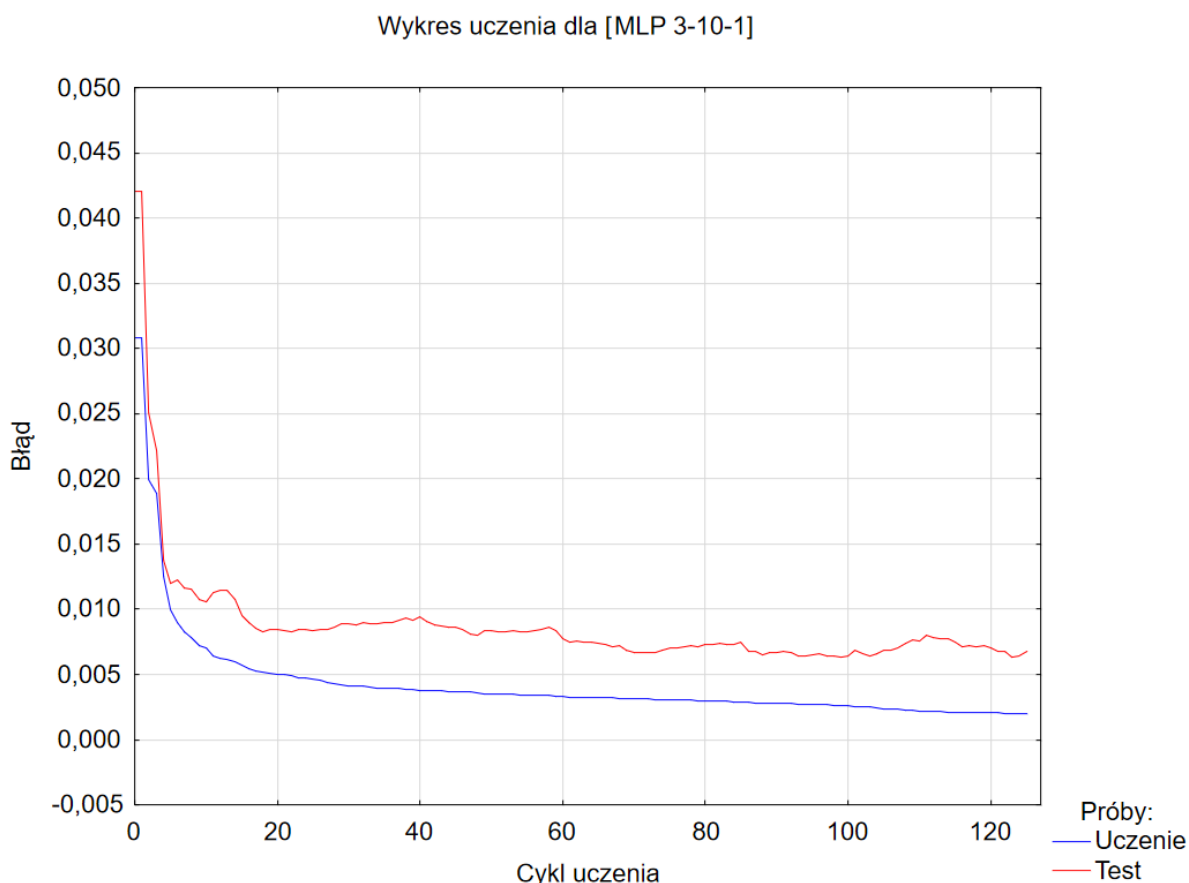
| Podsumowanie aktywnych sieci | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|------------------|---------------------|--------------------|----------------|-------------------|------------------|------------------|
| Id sieci | Nazwa sieci | Jakość (uczenie) | Jakość (testowanie) | Jakość (walidacja) | Błąd (uczenie) | Błąd (testowanie) | Błąd (walidacja) | Algorytm uczenia |
| 1 | MLP 3-6-1 | 0,894423 | 0,884991 | 0,791932 | 0,006178 | 0,009165 | 0,011247 | BFGS 28 |
| 2 | MLP 3-7-1 | 0,930585 | 0,884744 | 0,782460 | 0,004135 | 0,009168 | 0,012329 | BFGS 41 |
| 3 | MLP 3-9-1 | 0,971339 | 0,907428 | 0,799675 | 0,001745 | 0,007433 | 0,011670 | BFGS 115 |
| 4 | MLP 3-10-1 | 0,964604 | 0,918581 | 0,888684 | 0,002152 | 0,006583 | 0,007947 | BFGS 125 |
| 5 | MLP 3-10-1 | 0,943276 | 0,912657 | 0,781246 | 0,003427 | 0,007036 | 0,012383 | BFGS 41 |

Po wybraniu najlepszej sieci pod kątem dopasowania parametrów testujących, przeprowadzono analizę wrażliwości, której celem było sprawdzenie wpływu poszczególnych zmiennych na dokładność sieci. Parametrem najistotniejszym, mającym największy wpływ na budowany model neuronowy, okazał się punkt pomiarowy (analizowany obszar płyty oporowej).

Analiza danych przy użyciu najkorzystniejszego modelu neuronowego

Po przeprowadzonym porównaniu sieci MLP pod względem możliwości predykcji parametrów wyjściowych zdecydowano, że do dalszej analizy zostanie zastosowana sieć wielowarstwowa o architekturze MLP 3-10-1, która charakteryzowała się lepszą korelacją wartości zmierzonych i przewidywanych. Czego potwierdzeniem były wartości wskaźnika jakości testowania oraz mniejszy błąd dla zbioru testowego.

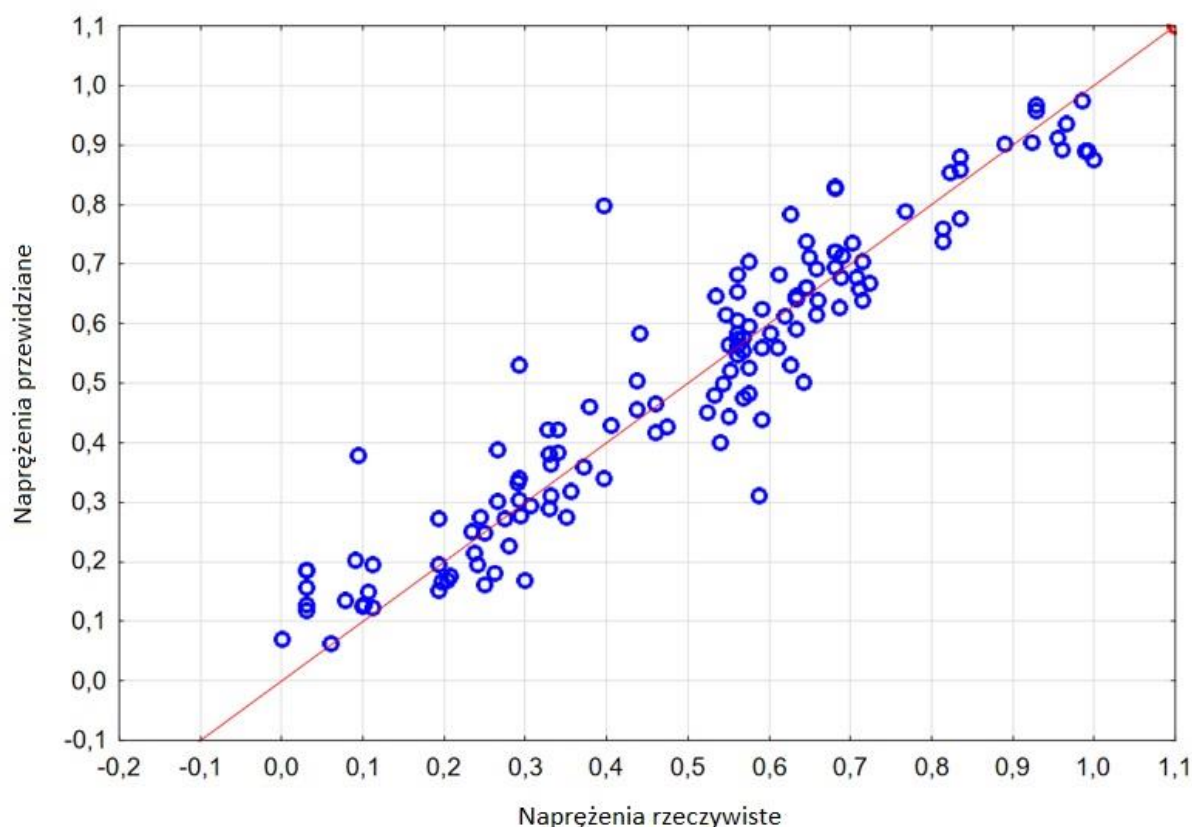
W celu określenia dokładności wartości predykcji względem wartości zmierzonych, przeanalizowano proces uczenia sieci w oparciu o wykres zmiany błędu średniokwadratowego (ang. Mean Squared Error – MSE) w stosunku do kolejnych cykli uczenia, co przedstawiono na rysunku 7.6.2.



Rys. 7.6.2. Wykres uczenia sieci MLP 3-10-1

Analizując wykres uczenia sieci przedstawiony na rysunku 7.6.2, można zaobserwować charakterystyczny przebieg błędu MSE zależnie od cyklu (epoki) uczenia. Z wykresu wynika, że największe wartości błędu predykcji dla wybranego modelu neuronowego występują w początkowej fazie uczenia, po czym systematycznie zmniejszają się wraz z kolejnymi cyklami uczenia. Opisywana tendencja spadkowa utrzymuje się do około 40 cyklu uczenia, kiedy to wartość błędu przestaje się zmniejszać i jest utrzymywana do końca na podobnym poziomie. Przedstawiony błąd na wykresie uczenia jest oparty na zależności pomiędzy wartościami rzeczywistymi, a wartościami predykcji.

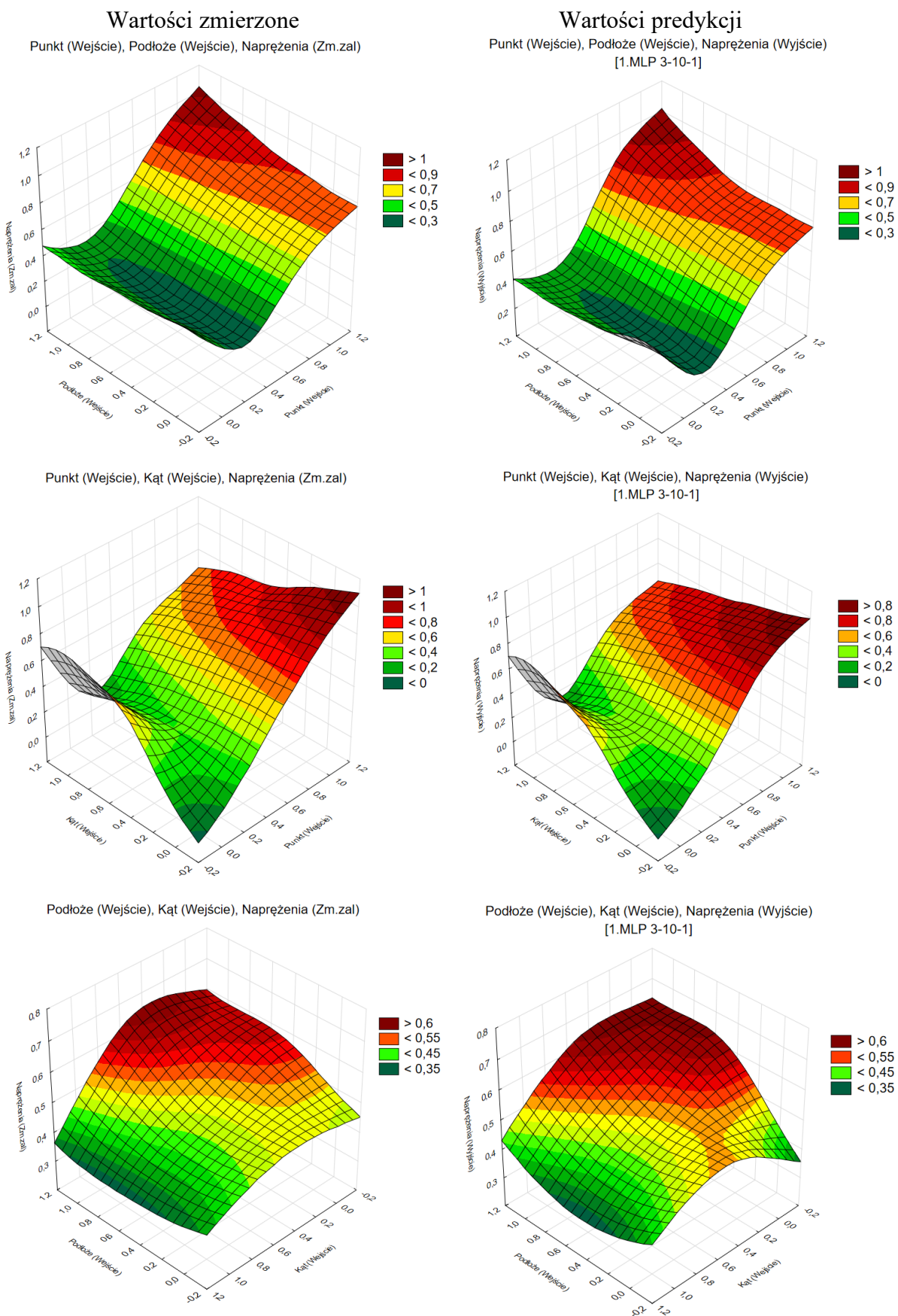
W celu lepszego zobrazowania dopasowania wartości predykcji do wartości zmierzonych sporządzono wykres rozrzutu przedstawiony na rysunku 7.6.3.



Rys. 7.6.3. Wykres rozrzutu dla napężenia

Wykres przedstawiony na rysunku 7.6.3 ilustruje rozproszenie wartości rzeczywistych względem wartości predykcji dla naprężeń, przy zachowaniu poziomu ufności równego 95 %. Specyfika przedstawionego wykresu, potwierdza prawidłowe rozmieszczenie analizowanych wartości, równomiernie wzdłuż przekątnej. W przypadku danych przedstawiających rozrzut wartości naprężenia zmierzonego i przewidzianego, widoczny jest wyraźny podział na cztery grupy. Pierwsza z nich zawiera się w przedziale od 0 do 0,15 a jej wartości charakteryzują się większym rozrzutem, druga skupiona jest w zakresie od 0,2 do 0,5 i cechuje się podobną różnicą wartości zmierzonej i przewidzianej w porównaniu do grupy pierwszej. Kolejna grupa zawierająca się w przedziale wartości od 0,55 do 0,75 charakteryzuje się najmniejszym rozrzutem. Czwarta grupa skupiona w zakresie od 0,8 do 1 cechuje się podobną różnicą wartości zmierzonej i przewidzianej w porównaniu do grupy trzeciej.

Za pomocą wykresów powierzchniowych zobrazowano wpływ poszczególnych parametrów, takich jak: kąt podniesienia lufy moździerza, podłoże, punkty pomiarowe (obszary płyty), na wartość naprężeń płyty oporowej. Wyniki MES uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych porównano z wynikami wygenerowanymi w oparciu o zbudowany model neuronowy.



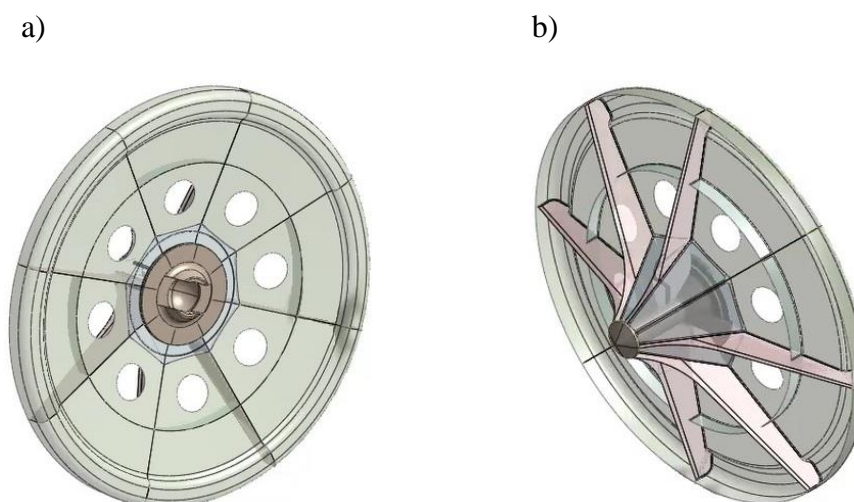
Rys. 7.6.4. Wpływ kąta podniesienia, punktu, podłoża na wartość naprężenia: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 3–10–1

Na podstawie rysunku 7.6.4, przedstawiającego wykresy wpływu kąta podniesienia lufy moździerza, punktu (obszaru płyty oporowej) oraz podłoża na wartość naprężeń, można dostrzec bardzo zbliżoną charakterystykę zachowania wartości parametrów wyjściowych, bez względu na sposób pozyskania danych – w oparciu o przeprowadzone badania i symulacje MES, czy na podstawie predykcji z zastosowaniem sieci typu MLP 3–10–1.

Podsumowując, przedstawione wykresy na rysunku 7.6.4 obrazują wpływ wybranych parametrów wejściowych na naprężenia. Na ich podstawie można łatwo i szybko określić charakter zachodzących zmian, które odzwierciedlają tendencję całego zjawiska, a nie wyłącznie poszczególnych wartości dla zadanych parametrów. Dodatkowo każdy rysunek przedstawia porównanie wartości zmierzonych MES (rzeczywistych) z wartościami przewidzianymi (predykcji). Wykresy predykcji opracowano na podstawie modelu neuronowego, który został wybrany z grupy analizowanych modeli, w oparciu o największą jakość i najmniejszy błąd korelacji dla zbioru testującego. Wybrana sieć neuronowa o konstrukcji MLP 3–10–1 skutecznie poradziła sobie w analizie danych wprowadzanych, czego dowodem są przedstawione wykresy, które kształtem odpowiadają rzeczywistemu charakterowi i wartościom zarejestrowanym w czasie prowadzonych badań.

8. Modyfikacja konstrukcji płyty oporowej

W kolejnym etapie podjęto próbę modyfikacji konstrukcji dotychczas stosowanej płyty oporowej moździerza na podstawie prowadzonych symulacji MES, w oparciu o opracowany model obliczeniowy. Podstawowym założeniem przed rozpoczęciem prac projektowych było pozostawienie okrągłego kształtu płyty oporowej moździerza M98 wraz z dotychczasowym wymiarem jej średnicy zewnętrznej. Okrągły obrys płyty umożliwia symetryczny we wszystkich kierunkach rozkład naprężeń, a ponadto nie wymusza zmiany obecnie stosowanego wózka transportowego. Kluczowym efektem przeprowadzonych prac była zmiana konstrukcji zapewniająca eliminację obszarów płyty, w których dochodziło do koncentracji naprężeń. Istotnym aspektem determinującym wprowadzone modyfikacje geometryczne, była również znaczna masa dotychczasowej konstrukcji płyty oporowej. W tym celu zmieniono skrzyniową budowę płyty, pozabawiając ją pokryw międzyżebrowych usztywniających na rzecz żebra obwodowego, umieszczonego w pobliżu połowy dystansu pomiędzy środkiem płyty, a jej zewnętrznym obrysem. Przetłoczenia międzyżebrowe na wierzchniej stronie płyty oporowej zastąpiono otworami technologicznymi, umożliwiającymi skuteczniejsze odprowadzanie spiętrzających się naprężeń. Kolejną ich zaletą jest wpływ na łatwiejszy i tańszy proces produkcyjny płyty. Wprowadzone modyfikacje zapewniły redukcję masy płyty o około 30 %. Na rysunku 8.1 przedstawiono model zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej 98 mm moździerza.

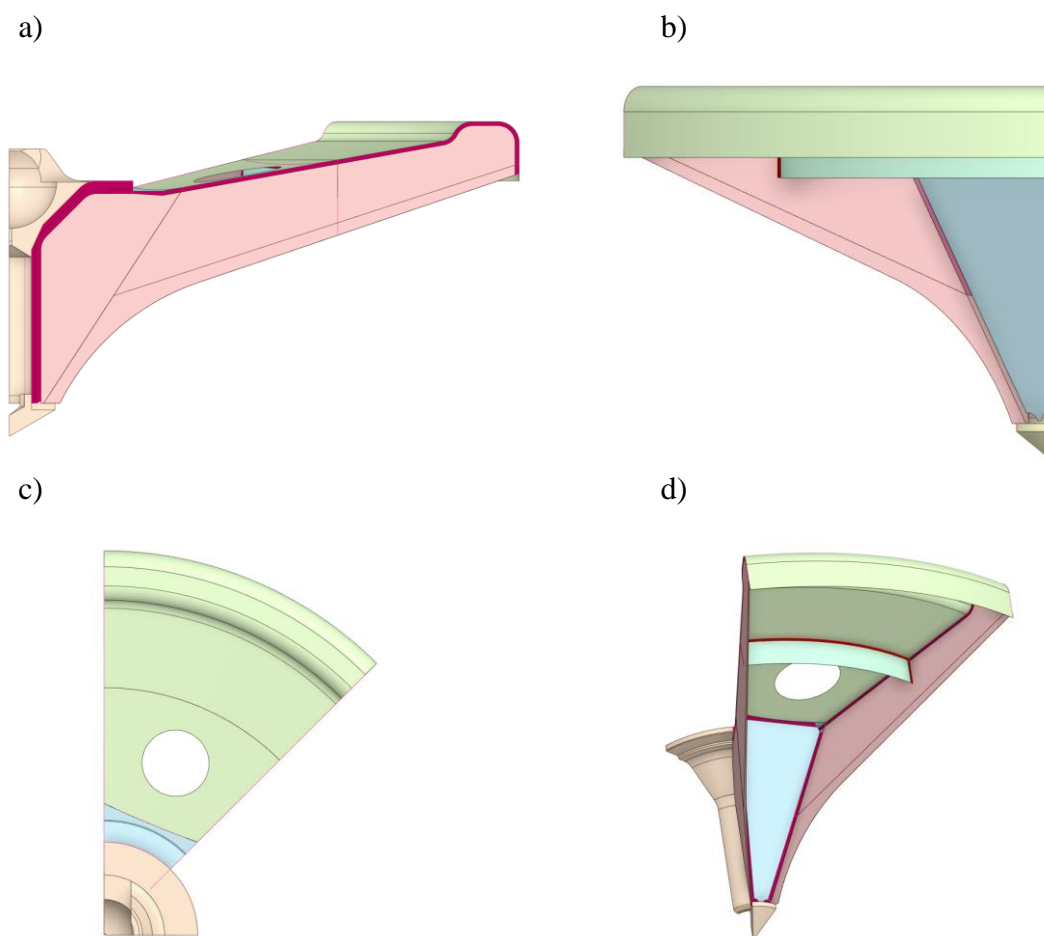


Rys. 8.1. Model zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej moździerza: a) widok z wierzchu, b) widok od spodu

8.1. Model numeryczny zmodyfikowanej konstrukcji

Analogicznie jak w przypadku istniejącej konstrukcji płyty oporowej mózdzierza M98, opracowano model obliczeniowy dla zmodyfikowanego rozwiązania konstrukcyjnego, stanowiący połączenie modelu geometrycznego i dyskretnego. Geometrię powłokowo bryłową płyty oporowej wykonano w programie Ansys Space Claim 2023 R1 na wcześniej przygotowanym modelu 3D za pomocą oprogramowania NX 11.

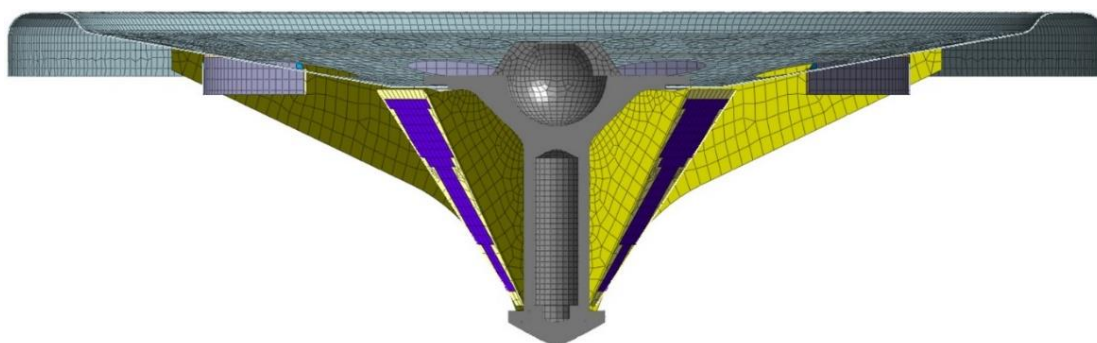
Na rysunku 8.2 przedstawiono fragmenty geometrii zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej mózdzierza, umożliwiające prowadzenie obliczeń numerycznych.



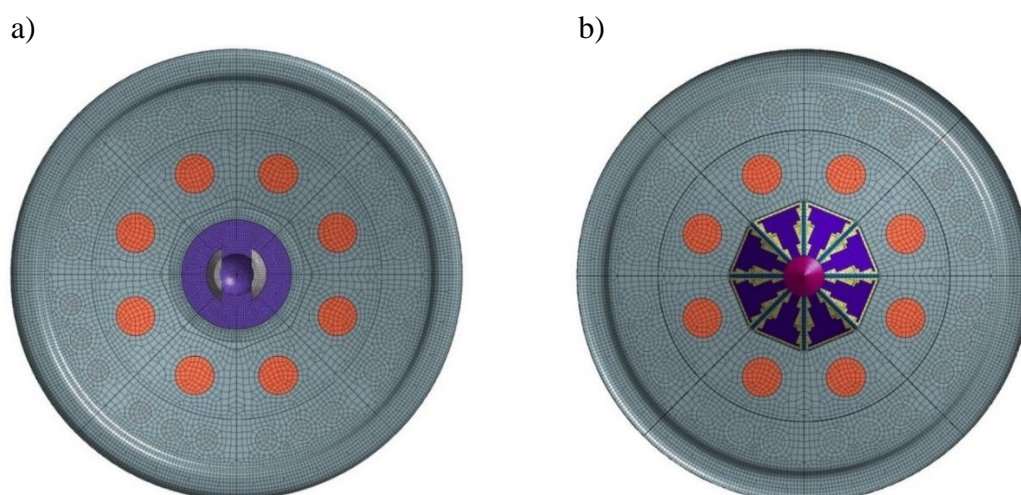
Rys. 8.2. Pierwotna geometria uproszczona zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej w widoku: a) z przodu, b) z tyłu, c) z góry, d) izometrycznym

Następnie dokonano dyskretyzacji modelu geometrycznego w programie Midas NFX 2023 R1, w wyniku której uzyskano modele podzielone na skończoną ilość elementów. Wielkość siatki elementów skończonych dobrano tak, aby nie zaburzyć rzeczywistego kształtu płyty, ani nie wydłużać czasu analiz. Docelową wielkość siatki przyjęto jako 8 mm, również na

większych powierzchniach płaskich, natomiast zagęszczone obszary o rozmiarze siatki wynoszącym 4 mm zastosowano po zewnętrznym obrysie płyty. Przy zachowaniu tak zdefiniowanych wielkości siatki, dla analizowanej zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej moździerza wygenerowano 47552 elementów skończonych. Na rysunkach 8.3 i 8.4 przedstawiono modele numeryczne analizowanej zmodyfikowanej konstrukcji płyty.



Rys. 8.3 Wizualizacja siatki elementów skończonych w przekroju zmodyfikowanej konstrukcji płyty



Rys. 8.4. Wizualizacja siatki elementów skończonych zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej: a) widok z wierzchu, b) widok od spodu

Przyjęte warunki brzegowe

Do symulacji numerycznych prowadzonych na zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej zastosowano tożsame warunki brzegowe, jak w przypadku analiz wykonywanych na dotychczasowej konstrukcji w zakresie zastosowanego materiału płyty, kątów ostrzału, sił działających na układ oraz lokalizacji punktów pomiarowych rozmieszczonych na płycie oporowej.

Przeprowadzone modyfikacje geometryczne wpłynęły na zmiany wielkości i rozkładu siatki elementów skończonych, w związku z czym konieczne było uwzględnienie ilości węzłów podpartych elementami typu Bush. Stosując siatkę o mniejszym rozmiarze na zewnętrznym obrysie płyty, wypadkowo podparto więcej węzłów, niż w przypadku dotychczasowej konstrukcji. W następstwie czego wartość sprężystości elementów Bush obniżono tak, aby sztywność gruntu odpowiadająca danemu obszarowi płyty miała wartości zbliżone do dotychczasowej konstrukcji. Sprężystość zadaną na elementy typu Bush przyłożone do nowej geometrii przeliczano zgodnie z zależnością 8.2.

$$l_1 \cdot k_1 = l_2 \cdot k_2 \quad (8.1)$$

$$k_2 = \frac{l_1 \cdot k_1}{l_2} \quad (8.2)$$

gdzie:

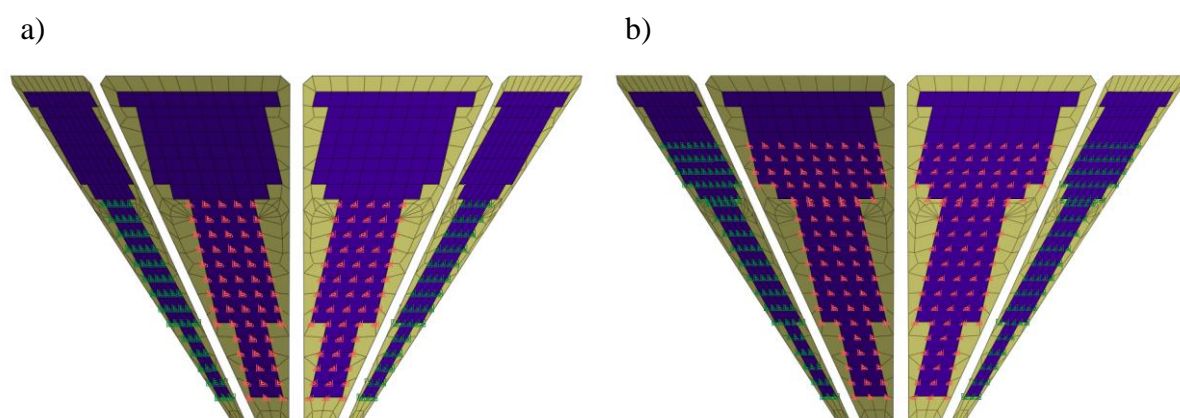
l_1 – liczba węzłów na pierwotnej konstrukcji płyty,

l_2 – liczba węzłów na zmodyfikowanej płycie,

k_1 – sprężystość elementów Bush na pierwotnej konstrukcji płyty,

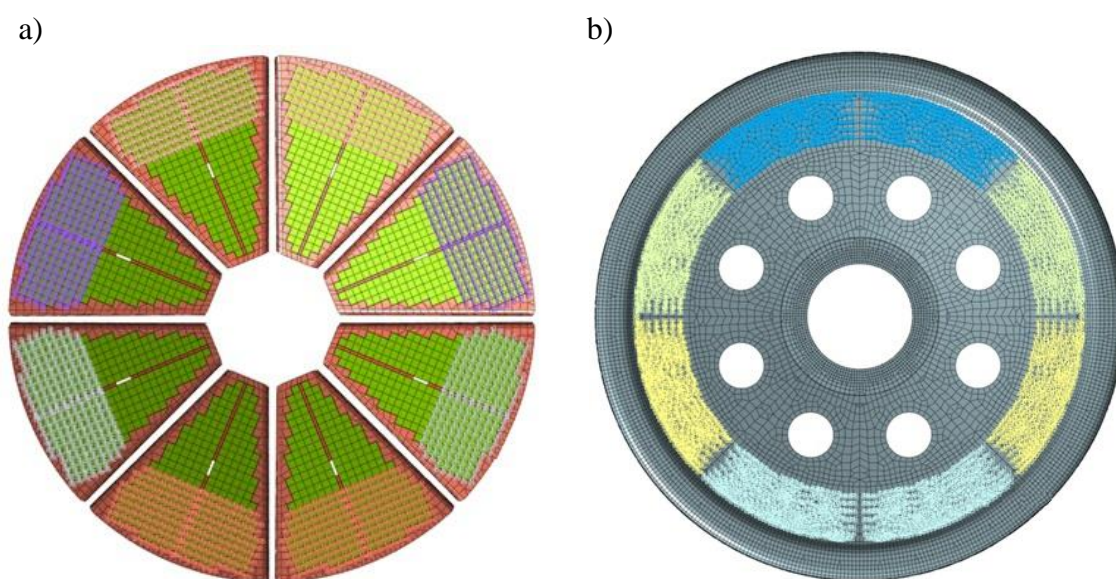
k_2 – sprężystość elementów Bush na zmodyfikowanej płycie.

Wyżej scharakteryzowane zmiany rozkładu sprężystości dotyczą wyłącznie tych części płyty oporowej, które zostały poddane modyfikacjom. Dodatkowo ze względu na usunięcie obwodowych pokryw międzyżebrowych nastąpiło zwiększenie powierzchni oparcia o grunt międzyżebrowych pokryw przyśrodkowych. Na rysunku 8.5 przedstawiono obszary podparcia tychże pokryw, w zależności od konstrukcji płyty oporowej.



Rys. 8.5. Obszary podparcia pokryw międzyżebrowych przyśrodkowych dla konstrukcji płyty:
a) dotychczasowej, b) zmodyfikowanej

Zastosowanie gęstszej siatki elementów skończonych na zmodyfikowanym modelu płyty wpłynęło na zwiększenie ilości węzłów, generujących dodatkowe punkty podparcia płyty oporowej poprzez zastosowanie kontaktów typu Bush. W celu zachowania tożsamyh warunków prowadzonych dotychczas analiz na istniejącej konstrukcji płyty, skorzystano z zależności 8.2. Na podstawie przeliczeń z zastosowanego wzoru uzyskano większą ilość podpartych węzłów. Na rysunku 8.6 przedstawiono dotychczasową i zmodyfikowaną płytę oporową, których konstrukcja różni się gęstością siatki, wpływającą na ilość węzłów stanowiących punkty podparcia.



Rys. 8.6. Gęstość siatki elementów skończonych wpływająca na ilość węzłów płyty oporowej o konstrukcji: a) dotychczasowej, b) zmodyfikowanej

8.2. Wyniki symulacji MES zmodyfikowanej konstrukcji płyty i ich analiza

Na podstawie przeprowadzonych analiz oszacowano rozkłady naprężeń występujące na zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej mózdzierza pod wpływem zadanych obciążeń. Zarówno obciążenia, jak i warunki podparcia dla zmodyfikowanej płyty odwzorowano z największą dokładnością, analogicznie do analiz prowadzonych w poprzednim etapie prac (na istniejącej konstrukcji płyty).

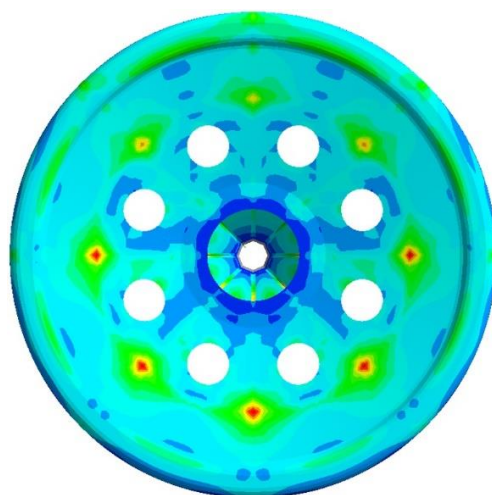
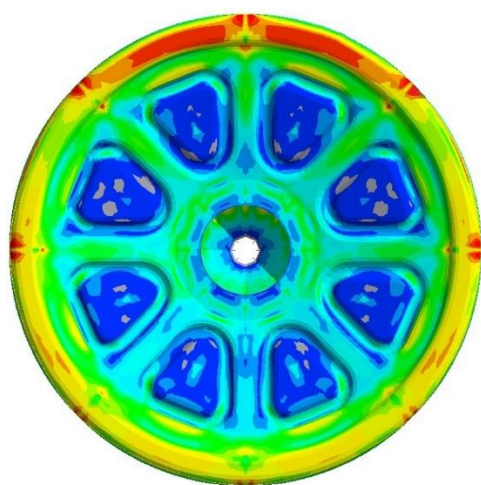
Na rysunkach 8.7 ÷ 8.9 przedstawiono porównawcze wyniki symulacji dla modeli numerycznych zmodyfikowanej konstrukcji płyty oraz dotychczasowej konstrukcji płyty, przeprowadzone na podłożu ziemnym, piaszczystym i kamienistym przy kącie podniesienia lufy mózdzierza wynoszącym 45°.

Dotychczasowa konstrukcja

Zmodyfikowana konstrukcja

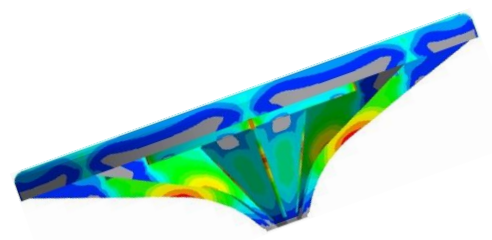
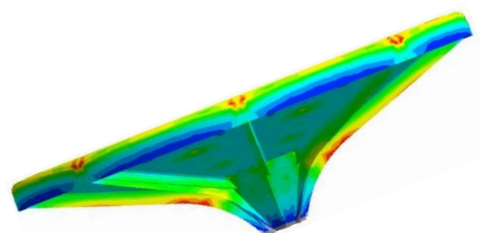
a)

b)



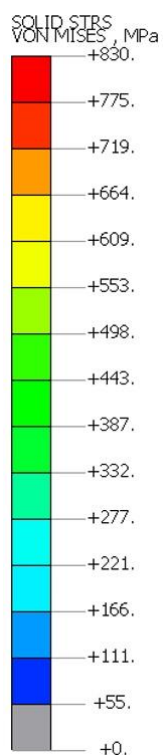
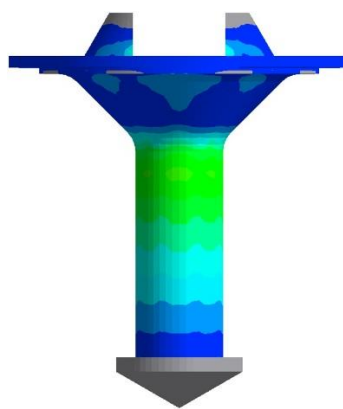
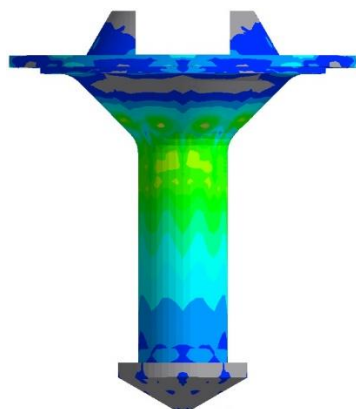
c)

d)



e)

f)



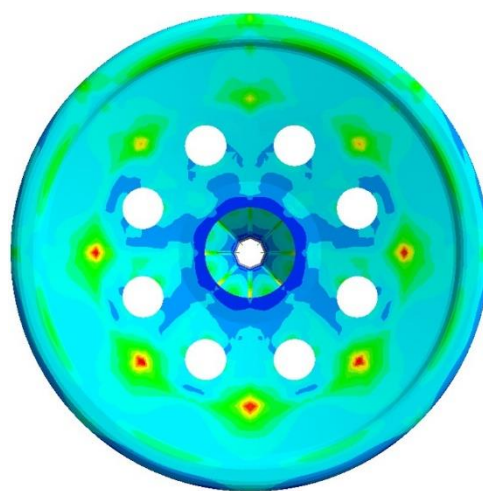
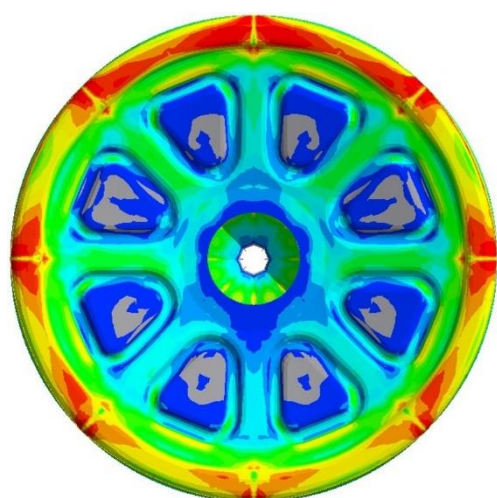
Rys. 8.7. Porównawcze analizy numeryczne ostrzału płyty oporowej z podłoża ziemnego przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącego 45° dla dotychczasowej konstrukcji płyty – widok z wierzchu (a), widok od boku (c) i jej trzpienia wewnętrznego (e) oraz dla zmodyfikowanej konstrukcji płyty – widok z wierzchu (b), widok od boku (d) i jej trzpienia (f)

Dotychczasowa konstrukcja

Zmodyfikowana konstrukcja

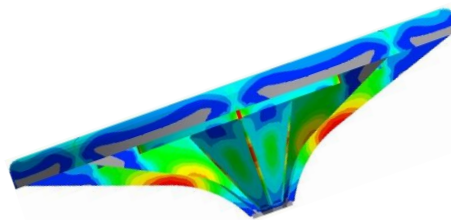
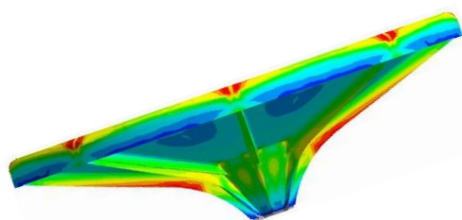
a)

b)



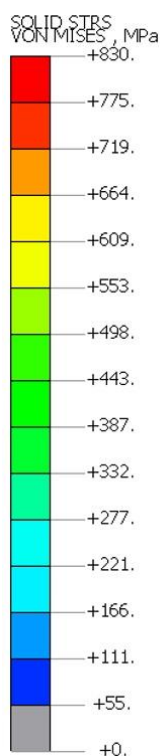
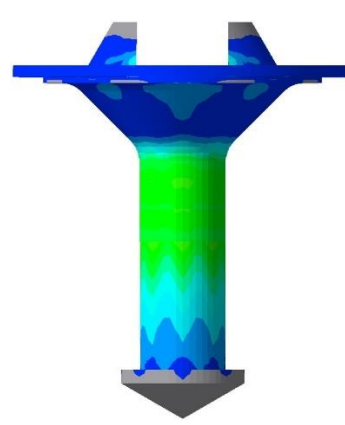
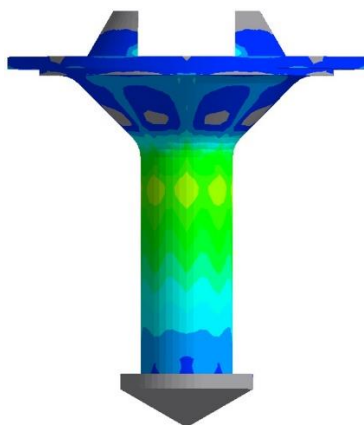
c)

d)



e)

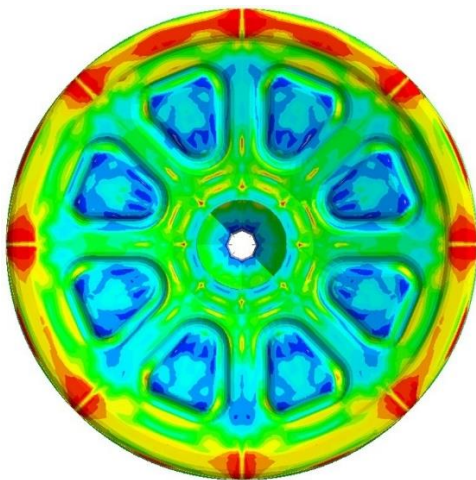
f)



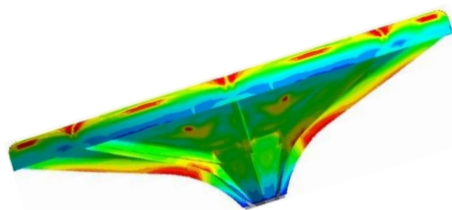
Rys. 8.8. Porównawcze analizy numeryczne ostrzału płyty oporowej z podłoża piaszczystego przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącego 45° dla dotychczasowej konstrukcji płyty – widok z wierzchu (a), widok od boku (c) i jej trzpienia wewnętrznego (e) oraz dla zmodyfikowanej konstrukcji płyty – widok z wierzchu (b), widok od boku (d) i jej trzpienia (f)

Dotychczasowa konstrukcja

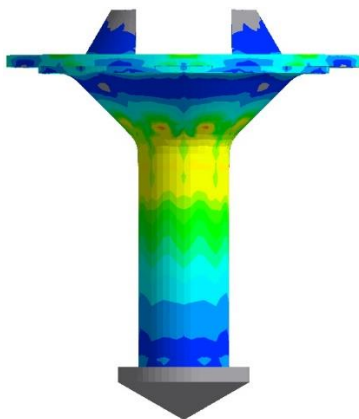
a)



c)

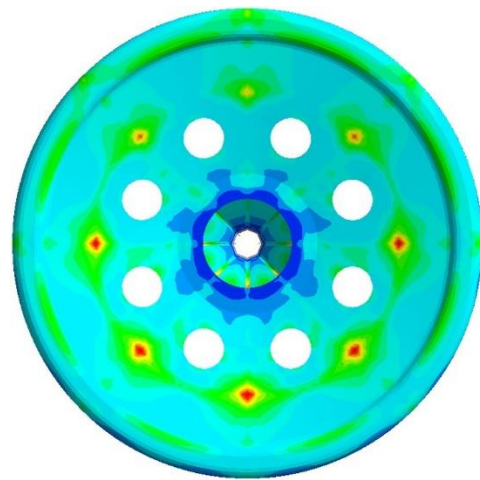


e)

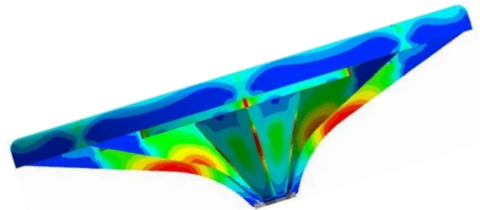


Zmodyfikowana konstrukcja

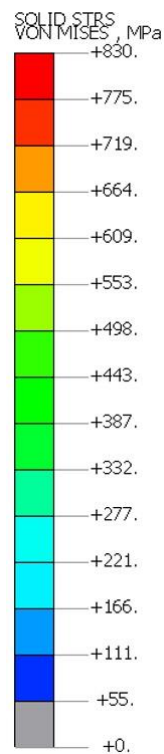
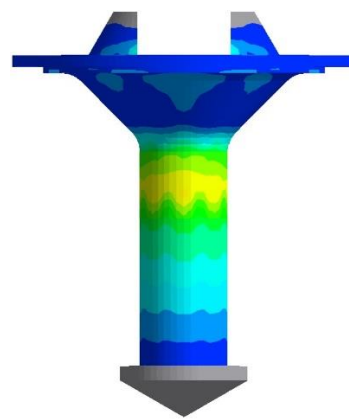
b)



d)



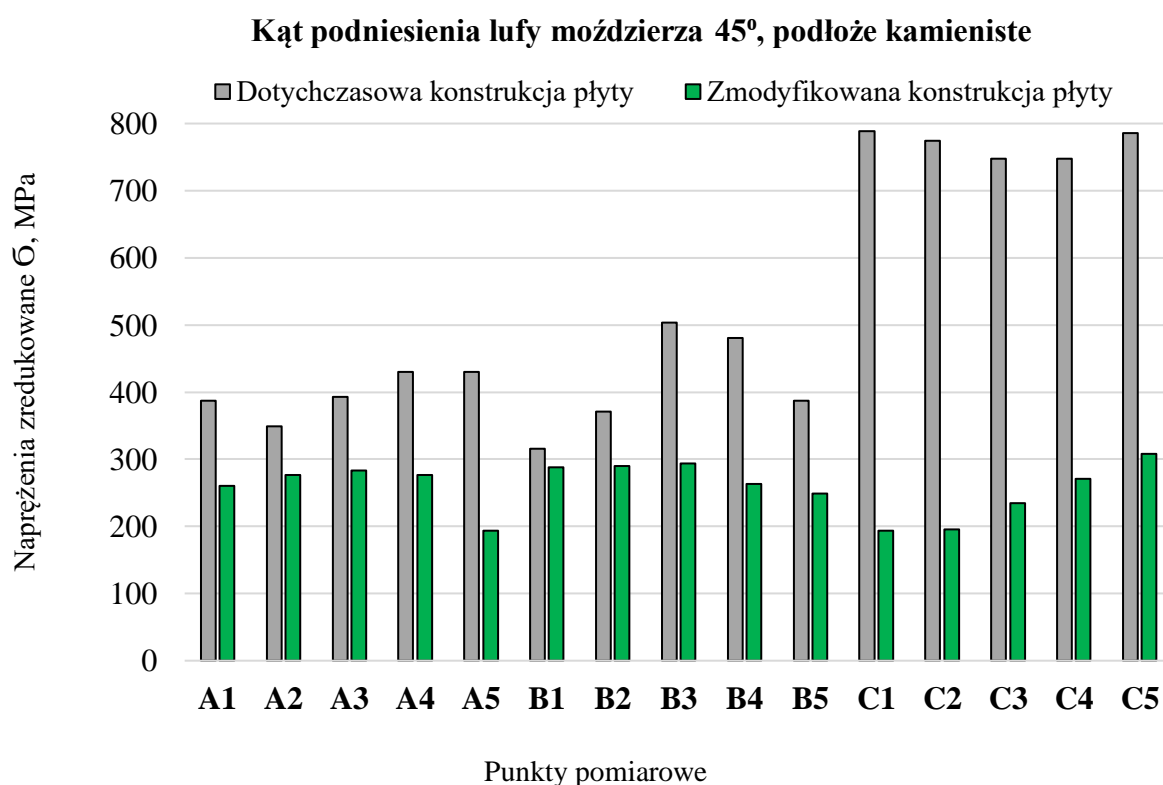
f)



Rys. 8.9. Porównawcze analizy numeryczne ostrzału płyty oporowej z podłoża kamienistego przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącego 45° dla dotychczasowej konstrukcji płyty – widok z wierzchu (a), widok od boku (c) i jej trzpienia wewnętrznego (e) oraz dla zmodyfikowanej konstrukcji płyty – widok z wierzchu (b), widok od boku (d) i jej trzpienia (f)

Na podstawie otrzymanych wyników z symulacji numerycznych MES zaobserwowano mniej zróżnicowane wartości naprężeń na poszczególnych obszarach płyty oporowej w przypadku zmodyfikowanej konstrukcji, niż dla dotychczasowej konstrukcji płyty. Łagodniejszy rozkład naprężeń w momencie strzału świadczy o lepszym sposobie ich odprowadzania. Zmodyfikowana konstrukcja płyty oporowej nie kumuluje naprężeń wokół zewnętrznego obrysu, co występowało w przypadku dotychczasowej konstrukcji.

Stosując wertykalny układ punktów pomiarowych (rys. 7.4.1), analogicznie dla zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej dokonano porównania poszczególnych wartości naprężeń występujących w obszarach A, B i C. Na podstawie rankingu (rys. 7.4.8) do porównania zmodyfikowanej i dotychczasowej konstrukcji płyty oporowej przyjęto najbardziej wymagające warunki jej pracy, stanowiące ostrzał z podłoża kamienistego przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° . Wyniki porównawcze naprężeń dla obu płyt oporowych z wyszczególnieniem zdefiniowanych punktów pomiarowych, przedstawiono w formie wykresu słupkowego na rysunku 8.10.

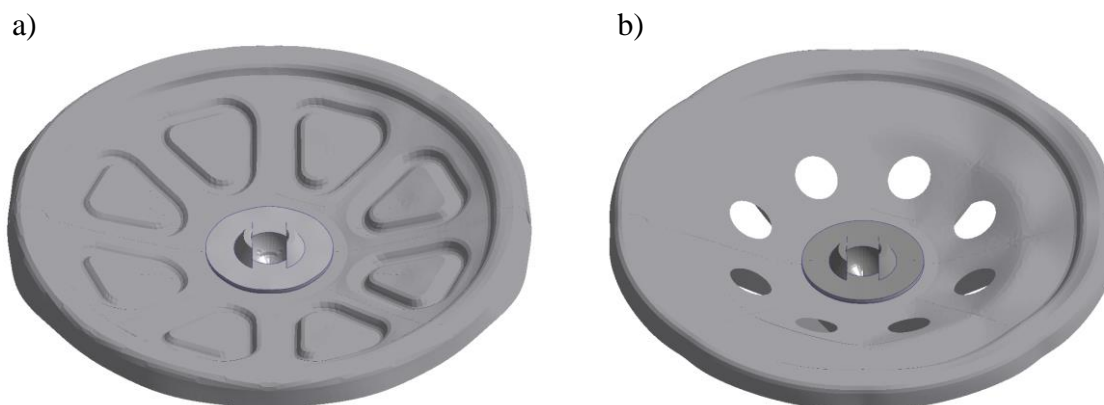


Rys. 8.10. Porównawcze wyniki naprężeń dla zmodyfikowanej i dotychczasowej konstrukcji płyty oporowej przy jej ostrzale z podłoża kamienistego pod kątem podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° , z uwzględnieniem wertykalnego rozmieszczenia punktów pomiarowych

Uzyskane wyniki naprężeń we wszystkich punktach pomiarowych z obszarów A, B i C były mniejsze dla zmodyfikowanej płyty, niż dla płyty o dotychczasowej konstrukcji. Największą różnicę wyników stanowił obszar stanowiący zewnętrzny obrys płyty oporowej (obszar C). Zmniejszenie naprężeń we wszystkich punktach pomiarowych zmodyfikowanej płyty oporowej świadczy o znalezieniu prawidłowego rozwiązania konstrukcyjnego, zapobiegającego ich spiętrzaniu. Główną zmianą geometrii rozpatrywanych płyt oporowych było zastąpienie międzyżebrowych pokryw żebrem obwodowym. Kolejna wprowadzona zmiana dotyczyła przetłoczeń usztywniających wierzchniej strony dotychczasowej konstrukcji, które zastąpiono otworami technologicznymi. W przypadku istniejącej konstrukcji płyty, naprężenia kumulowały się na zewnętrznym jej obrysie. Wynikało to z zastosowanych pokryw międzyżebrowych obwodowych, które miały na celu usztywnić i wzmocnić konstrukcję płyty, co jednocześnie prowadziło do zamknięcia jej pustych przestrzeni i tworzenia skrzyniowej struktury, utrudniającej całościowy rozkład naprężeń.

Wyniki deformacji zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej i ich analiza

W celu weryfikacji wytrzymałości zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej poprzez porównanie z istniejącą konstrukcją, przeprowadzono symulacje na obydwu modelach numerycznych. Istotą symulacji było ujęcie momentu wystrzału pocisku z moździerza, które generuje maksymalne siły działające na płytę oporową. Do symulacji przyjęto podłoże ziemne oraz kąt podniesienia lufy moździerza wynoszący 45° . Na podstawie wartości deformacji poszczególnych konstrukcji płyt oporowych uzyskano porównawcze wyniki ich odkształceń dla każdego obszaru [167]. Na rysunkach 8.11 ÷ 8.14 przedstawiono deformacje płyt, będące odpowiedzią na zadane siły.



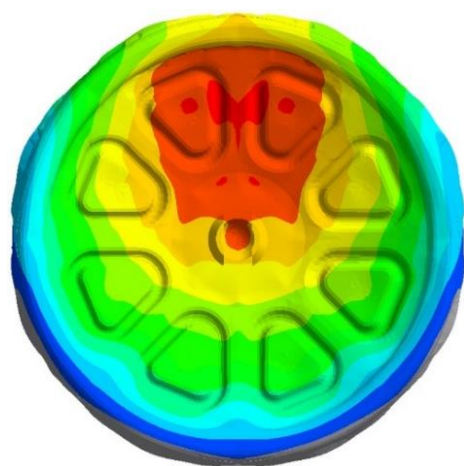
Rys. 8.11. Deformacje modeli płyt oporowych – widok izometryczny: a) dotychczasowa konstrukcja, b) zmodyfikowana konstrukcja

Dotychczasowa konstrukcja

Zmodyfikowana konstrukcja

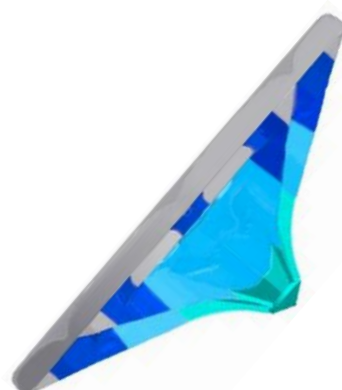
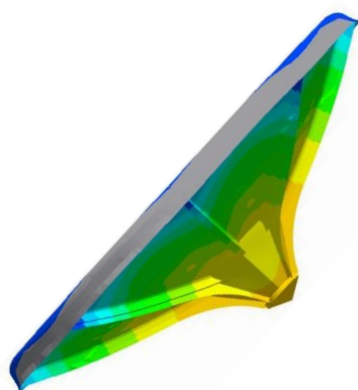
a)

b)



c)

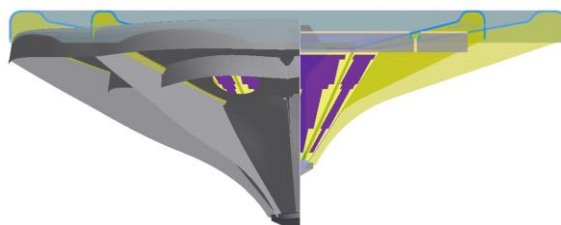
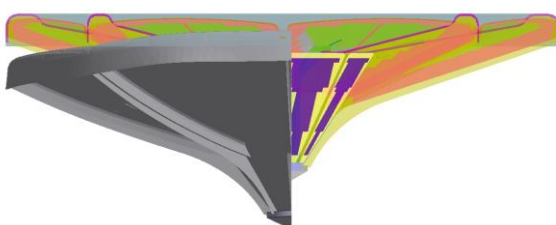
d)



Rys. 8.12. Deformacje numerycznych modeli płyt oporowych dla dotychczasowej konstrukcji – widok z wierzchu (a), widok od boku (c) i dla zmodyfikowanej konstrukcji – widok z wierzchu (b), widok od boku (d)

a)

b)

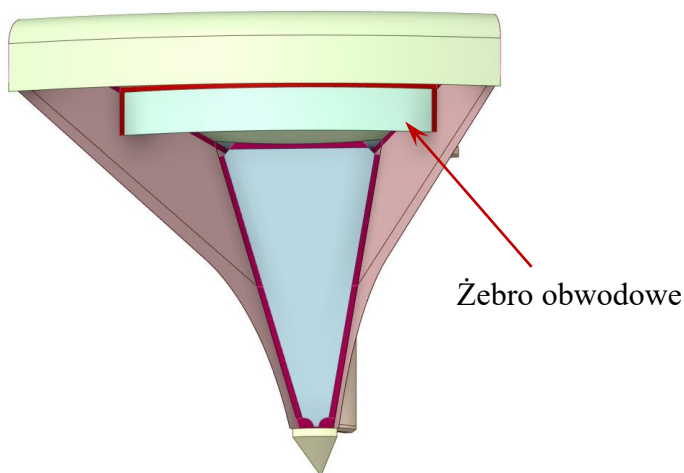


Rys. 8.13. Deformacje modeli płyt oporowych w odniesieniu do postaci przed strzałem – widok od boku: a) dotychczasowa konstrukcja, b) zmodyfikowana konstrukcja

Biorąc pod uwagę wartości deformacji uzyskane podczas symulacji prowadzonych na poszczególnych modelach numerycznych płyt oporowych (rys. 8.12 i 8.13), znacznie mniejsze odkształcenia występują na zmodyfikowanej konstrukcji. Oznacza to, że zaproponowana konstrukcja płyty oporowej w większym stopniu przeciwstawia się działaniu obciążeń z lufy moździerza poprzez wyeliminowanie obszarów, w których dochodziło do kumulowania naprężeń. Porównując jedynie maksymalne wartości odkształceń z deformacji, są one ponad dwukrotnie niższe dla zmodyfikowanej konstrukcji.

8.3. Ekspertyza zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej

Wyniki analiz numerycznych pokazały istotne zmiany w rozkładzie naprężeń na całej konstrukcji zmodyfikowanego modelu płyty oporowej. Przez zastosowanie dodatkowego żebra obwodowego (rys. 8.15), korzystnie zagospodarowano niewyťažony uprzednio obszar pokrywy międzyżebrowej przyśrodkowej, która w przypadku nowej geometrii odgrywa istotną rolę w procesie przenoszenia obciążeń. W zmodyfikowanej konstrukcji elementami najbardziej wyťažonymi okazały się spoiny łączące żebro obwodowe z głównymi żebrami całej płyty oporowej. W ich rejonie dochodzi do koncentracji naprężeń, dlatego bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na trwałość analizowanej konstrukcji jest dobór odpowiedniego typu spoiny, która zapewni możliwie największą wytrzymałość. Zabiegiem poprawiającym odprowadzanie kumulujących się naprężeń na płycie oporowej było zastosowanie otworów technologicznych na jej wierzchniej stronie, zastępujących dotychczasowe przetłoczenia usztywniające.



Rys. 8.15. Fragment zmodyfikowanej konstrukcji płyty oporowej z oznaczonym żebrzem obwodowym

Istotnym aspektem determinującym wprowadzone modyfikacje geometryczne była również znaczna masa istniejącej konstrukcji płyty oporowej, wynosząca 53 kg. W tym celu zmieniono skrzyniową budowę płyty, zastępując pokrywę międzyzębrowe usztywniające zębem obwodowym, a zamiast przetłoczeń międzyzębrowych na wierzchniej stronie wprowadzono otwory technologiczne. Po zastosowanych zmianach uzyskano redukcję masy płyty o około 30%, co sprawiło, że zmodyfikowana konstrukcja jest o około 16 kg lżejsza od dotychczasowej konstrukcji. Największą zaletą przeprowadzonych modyfikacji jest wzrost mobilności oraz ergonomii płyty oporowej na polu walki, bezpośrednio wpływający na bezpieczeństwo żołnierzy obsługujących moździerze.

Wszystkie wprowadzone modyfikacje konstrukcyjne są również znacznym ułatwieniem w procesie technologicznym wykonania płyty oporowej, ponieważ generują mniejszy nakład materiałów, pracy i czasu w cyklu produkcyjnym.

Podsumowanie

W związku ze znikomą ilością opisywanych w literaturze wyników badań dotyczących płyt oporowych mózdzierzy, podjęto analizę mającą na celu rzeczywisty ostrzał płyty oporowej mózdzierza kalibru 98 mm z korelacją otrzymanych wyników w odniesieniu do symulacji numerycznych MES. Złożoność tego typu badań umożliwiło określenie obszarów płyty oporowej, w których dochodzi do największego spiętrzenia naprężeń.

Realizacja badań wstępnych dowiodła możliwość pomiaru odkształceń płyty oporowej podczas jej ostrzału, który przeprowadzono za pomocą tensometrów jednokierunkowych. Trudne warunki ostrzału wymuszają pomiar odkształceń na wierzchniej stronie płyty oporowej przy jednoczesnym stosowaniu izolacji. W oparciu o uzyskane parametry balistyczne ustalono, że najtrudniejsze warunki ostrzału płyty oporowej, generujące największe wartości ciśnienia bezpośrednio przekładające się na siłę nacisku, zapewniają pociski dymne ukompletowane w ładunki miotające pełne przechowywane w temperaturze +50 °C.

W celu wyznaczenia naprężeń na kierunkach głównych oraz określenia naprężeń zredukowanych zastosowano rozety tensometryczne. Przygotowana instalacja składała się z dziesięciu rozet pozwalających na pomiar w trzech kierunkach głównych: 0°, 45° i 90°. Ich ilość została dostosowana do możliwości pomiarowych opracowanego toru pomiarowego do rejestracji sygnałów. Mając na uwadze bardzo wysokie koszty amunicji do badań strzelaniem, rozety rozmieszczono tak, aby pozyskać jak największą ilość danych definiujących obciążenia działające na różne obszary płyty oporowej. Instalację tensometryczną zabezpieczono zewnętrznymi czynnikami mechanicznymi i atmosferycznymi powłoką silikonową.

W oparciu o uzyskane wyniki z ostrzału płyty oporowej zaobserwowano symetryczny rozkład naprężeń w układzie wertykalnym, na podstawie którego wyznaczono rozmieszczenie punktów pomiarowych. Większość punktów przyjęto w dolnej części płyty oporowej, z uwagi na większą interakcję z gruntem, będącą następstwem wstępnego ustawienia płyty względem podłoża.

Powołując się na zapisy normatywne oraz w celu zapewnienia różnych warunków ostrzału płyty oporowej możliwych do wystąpienia w czasie jej eksploatacji, do badań eksperymentalnych przygotowano trzy podłoża odpowiadające gruntom miękkim, średnim oraz twardym. Do zapewnienia powyższych warunków ostrzału wykonano trzy sąsiednie stanowiska na terenie poligonu, charakteryzujące się różnym materiałem podłoża. Stanowiska w formie wykopów zasypano ziemią, piaskiem i kamieniem.

Poprawne zamodelowanie odkształceń występujących na płycie oporowej mózdzierza podczas strzału wymagało zdefiniowania odpowiednich warunków brzegowych. W tym celu określono rodzaj, kierunek i miejsce przyłożenia siły działającej na płytę oporową oraz rozkład, wielkość i charakter oddziaływania sił stanowiących opór gruntu. Kolejnym istotnym aspektem było odzwierciedlenie dynamicznego charakteru wystrzału oraz zdefiniowanie danych materiałowych konstrukcji i zastosowanego rodzaju podłoża.

Symulacje numeryczne MES przeprowadzono z uwzględnieniem danych wejściowych, pozyskanych z rzeczywistych pomiarów tensometrycznych, wykonanych podczas ostrzału płyty oporowej w warunkach poligonowych. Zastosowanie zmiennych warunków strzelania obejmujących różne rodzaje podłoży i kąty podniesienia lufy mózdzierza, umożliwiło zbudowanie bazy danych do zamodelowania warunków brzegowych podczas symulacji numerycznych MES.

Porównywanymi wartościami były naprężenia otrzymane z symulacji numerycznych MES oraz z pomiarów rzeczywistych, przy eksploatacji płyty oporowej w różnych warunkach ostrzału. Przeprowadzone symulacje uwzględniały zdefiniowane warunki brzegowe oraz zmienność sprężystości podłoża w określonych punktach pomiarowych przy zachowaniu zbieżności wyników w odniesieniu do pomiarów rzeczywistych.

Założeniem prowadzonych prac było otrzymanie możliwie największej zbieżności wyników naprężeń w zdefiniowanych punktach pomiarowych modelu numerycznego płyty oporowej, w porównaniu do wartości rzeczywistych zmierzonych podczas badań strzelaniem. Dla przyjętych warunków ostrzału płyty oporowej, obejmujących różne podłoża i zmienne kąty podniesienia lufy mózdzierza, uzyskano zbieżność wyników naprężeń dla poszczególnych konfiguracji zawierającą się w przedziale $72 \div 97$ %. Mając na uwadze liczne zmienne obejmujące: sztywność gruntów, sposób podparcia płyty, kąty podniesienia lufy oraz powierzchnię kontaktu płyty z podłożem, można uznać, że uzyskany poziom korelacji definiuje dokładne dopracowanie procesów symulacyjnych. Ze względu na wysoki poziom zbieżności otrzymanych wyników można uznać, że rozkłady naprężeń z symulacji MES pokrywają się z naprężeniami rzeczywistymi, co dowodzi poprawnemu odzwierciedleniu charakteru pracy płyty oraz jej najbardziej wytężonych elementów i obszarów, w zależności od rozpatrywanego przypadku.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji MES zaobserwowano, że największe spiętrzenia naprężeń występują po zewnętrznym obrysie płyty oporowej. Wynika to z jej pozycji podczas ostrzału, uwzględnionej w warunkach brzegowych i skrzyniowej konstrukcji, mogącej utrudniać tłumienie drgań w obszarze słabszego podparcia. Wpływ na zróżnicowany

stopień wyężenia poszczególnych obszarów płyty oporowej miał rodzaj zastosowanego podłoża. Przy prowadzeniu ostrzału z podłoża ziemnego i piaszczystego większe obciążenia przejmowały pokrywy międzyżebrowe, natomiast przy ostrzale z podłoża kamienistego bardziej obciążone były żebra płyty. Najtrudniejszą zmienną spośród wszystkich podjętych warunków ostrzału, okazał się kąt podniesienia lufy moździerza równy 45° , który powodował przenoszenie złożonych obciążeń z moździerza na płytę oporową.

Przyjęty układ rozmieszczenia rozet tensometrycznych potwierdził symetryczny rozkład naprężeń względem osi pionowej płyty. Pozwoliło to na analizę uzyskanych wyników symulacji w odniesieniu do połowy płyty oporowej. Z dotychczas przeprowadzonych analiz numerycznych znaczne wartości naprężeń zaobserwowano po zewnętrznym obrysie płyty oporowej. Aby prawidłowo interpretować pracę płyty podczas ostrzału, rozkład naprężeń należy rozpatrywać globalnie, równocześnie na całej jej powierzchni. Dlatego też rozpatrywany model obliczeniowy płyty oporowej podzielono na trzy obszary, o kształcie półokręgów: A – zlokalizowany najbliżej trzpienia lufy moździerza, B – przed kołnierzem, C – na kołnierzu stanowiącym zewnętrzny obrys płyty.

W oparciu o otrzymane wyniki z podziałem na poszczególne obszary i w odniesieniu do aktualnie zdefiniowanych punktów pomiarowych zaobserwowano, że największe wartości naprężeń występowały na obszarze C, odpowiadającemu zewnętrznemu obrysowi płyty oporowej oraz przy ostrzale płyty pod kątem podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° . Jest to bardzo istotny kąt, ponieważ zapewnia maksymalną donośność wystrzeliwanych pocisków. Mając na uwadze tak zdefiniowane warunki pracy płyty oporowej, lepszą współpracę zapewniały grunty o drobniejszych ziarnach, ponieważ dla zastosowanego podłoża ziemnego oraz piaszczystego, uzyskane naprężenia miały wartości mniejsze od tych, które otrzymano w przypadku gruntu kamienistego, charakteryzującego się znaczną sztywnością.

Na podstawie średnich naprężeń występujących w piętnastu punktach pomiarowych należących do trzech obszarów wertykalnego układu płyty oporowej, najtrudniejsze warunki pracy płyty stanowi podłoże kamieniste przy kącie podniesienia lufy moździerza wynoszącym 45° , tuż przed kątem podniesienia równym 60° . Prawidłowość związana z najtrudniejszymi warunkami pracy przy zastosowaniu kąta 45° powtarzała się także dla podłoża piaszczystego oraz ziemnego. Wzrost kąta podniesienia lufy moździerza powodował spadek wartości naprężeń. Jedynym wyjątkiem był wspomniany wcześniej kąt 60° przy zastosowanym podłożu kamienistym. W przypadku kąta podniesienia lufy moździerza wynoszącego 75° , uzyskano porównywalne wartości średnich naprężeń, z których najniższe zaobserwowano dla podłoża

piaszczystego. Zatem można przyjąć, że jest to konfiguracja zmiennych, która stanowi najłatwiejsze warunki pracy płyty oporowej.

W pracy zastosowano nowatorskie podejście związane z zaproponowaniem nowej metodyki prowadzenia badań numerycznych. Polegała ona na sterowaniu poszczególnymi sztywnościami wybranych obszarów modelu płyty celem uzyskania wartości naprężeń zbliżonych do rzeczywistych, zarejestrowanych podczas badań strzelaniem. Dotychczas w literaturze, aspekt zmiennej sztywności gruntu bezpośrednio wpływającej na różnorodną sztywność materiału płyty oporowej był pomijany. Uzyskane wyniki badań dowodzą słuszności zaproponowanego podejścia analizowania naprężeń występujących na zdefiniowanych obszarach płyty oporowej, zależnych od jej zmiennej sztywności.

Przeprowadzone prace analityczne umożliwiły modyfikację istniejącej konstrukcji płyty oporowej, polegającą na zmniejszeniu jej masy oraz redukcji spiętrzających się naprężeń. Osiągnięcie tych założeń powinno wydłużyć cykl eksploatacyjny płyty oporowej i poprawić jej ergonomiczność oraz mobilność na polu walki.

W efekcie zmodyfikowana konstrukcja płyty oporowej zapewniła eliminację obszarów spiętrzania naprężeń poprzez zastąpienie dotychczasowej skrzyniowej budowy, złożonej z usztywniających pokryw międzyżebrowych na rzecz żebra obwodowego oraz zamianę przetłoczeń wierzchniej części płyty otworami technologicznymi.

W oparciu o wyniki analiz numerycznych zaobserwowano istotne zmiany w globalnym rozkładzie naprężeń na zmodyfikowanej konstrukcji modelu płyty oporowej. Zastosowanie obwodowego żebra umożliwiło korzystniejsze zagospodarowanie niewyťažonego wcześniej obszaru pokrywy międzyżebrowej przyśrodkowej, która w nowej geometrii ma istotne znaczenie i jest odpowiedzialna za przenoszenie obciążeń. Najbardziej wyťažonymi elementami zmodyfikowanej konstrukcji, w rejonie których dochodzi do koncentracji naprężeń są spoiny łączące żebro obwodowe z głównymi żebrami płyty oporowej.

Analizując otrzymane porównawcze wyniki naprężeń we wszystkich piętnastu punktach pomiarowych z obszarów A, B i C dla skrajnie najtrudniejszych warunków eksploatacyjnych pracy płyty, obejmujących ostrzał z podłoża kamienistego przy ostrzale wynoszącym 45° dla dotychczasowej i zmodyfikowanej konstrukcji, wszystkie wartości były mniejsze dla zmodyfikowanej płyty. Największa różnica wyników wystąpiła na obszarze C, stanowiącym zewnętrzny obrys płyty. Zmniejszenie naprężeń we wszystkich obszarach i punktach pomiarowych zmodyfikowanej płyty oporowej dowodzi o znalezieniu właściwego rozwiązania konstrukcyjnego, zapobiegającego ich kumulowaniu.

Istotnym aspektem wprowadzonych zmian geometrycznych była redukcja znacznej masy dotychczasowej konstrukcji płyty oporowej wynoszącej 53 kg o około 30%, co spowodowało, że zmodyfikowana konstrukcja stała się o około 16 kg lżejsza. Jest to ogromna zaleta wpływająca na mobilność oraz ergonomię płyty oporowej na polu walki, co bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo żołnierzy obsługujących moździerz.

Wszystkie wprowadzone zmiany konstrukcyjne będą również stanowić znaczne ułatwienie w procesie produkcyjnym wykonania zmodyfikowanej płyty oporowej, wpływające na redukcję czasu, nakładu pracy i zmniejszenie zużycia materiałów.

Kolejnym, naturalnym etapem badań płyty oporowej moździerza M98 powinna być empiryczna weryfikacja jej zmodyfikowanej konstrukcji w warunkach poligonowych.

Wnioski końcowe:

1. Badania wstępne wykazały możliwość pomiaru odkształceń płyty oporowej mózdzierza podczas jej ostrzału z zastosowaniem tensometrów oraz pomiarów parametrów balistycznych, co pozwoliło na opracowanie metodyki badań eksperymentalnych uwzględniających symetryczny rozkład naprężeń w układzie wertykalnym oraz najtrudniejsze warunki jej pracy.
2. Pozyskanie danych wejściowych z rzeczywistych pomiarów tensometrycznych, wykonanych podczas ostrzału płyty oporowej w warunkach poligonowych, obejmujących różne rodzaje podłoża oraz różne wartości kąta podniesienia lufy mózdzierza, umożliwiło zbudowanie bazy danych niezbędnych do zdefiniowania warunków brzegowych do symulacji numerycznych MES.
3. Uzyskane w symulacjach numerycznych MES rozkłady naprężeń zredukowanych umożliwiły ujawnienie obszarów maksymalnego wyężenia płyty oporowej w zależności od rodzaju podłoża oraz kąta podniesienia lufy mózdzierza. Największe wartości naprężeń zredukowanych zaobserwowano dla płyty oporowej umieszczonej na podłożu kamienistym, przy kącie podniesienia lufy 45° i 60° oraz na podłożu piaszczystym, przy kącie podniesienia lufy 45°. Największe spiętrzenie naprężeń występuje na zewnętrznym obrysie płyty oporowej. Wynika to z jej skrzyniowej konstrukcji, utrudniającej tłumienie drgań, szczególnie w obszarze słabszego podparcia.
4. Wpływ na zróżnicowany stopień wyężenia poszczególnych obszarów płyty oporowej ma rodzaj podłoża. W wyniku zastosowania podłoża ziemnego oraz piaszczystego, większe obciążenia przejmowały pokrywy międzyżebrowe, natomiast przy ostrzale płyty z podłoża kamienistego, bardziej obciążone były żebra płyty.
5. Uwzględnienie zmiennej sztywności gruntu, bezpośrednio wpływającej na różny stopień sztywności materiału płyty oporowej mózdzierza, do tej pory pomijanej w publikowanych pracach naukowych, pozwoliło na uzyskanie zbieżności wyników symulacyjnych na poziomie 72-97%, w porównaniu z rzeczywistymi wynikami z pomiarów tensometrycznych. Dowodzi to słuszności proponowanego podejścia analizowania naprężeń oraz potwierdza poprawność przyjętej metodyki badań.
6. Przeprowadzenie analizy ANOVA umożliwiło uzyskanie cech statystycznie istotnych dla danych wejściowych (obszar płyty oporowej, kąt podniesienia lufy mózdzierza i podłoże), mających wpływ na naprężenia płyty. Parametrem najsilniej wpływającym

na wartości naprężeń płyty oporowej jest jej obszar, kolejnym kąt podniesienia lufy, a najmniej istotnym statystycznie jest rodzaj podłoża. Wartości predykcji otrzymane na podstawie opracowanego modelu neuronowego, ujmujące wpływ parametrów wejściowych (obszar płyty oporowej, kąt podniesienia lufy i podłoże) na wartości naprężeń, odpowiadają rzeczywistemu charakterowi i wartościom zarejestrowanym w trakcie badań eksperymentalnych.

7. Na podstawie uzyskanych wyników badań zaproponowano modyfikację konstrukcji płyty oporowej mózdzierza. Skrzyniową budowę płyty zastąpiono żebrami obwodowym, a w miejsce przetłoczeń wprowadzono otwory technologiczne. Efektem tych zmian była eliminacja obszarów spiętrzenia naprężeń i obniżenie ich wartości oraz redukcja masy o około 30%. Wyniki symulacji dla zmodyfikowanej konstrukcji mogą zostać uwzględnione w procesie projektowania nowej konstrukcji płyty oporowej mózdzierza M98, co powinno zredukować naprężenia przy równoczesnym obniżeniu jej masy, zapewniając jej większą mobilność w warunkach bojowych.
8. Opracowana metodyka badań eksperymentalnych oraz metodyka tworzenia analizy MES mogą być wykorzystane do opracowania lub zmiany konstrukcji typoszeregu płyt oporowych mózdzierzy.

Literatura

- [1] *Encyklopedia Techniki Wojskowej*. Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, str. 492, Warszawa, 1978.
- [2] Kijewski, J.; Kupidura, P.; Zahora, M. *Lexicon of Land Forces Weapons M-98 mortar, caliber 98 mm*, Land Forces Review, no. 5, 2004.
- [3] Świątek, T.; Madej, W. *Mortars – an overview of construction and applications*, Problems of Armament Technology and Radio-location, no. 50, pp. 37-51, 1993.
- [4] <https://www.hsw.pl/wp-content/uploads/2021/08/ciagnione.pdf>
- [5] Kaczmarzyk, J.; Nowicki, J.; *Modułowe dodatkowe ładunki miotające do amunicji moździerzowej*, Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 85, str. 53-63, Zielonka, 2002.
- [6] Dmitruk T.: *Modernizacja Wojsk Lądowych 2021-2035*, Nowa Technika Wojskowa, nr 9/2022, str. 17, 2022.
- [7] Saunders A.: *Weapons of the Trench War, 1914-1918*, Phoenix Mill: Sutton Publishing, pp. 127, 2000.
- [8] Norris J.: *Infantry Mortars of World War II*, Oxford: Osprey Publishing, pp. 20, 2002.
- [9] Kaczyński A.: *Moździerz 82 mm wzór 1937*, Militaria XX wieku, nr 2/2009, Kagero.
- [10] Great Britain War Office, *Handbook of the M.L. Stokes 3-Inch Trench Mortar Equipments*, His Majesty's Stationery Office, London, 1920.
- [11] <https://www.ima-usa.com/products/original-french-wwii-brandt-mle-27-31-1mmdisplay-mortar-system-with-baseplate-and-bipod-italian-cyrillic-markings>
- [12] Gardner T., Chamberlain P.: *Enzyklopädie deutscher waffen 1939-1945*, Motorbuch Verlag, 2006.
- [13] Ciepliński A., Woźniak R.: *Encyklopedia współczesnej broni palnej (od połowy XIX wieku)*, Wydawnictwo WIS, str. 149, Warszawa, 1994.
- [14] Wolfram J., Zasieczny A.: *Broń piechoty Wehrmachtu 1939-1945*, Oficyna Wydawnicza Alma-Press, str. 141-142, Warszawa, 2009.
- [15] <https://web.archive.org/web/20160304222324/http://wojskoitechnika.cba.pl/dane/120.html>
- [16] Field Manual no. 23-90, Technical Order no.11W2-5-13-21: *Mortars*, U.S. Government Printing Office, Washington, 2000.
- [17] <https://web.archive.org/web/20131113160611/http://www.army.mil:80/factfiles/equipment/indirect/m224.html>

- [18] <https://web.archive.org/web/20131020212956/http://www.army.mil/factfiles/equipment/indirect/m252.html>
- [19] <https://man.fas.org/dod-101/sys/land/m120.htm>
- [20] Littlefield A. G., Sibilja J.: *Simulated proof testing of mortar baseplates*, US Army RDECOM-ARDEC Benét Laboratories, Conference paper, Watervliet, N.Y., 2008.
- [21] <https://innovatsiooipesadest.tehnopol.ee/?g=120-mm-mortar-regiment-of-the-1943-isolated-on-qq-QmGWrU3>
- [22] <https://www.turbosquid.com/pl/3d-models/mortar-120mm-3d-model/540876>
- [23] Praca zbiorowa pod redakcją Zalewskiego K.: *120 mm moździerz mobilny z Huty Stalowa Wola*, Nowa Technika Wojskowa, nr 9, str. 36-37, 2005.
- [24] <https://kotadef.sk/projekty/minomety-2/?lang=en>
- [25] <https://weaponsystems.net/system/1145-120mm+Soltam+K625>
- [26] <https://www.n-tv.de/politik/Bundeswehr-eroeffnet-neuen-Ubungsplatz-article20148579.html>
- [27] https://military-history.fandom.com/wiki/120_KRH_92
- [28] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Granatkastare_modell_41_Revinge_2015.jpg
- [29] <https://weaponsystems.net/system/1154-120mm+Type+W86>
- [30] Wang F., Yang G., Xu F.: *Uncertain optimization for composite base plate of mortar under impact load*, Vibroengineering Procedia, vol. 49, 2023.
- [31] Sayir H., Willison C. H., Gugliotta J. D., Leppo G.: *Architecturally design mortar base plate*, Patent Application Publication no. US 2011/0219945 A1, Sep. 15, 2011.
- [32] Adams V., Askenazi A.: *Building better products with finite element analysis*, OnWord Press First edition, pp. 15-25, USA, 1999.
- [33] Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T.: *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
- [34] Rakowski G., Kacprzyk Z.: *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, str. 13-27, Warszawa, 2005.
- [35] Zienkiewicz O. C.: *Metoda elementów skończonych*, Arkady, str. 379-390, Warszawa, 1972.
- [36] Łodygowski M., Kąkol W.: *Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, str. 5-8, Poznań, 2003.

- [37] Kacprzyk Z., Maj M., Pawłowska B., Sokół T.: *Poradnik metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Wydanie drugie, Warszawa, 2011.
- [38] Gokhale N. S., Deshpande S. S., Bendekar S. V., Thite A. N.: *Practical Finite Element Analysis*, Finite To Infinite, pp. 1-27, Maharashtra, India, 2008.
- [39] Bielski J.: *Wprowadzenie do inżynierskich zastosowań metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010.
- [40] Kleiber M.: *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1989.
- [41] Jurczak W., Szturomski B.: *Symulacja metodą elementów skończonych stanu naprężenia w rozciąganej próbce aluminiowej z jednostronnym ubytkiem korozyjnym*, Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki (red. Niezgoda T.), WAT, str. 107-117, Warszawa, 2006.
- [42] Żochowski P., Bajkowski M., Grygoruk R., Magier M., Burian W., Pyka D., Bocian M., Jamroziak K.: *Finite element modeling of ballistic inserts containing aramid fabrics under projectile impact conditions – comparison of methods*, Composite Structures, vol. 294, pp. 1-21, 2022.
- [43] Frącz W., Janowski G.: *Analiza numeryczna procesu wytwarzania kompozytowego fotela pasażera miejskiego autobusu w technologii RTM*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, tom 17, nr 5, str. 28-32, 2016.
- [44] Kawalec A., Magdziak M.: *The selection of radius correction method in the case of coordinate measurements of a turbine blade*, Precision Engineering vol. 49, pp. 243-252, 2017.
- [45] Marzec K., Kucaba-Piętal A.: *Numerical Investigation Of Local Heat Transfer Distribution On Surfaces With A Non-Uniform Temperature Under An Array Of Impinging Jets With Various Nozzle Shapes*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol. 55, no. 4, pp. 1313-1324, 2017,
- [46] Nowotyńska I., Kut S.: *Wykorzystanie metod symulacji w procesie wytwarzania elementów złącznych*, Technika, nr 12/2015, str. 2776-2779.
- [47] Noga S., Markowski T.: *Analiza drgań własnych przekładni zębatej małej mocy*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, tom 89, nr 4, str. 517-528, 2017.
- [48] Trzepieciński T., Lemu, H. G., Fejkiel, R.: *Finite element method-based modeling of bending under tension friction test of deep drawing quality steel sheets*, International Journal of Simulation Modelling, vol. 16, no. 4, pp. 590-602, 2017.

- [49] Rusiński E., Lewandowski T., Karliński J., Jamroziak K.: *Eksperymentalno – numeryczna analiza kształtowania odporności balistycznej samochodu specjalnego*, Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 34, str. 97-108, Zielonka, 2005.
- [50] Murzynowski W.: *Analiza stanu naprężeń i odkształceń metodą elementów skończonych (MES) w łopacie drugiego stopnia turbiny gazowej*, Energetyka str. 34-39, 2007.
- [51] Lewkowicz R., Hinz T., Rypina Ł., Królikowski T., Piątkowski P.: *Symulacja naprężeń i odkształceń w podłużnicach samochodowych*, Mechanik nr 5-6/2011, str. 510-515.
- [52] Wang X.: *Optimal Design of a Large Caliber Mortar Base Plate Structure*, Nanjing University of Technology, 2019.
- [53] Wang F., Yang G., Wang D., Ge J., Yu Q., Li Z.: *Research on the test and lightweight design of a mortar base plate*, Shock and Vibration, vol. 39, no. 17, pp. 76-81, 2020.
- [54] Ristić Z., Kari A., Bajević M.: *Dinamička analiza modela podloge minobacača primenom softverskog paketa pro/engineer*, Vojnotehnički Glasnik č. 1/09, Beograd, 2009.
- [55] Wang F., Yang G.: *Topological Design of a Mortar Base Plate under Impact Loads*, Shock and Vibration, vol. 2021.
- [56] Battaglia J.: *Comparative evaluation test of lightweight company mortar auxiliary baseplate, XM8E2 modified*, Benet Weapons Laboratory, ARLCB-MR-79032, USA, 1979.
- [57] Polska Norma PN-S-02205: *Drogi samochodowe; Roboty ziemne; Wymagania i badania*, Polski Komitet Normalizacyjny, 1998.
- [58] Błażejczak D., Dawidowski J., Malinowski M., Śnieg K.: *Wybrane aspekty metodyczne wykorzystania aparatu Proctora w badaniach zagęszczalności gleb*, Wydawnictwo WiR, tom 147, nr 4/2013, str. 27-34.
- [59] Norma Branżowa BN-77/8931-12: *Oznaczanie wskaźnika zagęszczenia gruntu*, Budownictwo Komunikacji Lądowej, 1977.
- [60] Jermołowicz P.: *Wskaźnik odkształcenia*, <https://inzynieriasrodowiska.com.pl/>, 2021.
- [61] Parylak K.: *Kontrola zagęszczania gruntów lekką płytą dynamiczną*, <https://inzynierbudownictwa.pl/>, 2019.
- [62] Sulewska M.: *Moduły odkształcenia gruntu niespoistego wyznaczone metodą dynamiczną*, Rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, 1993.

- [63] DIN 18134 (E) Soil. Testing Procedures and Testing Equipment. Plate Load Test; Deutsches Institut fur Normung E.V.: Berlin, 2012.
- [64] Gosk W.: *Badanie podłoża gruntowego za pomocą płyty dynamicznej ZFG-01 – ocena zastosowania modelu sprężystego do interpretacji wyników*. Aparatura Badawcza i Dydaktyczna nr 2/2010, str. 99-106.
- [65] Wyroślak M., Ossowski R.: *Badanie modułu odkształcenia podłoża gruntowego w nasypie kontrolowanym za pomocą płyty statycznej i lekkiej płyty dynamicznej*. Acta Scientiarum Polonorum Architectura, tom 15, nr 3, str. 111–118, 2016.
- [66] Sulewska M.: *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w badaniach wybranych parametrów geotechnicznych*, Inżynieria Morska i Geotechnika nr 4/2012, str. 388-392.
- [67] Ochmański M., Bzówka J.: *Wybrane przykłady zastosowań sztucznych sieci neuronowych w geotechnice*, Budownictwo i Inżynieria Środowiska nr 4/2013, str. 287–294.
- [68] Dacko M, Borkowski W., Dobrociński S, Niezgoda T., Wieczorek M.: *Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji*, Arkady, Warszawa, 1994.
- [69] Hoffman K.: *An Introduction to Measurements Using Strain Gauges*, Hottinger Baldwin Messtechnik Gmbh, Darmstadt, Niemcy, 1989.
- [70] Kowalczyk M., Maślak P., Rusiński E.: *Badanie eksperymentalnych wartości przeciążeń w napędach jazdy koparek wielonaczyniowych kołowych*, Górnictwo Odkrywkowe, tom 55, nr 4-5, str. 25-30, 2014.
- [71] Wróbel A.: *Tensometryczna metoda pomiaru naprężeń w modelu laboratoryjnym do badania podzespołów i zespołów niezbędnych do innowacyjnej konstrukcji wagonów towarowych*, Zeszyty Naukowe WSOWL, tom 159, nr 1, str. 286-293, 2011.
- [72] Dyniewicz B., Sekuła K., Dębowski T.: *Dynamic measurements of the railway transportation using piezoelectric sensors*, Road and Bridges, vol. 9, no. 1, pp. 31-44, 2010.
- [73] Małecki A., Mydlowski T., Dybała J.: *Stanowisko hamowania do badań silników spalinowych o małych mocach*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, tom 96, nr 5, str. 55-66, 2013.
- [74] Hannah R. L., Reed S. E.: *Strain Gage user's Manual*, Society for Experimental Mechanics, 1992.

- [75] Kowalewski Z. L., Szymczak T.: *Podstawy tensometrii elektrooporowej oraz praktyczne jej zastosowania*, Dziewiętnaste seminarium pt. *Nieniszczące badania materiałów*, Zakopane, 12-15.03.2013 r.
- [76] Gałkiewicz J.: *Pomiar naprężeń metodą tensometrii oporowej w warunkach obciążeń monotonicznie zmiennych i cyklicznie zmiennych*, ([zhttps://w3.tu.kielce.pl/~jgalka/html/md/skrypt/cwicz_04.pdf](https://w3.tu.kielce.pl/~jgalka/html/md/skrypt/cwicz_04.pdf)).
- [77] Ejiko S. O., Olakolegun O. D.: *Design and Construction of Indigenous Strain Gauge Equipment*, Journal of Mechanical and Civil Engineering, vol. 15, issue 2 ver. IV (Mar. - Apr. 2018), pp. 49-59.
- [78] Styburski W.: *Przetworniki tensometryczne. Konstrukcja, projektowanie, użytkowanie*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1971.
- [79] *Statyczne pomiary tensometryczne*, Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Politechnika Śląska, (http://imio.polsl.pl/Dopobrania/WM_lab_tensometry.pdf).
- [80] Roliński Z.: *Tensometria oporowa. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1981.
- [81] Skorupka Z., Sobieszek A.: *Strain gauge pin based force measurement*, Journal of KONES, vol. 25, no. 2, pp. 335-340, 2018.
- [82] Dudek K., Huss W., Prus L.: *Tensometria oporowa w badaniach konstrukcji nośnej koparek wielonaczyniowych*, Wybrane Problemy Inżynierskie, nr 1/2010, str. 13-17.
- [83] Fomichev P., Zarutskiy A., Lyovin A.: *Improving Method for Measuring Engine Thrust with Tensometry Data*, Systems, Decision and Control in Energy I, pp. 51-67, 2020.
- [84] Dobrociński S., Jurczak W., Szturomski B.: *Pomiar odkształceń metodą tensometryczną w krańcu szyn lądowego urządzenia dokowego*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, tom 73, nr 1, str. 191-198, 2004.
- [85] Rośkowicz M., Leszczyński P.: *Evaluation of the Suitability of the Strain-Gauge Method for Measuring Deformations during the Fatigue Tests of Aviation Composite Structures*, Fatigue of Aircraft Structures, vol. 2017, pp. 75-84, 2017.
- [86] *Modelowanie numeryczne i analiza kuloodporności wielowarstwowych pakietów wykonanych z włókien paraaramidowych*, Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa, vol. 7, nr 1, str. 43-59, 2016.
- [87] Damaziak K., Małachowski J., Płatek P., Woźniak R.: *Badania numeryczne dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka standardowego*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, tom 61, nr 3, str. 181-194, 2012.

- [88] Strachowski M., Rogowski K.: *Numeryczna i eksperymentalna analiza flutteru skrzydła*, Mechanika w lotnictwie, nr ML-XXI 2024, str. 237-256, 2024.
- [89] Magdziak M., Kawalec A.: *The accuracy of calculating form deviations of selected free-form surfaces*, Mechanik nr 11/2017, str. 1035-1037.
- [90] Skrzat A., Wójcik M.: *Explicit and Implicit Integration of Constitutive Equations of Chaboche Isotropic-Kinematic Hardening Material Model*, Acta Metallurgica Slovaca vol. 29, no. 4, pp. 200-205, 2023.
- [91] Krysiak P., Szczepaniak M., Śliwiński J., Wojciechowski A., Wojcieszńska P.: *Modelowanie i analiza wytrzymałościowa zbiornika do transportu przedmiotów zawierających materiały wybuchowe*, Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 139, nr 3/2016, str. 93-106.
- [92] Toivola J., Moilanen S., Jussila H. R.: *Force, pressure and strain measurements for traditional heavy mortar launch cycle*, Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics) vol. 44, no. 4, pp. 309-329, 2011.
- [93] Bieniek P., Weiss J.: *Metody pomiaru maksymalnego ciśnienia gazów prochowych stosowane podczas strzelania ze stanowiska wyposażonego w 120 mm armatę czołgu Leopard 2A4*, Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 149, nr 1/2019, str. 85-98.
- [94] Bieniek P., Milewski E., Tupaj M., Łysiak K.: *Analiza metod pomiaru wybranych parametrów balistycznych podczas strzelania z 155 mm stanowiska balistycznego*, Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 171, nr 4/2024, str. 49-73.
- [95] Flynn P. D.: *Strain-gage instrumentation for ammunition testing. Experimental Mechanics*; 192-200, 1975.
- [96] Bartnik G., Józefiak K., Superczyńska M., Czerwińska M., Krajewski W., Legieć J., Kuśnierz T., Magier M.: *The Use of Geotechnical Methods to Determine the Deformation Parameters of the Ground in Terms of Operation and Safety of Mortar Use*, Materials no. 14 (23), 2021.
- [97] Norma Obronna NO-06-A103:2021: *Uzbrojenie i sprzęt wojskowy; Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań; Wymagania środowiskowe*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa 2021.
- [98] Norma Obronna NO-10-A216:2021 *Działa artyleryjskie; Moździerze ciągnięte (holowane) i przenośne; Wymagania i Badania*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa, 2021.
- [99] Tauscher S.: *Failure analyses of M3A1 baseplate for 81-mm mortar 252*, Technical report ARCCB-TR-92033, Benét Laboratories, Watervliet, N.Y., 1992.

- [100] Bieniek P., Weiss J.: *Charakterystyka zjawisk zachodzących w przewodzie lufy podczas strzału amunicją artyleryjską i ich wpływ na zużycie*, Technika lufowa – materiały, technologie, konstrukcje, eksploatacja, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, str. 15- 32, Rzeszów, 2021.
- [101] Radomski M.: *Warunki pracy luf i związane z tym zagadnienia wytrzymałości i żywotności*, Informator WITPiS nr 47, str. 90-170, Warszawa, 1997.
- [102] Polska Norma PN-89/H-84030/04: *Stal stopowa konstrukcyjna; Stal do ulepszania cieplnego i hartowania powierzchniowego; Gatunki*, Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa, 1989.
- [103] Polska Norma PN-H-92135:1981: *Blachy grube ze stali konstrukcyjnej węglowej wyższej jakości i stopowej*, Warszawa, 1981.
- [104] <https://auremo.pl/materials/d-stal-30hgsa.html>
- [105] EN ISO 16834:2012 *Welding consumables - Wire electrodes, wires, rods and deposits for gas shielded arc welding of high strength steels - Classification*, Geneva, 2012.
- [106] DIN EN ISO 6892-1: *Metal tensile test at ambient temperature*, Geneva, 2019.
- [107] Polska Norma PN-91/H-04310: *Próba statyczna rozciągania metali*, Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa, 1991.
- [108] Dzierwa A., Gałda L., Tupaj M., Dudek K.: *Investigation of wear resistance of selected materials after slide burnishing process*, Maintenance and Reliability, vol. 22, no. 3, pp. 432-439, 2020.
- [109] Tupaj M., Orłowicz A.W., Mróz M., Trytek A., Dolata A. J., Dziedzic A.: *A Study on Material Properties of Intermetallic Phases in a Multicomponent Hypereutectic Al-Si Alloy with the Use of Nanoindentation Testing*, Materials no. 13 (24), 2020.
- [110] Kłysz S.: *Podstawy Wytrzymałości Materiałów*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, str. 65 – 68, Warszawa, 2015.
- [111] Ćwikła A., Tofil A., Włosek N., Gontarz A.: *Wykorzystanie skanera 3D do analizy zużycia matryc do kucia na zimno*, Hutnik - Wiadomości Hutnicze, vol. 85, nr 7, str. 214-218, 2018.
- [112] Juras B., Szewczyk D.: *Dokładność pomiarów realizowanych skanerem optycznym*, Postępy Nauki i Techniki, tom nr 7, str. 29-36, 2011.
- [113] Derejczyk K., Siemiński P.: *Analiza dokładności metod optycznego skanowania 3D*, Mechanik, nr 4/2016, str. 312-313.
- [114] Kubik H., Dłutowski C.: *Wykorzystanie skanowania 3D w przemyśle*, Mechanik, nr 2/2016, str. 255-258.

- [115] Bieniek P., Tupaj M.: *Characteristics of the measurement of ballistic parameters during firing from the 155 mm ballistic station of the KRAB self-propelled howitzer*, 17th International Conference on Materials and Technologies for Defense and Security, Brno, 2023.
- [116] STANAG 4114: *Measurements of Projectile Velocities*, NATO, Brussels, 1997.
- [117] STANAG 4113: *Pressure Measurement by Crusher Gauges*, Brussels, 1993.
- [118] Wojskowa Norma Branżowa WBN-91/1003-54: *Prochy i ładunki miotające do naboju artyleryjskich, moździerzowych i granatnikowych. Badania balistyczne*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Zielonka, 1992.
- [119] Instruction manual: *Quartz High-Pressure Sensor Type 6215*, Kistler Group, Switzerland, 2013.
- [120] Instruction manual: *Charge Meter Type 5015A...*, Kistler Group, Switzerland, 2010.
- [121] Quick Start Guide: *Picoscope PC Oscilloscope*, Pico Technology, UK, 2009.
- [122] Torecki S.: *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa, 1980.
- [123] Weibel Scientific A/S: *Weibel SL-520 radar antenna manual*, Denmark, 1993-1996.
- [124] Stępnia W.: *Badania balistyczne przy użyciu Dopplerowskiego Zestawu Balistycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1995.
- [125] Norma Obronna NO-06-A107:2021: *Sprzęt wojskowy; Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań; Metody badania odporności całkowitej na działanie czynników środowiskowych*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa, 2021.
- [126] https://dezamet.com.pl/files/files/98_mm_dymna.pdf
- [127] Kuśnierz T., Bazela R., Magier M.: *Badania poligonowe partii prototypowej naboju z pociskiem dymnym do 98 mm moździerza M98*, Problemy Techniki Uzbrojenia tom 113, nr 1/2010, str. 33-38.
- [128] https://dezamet.com.pl/files/files/98_mm_o%C5%9Bwietlaj%C4%85ca.pdf
- [129] Kuśnierz T., Bazela R., Magier M.: *Badania poligonowe partii prototypowej naboju z pociskiem oświetlającym do 98 mm moździerza M98*, Problemy Techniki Uzbrojenia tom 113, nr 1/2010, str. 39-44.
- [130] Zarzycki B.: *Wybrane sposoby wytwarzania ciśnienia rozcalającego kasetę 98 mm pocisku moździerzowego*, Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 128, Zielonka, 2013.
- [131] Bazela R., Szajna J.: *Zapalniki elektroniczne*, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zielonka, 2009.
- [132] <https://www.zse.de/en/transducer-sensors/strain-gages/for-concrete/kfgs-serie>

- [133] <https://product.kyowa-ei.com/en/products/strain-gages/type-kfgs>
- [134] <https://www.mesko.com.pl/produkt/naboj-mozdzierzowy-98-mm-he>
- [135] Torecki S.: *1000 słów o broni i balistyce*, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa, 1982.
- [136] Gacek J.: *Balistyka zewnętrzna, cz. 1 – Modelowanie zjawisk balistyki zewnętrznej i dynamiki lotu*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 1997.
- [137] Krzyżanowski S.: *Analiza zależności kąta podniesienia lufy od wzajemnego położenia celu i stanowiska ogniowego*, Zeszyty Naukowe WSOWL, tom 148, nr 2, str. 31-40, 2008.
- [138] Bieniek P., Sz wajka K.: *Metody pomiaru czasu strzału podczas strzelania 120 mm amunicją czołgową*, Technika lufowa – materiały, technologie, konstrukcje, eksploatacja, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, str. 151-163, Rzeszów, 2021.
- [139] <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B03899.pdf>
- [140] Surdacki P., Gontarz A.: *Analiza porównawcza modeli MES procesu walcowania pierścieni*, Hutnik - Wiadomości Hutnicze, vol. 85, nr 3, str. 75-79, 2018.
- [141] Magier M., Burian W., Juszczak B., Gmitrzu k M., Starczewski L., Żochowski P., Marcisz J.: *Protection effectiveness of perforated plates made of high strength steel*, International Journal of Impact Engineering, vol. 126, pp. 27-39, 2019.
- [142] Pyka D., Kurzawa A., Bocian M., Bajkowski M., Magier M., Śliwiński J., Jamroziak K.: *Numerical and Experimental Studies of the ŁK Type Shaped Charge*, Applied Sciences-Basel, vol. 10, no. 19, pp. 1-20, 2020.
- [143] Pater Z., Gontarz A.: *Modelowanie numeryczne procesu walcowania uzębienia skośnego*, Rudy i Metale Nieżelazne, vol. 55, nr 6, str. 366-369, 2010.
- [144] Panowicz R., Nowak J., Konarzewski M., Niezgoda T.: *Introduction to numerical analysis of directed fragmentation warheads*, Journal of KONES, vol. 20, no. 4, pp. 319-325, 2013.
- [145] Jurczak W., Kyzioł L.: *Modelling of the ship structural ballistic shields from the 10GHMBA steel*, Solid State Phenomena, vol. 180, pp. 303-312, 2012.
- [146] Żochowski P., Bajkowski M., Grygoruk R., Magier M., Burian W., Pyka D., Bocian M., Jamroziak K.: *Comparison of Numerical Simulation Techniques of Ballistic Ceramics under Projectile Impact Conditions*, MDPI Materials, vol. 15, no. 1, pp. 1-22, 2022.
- [147] *ANSYS SpaceClaim 2016 Use'r Guide*, SpaceClaim Corporation, USA, 2016.

- [148] Mazur D., Rudy M.: *Modelowanie w systemie NX CAD*, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, 2016.
- [149] *Midas NFX Analysis Manual*, MIDAS Information Technology Co., 2015.
- [150] <https://midasit.com.pl/opanowanie-analizy-strukturalnej/>
- [151] Polska Norma PN-81-B-03020: *Grunty budowlane; Posadowienie bezpośrednie budowli; Obliczenia statyczne i projektowanie*, Wydanie 3, Instytut Techniki Budowlanej, 1985.
- [152] <https://midasit.com.pl/odslanianie-potencjalu-midas-nfx/>
- [153] Szymański A.: *Mechanika gruntów*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2007.
- [154] Bieniek P., Tupaj M., Sz wajka K.: *The Influence of the Variability of the Support of the Mortar Base Plate on the Quality of the Results Obtained in the Process of Its Numerical Design*, Advances in Mechanical and Materials Engineering, vol. 41, pp. 103-111, 2024.
- [155] Bieniek P., Tupaj M., Sz wajka K.: *Experimental studies and numerical simulation stress analysis of mortar base plate under impact loading*, Shock and Vibration, in press, 2025.
- [156] Sz wajka K., Trzepieciński T.: *Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard*, Journal of Wood Science, vol. 62, pp. 305-315, 2016.
- [157] Sz wajka K.: *Surface roughness after drilling of laminated chipboard*, Advances in Mechanical and Materials Engineering, vol. 32, pp. 81-88, 2015.
- [158] https://mfiles.pl/pl/index.php/Test_Fishera
- [159] Tadeusiewicz R., Szaleniec M.: *Leksykon Sieci Neuronowych*, Wydawnictwo Fundacji Projekt Nauka, Wydanie I, Wrocław, 2015.
- [160] Kluska J., Żabiński T., Mączka T.: *Applications of Computational Intelligence Methods for Control and Diagnostics*, Automatic Control, Robotics, and Information Processing, pp. 671-698, 2010.
- [161] Borowiec A., Ziemiański L.: *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji uszkodzenia w belkach - badania numeryczne i doświadczalne*, Czasopismo Techniczne. Mechanika, tom 109, nr 8-M, str. 3-13, 2012.
- [162] Kozakiewicz A., Kieszek R., Rogólski R.: *Optimization of a Jet Engine Compressor Disc with Application of Artificial Neural Networks for Calculations Related to Time and Mass Criteria*, Advances in Science and Technology Research Journal vol. 15, no. 2, pp. 208-218, 2021.

- [163] Drózd K., Kamiński M., Serkies P. J., Szabat K.: *Zastosowanie sieci neuronowych do estymacji prędkości napędu elektrycznego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, vol. 69, nr 33, str. 132-140, 2013.
- [164] Patra K., Pal S. K., Bhattacharyya K.: *Artificial neural network based prediction of drill flank wear from motor current signals*, Applied Soft Computing, vol. 7, no. 3, pp. 929-935, 2007.
- [165] Osowski S.: *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1996.
- [166] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciski D.: *Sztuczne Sieci Neuronowe Podstawy i Zastosowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1994.
- [167] Bieniek P., Tupaj M., Sz wajka K.: *Experimental and Simulation Studies of the Deformation of the Base Plate of the M98 Mortar*, International Scientific Conference on Materials and Technologies for Defense and Security, Trenčín, 2024.

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Tytuł: Analiza naprężeń i odkształceń w procesie modelowania płyty oporowej mózdzierza

Autor: mgr inż. Piotr Bieniek

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Tupaj, prof. PRz

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Sz wajka

Słowa kluczowe: płyta oporowa mózdzierza, pomiar odkształceń, kumulacja naprężeń, modelowanie numeryczne MES, zmodyfikowana konstrukcja.

Streszczenie:

Przedmiotem pracy była analiza stanu naprężeń płyty oporowej mózdzierza M98 w oparciu o wyniki z symulacji numerycznych MES, uzyskanych na podstawie danych eksperymentalnych.

Badania eksperymentalne, których metodykę opracowano na podstawie badań wstępnych obejmowały zbudowanie stanowiska pomiarowego, przygotowanie amunicji oraz ostrzału płyty oporowej. Badania strzelaniem prowadzono balistycznymi pociskami mózdzierzowymi ukończonymi w ładunki miotające wzmocnione z podłoża ziemnego, piaszczystego i kamienistego, przy kącie podniesienia lufy mózdzierza wynoszącym 45°, 60° i 75°. Pomiary odkształceń poszczególnych obszarów płyty wykonywano z zastosowaniem tensometrii elektrooporowej. Pozwoliły one na określenie ekstremalnych warunków eksploatacyjnych dla płyty oporowej oraz pozyskanie danych eksperymentalnych w zakresie jej odkształceń, wartości siły nacisku i jej rozkładu oraz wartości naprężeń zredukowanych. Uzyskane dane pomiarowe z ostrzału płyty wraz z wynikami jej badań materiałowych, przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych, posłużyły do zdefiniowania warunków brzegowych do symulacji numerycznych.

Badania symulacyjne, opierające się na metodzie elementów skończonych, obejmowały utworzenie modelu obliczeniowego płyty oporowej, zdefiniowanie warunków brzegowych uwzględniających dane wejściowe z pomiarów eksperymentalnych oraz przeprowadzenie analiz numerycznych, w celu określenia wartości naprężeń występujących w poszczególnych

obszarach płyty oporowej. W symulacjach uwzględniano zmienną sztywność gruntu mającą wpływ na rozkład naprężeń płyty. Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych dokonano weryfikacji stanu naprężeń wybranych obszarów płyty oporowej mózdzierza M98 oraz zlokalizowano miejsca ich największego spiętrzenia. Stwierdzono, że największe wartości naprężeń płyty oporowej występowały na jej zewnętrznym obrysie. Natomiast najtrudniejsze warunki pracy płyty stanowiło podłoże kamieniste przy kącie podniesienia lufy mózdzierza wynoszącym 45° . Prawidłowość związana z najtrudniejszymi warunkami pracy przy zastosowaniu kąta 45° powtarzała się także dla podłoża piaszczystego i ziemnego. Wzrost kąta podniesienia lufy mózdzierza powodował spadek wartości naprężeń.

W oparciu o przeprowadzone prace analityczne zmodyfikowano model numeryczny konstrukcji płyty oporowej mózdzierza. Efektem wprowadzonych zmian była eliminacja obszarów spiętrzenia naprężeń i obniżenie ich wartości oraz redukcja masy o około 30%. Wyniki symulacji dla zmodyfikowanej konstrukcji mogą zostać uwzględnione w procesie projektowania nowej konstrukcji płyty oporowej mózdzierza M98, co powinno zredukować naprężenia przy równoczesnym obniżeniu jej masy, zapewniając jej większą mobilność.

Opracowana metodyka badań eksperymentalnych oraz metodyka tworzenia analizy MES mogą być wykorzystane do opracowania lub zmiany konstrukcji typoszeregu płyt oporowych mózdzierzy.

Doctoral dissertation abstract

Title: Analysis of stress and strain in the process of modeling the mortar base plate

Author: MSc Eng. Piotr Bieniek

Supervisor: DSc, PhD Eng. Mirosław Tupaj, Associate Professor

Co-supervisor: PhD Eng. Krzysztof Szwajka

Keywords: mortar base plate, strain measurement, stress accumulation, FEM numerical modeling, modified design.

Abstract:

The subject of the work was the analysis of the stress state of the base plate of the M98 mortar based on the results of FEM numerical simulations obtained on the basis of experimental data.

Experimental research, the methodology of which was developed on the basis of preliminary research, included the construction of a measurement station, preparation of ammunition and firing of the base plate. Shooting tests were carried out with ballistic mortar shells equipped with reinforced propellant charges made of earth, sand and rocks, at an elevation angle of the mortar barrel of 45°, 60° and 75°. Strain measurements of individual areas of the plate were performed using electrofusion strain gauges. They allowed for the determination of extreme operating conditions for the base plate and the acquisition of experimental data regarding its strain, pressure force values and its distribution, and reduced stress values. The measurement data obtained from the firing of the plate, together with the results of its material tests carried out in laboratory conditions, were used to define the boundary conditions for numerical simulations.

Simulation studies, based on the finite element method, included creating a computational model of the base plate, defining boundary conditions taking into account input data from experimental measurements, and conducting numerical analyzes to determine the values of stresses occurring in individual areas of the base plate. The simulations took into account variable soil stiffness, which had an impact on the slab stress distribution. Based on the

numerical analyses, the stress state of selected areas of the M98 mortar base plate was verified and the places of their greatest accumulation were located. It was found that the highest stress values of the base plate occurred on its outer contour. However, the most difficult working conditions for the plate were rocky ground with a mortar barrel elevation angle of 45° . The regularity related to the most difficult working conditions using an angle of 45° was also repeated for sandy and earthy substrates. An increase in the mortar barrel elevation angle resulted in a decrease in stress values.

Based on the analytical work carried out, the numerical model of the mortar base plate structure was modified. The effect of the changes introduced was the elimination of stress concentration areas and their reduction, as well as a weight reduction of approximately 30%. The simulation results for the modified structure can be taken into account in the design process of the new structure of the M98 mortar base plate, which should reduce stresses while reducing its weight, ensuring its greater mobility.

The developed experimental research methodology and the methodology for creating FEM analysis can be used to develop or change the design of a series of types of mortar base plates.