



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

ROZPRAWA DOKTORSKA

Badania wybranych własności blachy perforowanej
jako materiału konstrukcyjnego

Autor: Marcin Michał Wieczorek

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wacław Muzykiewicz, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Mroczkowski

Praca wykonana: AGH, Wydział Metali Nieżelaznych, Katedra Przeróbki
Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych

Kraków, 2023

*Dziękuję moim Najbliższym za wszelakie wsparcie
i wyrozumiałość w czasie pisania pracy.*

*Składam serdeczne podziękowania Promotorowi Panu
Profesorowi Wacławowi Muzykiewiczowi za opiekę naukową,
cenne rady i sugestie, życzliwość, zaangażowanie oraz czas
poświęcony na dyskusje podczas badań i redakcji pracy.*

*Serdecznie dziękuję Promotorowi Pomocniczemu Doktorowi
Marcinowi Mroczkowskiemu za udzielone wskazówki,
konsultacje i wsparcie podczas badań. Wyrazy wdzięczności
kieruję do Pracowników i Kolegów z Wydziału Metali
Nieżelaznych, zwłaszcza do Doktorów Łukasza Kuczka
i Pawła Pałki, za pomoc w badaniach numerycznych
i eksperymentalnych.*

Spis treści

Streszczenie	6
Summary	8
Wykaz ważniejszych oznaczeń, definicje	10
Wprowadzenie.....	11
1. Materiały inżynierskie	13
2. Rynek blach perforowanych	16
2.1. Asortyment.....	16
2.1.1. Metody perforowania blach.....	17
2.1.2. Kształt otworu	19
2.1.3. Układ perforacji i wielkość otworów	24
2.1.4. Materiały stosowane do produkcji blach perforowanych.....	27
2.1.5. Siatki cięto-ciągnione	30
2.2. Przegląd zastosowań	32
3. Analiza własności blach perforowanych – stan zagadnienia	40
3.1. Własności blach (płyt) perforowanych stosowanych w wymiennikach ciepła.....	40
3.2. Zakres posprężysty materiałów perforowanych (kryterium plastyczności).....	44
3.3. Zjawisko wyboczenia płyt (płytek) perforowanych.....	49
3.4. Badania materiałów perforowanych w obszarze sprężystym	57
3.5. Analiza sprężysto-plastyczna blach (płyt) perforowanych dla różnych schematów obciążenia.....	59
3.6. Koncentracja naprężeń w blachach (płytach) perforowanych	63
3.7. Kształtowanie przestrzenne blach perforowanych.....	69
3.8. Obciążenia dynamiczne blach perforowanych.....	73
3.9. Blacha perforowana jako element materiałów kompozytowych	76
3.10. Pozostałe obszary badań	79

4. Teza i cele pracy	83
5. Zakres i metodyka badań.....	84
5.1. Materiał do badań.....	84
5.2. Charakterystyka badanych perforacji.....	85
5.3. Wyznaczanie własności mechanicznych.....	87
5.3.1. Moduł Younga.....	88
5.3.2. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie	91
5.4. Wyznaczanie charakterystyk gięcia badanych materiałów	92
5.4.1. Konstrukcja narzędzi i opis stanowiska do prób zginania blachy.....	92
5.4.2. Opis procedury badań.....	93
5.5. Symulacje numeryczne	96
5.5.1. Jednoosiowe rozciąganie w zakresie sprężystym.....	100
5.5.2. Symulacja stanu naprężenia i odkształcenia w blachach poddanych gięciu	103
6. Wyniki badań i ich analiza.....	106
6.1. Wskaźnik ubytku masy blachy perforowanej	106
6.2. Wartości i rozkład modułu Younga	108
6.3. Wartości i rozkład własności wytrzymałościowych	121
6.4. Analiza wpływu perforacji na sztywność blachy.....	133
6.5. Wpływ prześwitu i wielkości otworów na własności sprężyste blachy perforowanej	139
6.6. Wpływ szerokości próbki i usytuowania linii cięcia blachy perforowanej na efektywny moduł Younga	150
6.7. Analiza stanu naprężenia i odkształcenia w blachach perforowanych	155
6.7.1. Jednoosiowe rozciąganie	155
6.7.2. Trójpunktowe gięcie.....	161
6.8. Badania aplikacyjne	167
7. Podsumowanie i wniosek	188

Literatura.....	192
Netografia	226
Spis rysunków.....	234
Spis tabel.....	244

Streszczenie

BADANIA WYBRANYCH WŁASNOŚCI BLACHY PERFOROWANEJ JAKO MATERIAŁU KONSTRUKCYJNEGO

Mnogość zastosowań blach perforowanych wynika z zestawienia ich własności mechanicznych i użytkowych. Specyfika tej grupy materiałów inżynierskich jest determinowana rodzajem surowca macierzystego i parametrami perforacji. W tym względzie istotny jest m.in. odpowiedni dobór wartości prześwitu, który umożliwia kontrolowany przepływ substancji (gazów, cieczy, rozdrobnionych ciał stałych) czy fal dźwiękowych i elektromagnetycznych. Przeznaczenie konstrukcyjne blach perforowanych wymaga ponadto określonej charakterystyki sprężystej i wytrzymałościowej tego typu tworzywa.

W części teoretycznej pracy omówiono asortyment blach perforowanych, dotyczący m.in. metod i parametrów perforacji, a także surowców stosowanych do ich produkcji. Dokonano przeglądu zastosowań rozpatrywanych materiałów. Analizę stanu zagadnienia związaną z własnościami blach perforowanych przeprowadzono, uwzględniając przede wszystkim aspekt ich zastosowań jako materiału konstrukcyjnego. Część badawcza, poprzedzona tezą i sformułowaniem celów pracy, zawiera wyniki doświadczalne i symulacji numerycznej, związane z odpowiedzią sprężystą i wytrzymałością mechaniczną blachy z regularnym układem otworów cylindrycznych w różnych schematach obciążenia. Materiał referencyjny stanowiła blacha pełna tego samego gatunku i grubości: stalowa DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754. Rozważano perforacje o dużym znaczeniu aplikacyjnym: prostą (układ kwadratu) i heksagonalną (trójkątną równoboczną) – dla jednakowej średnicy otworu (2 mm) i skoku, równym dwóm średnicom (4 mm). Badania wykazały istotny wpływ geometrycznych cech siatki otworów na sztywność i wytrzymałość perforowanego materiału. Generalnie, własności te kształtowały się na wyższym poziomie w przypadku blachy z perforacją prostą, natomiast blacha z heksagonalnym układem otworów wykazywała pod tym względem większą jednorodność. Charakterystyka mechaniczna blachy perforowanej, będąca pochodną własności materiału macierzystego i parametrów związanych z samą perforacją, może także w większym stopniu zależeć od sposobu obciążenia w porównaniu do blachy litej. Istotne znaczenie ma bowiem rozmieszczenie otworów i rozpatrywany kierunek w płaszczyźnie blachy (kierunek perforacji). Pod tym względem, w świetle przeprowadzonych badań, sztywność blachy z perforacją prostą jest silniej determinowana schematem obciążenia niż blachy z perforacją heksagonalną.

Często jednym z kluczowych aspektów związanych z projektowaniem konstrukcji jest połączenie jej niskiej masy z odpowiednią wytrzymałością. Określony ubytek masy blachy w wyniku perforacji może w różnym stopniu obniżać i wpływać na izotropię jej własności sprężystych i wytrzymałościowych, zależnie od parametrów perforacji. W tym kontekście, analizę otrzymanych wyników przeprowadzono także z uwzględnieniem wskaźnika ubytku masy, który wyraża stosunek masy blachy perforowanej do masy macierzystej blachy pełnej. Pozwala on ponadto na trafniejszą ocenę wpływu różnej perforacji na własności blachy perforowanej, wykonanej z tego samego materiału bazowego (tej samej blachy pełnej).

Rozkłady naprężeń i odkształceń w blachach z perforacją prostą i heksagonalną, poddanych jednoosiowemu rozciąganiu i trójpunktowemu gięciu, przedstawiono na przykładzie blachy stalowej DC01, gdyż charakter rozkładu analizowanych parametrów pozostaje taki sam, niezależnie od materiału referencyjnego. Niezmienny jest także wpływ samej perforacji na zmianę własności blachy macierzystej, niezależnie od jej rodzaju. Pokazano to, przeprowadzając analogiczne badania dla blachy stalowej DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754.

Dopełnieniem podjętej tematyki było m.in. określenie wpływu usytuowania linii cięcia blachy perforowanej na efektywny moduł Younga. Rozważano różny przebieg krawędzi bocznych próbki i linii wyznaczających jej bazę pomiarową względem okrągłych otworów, rozmieszczonych w układzie prostym. Ponadto, wyznaczono odpowiednie krzywe, ilustrujące wpływ prześwitu na spadek własności sprężystych materiału dla charakterystycznych kierunków perforacji prostej, uwzględniając różną średnicę otworu.

Aspekt poznawczy pracy uzupełniono badaniami o charakterze aplikacyjnym, związanymi z zastosowaniem blachy perforowanej w innowacyjnych rozwiązaniach tzw. zespołu powierzchniowego, stosowanego jako panele elewacyjne. Analizowano numerycznie m.in. rozkład naprężeń i odkształceń w blasze ze stopu aluminium EN AW-5754 z otworami okrągłymi i kwadratowymi w układzie prostym. Dla każdej perforacji wyznaczono obciążenia graniczne przy zadanym współczynniku bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: blacha perforowana, moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga), własności wytrzymałościowe, jednoosiowe rozciąganie, trójpunktowe gięcie

Summary

STUDY OF SELECTED PROPERTIES OF PERFORATED METAL SHEET AS A CONSTRUCTION MATERIAL

The variety of applications of perforated metal sheets results from the combination of their mechanical and functional properties. The specificity of this group of engineering materials is determined by the type of matrix material and the perforation parameters. In this respect, the proper selection of the open area, which allows for controlled flow of substances (gases, liquids, fragmented solids) or sound and electromagnetic waves, is essential. The construction purpose of perforated metal sheets also requires a specific elastic and strength characteristic of this type of material.

In the theoretical part of the paper, the assortment of perforated metal sheets was discussed, including methods and parameters of perforation, as well as raw materials used for their production. A review of applications of the considered materials was conducted. The analysis of the state of the art related to the properties of perforated metal sheets was carried out, primarily considering their use as a construction material. The research part, preceded by the thesis and the formulation of the objectives, contains experimental and numerical simulation results related to the elastic response and mechanical strength of the metal sheet with a regular arrangement of cylindrical holes in various loading schemes. The reference material was the solid sheet of the same grade and thickness: DC01 steel and EN AW-5754 aluminium alloy. Perforations with significant application value were considered: straight (square arrangement) and hexagonal (equilateral triangular) - for the same hole diameter (2 mm) and pitch, equal to two diameters (4 mm). The studies showed a significant influence of the geometrical features of the hole grid on the stiffness and strength of the perforated material. In general, these properties were higher for the sheet with straight perforation, while the sheet with a hexagonal hole arrangement exhibited greater homogeneity in this respect. The mechanical characteristics of the perforated metal sheet, which are derived from the properties of the matrix material and the parameters related to the perforation itself, may also depend more on the loading mode compared to the solid sheet. The distribution of holes and the considered direction in the metal sheet plane (direction of perforation) are of significant importance. In this respect, in light of the conducted studies, the stiffness of the metal sheet

with straight perforation is more strongly determined by the loading scheme than that of the metal sheet with hexagonal perforation.

One of the key aspects related to the design of structures is often the combination of low mass with adequate strength. A certain loss of mass due to perforation may to varying degrees reduce and affect the isotropy of the elastic and strength properties, depending on the perforation parameters. In this context, the analysis of the obtained results was also carried out considering the mass loss ratio, which expresses the relation of the mass of the perforated sheet to the mass of the matrix solid sheet. This also allows for a more accurate assessment of the influence of different perforations on the properties of the perforated metal sheet, made of the same base material (the same solid sheet).

The stress and strain distributions in the sheets with straight and hexagonal perforation, subjected to uniaxial tension and three-point bending, are presented for the example of DC01 steel sheet, as the nature of the distribution of the analyzed parameters remains the same, regardless of the reference material. The influence of the perforation itself on the change in the properties of the matrix sheet also remains unchanged, regardless of its type. This was shown by conducting analogous studies for DC01 steel sheet and EN AW-5754 aluminium alloy sheet.

A complement to the undertaken topic was, among others, determining the influence of the location of the cutting line of the perforated sheet on the effective Young's modulus. Different courses of the side edges of the sample and the lines determining its measurement base with respect to the round holes arranged in a straight pattern were considered. Moreover, the appropriate curves illustrating the influence of the open area on the decrease in the elastic properties of the material for characteristic directions of straight perforation were determined, taking into account different hole diameters.

The cognitive aspect of the work was supplemented with application-oriented research related to the use of perforated metal sheet in innovative solutions of the so-called surface assembly, used as facade panels. The numerical analysis included, among others, the distribution of stresses and strains in the sheet made of EN AW-5754 aluminium alloy with round and square holes in a straight arrangement. For each perforation, the limit loads were determined at a given safety factor.

Keywords: perforated metal sheet, modulus of elasticity (Young's modulus), strength properties, uniaxial tension, three-point bending

Wykaz ważniejszych oznaczeń, definicje

Blacha perforowana – blacha z określonym (najczęściej regularnym) układem otworów o ustalonym kształcie, wymiarach i rozmieszczeniu

Przyjęte w badaniach oznaczenia w odniesieniu do stosowanych perforacji:

- P** – układ prosty (w badanym przypadku – kwadratowy)
- H** – układ heksagonalny (w *nomenklaturze produkcyjnej*: układ mijany 60°)
- o** – otwór okrągły (w pracy nazywany także cylindrycznym)
- k** – otwór kwadratowy
- s** – skok – parametr perforacji, równy odległości pomiędzy środkami otworów w kierunku ich najgęstszego upakowania (w literaturze dotyczącej blach perforowanych często posługiwano się także tzw. *współczynnikiem wiązadła*)

Przykłady pełnego oznaczenia blachy perforowanej:

- Ho2s4** – blacha perforowana z Heksagonalnym układem otworów okrągłych o średnicy 2 mm ze skokiem 4 mm
- Pk5s8** – blacha perforowana z Prostym układem otworów kwadratowych o boku 5 mm ze skokiem 8 mm
- d, a – wymiar (średnica, długość boku) otworu perforacji, mm
- s – skok (w *nomenklaturze produkcyjnej*: t – podziałka), mm
- P – wielkość prześwitu blachy perforowanej (procentowy udział powierzchni otworów w stosunku do całkowitej powierzchni blachy), %
- KW – kierunek walcowania
- KP – kierunek poprzeczny do kierunku walcowania
- 0°, 30°, 45°, 60°, 90° – orientacja (kierunek) w płaszczyźnie blachy pełnej i perforowanej względem kierunku walcowania
- E – moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) blachy pełnej (bez perforacji), GPa
- E* – efektywny moduł Younga blachy perforowanej, GPa
- E*/E – stosunek modułów Younga blachy perforowanej i pełnej
- R_{p0,2} – umowna granica plastyczności, MPa
- R_e – granica plastyczności, MPa
- R_m – wytrzymałość na rozciąganie, MPa
- R_{p0,2}*/R_e lub R_{p0,2}*/R_{p0,2} – stosunek granicy plastyczności blachy perforowanej i pełnej
- R_m*/R_m – stosunek wytrzymałości na rozciąganie blachy perforowanej i pełnej
- W_m – wskaźnik (ubytku) masy

Komentarz: W pracy używano określenia „własności” w odniesieniu do analizowanych cech badanych materiałów, jako alternatywnego do określenia „właściwości”. Obydwa są powszechnie stosowane w literaturze technicznej, chociaż wydaje się, iż nieco częściej występuje zwrot „własności” (np. mechaniczne, wytrzymałościowe), co może mieć także historyczne uzasadnienie.

Wprowadzenie

Blachy perforowane znajdują szerokie spektrum zastosowań w różnych gałęziach przemysłu – od górnictwa, przez budownictwo i architekturę, po elektronikę, a nawet sztukę. Stanowią często istotny element innowacyjnych rozwiązań inżynierskich. Wynika to z ich specyficznych własności użytkowych (m.in. obniżona masa, dźwiękochłonność, rozpraszanie ciepła, pochłanianie promieniowania, funkcje filtracyjne), połączonych z korzystną charakterystyką mechaniczną. Rozpatrywane materiały inżynierskie mogą tworzyć zasadniczą część czy też pewien element (detal) danej konstrukcji, gdzie są często stosowane w postaci płaskich (bez wcześniejszego formowania przestrzennego) arkuszy. Wówczas, oprócz odpowiednio wykonanej perforacji zapewniającej oczekiwaną funkcjonalność i estetykę, ważna jest także wytrzymałość takiego materiału determinowana jego przeznaczeniem i warunkami eksploatacji.

Zachowanie blachy perforowanej pod wpływem obciążeń zewnętrznych jest inne w porównaniu do materiału macierzystego (bez perforacji). W ujęciu makroskopowym wyraża się to m.in. poprzez niższe własności mechaniczne oraz ich mniej jednorodny rozkład w płaszczyźnie blachy, wynikający z geometrycznych cech siatki otworów. Mając na uwadze mnogość możliwych wariantów perforacji (prześwit, układ, wielkość, kształt i profil otworów) oraz liczną bazę perforowanych materiałów (różne gatunki stali oraz metali nieżelaznych i ich stopów, płyty z tworzyw sztucznych) właściwym i pomocnym wydaje się przyjęcie określonej metodyki wyznaczania własności blach perforowanych, kluczowych z perspektywy ich konstrukcyjnego przeznaczenia. W tym względzie bardzo często stosowane jest podejście, zgodnie z którym dane parametry materiału perforowanego odnosi się do analogicznych wartości dla materiału referencyjnego (blachy pełnej) otrzymując w rezultacie zestaw bezwymiarowych i uogólnionych współczynników (niezależnych od rodzaju materiału macierzystego) dla określonego typu i kierunków perforacji. W przypadku regularnego układu otworów wybrane własności można wyznaczyć w oparciu o jego charakterystyczne kierunki. Do najczęściej stosowanych w praktyce należy m.in. układ prosty i mijany 60° (heksagonalny) z otworami cylindrycznymi, co w dużym stopniu zadecydowało o wyborze tych perforacji do badań.

W rozdziale 1 niniejszej pracy przedstawiono ogólną specyfikę własności blach perforowanych na tle pozostałych materiałów inżynierskich, ujętych według ich ogólnej klasyfikacji. Szeroką rozpiętość asortymentową oraz przegląd zastosowań rozpatrywanych wyrobów omówiono syntetycznie w rozdziale 2, korzystając z pierwotnego i najpełniejszego

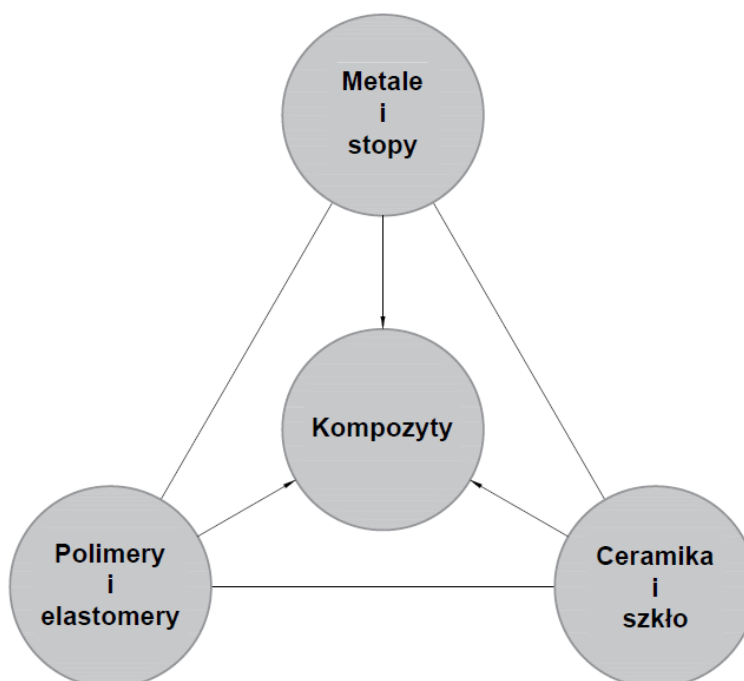
pod tym względem źródła informacji, czyli z danych internetowych (w tym broszur) udostępnianych przez przedsiębiorstwa działające w branży omawianych materiałów (głównie producentów). Stan zagadnienia, dotyczący własności blach perforowanych istotnych zwłaszcza w kontekście ich konstrukcyjnego zastosowania, zamieszczono w rozdziale 3. W kolejnym rozdziale 4 sformułowano tezę pracy, której weryfikacji dokonano w oparciu o wyznaczone cele badawcze. Treść rozdziału 5 obejmowała charakterystykę rozpatrywanych materiałów oraz opis sposobu wyznaczania ich własności mechanicznych w różnych schematach obciążenia. Wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych zawiera rozdział 6, w którym przeprowadzono m.in. analizę wpływu określonego rodzaju perforacji i ubytku masy na własności sprężyste i wytrzymałościowe blachy perforowanej. Niejako dopełnieniem podjętej tematyki i jednocześnie potwierdzeniem jej znaczenia także w wymiarze praktycznym są zrealizowane badania aplikacyjne, dotyczące innowacyjnego rozwiązania tzw. zespołu powierzchniowego z blachą perforowaną, stosowanego np. jako sufity podwieszane, wykończenia ścian wewnętrznych czy elewacji. Pracę w części merytorycznej zamyka całościowe podsumowanie i wnioski, stanowiące rezultat otrzymanych wyników i ich szczegółowej analizy.

1. Materiały inżynierskie

Materiałami w ujęciu technicznym nazywane są ciała stałe o własnościach umożliwiających ich stosowanie przez człowieka do wytwarzania produktów. Najogólniej, wśród materiałów o znaczeniu technicznym można wyróżnić:

- **materiały naturalne**, wymagające jedynie nadania kształtu do technicznego zastosowania,
- **materiały inżynierskie**, nie występujące w naturze, wymagające zastosowania złożonych procesów wytwórczych do ich przystosowania do potrzeb technicznych po wykorzystaniu surowców dostępnych w naturze [1].

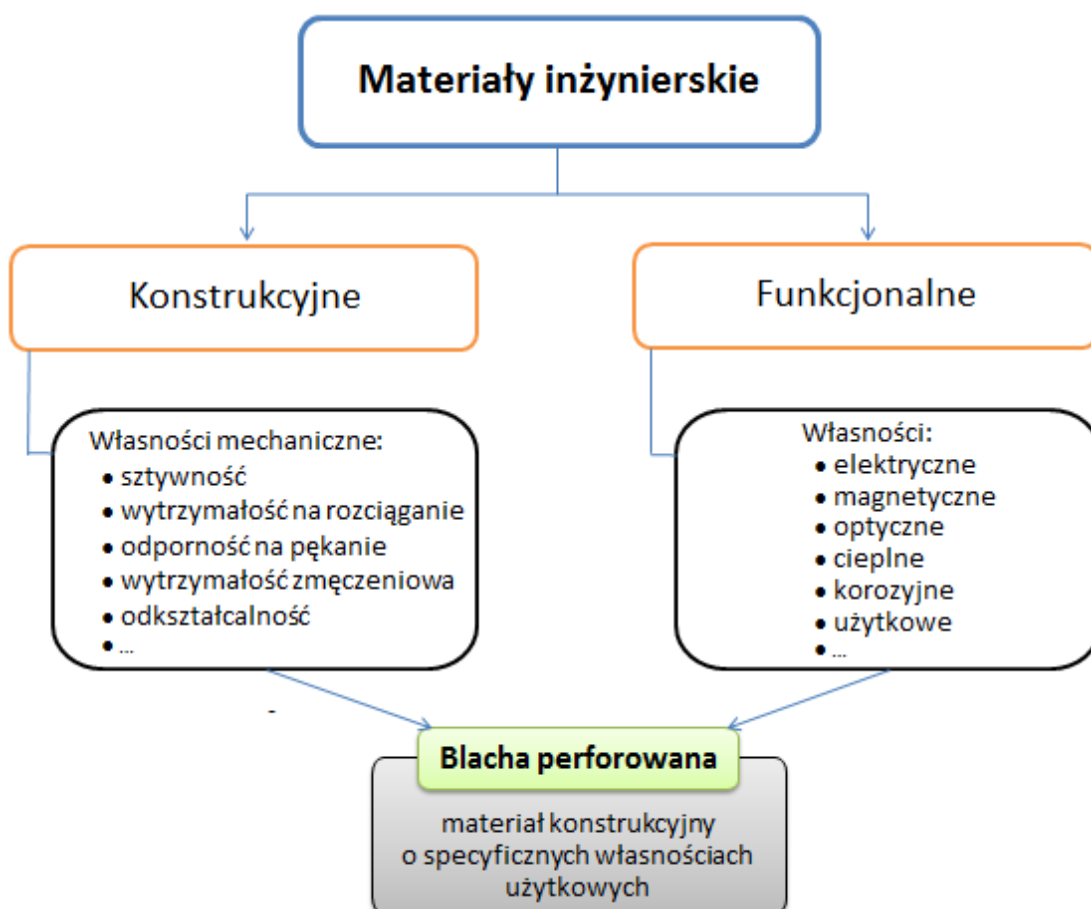
Materiały inżynierskie można klasyfikować na wiele sposobów, różniących się zarówno subiektywnością jak i przydatnością praktyczną. W często stosowanej klasyfikacji ze względu na skład chemiczny, strukturę atomów i wiązania międzyatomowe wyodrębnia się trzy podstawowe grupy materiałów inżynierskich: metale i ich stopy, ceramiki i szkła oraz polimery. Wyróżnia się również kompozycje dwóch lub więcej materiałów podstawowych, nazywane kompozytami (rys. 1.1). Stosowane jest również pojęcie materiały hybrydowe.



Rys. 1.1. Klasyfikacja materiałów inżynierskich, uwzględniająca budowę wewnętrzną i rodzaj wiązań międzyatomowych [3]

Często materiały klasyfikuje się ze względu na zastosowanie i wówczas wyróżnia się materiały konstrukcyjne (strukturalne) oraz materiały funkcjonalne (rys. 1.2). Materiały funkcjonalne są stosowane ze względu na inne własności niż zdolność do przenoszenia

obciążeń mechanicznych lub ich przydatność wynika z określonych zastosowań użytkowych [2].



Rys. 1.2. Schemat ilustrujący podział materiałów inżynierskich ze względu na ich zastosowanie, ujmujący blachę perforowaną jako materiał o złożonych własnościach

Własności materiału, czyli zespół cech określających reakcję tworzywa na czynniki zewnętrzne (obciążenie mechaniczne i cieplne, pole elektromagnetyczne, środowisko chemiczne, tarcie itp.), w głównej mierze decydują o jego praktycznym zastosowaniu. Każdej z podstawowych grup materiałów inżynierskich można przypisać pewne ogólne charakterystyczne własności. W przypadku metali są to: dobre przewodnictwo elektryczne i cieplne, dodatni temperaturowy współczynnik rezystywności, metaliczny połysk i nieprzezroczystość, plastyczność. Materiały ceramiczne cechuje: wysoka temperatura topnienia, zazwyczaj duża rezystywność, bardzo wysoka wytrzymałość na ściskanie, brak podatności na odkształcenie plastyczne (kruchość) i obróbkę cieplną. Z kolei polimery wyróżnia: mała gęstość, dobre własności izolacyjne cieplne i elektryczne, słabe odbicie światła (często przezroczystość), dobra odporność na działanie agresywnych związków

chemicznych, słaba odporność na niską i podwyższoną temperaturę [4-6]. Celowo projektowane i wytwarzane kompozyty – jako materiały zewnętrznie monolityczne, utworzone z co najmniej dwóch komponentów (faz), wykazujących różne własności – charakteryzują się pod pewnymi względami lepszymi i (lub) nowymi (dodatkowymi) własnościami w porównaniu do materiałów podstawowych [8].

Rozwój techniczny i cywilizacyjny był i jest uwarunkowany odpowiednim zastosowaniem znanych lub nowo opracowanych materiałów. W każdym przypadku niezwykle istotne jest pełne rozpoznanie ich własności. Niemniej jednak, słuszne wydaje się stwierdzenie, iż możliwość wytwarzania nowoczesnych wyrobów wymaga często stosowania innowacyjnych materiałów, wykazujących odmienne cechy od dotychczas obserwowanych o dużym znaczeniu technicznym [7]. Warto dodać, iż ok. 90% materiałów innowacyjnych to materiały funkcjonalne (np. metale amorficzne, m.in. ze względu na doskonałe własności magnetyczne) [4]. W tym kontekście – mając na uwadze tematykę niniejszej pracy – należy zauważyć, iż mnogość i różnorodność zastosowań blach perforowanych wynika przede wszystkim z kombinacji ich własności charakteryzujących materiał konstrukcyjny i określonych cech użytkowych (w szerszym znaczeniu także funkcjonalnych).

2. Rynek blach perforowanych

Oferta producentów blach perforowanych jest różnorodna, zarówno pod względem parametrów perforacji (układ, prześwit i kształt otworów) jak również rodzaju materiału stosowanego w procesie wytwórczym. Często, w zależności od możliwości technicznych danego producenta, blachy perforowane mogą być poddawane dodatkowym operacjom, takim jak: gięcie, zwijanie, przetłaczanie (formowanie miejscowe), trapezowanie, spawanie, zgrzewanie, oprawianie w ramki czy malowanie proszkowe. Biorąc pod uwagę niezwykle bogatą ofertę rynkową omawianych wyrobów należy uznać, iż jej pełna i szczegółowa prezentacja jest trudna, wręcz niemożliwa, do wykonania w ramach niniejszej pracy, co jednocześnie wydaje się też zbędne z punktu widzenia charakteru opracowania. Ponadto, w pełni wystarczający wydaje się też przegląd oferowanego przez różnych wytwórców, mniej lub bardziej urozmaiconego, standardu produkcyjnego, który często zawiera mocno zbliżone lub wręcz takie same rodzaje blach perforowanych (dotyczy zazwyczaj produktów o dużym znaczeniu komercyjnym). Informacje dotyczące asortymentu i zastosowań rozpatrywanych materiałów zaczerpnięto ze stron internetowych (w tym także dostępnych w formie elektronicznej katalogów i broszur) przedsiębiorstw działających w obszarze związanym przede wszystkim z ich produkcją.

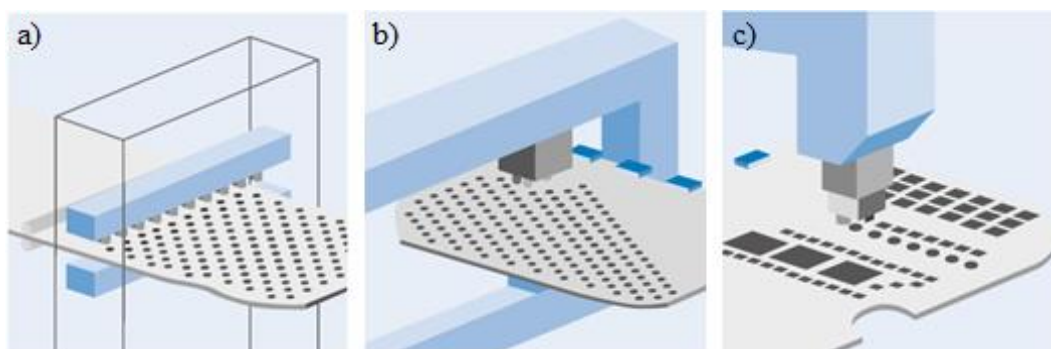
2.1. Asortyment

Parametry charakteryzujące blachę perforowaną, takie jak prześwit, układ i kształt otworów oraz materiał zastosowany do jej produkcji, stanowią zasadnicze kryteria wyznaczające asortyment tworzący podstawowy rynek tego produktu. Poza tym, różny może być sposób wykonania perforacji czy profil otworu. Arkusze blach perforowanych najczęściej dostępne są w standardowych wymiarach: 1000 x 2000 mm (mały format), 1250 x 2500 mm (średni format) oraz 1500 x 3000 mm (duży format) o maksymalnej grubości ok. 20 mm (wartość ta w dużej mierze zależy m.in. od rodzaju materiału, wielkości otworu czy możliwości technicznych danego producenta). Według ogólnie stosowanej praktyki, grubość blachy nie powinna być większa od średnicy otworu (przynajmniej wówczas, gdy stosowana jest metoda wykrawania). Oprócz podstawowego prostokątnego formatu, możliwa jest także forma trapezu, rombu czy krzyża. Arkusze mogą mieć ponadto różny kształt narożników (w tym celu stosuje się np. wycięcia prostokątne, fazowanie, zaokrąglenie). Różnorodna jest także wielkość i kształt perforowanego obszaru. Pod tym względem, dla określonego rodzaju perforacji może istnieć pewne ograniczenie, wynikające z konieczności stosowania

nieperforowanych marginesów technologicznych, chociaż należy jednocześnie dodać, iż pewien określony odstęp między krawędzią blachy a zewnętrznym konturem pola perforacji jest niejednokrotnie celowy i wynika z przeznaczenia wyrobu. Niestandardowe formaty arkuszy są często możliwe do wykonania przez producentów na specjalne zamówienie. Dla określonego asortymentu blachy perforowane dostępne są również w formie kręgów [N1–N3].

2.1.1. Metody perforowania blach

Głównym i powszechnie stosowanym sposobem perforowania blach jest wykrawanie mechaniczne. Proces perforacji (sterowany numerycznie) może być prowadzony na prasach: szeroko perforujących, sekcyjnych (rzędowych), rewolwerowych (młoteczkowych). Ponadto, podczas operacji dziurkowania może następować automatyczna zmiana narzędzia, umożliwiającą wykonanie otworu innego kształtu (rys. 2.1) [N4, N5].



Rys. 2.1. Perforacja blachy na prasie: a) szeroko perforującej, b) sekcyjnej, c) z automatyczną zmianą narzędzia [N4]

Prasa szeroko perforująca pozwala jednorazowo wykrawać otwory na całej szerokości blachy. W tym celu wyposażona jest w zestaw pogrupowanych rzędowo stempli (jednocześnie można zastosować do 1000 sztuk) o ściśle ustalonej wzajemnej odległości. Poprzez wyeliminowanie kilku z nich (lub całego rzędu) można tworzyć nieregularne wzory, pozostawiając różnej wielkości i kształtu obszary nieperforowane. Po obróbce na tego typu prasach pole perforacji zawiera się między marginesami występującymi na wszystkich brzegach arkusza lub tylko na krawędziach wzdłużnych. Maksymalna grubość blachy wynosi ok. 3-4 mm, natomiast szerokość 1500 mm. Produkcja może odbywać się w systemie: krąg-krąg, krąg-arkusz (po perforacji następuje cięcie poprzeczne taśmą), arkusz-arkusz. Dokładność wymiarowa (zwłaszcza na szerokości blachy), stosunkowo niewielkie

potencjalne wady wyrobu (zmiana kształtu, utrata płaskości) wynikające z naprężeń skoncentrowanych w miejscach otworów, wydajność procesu to zalety perforacji na prasach szeroko perforujących. Z kolei, względnie wysoki koszt narzędzi, przygotowania produkcji sprawia, iż takie rozwiązanie jest ekonomicznie uzasadnione w przypadku wytwarzania wielkoseryjnego [N6, N7].

Wycinanie otworów na prasie sekcyjnej odbywa się za pomocą kilku razem zgrupowanych stempli (gdy wykrawanie prowadzone jest przy użyciu tylko jednego stempla stosuje się także określenie prasa rewolwerowa). Odpowiednio zaprogramowany ruch narzędzia (zgodnie z kierunkami x-y) umożliwia perforację kolejnych obszarów (sekcji) blachy. W porównaniu do prasy szeroko perforującej, obróbka jest bardziej czasochłonna, ale jednocześnie koszty narzędzi są niższe. Poza tym, gdy istnieje potrzeba wykonania skomplikowanego wzoru, zastosowanie prasy sekcyjnej może okazać się niezbędne. Co więcej, nacisk prasy skoncentrowany jest na mniejszej ilości stempli, co pozwala perforować blachy o większej grubości (do ok. 20 mm) lub materiały wymagające większej siły tnącej.

Generalnie można stwierdzić, iż metody wykrawania mechanicznego są popularnym i relatywnie przystępnym ekonomicznie sposobem wytwarzania blach perforowanych (o grubości ok. 0,4 – 15 mm i minimalnej średnicy otworu 0,4 mm). Niemniej jednak, istnieją pewne ograniczenia tych technik perforacji, które można wyrazić za pomocą ogólnie przyjętej reguły stwierdzającej, iż gdy stosunek średnicy otworu, grubości blachy i szerokości mostu pomiędzy otworami wynosi w przybliżeniu odpowiednio 1:1:1, wówczas wykrawanie jest mocno utrudnione lub niemożliwe (co zależy także od rodzaju materiału). Zatem preferowany, ze względu na podatność do perforacji, jest przypadek, gdy wielkość otworu i szerokość mostu są większe od grubości blachy. Jeśli taki warunek nie jest spełniony (np. ze względu na przeznaczenie perforowanego wyrobu) można zastosować inne techniki perforacji, jak: wiercenie, frezowanie, cięcie laserem czy cięcie wiązką elektronów.

Metoda wiercenia za pomocą wiertel pozwala uzyskać małe i gęsto rozmieszczone otwory (o różnym profilu, np. stożkowym) w stosunkowo grubej blasze, zachowując przy tym jej stabilność podczas procesu. Ścianki otworów są gładkie, a powierzchnie blachy równe i wolne od zadziorów. Możliwe niewielkie zniekształcenia. Wiercone otwory mają średnice od 0,3 mm do ok. 15 mm. Podobną jakość perforacji można otrzymać poprzez frezowanie, stosowane zwłaszcza w przypadku otworów podłużnych (szczelinowych) o zróżnicowanych przekrojach poprzecznych i szerokości nawet 0,1 mm.

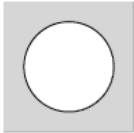
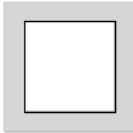
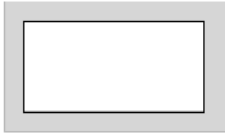
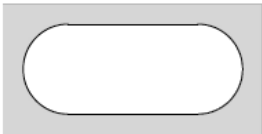
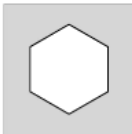
Przy użyciu wiązki lasera czy wiązki elektronów można wykonywać bardzo małe otwory (nawet o średnicy ok. 0,04 mm) w materiałach o grubości 0,2 – 5 mm, przy czym

stosunek średnicy otworu do grubości blachy może wynosić ok. 1:15. W tym przypadku można mówić o tzw. mikroperforacji. Należy jednocześnie dodać, iż możliwa minimalna wielkość otworu jaką można otrzymać dość znacznie zależy od rodzaju i grubości perforowanego materiału (wraz ze wzrostem grubości wzrasta wartość minimalnej średnicy otworu). Właściwie dobrane parametry procesu skutkują wysoką jakością perforacji (duża dokładność i powtarzalność wymiarowa, równa i gładka powierzchnia cięcia, brak zadziorów). Z uwagi na fakt, iż zarówno wycinanie laserem jak i wiązką elektronów należą do tzw. metod termicznych, należy minimalizować niekorzystne następstwa związane ze zbyt dużą strefą wpływu ciepła i przegrzaniem materiału. Obie techniki umożliwiają wykonanie otworów o rozmaitych kształtach i o różnym nachyleniu względem płaszczyzny blachy [N4, N8–N10, 9].

Inne sposoby perforowania blach, o mniejszym znaczeniu produkcyjnym, to: obróbka elektroerozyjna i elektrochemiczna, cięcie strumieniem wody (także ze ścierniwem), cięcie gazowe (tlenem, plazmą) [10-13].

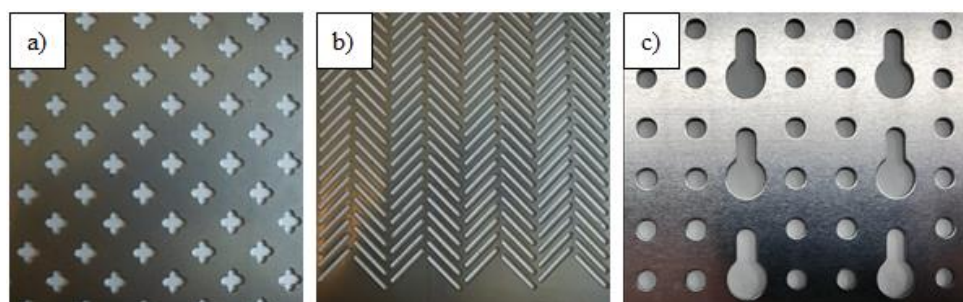
2.1.2. *Kształt otworu*

Podstawowy podział blach perforowanych, odnoszący się do kształtu otworu w ich płaszczyźnie, obejmuje przede wszystkim otwory okrągłe, kwadratowe, prostokątne, wydłużone, trójkątne i sześciokątne (rys. 2.2). Naroża wielokątów mogą być ostre lub zaokrąglone. Najczęściej wytwarzane są otwory okrągłe, co wynika z ich dużych możliwości aplikacyjnych.

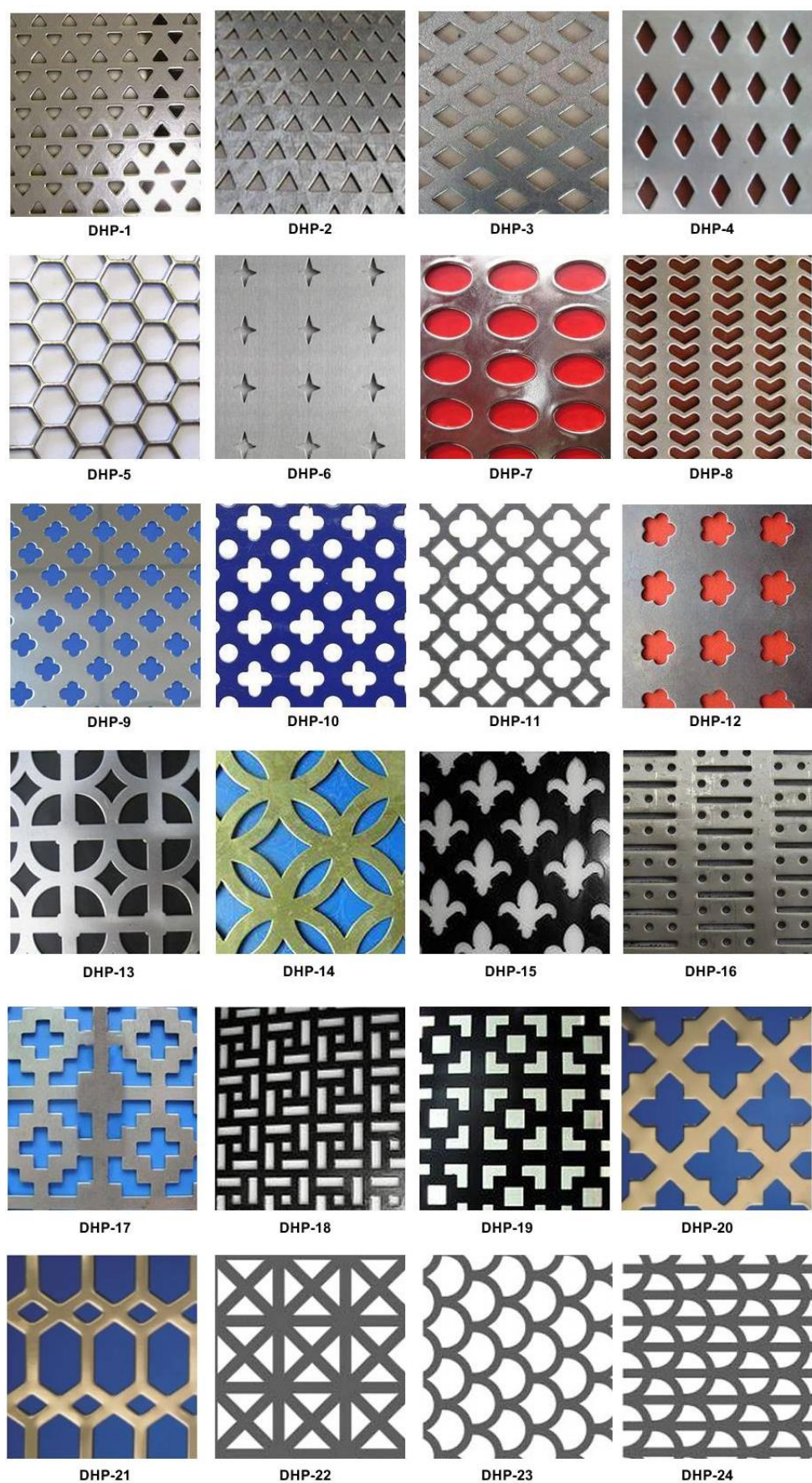
okrągłe	kwadratowe	prostokątne
		
wydłużone	trójkątne	sześciokątne
		

Rys. 2.2. Podstawowe kształty otworów perforacji w płaszczyźnie blachy

Nierzadko blacha perforowana jest stosowana głównie ze względu na jej walory estetyczne. W tym celu można niemal bez ograniczeń dobierać różnego kształtu otwory oraz ich kombinacje (rys. 2.3 i 2.4). Nazwy handlowe poszczególnych dekoracyjnych perforacji nie są ujednolicone i zależą od producenta. Estetykę tego typu materiałów można wzbogacić poprzez dodatkową obróbkę powierzchni (szlifowanie, polerowanie), zwłaszcza strony spodniej (technologicznej), na której występuje grat. Nie bez znaczenia jest również możliwość różnorodnej kolorystyki ozdobnych blach perforowanych.

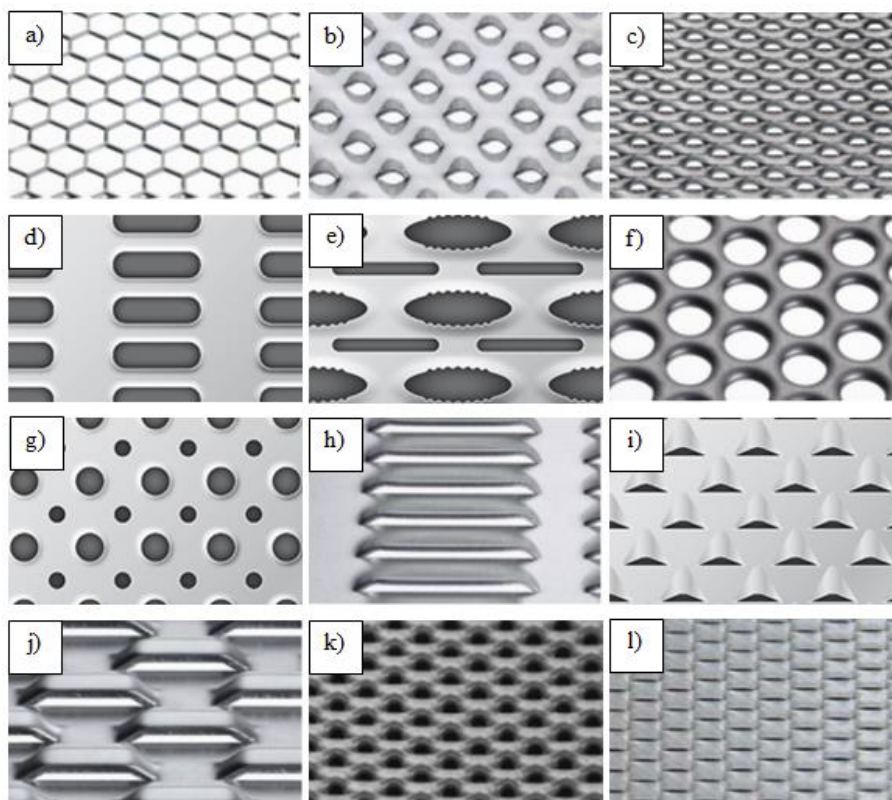


Rys. 2.3. Wybrane (typowe) kształty otworów perforacji ozdobnej: a) koniczynka, b) jodełka, c) kluczyk [N11–N13]



Rys. 2.4. Przykłady perforacji dekoracyjnej (DHP – *Decorative Hole Pattern*) [N14]

Różna może być struktura otworu blachy perforowanej, czego odzwierciedleniem jest m.in. jego kształt, rozpatrywany w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni arkusza. W przypadku tzw. specjalnych perforacji (rys. 2.5) często występują otwory wypukłe, zawierające odgiętą część wystającą poza powierzchnię blachy. Podobnie jak dla wzorów ozdobnych, nazewnictwo tego typu perforacji również jest zależne od producenta, chociaż w tym przypadku wydaje się ono bardziej jednolite i powtarzalne.



Rys. 2.5. Różne rodzaje perforacji specjalnej: a) heksagonalna, b) noskowa (łuskowa), c) Perfocon, d) perforacja z wydłużonymi przetłoczonymi otworami, e) perforacja z wydłużonymi przetłoczonymi otworami „ząbki”, f) miseczkowa, g) miseczkowa z otworem odwadniającym, h) daszkowa, i) tarkowa, j) mostkowa (szczelinowo-mostkowa), k) ConiPerf trójkątna, l) ConiPerf szczelinowa [N15–N17]

Perforacja specjalna to zazwyczaj niestandardowe rozwiązania, opracowywane przez producentów blach perforowanych w odpowiedzi na zapotrzebowanie wielu gałęzi przemysłu na tego typu materiały. W tym kontekście na uwagę zasługują takie rodzaje perforacji jak [N15–N21]:

Heksagonalna (rys. 2.5a). Zapewnia dużą wartość prześwitu (nawet rzędu 80%), powiązaną z niską masą blachy. Umożliwia skuteczny transport ciepła, co jest korzystne m.in. dla uzyskania optymalnej wentylacji.

Noskowa / luskowa (rys. 2.5b). Wyróżnia się przetłoczeniami wystającymi obustronnie poza arkusz, tworząc prześwit, którego zarys w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni blachy przyjmuje owalny kształt.

Perfocon (rys. 2.5c). Charakteryzuje się stosunkowo małą wielkością otworów względem grubości blachy (np. dla oczka o średnicy 0,2 mm grubość kwasoodpornej blachy może wynosić 0,8 mm). Perforacja jest kierunkowa a odpowiedni kąt jej nachylenia pozwala na kontrolowany przepływ powietrza oraz zmniejsza możliwość zatykania otworów, m.in. w procesach separacji.

Perforacja wydłużona z przetłoczeniami (rys. 2.5d). Na brzegach wydłużonych otworów występują określonej wysokości (ok. 3 mm) przetłoczenia, mogące stanowić m.in. miejsce zaczepu (mocowania) innych elementów.

Perforacja przetłoczona „zębki” (rys. 2.5e). Występujące na krawędziach wydłużonych otworów przetłoczenia (wysokość ok. 7 mm) cechują się odpowiednimi obwodowymi nacięciami (ząbkami). Pomędzy przetłoczeniami mogą występować innego typu wydłużone otwory płaskie. Perforacja spełnia np. funkcje antypoślizgowe.

Miseczkowa (rys. 2.5f). Okrągłe przetłoczone otwory odznaczają się także gładką powierzchnią. Wysokość przetłoczeń może wynosić ok. 2 – 3 mm.

Miseczkowa z otworem odwadniającym (rys. 2.5g). Poza otworami miseczkowymi z przetłoczeniami występują również otwory zwykłe (bez przetłoczeń).

Daszkowa (rys. 2.5h). Przetłoczenia wystające poza powierzchnię blachy przybierają kształt daszków, które mogą być zaokrąglone lub płaskie.

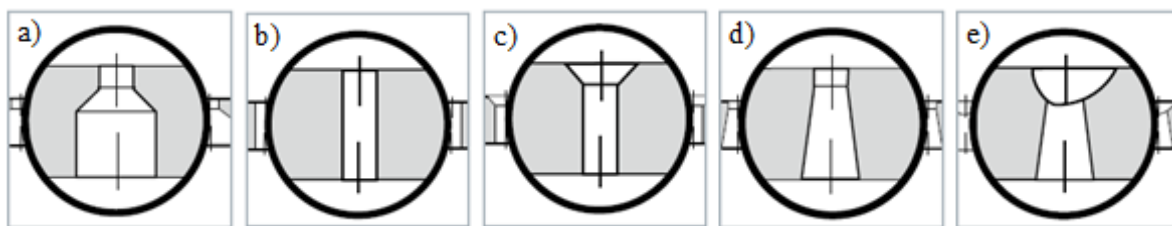
Tarkowa (rys. 2.5i). Zarys otworów z przetłoczeniami może przyjmować formę trójkątną lub owalną (pojedynczą albo podwójną).

Mostkowa / szczelinowo-mostkowa (rys. 2.5j). Odpowiednio ukształtowana wygięta część otworu stanowi połączenie (most) pomiędzy dwiema przeciwnymi krawędziami szczeliny, tworząc dwie otwarte powierzchnie boczne. Duża grubość blachy oraz mała wielkość otworów nadaje jej wysoką wytrzymałość. Często używana w przemyśle chemicznym.

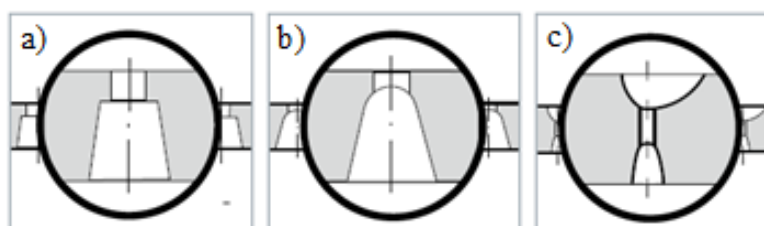
ConiPerf (rys. 2.5k,l). Drobną kierunkową perforacją w grubej blasze. Otwory mają kształt trójkątny lub półeliptyczny, wykazując równocześnie dużą stożkowatość. Może występować także w formie szczelinowej walcowanej.

Otwory blachy perforowanej mogą mieć także różny kształt przekroju osiowego. Do najczęściej stosowanych należy zaliczyć otwory cylindryczne (o tworzącej prostopadłej do powierzchni blachy), wykonywane zazwyczaj metodą mechanicznego dziurkowania. Bardziej

złożone kształty (o zróżnicowanym nachyleniu ścianki otworów) można uzyskać poprzez wiercenie (rys. 2.6), frezowanie (rys. 2.7), perforację laserem czy wiązką elektronową.



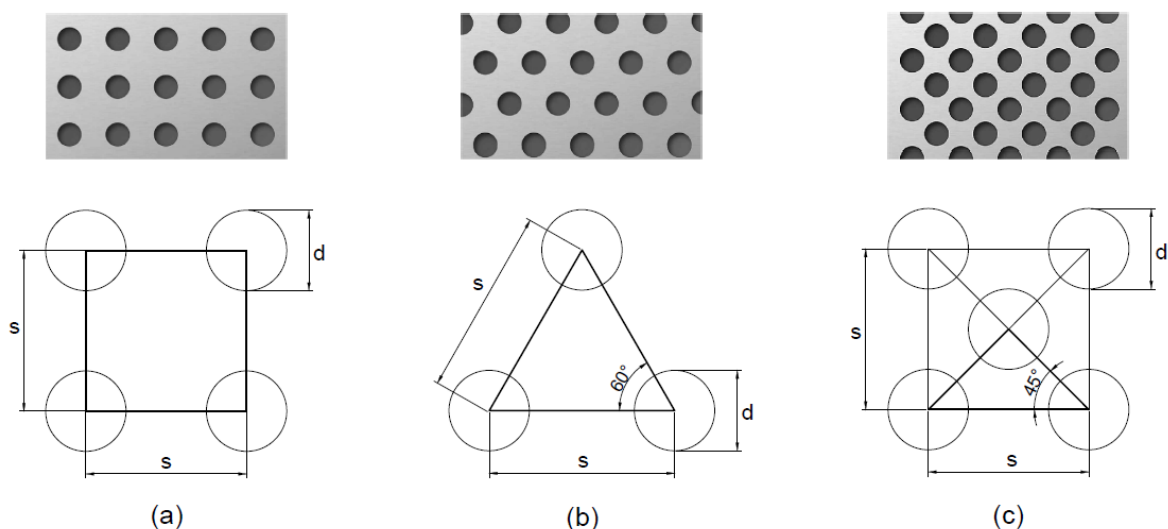
Rys. 2.6. Profile otworów wierconych: a) podwójnie cylindryczny, b) cylindryczny, c) pogłębiony, d) stożkowo-cylindryczny, e) stożkowy z dodatkowym profilem [N4]



Rys. 2.7. Profile otworów frezowanych: a) trapezowy, b) paraboliczny, c) paraboliczny z dodatkowym profilem [N4]

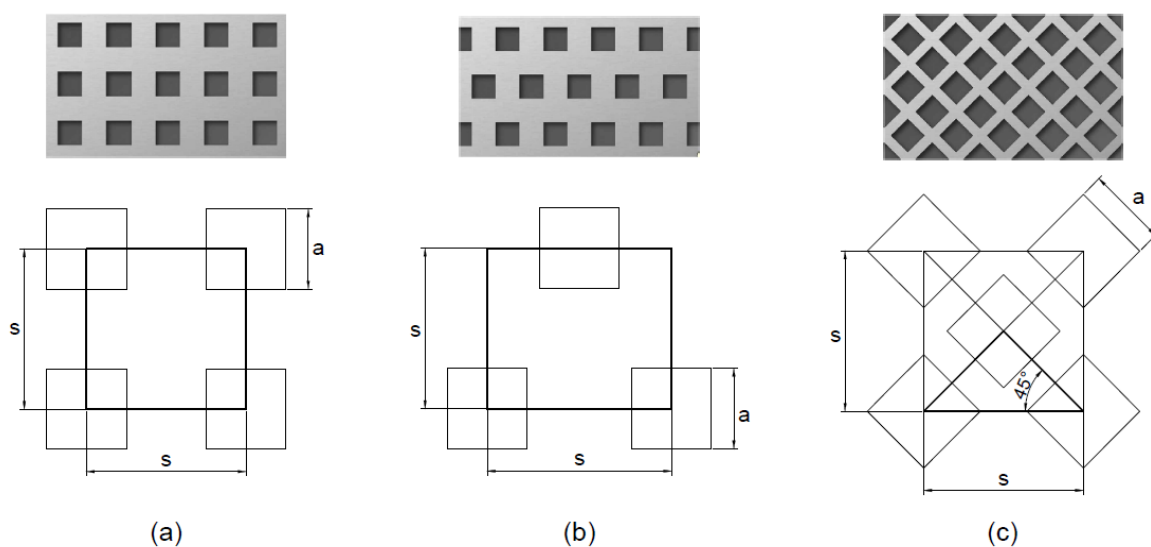
2.1.3. Układ perforacji i wielkość otworów

Wymienić należy dwa podstawowe układy perforacji, rozumiane jako sposób wzajemnego ułożenia najbliższych otworów (zazwyczaj o typowych kształtach) w płaszczyźnie blachy: prosty i mijany (pod różnym kątem). Oczka okrągłe występują w układzie mijanym, najczęściej pod kątem 45° i 60° (rys. 2.8), natomiast w przypadku otworów kwadratowych wyróżnić można także tzw. układ diagonalny, utworzony poprzez obrócone o 45° otwory, rozmieszczone w układzie mijanym 45° (rys. 2.9). Przywołane układy perforacji są niekiedy określane jako układ: kwadratu, trójkąta równobocznego i trójkąta prostokątnego. Oczywiście, istnieje możliwość usytuowania otworów w innych układach (także kombinowanych, charakteryzujących się zestawieniem różnych perforacji na tym samym arkuszu). Jednocześnie warto dodać, iż stanowią one zdecydowanie mniejszy udział w rynku blach perforowanych w porównaniu do układu prostego i mijanego.



Rys. 2.8. Układy otworów okrągłych [N22]

a) prosty (Rg), b) mijany 60° (Rv), c) mijany 45° (Rd)



Rys. 2.9. Układy otworów kwadratowych [N23]

a) prosty (Qg), b) mijany (Qv), c) diagonalny/mijany 45° (Qd)

W wielu przypadkach oferty blach perforowanych zawierają oznaczenia według DIN 24041 [14], które zamieszczono w nawiasach obok nazwy określonego układu perforacji. Na przykład, symbol **Rv** to skrót od słów: *rund* – okrągły, *versetzt* – mijany (przestawny), co oznacza perforację mijaną z otworami okrągłymi. Poza kształtem i sposobem ułożenia otworów, nazwa danej perforacji zawiera informację dotyczącą jej wymiarów: $d - s$ lub $a - s$ (oznaczenia jak na rysunkach: d – średnica otworu okrągłego, a – długość boku kwadratu oraz s – odległość między środkami odpowiednich dwóch sąsiednich otworów (skok, podziałka)).

Wielkość otworów wykonywanych w standardowej produkcji metodą wykrawania jest często wyraźnie zróżnicowana w zależności od producenta. Niemniej jednak, można ogólnie przyjąć, iż najmniejsze otwory okrągłe mają średnicę 0,5 – 1 mm, natomiast górna wartość wynosi nawet powyżej 100 mm. Szeroki zakres wymiarowy występuje także dla perforacji z otworami w kształcie kwadratu, którego bok może mieć długość: od ok. 2 mm nawet do ok. 120 mm. Ponadto, wielkość otworów także jest uzależniona od układu perforacji.

Istnieje możliwość uzyskania mniejszych otworów za pomocą nietypowych technik perforowania (zależnie od grubości blachy). Należą do nich już wspomniane wcześniej m.in.: wiercenie, frezowanie, perforowanie wiązką elektronową lub laserem. Poza tym, warto mieć na uwadze fakt, iż różnice pomiędzy wymienionymi metodami (także niekonwencjonalnymi i wysokoenergetycznymi) dotyczą nie tylko możliwości wymiarowych, lecz obejmują także kwestie związane m.in. z jakością perforacji, co ma w konsekwencji wpływ na własności wyrobu [15, 16].

Wielkość otworów i układ perforacji determinują wartość prześwitu (P). Oznacza on procentowy udział powierzchni otworów w całkowitej powierzchni blachy (tab. 2.1). Stanowi podstawowy parametr charakteryzujący blachę perforowaną. Od niego zależy nie tylko wytrzymałość, ale także własności użytkowe tego tworzywa. Może decydować m.in. o przepływie cieczy i gazów, przenikaniu światła, pochłanianiu fal dźwiękowych i efektywności wymiany ciepła [N24]. Wielkość prześwitu mieści się w zakresie od kilku (choćby niekiedy może wynosić poniżej 1%) do kilkudziesięciu procent (nawet ok. 80 %). Jednakże dla dużego prześwitu (powyżej 60 – 70%) blacha w znacznym stopniu traci sztywność i ulega zniekształceniom podczas perforacji (np. utrata płaskości, falistość i nierównoległość krawędzi), co jest także spowodowane obecnością różnej szerokości nieperforowanych marginesów na brzegach arkusza [N25–N28].

Ogólnie można stwierdzić, iż w praktyce najczęściej wielkość powierzchni otwartej nie przekracza ok. 50%. W pewnych przypadkach blacha perforowana może stanowić lepszą alternatywę np. w stosunku do siatek drucianych, zwłaszcza ze względu na integralność materiału oraz możliwość pozostawienia wybranych miejsc bez perforacji, wykazując jednocześnie skrajnie dużą wartość prześwitu (nawet nieco powyżej 90% dla otworów heksagonalnych i kwadratowych i powyżej 80% dla otworów okrągłych) [N29].

Tabela 2.1. Wzory do obliczania wielkości prześwitu dla typowych perforacji [N30]

Kształt otworu	Układ perforacji	Wielkość prześwitu
Okrągły	Prosty (Rg)	$P = 0,785 \cdot \frac{d^2}{t^2} \cdot 100\%$
	Mijany 60° (Rv)	$P = 0,91 \cdot \frac{d^2}{t^2} \cdot 100\%$
	Mijany 45° (Rd)	$P = 1,57 \cdot \frac{d^2}{t^2} \cdot 100\%$
Kwadratowy	Prosty (Qg)	$P = \frac{a^2}{t^2} \cdot 100\%$
	Mijany (Qv)	
	Diagonalny (Qd)	$P = 2 \cdot \frac{a^2}{t^2} \cdot 100\%$

2.1.4. Materiały stosowane do produkcji blach perforowanych

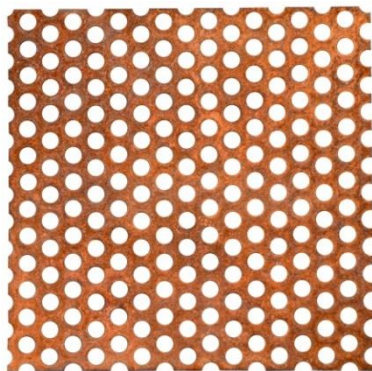
W zależności od wymagań jakie musi spełniać blacha perforowana w danej konstrukcji należy wybrać odpowiedni materiał do perforacji. Najczęściej są to różnego rodzaju stale (węglowa, nierdzewna, kwasoodporna, żaroodporna, trudnościeralna, corten), aluminium i jego stopy, miedź, mosiądz oraz brąz [N31–N40].

Stal węglowa to jeden z najbardziej popularnych perforowanych materiałów, charakteryzujący się korzystnym zestawieniem własności mechanicznych (stal zimnowalcowana: DC01-DC07, stal gorącowa: DD11-DD14). Poza tym, jest stosunkowo niedrogi w porównaniu do innych surowców. W celu ochrony przed korozją blachy z tego rodzaju stali poddaje się galwanizacji lub cynkowaniu ogniowemu (stal ocynkowana: DX51D-DX57D). Zabezpieczenie antykorozyjne (zwłaszcza w miejscach perforacji) można dodatkowo wzmocnić np. poprzez malowanie proszkowe, co jednocześnie wpływa na dekoracyjność wyrobu. Stosuje się także aluminowanie lub metalizowanie stopami typu Zn-Al, Zn-Ni, Al-Si itp. [N18, N41, 17, 18].

Stal nierdzewna, głównie ze względu na odporność korozyjną, trwałość i estetykę, może w postaci blachy perforowanej być stosowana w konstrukcjach narażonych na szkodliwe działanie różnych czynników (chemikaliów, wody morskiej, warunków atmosferycznych). Za pomocą polerowania można uzyskać atrakcyjne wykończenie powierzchni, nadając jej odpowiednią gładkość i połysk. Oprócz różnych gatunków stali nierdzewnej (austenitycznej: 1.4301, 1.4306, 1.4401, 1.4404, 1.4541, 1.4571; ferrytycznej: 1.4016 i martenzytycznej: 1.4006) perforuje się także stal żaroodporną, gdy wymagana jest odporność na działanie gazów utleniających w wysokiej temperaturze (1.4724, 1.4742, 1.4749, 1.4828, 1.4841) oraz stal trudnościeralną (często stosowane różne gatunki stali Hardox) w przypadku gdy istotne

jest ograniczenie zużycia eksploatowanych elementów w wyniku ścierania, obciążeń uderowych i zgniatania [N42–N51].

Corten to rodzaj stali niskostopowej o podwyższonej odporności na korozję. Nazwa pochodzi od słów *corrosion resistance* oraz *tensile strength*. Szczególną cechą tego materiału jest zdolność do tworzenia się na jego powierzchni pod wpływem warunków atmosferycznych szczelnej i trwałej ochronnej warstewki kolorystycznie przypominającej rdzę (rys. 2.10). Stanowi ona skuteczne zabezpieczenie antykorozyjne, co sprawia, iż tego typu stal bez nanoszenia dodatkowych powłok może być stosowana w wielu konstrukcjach. Ponadto, samoczynnie tworzący się rdzawy nalot nadaje elementom oryginalny i niepowtarzalny wygląd, przy czym jego barwa zmienia się wraz z upływem czasu (od pomarańczowej przez czerwonawą aż po ciemnobrązową) i zależy od warunków eksploatacji (np. wilgotności, nasłonecznienia, zanieczyszczenia powietrza). Nawet na stosunkowo niewielkiej powierzchni mogą występować różnice w zabarwieniu. Walory dekoracyjne jakimi charakteryzuje się stal corten niejednokrotnie decydują o jej zastosowaniu np. w architekturze (perforowane elewacje budynków), chociaż warto dodać, iż pierwotne przeznaczenie tego materiału nie wynikało z jego estetyki, a z połączenia wytrzymałości i odporności na korozję (zachowanie dobrej wytrzymałości danej konstrukcji bez konieczności konserwacji) [N52, N54].



Rys. 2.10. Blacha perforowana wykonana ze stali corten A606-4 (S355J2W) [N55]

Aluminium i jego stopy (często odpowiednio umocnione) cechujące się niską gęstością i dobrą wytrzymałością właściwą należą do podstawowych materiałów poddawanych perforacji (EN AW-1050A, EN AW-3003, EN AW-5052). Prawidłowo dobrany prześwit (zależnie od zastosowania) dodatkowo obniża masę blachy, co w połączeniu z bardzo dobrą odpornością na korozję i walorami dekoracyjnymi decyduje o atrakcyjności tego materiału.

Ponadto, w celu uzyskania wymaganej jakości i koloru powierzchni często przeprowadza się anodowanie wyrobów wykonanych z aluminium i jego stopów (rys. 2.11), przy czym niektóre z nich wykazują lepszą podatność do tego procesu, np.: EN AW-5005, EN AW-5754 [N56–N59].



Rys. 2.11. Różnie barwione w procesie anodowania perforowane blachy aluminiowe [N60]

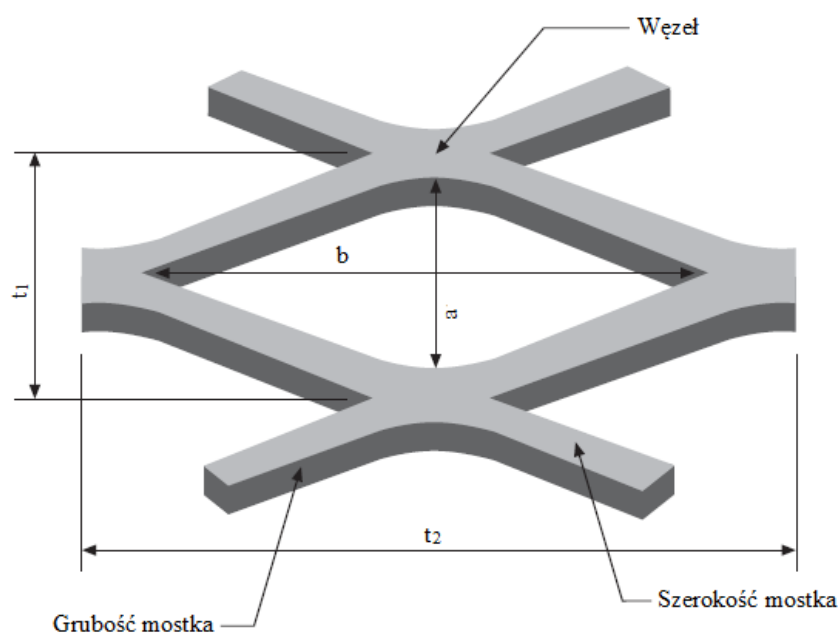
Wielu producentów oferuje także blachy perforowane wykonane z miedzi, mosiądzu i brązu. W tym przypadku oprócz własności wytrzymałościowych, często niemniej ważny jest aspekt wizualny i odporność korozyjna wyrobów. Ponadto, miedź i jej stopy wykazują generalnie dobrą podatność do kształtowania zarówno w postaci blach litych i perforowanych [N42, N61, N62].

Perforuje się także stopy niklu (monel 400, inconel 600), charakteryzujące się bardzo dobrą odpornością na korozję i dużą wytrzymałością w wysokiej temperaturze [N63–N65] oraz stopy tytanu, które dodatkowo wyróżnia znakomita wytrzymałość właściwa [N66]. Blacha cynkowo-tytanowa o bardzo dobrych własnościach fizyko-mechanicznych jest stosowana m.in. jako okładziny elewacyjne, pokrycia dachowe czy systemy odprowadzania wody. Wytwarzana jest z cynku Z1 (min. 99,995% Zn), do którego wprowadzany jest tytan w ilości 0,06 – 0,2%, miedź w ilości 0,08 – 1,0% oraz aluminium w ilości do 0,015%. Różne może być wykończenie powierzchni blachy: od naturalnej, metalicznej i błyszczącej przez matową, jasnoszarą, aż do grafitowej czerni. Do zalet tego materiału należy zaliczyć także znikome obciążenie środowiska i możliwość niemal pełnego recyklingu [N67, N68].

Nierzadko producenci oferują możliwość perforacji tworzyw sztucznych (polichlorek winylu PVC, polipropylen PP, polietylen PE, politereftalan etylenu PET, poliwęglan PC, polistyren PS, politetrafluoroetylen PTFE), a nawet materiałów kompozytowych (np. epoksydowych) [N69–N71].

2.1.5. Siatki cięto-ciągnione

Szeroki asortyment blach perforowanych uzupełniają siatki-cięto ciągnione, które oprócz docelowych zastosowań, mogą w pewnych wybranych przypadkach stanowić dla blach z siatką otworów alternatywę. Charakterystyczny dla tego rodzaju wyrobów jest sposób wytwarzania (niemal bezodpadowy), w którym po wykonaniu w blasze odpowiednich nacięć w ustalonych odstępach poddaje się ją rozciąganiu. Otrzymana siatka niejako nabiera lekkości w wyniku rozłożenia masy litej blachy na zwiększonej powierzchni, zawierającej regularnie rozmieszczone pustki w kształcie najczęściej zbliżonym do rombu (rys. 2.12) [N72]. Możliwe są także oczka okrągłe, kwadratowe, sześciokątne i inne, np. dekoracyjne [N73–N75].



a – pionowy wymiar oczka

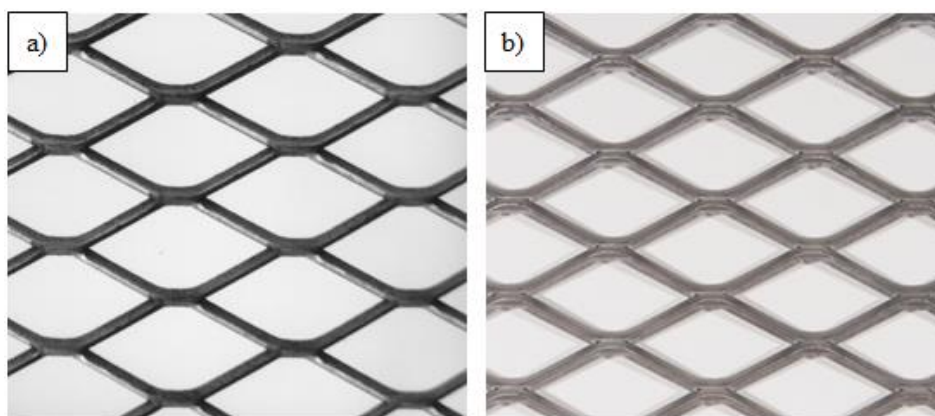
b – poziomy wymiar oczka

t₁ – podziałka (wymiar pionowy)

t₂ – podziałka (wymiar poziomy)

Rys. 2.12. Wymiary typowego oczka siatki cięto-ciągnionej [N76]

Po rozciągnięciu uzyskuje się siatkę w formie standardowej, tzn. całkowita jej grubość jest większa od grubości materiału wsadowego, stąd niejednokrotnie tego typu wyrób określa się jako „trójwymiarowy” (rys. 2.13). W celu spłaszczenia i wygładzenia powierzchni siatkę cięto-ciągnioną można poddać walcowaniu (zgniatanie mostków), co powoduje zarazem zmniejszenie jej grubości (osiągając niemal grubość blachy macierzystej) [N77–N82].



Rys. 2.13. Siatka cięto-ciągniona: a) standardowa, b) spłaszczona [N79]

Warto zauważyć, iż – podobnie jak w przypadku blach perforowanych – wytworzony produkt (według normy DIN 791 [19]) o określonej wartości prześwitu zachowuje jednocześnie integralność i monolityczność, tzn. nie jest konieczne łączenie oddzielnych elementów, co ma miejsce np. w przypadku siatek plecionych czy zgrzewanych [N83–N86]. Omawiany rodzaj siatek dostępny jest w formie arkuszy o różnych wymiarach, a także w postaci zrolowanej (do określonej grubości blachy). Brzegi siatki mogą zawierać oczka otwarte i zamknięte, a ewentualne dodatkowe obramowanie zabezpiecza ostre krawędzie i podnosi m.in. wytrzymałość na skręcanie. Można ogólnie przyjąć, iż do produkcji siatek cięto-ciągnionych najczęściej stosuje się blachy o grubości 0,5 – 5 mm (wykonane z podobnych asortymentowo materiałów co blachy perforowane), natomiast przybliżony szeroki zakres wymiarowy rombów oczek (pod tym względem mogą występować dość znaczące rozbieżności, zależnie od oferty danego producenta) wynosi: od 1 – 2 mm do 80 mm (krótsza przekątna) i od 2 mm do 200 mm (dłuższa przekątna) [N87, N88].

Siatki cięto-ciągnione znajdują zastosowanie m.in. w budownictwie, architekturze, aranżacji wnętrz, rolnictwie i przemyśle, np. jako obudowy, osłony, filtry, przesiewacze, elementy urządzeń wentylacyjnych. Ponadto, zależnie od kąta nachylenia, ten rodzaj tworzywa pozwala uzyskać różne efekty wizualne (siatka wydaje się mniej lub bardziej otwarta) [N89–N98].

2.2. Przegląd zastosowań

Zależnie od parametrów perforacji możliwy jest odpowiedni i kontrolowany przepływ gazów, cieczy, fal akustycznych i elektromagnetycznych przez otwartą powierzchnię blachy. W wielu przypadkach perforacja służy także do przesiewania sypkich ciał stałych. Stąd wynikają możliwości aplikacyjne blach perforowanych, które wykazują charakterystyczne własności użytkowe [N15, N99–N102]:

Obniżona masa. Ubytek masy spowodowany perforacją wpływa na zmniejszenie własności wytrzymałościowych blachy, co jednak jest dopuszczalne gdy perforowany materiał nadal spełnia wymagania dotyczące przenoszonych obciążeń zewnętrznych.

Filtracja i przesiewanie. Perforacja filtruje i oddziela od siebie substancje o płynnej lub stałej konsystencji, umożliwiając m.in. oczyszczanie, sortowanie, klasyfikowanie. Prędkość przepływu można regulować wielkością prześwitu i kształtem otworu.

Dźwiękochłonność. Blacha perforowana może stanowić osłonę dekoracyjną elementów akustycznych, przepuszczając fale dźwiękowe do materiału który je odbija, rozprasza lub pochłania. Poza tym, poprzez dobór wielkości i gęstości otworów można zmniejszać lub eliminować dźwięki w pewnym zakresie częstotliwości. W tym przypadku perforacja odgrywa aktywną rolę podczas tłumienia dźwięku.

Rozpraszanie ciepła. Elementy wykonane z blachy perforowanej pełnią istotną funkcję związaną z regulacją temperatury poprzez odpowiednią dyssypację ciepła. Strumień powietrza może służyć do chłodzenia jak i do ogrzewania.

Pochłanianie promieniowania. Perforowane obudowy osłabiają promieniowanie EMI/RFI, emitowane przez urządzenia elektryczne, zapewniając jednocześnie ich wentylację. Ponadto, zdolność rozpraszania światła sprawdza się gdy istnieje potrzeba ograniczenia docierającej energii słonecznej.

Funkcje ochronne. Osłony z perforacją zabezpieczają m.in. pracujące części maszyn i urządzeń, zapewniając przy tym odpowiedni przepływ powietrza. Bariery perforowane stanowią ochronę na przejściach, platformach itd.

Własności antypoślizgowe. Kombinacja perforacji i przetłoczeń stwarza interesujące możliwości projektowe. Otrzymywane w ten sposób materiały antypoślizgowe sprawdzają się m.in. jako pokrycia podłogowe, podesty i pomosty, które są narażone na działanie warunków atmosferycznych i środowisko przemysłowe (np. wilgoć i zabrudzenia).

Przezroczystość. W zależności od parametrów perforacji uzyskuje się różny efekt przejrzystości. Można w wybrany sposób pokazywać i zasłaniać określone fragmenty osłanianych obiektów.

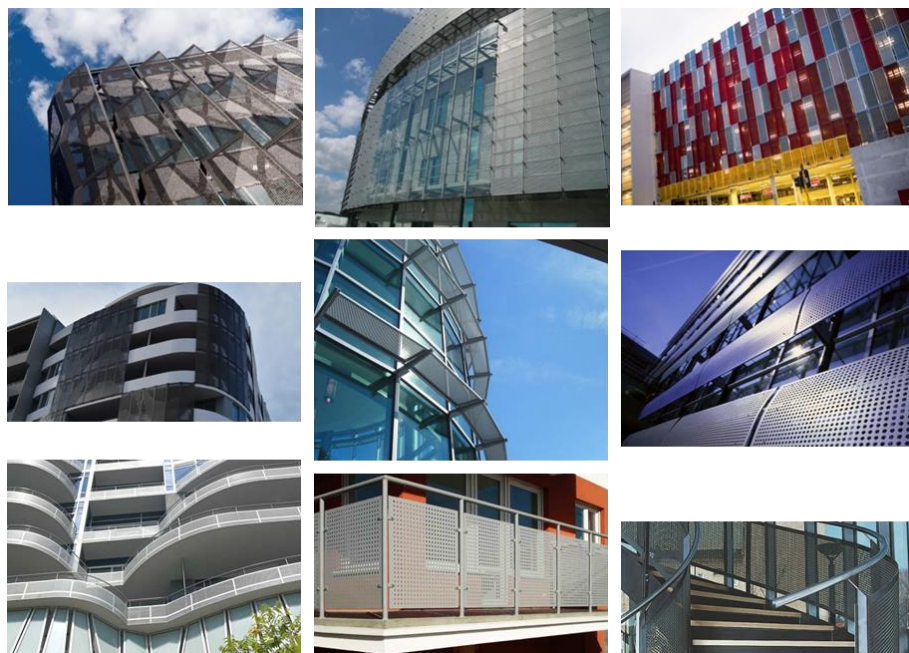
Estetyka i dekoracja. Różnorodne możliwości perforacyjne w połączeniu z innymi dodatkowymi operacjami (np. malowanie proszkowe, galwanizacja, wytłaczanie) pozwalają wpływać na walory estetyczne blach perforowanych, co decyduje o ich dużym znaczeniu dekoracyjnym.

Często w praktyce omawiane materiały inżynierskie spełniają jednocześnie kilka funkcji, co jest możliwe dzięki wymienionym własnościom użytkowym. Ponadto, blachy perforowane cechuje duża trwałość, dobra podatność do kształtowania czy istotna, zwłaszcza z eksploatacyjnego punktu widzenia, łatwość czyszczenia wytworzonych z nich wyrobów. Niekiedy specyficzne własności blach perforowanych decydują, iż tylko taki rodzaj tworzywa jest uwzględniany w danej konstrukcji o ściśle sprecyzowanych wymaganiach projektowych. W innych przypadkach natomiast może być rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do pozostałych materiałów.

Blachy perforowane są stosowane w wielu gałęziach przemysłu, gdzie mogą stanowić zasadniczą część danej konstrukcji lub tylko pewien jej element. Zależnie od przeznaczenia, rozpatrywane materiały charakteryzują się różną wielkością i kształtem (od dużych gabarytowo płaskich arkuszy aż do małych kształtowanych przestrzennie elementów [N103]). Co oczywiste, także parametry perforacji są zróżnicowane.

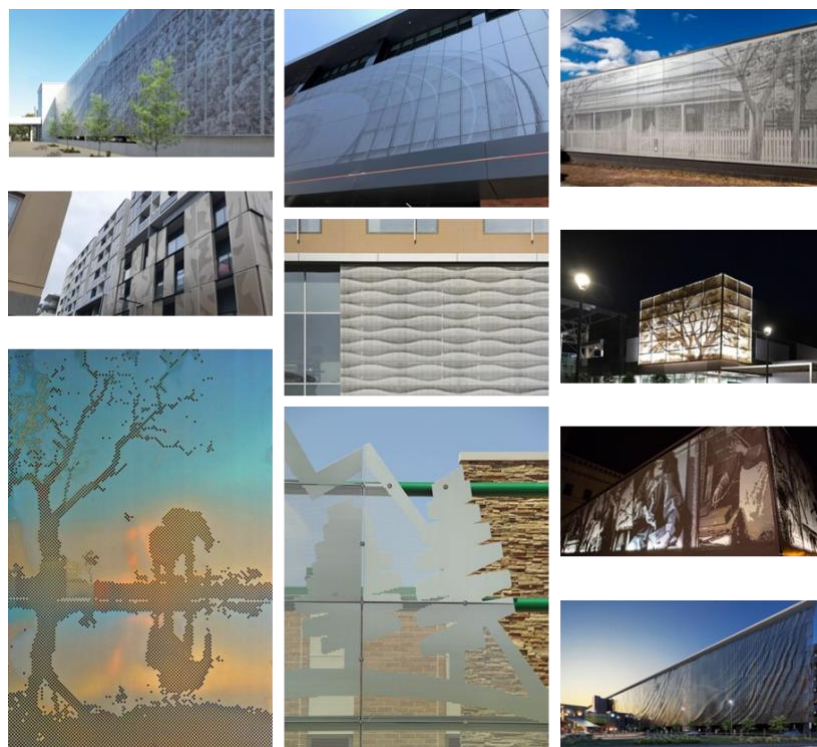
Obserwowana współcześnie duża mnogość i skala praktycznych aplikacji blach perforowanych jest możliwa dzięki wydajnej, precyzyjnej i powtarzalnej produkcji tych wyrobów, co wymaga z kolei odpowiednich narzędzi i poprawnie zaplanowanego procesu obróbki (głównie operacje związane z perforacją blachy) [N104, N105].

Budownictwo i architektura stanowią obszar licznych zastosowań blach perforowanych (rys. 2.14). Elewacje i fasady wykonane z tego typu materiałów, [20–22] poza walorami dekoracyjnymi, pozwalają m.in. na odpowiednie nasłonecznienie wnętrza budynków. Perforowane panele przeciwsłoneczne zapewniają skuteczną ochronę przed niekorzystnymi efektami nadmiernej ekspozycji na światło słoneczne (blask, odbicia i przegrzanie pomieszczeń), a także pomagają zmniejszyć zapotrzebowanie na wentylację i chłodzenie, co przekłada się na niższe koszty energii związane z klimatyzacją. Poziom nasłonecznienia może być regulowany poprzez zmianę nachylenia paneli względem ściany budynku [23, 24, N106–N109].



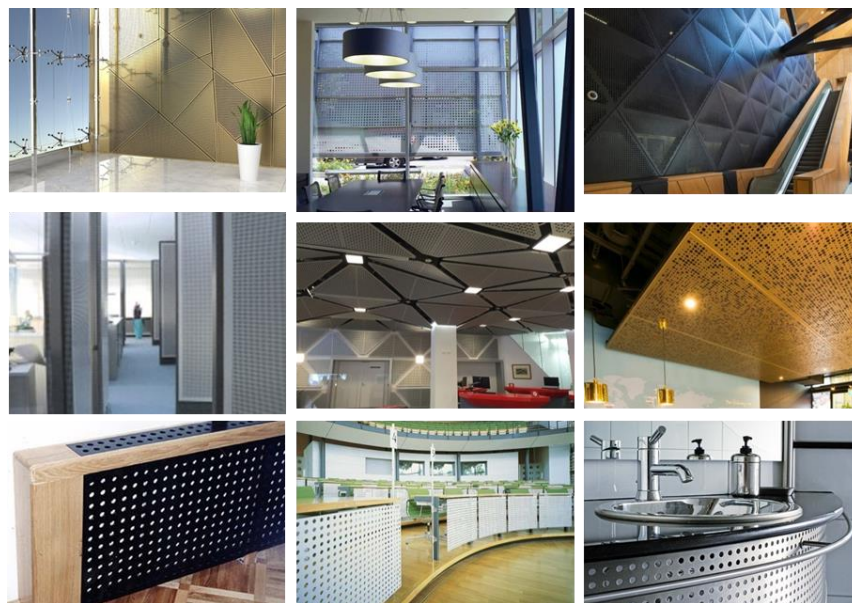
Rys. 2.14. Blachy perforowane w budownictwie i architekturze [N110–N117]

Bardzo ciekawe i atrakcyjne wizualnie efekty (zwłaszcza nocą) można uzyskać poprzez podświetlenie od wewnątrz perforowanych elewacji [N118]. Oprócz prostych i standardowych wzorów, perforacja pozwala tworzyć różnorodne, efektowne napisy, loga czy obrazy (perforacja artystyczna – rys. 2.15) [N119, N120].



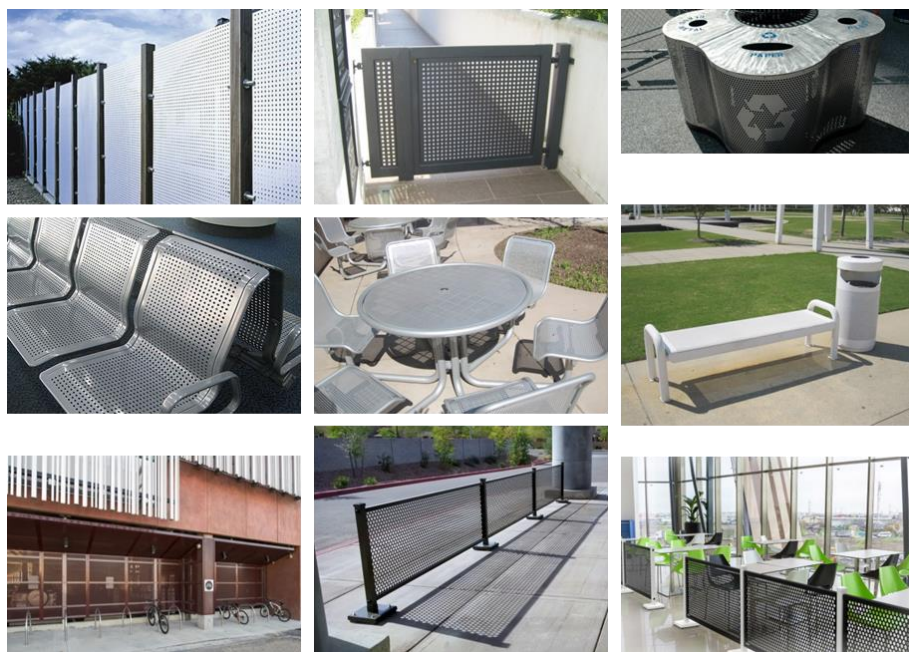
Rys. 2.15. Perforacja artystyczna [N121–N129]

Blachy perforowane służą często jako wypełnienia balustrad (np. schodowych, balkonowych, tarasowych). Stwarzają niemal nieograniczone możliwości aranżacji wnętrz (rys. 2.16). Są stosowane m.in. jako okładziny i dekoracje ścienne, podwieszane sufity, ścianki działowe czy inne elementy wystroju (np. maskownice grzejników). Nie bez znaczenia jest również ich dźwiękochłonność, która pozwala uzyskać odpowiednią akustykę pomieszczeń. W tym przypadku tzw. ustroje dźwiękochłonne zbudowane z blachy perforowanej mogą także zawierać dodatkową warstwę absorbującą, wykonaną z innego materiału (np. wełny mineralnej). Poprzez dobór takich parametrów jak: powierzchnia i grubość blachy, średnica otworów i współczynnik wiązadła można kształtować charakterystykę współczynnika pochłaniania dźwięku w zakresie różnych częstotliwości. Podobne koncepcyjnie rozwiązania stosuje się w celu ograniczenia hałasu komunikacyjnego (drogowego, kolejowego) i przemysłowego za pomocą ekranów akustycznych [N16, N99, N130–N134].



Rys. 2.16. Aranżacja wnętrz [N110, N114, N135–N138]

Omawiane materiały inżynierskie stanowią atrakcyjne tworzywo nie tylko dla obiektów użyteczności publicznej, budynków prywatnych i przemysłowych, lecz sprawdzają się także jako ogrodzenia, bramy, osłony, regały sklepowe i magazynowe, stojaki ekspozycyjne czy wyposażenie stoisk targowych, gdy wymagane jest zarówno bezpieczeństwo jak i estetyka. Doskonale wkomponowują się w przestrzeń miejską, będąc oryginalnym rozwiązaniem w przypadku m.in. wiat przystankowych i rowerowych, mebli parkowych i ulicznych (rys. 2.17) [N16, N116, N139–N143].



Rys. 2.17. Blacha perforowana w zabudowie przestrzeni [N110, N114, N144–N149]

Blachy perforowane są niezbędne w budowie maszyn i urządzeń różnego przeznaczenia. Oslaniają ich ruchome, a także gorące elementy, umożliwiając jednocześnie obserwację pracy urządzenia [N150]. W przemyśle wydobywczym często pełnią funkcję różnego rodzaju sit służących do przesiewania węgla i innych surowców, co należy do najstarszych zastosowań tych materiałów [N104, N105]. Stanowią ochronę dla urządzeń energetycznych i systemów rurowych przed zanieczyszczeniami znajdującymi się w doprowadzanej cieczy lub parze (pompy, turbiny, zawory sterujące i regulacyjne, rurociągi) [N151]. Perforowane płyty, często określane jako „*tube sheet*”, służą do mocowania wewnętrznych rur w wymiennikach ciepła, ustalając m.in. ich wzajemną odległość [N152, N153]. Powietrzne kolektory solarne wspomagające ogrzewanie budynków mogą w swojej konstrukcji zawierać absorber (element pochłaniający promieniowanie słoneczne), wykonany z blachy perforowanej, charakteryzującej się zazwyczaj małym prześwitem (nawet poniżej 1%). Przepływ powietrza przez otwory umożliwia wymianę ciepła pomiędzy powierzchnią absorbera a ogrzewaną przestrzenią [25–31]. Odpowiednio perforowana blacha zaimplementowana w panelach fotowoltaicznych może zapewniać ich pasywne chłodzenie [32–34]. Sektor petrochemiczny, do produkcji paliw oraz smarów, wykorzystuje filtry przemysłowe wykonane m.in. w oparciu o perforację blach, uzupełnioną dodatkowo obróbką plastyczną i wiórową [N157]. Metalowe materiały perforowane o odpowiedniej odporności korozyjnej są stosowane w przemyśle chemicznym, gdzie często muszą sprostać

agresywnemu i żrącemu działaniu różnych substancji w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia. W przemyśle farmaceutycznym i medycznym służą jako elementy urządzeń do produkcji leków i sterylizacji narzędzi medycznych (np. tacki i kosze perforowane w autoklawach) [N154]. Umożliwiają operacje oddzielania i zagęszczania podczas produkcji wyrobów dostarczanych przez branżę celulozowo-papierniczą. Przemysł drzewny, zajmujący się produkcją różnego typu płyt wiórowych, korzysta z maszyn (młyny powietrzne, młyny młotkowe, separatory powietrzne), których częścią składową jest blacha o odpowiedniej perforacji (np. z otworami trójkątnymi o przekroju stożkowym, perforacja tarkowa blachy wytłaczanej) [N155]. Związana z recyklingiem segregacja różnego typu odpadów wymaga stosowania perforowanych sit technicznych (lub sit szczelinowych) o zwiększonej odporności na ścieranie. Istotną kwestią dotyczącą ochrony środowiska jest także właściwa gospodarka wodno-ściekowa. W tym kontekście m.in. sita o odpowiedniej średnicy oczek pozwalają odseparować mechanicznie zanieczyszczenia stałe zawarte w dopływających ściekach komunalnych i przemysłowych, co stanowi wstępny etap ich oczyszczania [N156–N158]. Własności filtracyjne i separacyjne w znacznym stopniu decydują o zastosowaniu blach perforowanych w przemyśle rolno-spożywczym (rys. 2.18). Należy tu wymienić m.in. operacje dotyczące czyszczenia, sortowania i przetwarzania płodów rolnych, które są prowadzone za pomocą odpowiednich sit, będących elementami konstrukcyjnymi maszyn i urządzeń rolniczych (np. wialni, młynów, śrutowników, rozdrabniaczy, brykietarek). Często blachy z tzw. perforacją mostkową służą jako suszarnie podłogowe, ważne podczas magazynowania i transportu surowców [N100, N159–N163]. Szeroki zakres użytkowych cech perforacji przesądza o jej przydatności m.in. w branży: warzywno-owocowej (wyciskarki i wirówki filtracyjne), piekarskiej (perforowane blachy i formy do pieczenia), cukrowniczej (prasy wysłodkowe), mleczarskiej (wirówki, prasy do twarogu) [N164, N165]. Przepływ powietrza przez otwartą powierzchnię blachy umożliwia nie tylko wentylację, suszenie i ogrzewanie ale także chłodzenie, niezbędne m.in. do utrwalania, przechowywania i transportu żywności (chłodziarko-zamrażalki, lody i witryny chłodnicze). Wydajne odprowadzanie ciepła, a także jego ukierunkowane rozpraszanie za pomocą odpowiednio gęstej perforacji jest wymagane w elektronice przemysłowej (szafy sterujące) i użytkowej (obudowy komputerów, kratki i maskownice głośników). Perforowane korytka kablowe, przydatne w instalacjach elektrycznych, chronią przewody przed uszkodzeniem, zapewniając jednocześnie estetyczne wykończenie okablowania prowadzonego naściennie [N166–N168]. W motoryzacji wyroby z blachy perforowanej mogą być stosowane w układach chłodzenia podzespołów i silników (kratki wentylacyjne w samochodach i ciągnikach), pozwalając

powietrzu wnikać i krążyć, spełniając jednocześnie funkcje ochronne jako osłony. Ponadto są wykorzystywane do produkcji filtrów i tłumików w tej branży przemysłu [35, N15]. Hybrydowe elementy (wkładki) akustyczne zbudowane m.in. z blachy perforowanej, odpowiadają za redukcję hałasu [36–39] i chłodzenie silników lotniczych [40–42]. Materiały z perforacją stanowią często komponent urządzeń powszechnie używanych w gospodarstwach domowych (sprzęt AGD), np. filtry do zmywarek, bębny do pralek czy elementy kucharek mikrofalowych [N169, N170]. Wykonanie przetłoczeń w blasze perforowanej pozwala uzyskać tworzywo odpowiednie na podłogi, podesty i stopnie antypoślizgowe [N15, N171, N172]. Płyty perforowane stosowane w przemyśle morskim umożliwiają m.in. montaż i dostęp do instalacji okrętowej, obniżając jednocześnie masę konstrukcji [43]. Estetyczne zalety materiałów perforowanych są eksponowane m.in. w technice oświetleniowej. W branży transportowej perforowane płyty, panele i profile służą m.in. do konstrukcji najazdów i platform samochodowych [N173].



Rys. 2.18. Przykłady różnych zastosowań blach perforowanych [N114, N174–N184]

Przedstawiony przegląd zastosowań blach perforowanych warto uzupełnić o przykład oryginalnego rozwiązania, w którym blacha perforowana posłużyła do funkcjonalnej i estetycznej konstrukcji dachu, chroniącego rzymskie ruiny w parku archeologicznym El Molinete w Kartaginie (południowo-wschodnia Hiszpania). Szczególny charakter obiektu wymagał minimalnej ilości pionowych wsporników skomplikowanego pod względem kształtu zadaszania o dużej rozpiętości i różnych kątach nachylenia. Odpowiednio dobrane materiały jak perforowana blacha stalowa, tworząca niejako skorupę nietypowej konstrukcji dachowej oraz poliwęglan, zapewniający wodoszczelność pozwoliły nadać budowli lekkość, umożliwiając jednocześnie wnikanie światła (rys. 2.19) [N185].



Rys. 2.19. Park archeologiczny El Molinete w Kartaginie (Hiszpania), chroniony przezroczystym dachem wykonanym m.in. z blachy perforowanej [N185]

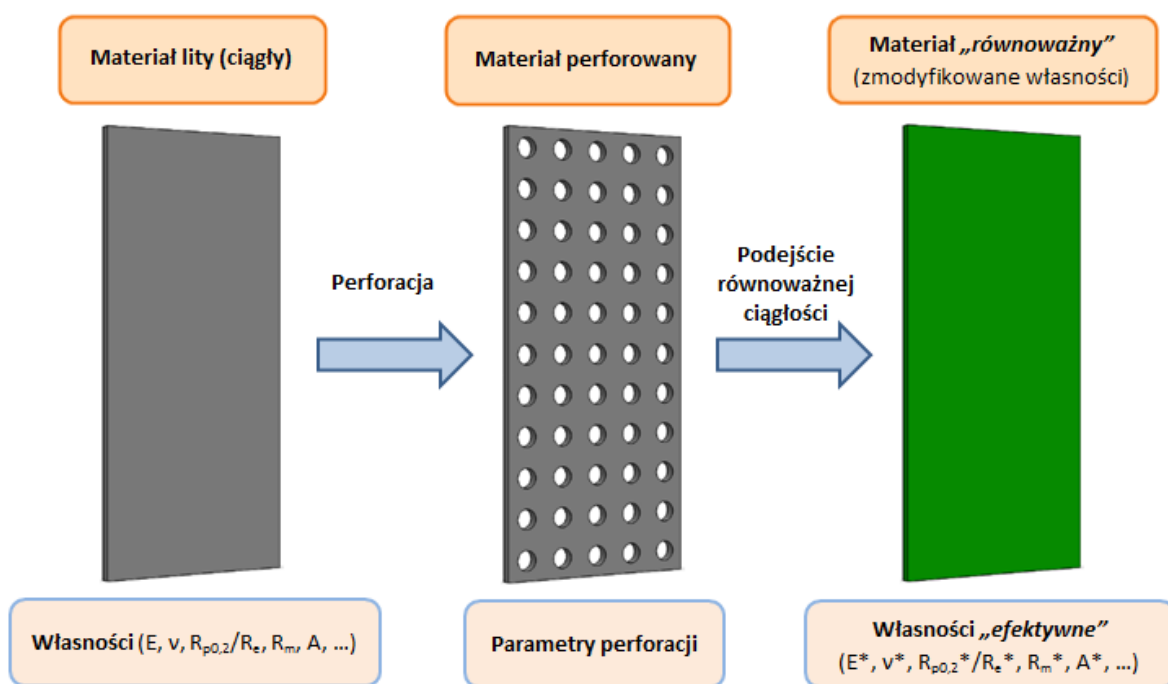
3. Analiza własności blach perforowanych – stan zagadnienia

Dokonując analizy literaturowej własności blach perforowanych, często w tytule oraz w treści wybranej publikacji pojawiało się określenie „*perforated plate(s)*”, które najczęściej rozumiano jako płyta (płyty) perforowane. W niektórych jednak przypadkach, używano tłumaczenia blacha (blachy) perforowane, co było związane z faktem, iż grubość badanych materiałów nie osiągała wartości 3 mm (według normy PN – EN 10079:2009 można je traktować jako blachy cienkie [44]). Takie podejście wydaje się być uzasadnione, gdyż pojęcie płyta perforowana sugeruje raczej wyrób płaski o grubości większej od podanej wartości.

3.1. Własności blach (plyt) perforowanych stosowanych w wymiennikach ciepła

Pierwsze prace dotyczące zagadnienia własności materiałów perforowanych sięgają kilkadziesiąt lat wstecz i związane są głównie z ich praktycznym zastosowaniem jako elementów konstrukcyjnych w wymiennikach ciepła [45–62].

Blachy perforowane z regularnym układem otworów w płaszczyźnie charakteryzują się innymi własnościami w stosunku do blachy macierzystej. W zależności od parametrów perforacji (układ, prześwit, kształt i profil otworów) następuje pewien ich spadek, który jest zazwyczaj różny dla poszczególnych kierunków. Te specyficzne własności sprawiają, iż poprawny opis zachowania się omawianych materiałów poddanych różnym warunkom obciążenia jest bardziej złożony niż w przypadku materiałów litych. W tym celu można przyjąć koncepcję równoważnej ciągłości (równoważnego materiału litego). Podejście takie zostało zastosowane po raz pierwszy przez Gardnera [45] i rozwinięte przez Malkina [48] i Horvay’a [49], którzy materiał perforowany traktowali jako materiał lity o takich samych wymiarach zewnętrznych, wprowadzając odpowiednie efektywne stałe modyfikujące jego własności (rys. 3.1). Gardner wprowadził także określenie „*ligament efficiency*”, które można tłumaczyć jako współczynnik wiązadła, stanowiącego stosunek różnicy skoku i średnicy otworu do skoku. Warto dodać, iż w kolejnych pracach dotyczących blach perforowanych, bardzo często stosowano model równoważnego materiału litego oraz posługiwano się tak zdefiniowanym współczynnikiem wiązadła. Sztywność blach perforowanych Gardner wyznaczał w oparciu o sztywność blachy pełnej, stosując odpowiednio dobrany współczynnik „*deflection efficiency*”, który zależał od układu perforacji (układ trójkątny i prosty) oraz współczynnika wiązadła. Jego wartość była zawsze mniejsza lub równa 1 [45, 46]. Miller zaproponował stosowanie uśrednionego współczynnika wiązadła [50].



Rys. 3.1. Koncepcja równoważnej ciągłości stosowana do opisu własności materiałów perforowanych (opracowanie własne na podstawie [48, 49])

W pracy [48] zaprezentowano teoretyczny model (sporządzony w oparciu o energię odkształcenia elementarnego obszaru zawartego pomiędzy otworami perforacji w układzie trójkątnym równobocznym), pozwalający określić efektywny moduł Younga oraz efektywny współczynnik Poissona blachy perforowanej poddanej gięciu. Przeprowadzono również jego weryfikację eksperymentalną. Horvay [51] wskazał, iż blachy perforowane w układzie trójkątnym z małym wiążadłem mogą być rozpatrywane jako materiały lite poddane płaskiemu stanowi naprężenia, który nie zmienia się znacząco pomiędzy otworami. Kontynuację i uzupełnienie [51] stanowi teoretyczna praca [49], przedstawiająca m.in. formułę na podstawie której obliczono wartości efektywnego modułu Younga i efektywnego współczynnika Poissona przy określonych wartościach innych parametrów (stałych). Duncan [52] w próbie gięcia wyznaczył eksperymentalnie stosunek ugięcia blachy pełnej do perforowanej (układ mijany 60°) przy stałym współczynniku wiążadła (0,285) dla przypadków, gdy perforacja obejmowała całą powierzchnię blachy oraz warianty, w których występował obszar wolny od perforacji. Autorzy pracy [53], bazując na wynikach otrzymanych przez Horvay’a i Duncana, podjęli próbę ulepszenia istniejących modeli, które jednak okazały się mało zgodne z eksperymentem. Sampson [54, 55] wyznaczył doświadczalnie efektywny moduł Younga plastikowego materiału (współczynnik Poissona 0,5) z trójkątnym układem perforacji dla płaskiego stanu naprężenia oraz w próbie gięcia

w szerokim zakresie współczynnika wiazadła. Zbadał ponadto wpływ współczynnika Poissona materiału bez perforacji na efektywne stałe sprężyste, wykorzystując do tego celu aluminiowe próbki. Istotnym wnioskiem płynącym z tych badań jest stwierdzenie mówiące, że w zależności od stosunku grubość (h)/skok (P), blachę perforowaną można traktować jako „grubą” ($h > 2P$) lub „cienką” ($h \leq 2P$). Podział ten wynika z faktu, iż wartość efektywnych stałych sprężystych podczas gięcia jest inna dla blach „cienkich” i „grubych”. Co ciekawe, można wyróżnić jeszcze tzw. zakres przejściowy ($0,1 \leq h/P \leq 2$), w którym wartości parametrów są zmienne. Weryfikację, która potwierdziła słuszność rezultatów uzyskanych przez Sampsona przeprowadził Leven [56, 57]. W pracy [58] rozpatrywano prosty układ perforacji (uwzględniając kierunek najgęstsze upakowania otworów i kierunek diagonalny) dla przypadków, gdy stosunek skoku do średnicy otworu wynosił 1,1; 1,4; 1,7; 2,0 i 3,0. Metodą numeryczną dla płaskiego stanu naprężenia określono m.in. efektywny moduł Younga (także dla ścinania), efektywny współczynnik Poissona, rozkład naprężenia wzdłuż wiazadła oraz współczynnik koncentracji naprężeń. Poprawność uzyskanych wyników sprawdzono doświadczalnie. W teoretyczno-eksperymentalnej pracy [62], O'Donnell i Langer ustalili wartości dopuszczalnych obciążeń mechanicznych i termicznych dla blach z trójkątnym (równobocznym) układem perforacji. Duncan i Upfold [63] wyznaczyli doświadczalnie efektywny moduł Younga i efektywny współczynnik Poissona m.in. dla grubej płyty z miękkiej stali węglowej, poddając ją obciążeniom zginającym i jednoosiowo rozciągającym w szerokim zakresie współczynnika wiazadła. Badano prosty i trójkątny (mijany 60°) układ perforacji. Wyniki wykazały zadowalającą zgodność z pracą [58], natomiast z teoretycznymi rezultatami Malkina [48] i Horvay'a [49] pokrywały się tylko w ograniczonym stopniu dla niskich współczynników wiazadła. Wpływ prostego układu perforacji o współczynniku wiazadła od 15 do 50% zbadano w pracy [64], wykorzystując próbę jednoosiowego rozciągania połączoną z metodą elastooptyczną. Hulbert i Niedenfuhr [65] określili analitycznie wartość naprężeń dla perforacji z symetrycznym i niesymetrycznym układem otworów dla płaskiego stanu odkształcenia i naprężenia, korzystając z metody najmniejszych kwadratów. W analitycznej pracy [66] założono model materiału o jednakowej grubości i nieograniczonego w dwóch pozostałych kierunkach, posiadającego nieskończoną ilość równomiernie rozmieszczonych otworów w układzie heksagonalnym. Stosunek skoku do średnicy wynosił od 1,1 do 3,0. Rozpatrywano płaski stan naprężenia. Przedstawiono m.in. rozkład naprężeń wzdłuż krawędzi foremne sześciokąta (elementarny segment perforacji) dla obciążeń rozciągających i ścinających, wyznaczono współczynnik koncentracji naprężeń oraz efektywny moduł Younga. Harrop i Abdul-Karim

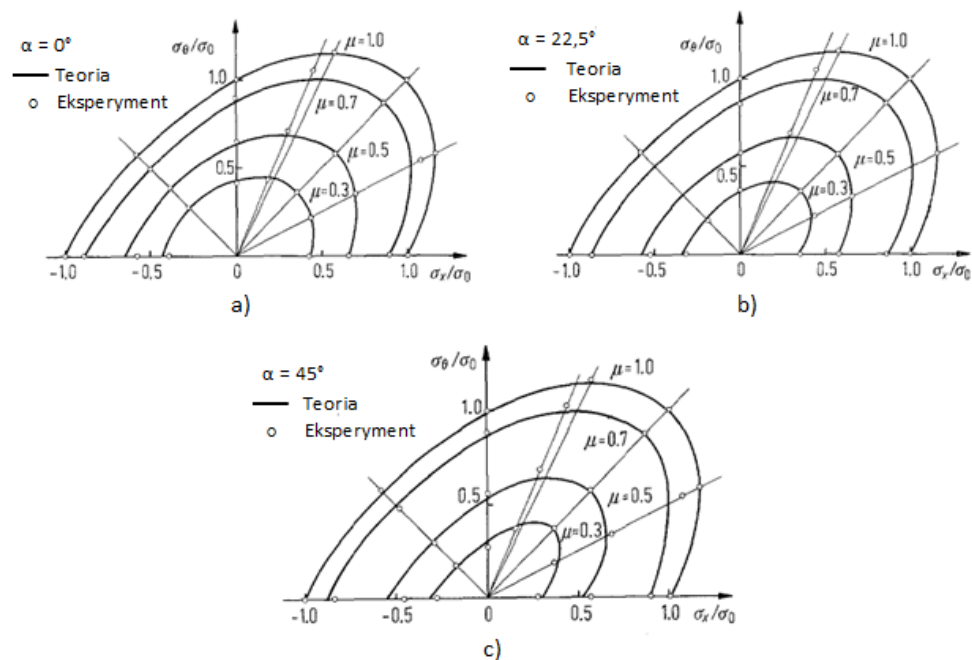
[67] zbadali wpływ trójkątnego (równobocznego) układu perforacji na sztywność swobodnie podpartego płaskiego elementu (grubość 9,525 i 12,7 mm) w kształcie dysku (średnica 203,2 mm) i kwadratu (długość boku 152,4 mm) ze szkła akrylowego dla różnego stosunku skoku do średnicy, stosując obciążenie w postaci centralnie skupionej siły. W przypadku próbki kwadratowej mocowano jej dwa przeciwległe naroża, a pozostałe obciążano, zapewniając schemat prostego zginania. Badany materiał (o wymiarach: 355,6 x 101,6 x 9,525 mm) poddano także jednoosiowemu rozciąganiu. Efektywny moduł Younga oraz efektywny współczynnik Poissona wyznaczono na podstawie wyników wszystkich prób. Ponadto, zaproponowano teoretyczny model obliczania rozważanych stałych sprężystych, zakładając analogię pomiędzy sposobem obciążenia grubościennego cylindra (siła działająca na jego pobocznicy) a obciążeniem elementarnego bloku perforacji. Model teoretyczny w dużej mierze pokrywał się z eksperymentem. Ci sami autorzy określili doświadczalnie i teoretycznie sztywność aluminiowej płyty (w kształcie dysku) z perforacją prostą w centralnej jej części (261 otworów). Uwzględniono trzy kombinacje grubości, średnicy otworu i współczynnika wiązadła, zachowując stałą wartość skoku (1,25). Obciążając hydrostatycznie powierzchnię badanej płyty, dokonywano pomiaru jej ugięcia w kierunku najmniejszego wiązadła oraz dla kierunków zorientowanych względem niego pod kątem 45° (diagonalnych) i 90° [68]. Meijers za pomocą metod analitycznych i numerycznych dla regularnych wzorów perforacji (prosty, trójkątny, prostokątny, rombowy) z okrągłymi otworami, rozważając płaski stan naprężenia, wyznaczył m.in. dla „grubych” blach perforowanych rozkład naprężeń wokół otworów oraz efektywny moduł Younga [69, 70]. Kontynuację problematyki stanowi praca [71], w której rozpatrywano obciążenie zginające i skręcanie, a w obliczeniach wykorzystano metodę asymptotyczną oraz interpolację. Wyniki analizy numerycznej były zgodne z otrzymanym modelem teoretycznym dla wartości efektywnych stałych sprężystych, w przeciwieństwie do wyznaczonego rozkładu naprężenia dla skręcania. Le Fort [72] wyznaczył teoretycznie, bazując na elementarnym fragmencie perforacji prostej z jednym otworem, wartości efektywnych (sprężystych) parametrów materiału ($\nu = 0,3$) w kierunku minimalnego wiązadła oraz w kierunku diagonalnym dla współczynnika wiązadła 0,1 – 0,9 przy stosunku grubości do skoku 0,2; 1,0; 6,0. Rozpatrywano obciążenie zewnętrzne w postaci czystego gięcia, jednak w obliczeniach uwzględniono poprzeczne naprężenia ścinające wynikające z obecności perforacji. Needleman przeanalizował zmianę kształtu i rozmiaru cylindrycznych pustek rozmieszczonych regularnie w kwadratowym układzie elasto-plastycznego materiału [73].

Nawiązanie do prac wcześniejszych, poprzez podejmowaną problematykę własności blach perforowanych m.in. w kontekście ich przeznaczenia na wymienniki ciepła, stanowią publikacje [74–87]. W teoretycznej pracy [76] przedstawiono m.in. zależności pozwalające określić wartości efektywnych stałych sprężystych dla „grubych” blach perforowanych z prostym i trójkątnym (równobocznym) układem okrągłych otworów zakładając płaski stan odkształcenia przy równomiernym obciążeniu działającym w płaszczyźnie blachy. Stwierdzono, iż otrzymane wyniki można także przyjąć za poprawne w przypadku gięcia i skręcania, czego potwierdzeniem była ich zgodność z eksperymentem Sampsona [54]. Próbe czteropunktowego zginania perforowanych płyt aluminiowych (prosty i trójkątny równoboczny układ okrągłych otworów) przeprowadzono w pracy [77]. Zmiennymi parametrami był współczynnik wiązadła (10, 20 i 50%) oraz stosunek grubości do skoku (0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,5), przy czym wartość skoku była stała i wynosiła 0,5. Badania potwierdziły, iż „cienkie blachy” perforowane (przy jednakowym współczynniku wiązadła) wykazują wyższy efektywny moduł Younga i niższy efektywny współczynnik Poissona w odniesieniu do blach „grubych” z taką samą perforacją. W pracy [78], metodą elementów skończonych, wyznaczono m.in. stosunek naprężenia nominalnego do naprężenia maksymalnego dla blach z prostym i trójkątnym układem perforacji (otwory okrągłe), uwzględniając dwuosiowy stan naprężenia. Tą samą metodę zastosowano w celu zbadania sprężystej odpowiedzi blachy z trójkątnym (równobocznym) wzorem perforacji o współczynniku wiązadła 5 i 10% obciążonej mechanicznie i termicznie [88].

3.2. Zakres posprężysty materiałów perforowanych (kryterium plastyczności)

Blachy perforowane stanowiły także przedmiot szeregu badań w kontekście ich zachowania w zakresie posprężystym. Pierwsze z nich to [79–81, 89–91], a także prace Litewki i współautorów [92–96]. W publikacji [79] przedstawiono m.in. powierzchnię plastyczności dla trójkątnego (równobocznego) układu perforacji z otworami okrągłymi o współczynniku wiązadła od 0,05 do 0,15 rozpatrując płaski stan naprężenia. Uwzględniono także różną orientację obciążenia zewnętrznego względem charakterystycznych kierunków badanej perforacji. Posłużono się warunkiem plastyczności według Tresci dla materiału litego. Wyznaczoną powierzchnię plastyczności poszerzono do niemal pełnego zakresu współczynnika wiązadła (0,05 – 1) [80], a także dla prostego układu perforacji [81]. Praca [89] zawiera wyniki badań metodą elementów skończonych perforacji prostej (otwory okrągłe) dla trzech wartości współczynnika wiązadła (0,1; 0,2; 0,5), stosując dwuosiowe

równomierne obciążenie w płaszczyźnie blachy oraz czyste ścinanie. Dla tak dobranych parametrów określono współczynnik koncentracji odkształcenia plastycznego, zdefiniowanego jako stosunek maksymalnego lokalnego odkształcenia plastycznego do obliczonego maksymalnego lokalnego odkształcenia sprężystego. W analizie wykorzystano warunek plastyczności Hubera-Misesa i prawo płynięcia Prandtla-Reussa. Winnicki i współautorzy [90], także za pomocą metody elementów skończonych oraz przy zastosowaniu warunku Hubera-Misesa wraz ze związanym z nim prawem płynięcia, wyznaczyli dla płytki perforowanej (grubość 10 mm) w układzie trójkątnym równobocznym (otwory okrągłe, skok 0,2) wartości granicznych naprężeń wywołujących początek odkształceń trwałych. Analizowano płaski stan naprężenia, zakładając (podobnie jak w wielu przypadkach tego typu analiz) model materiału sprężysto-idealnie plastycznego. Publikacja [91] zawiera analizę dotyczącą warunków uplastycznienia okrągłych płyt perforowanych (układ prosty i trójkątny) rozpatrując jednorodne obciążenie ich powierzchni (odpowiadające określonymu momentowi gnącemu) i przyjmując koncepcję ekwiwalentnego materiału ortotropowego. W pracy [92] zaprezentowano eksperymentalne badania wpływu współczynnika wiązadła (0,3; 0,5; 0,7; 1,0) na kształt i rozmiar powierzchni plastyczności dla prostego układu perforacji (otwory okrągłe). Testy prowadzono na rurkowych próbkach ze stali miękkiej St3S, które poddawano obciążeniu wewnętrznemu, osiowemu oraz skręcaniu. Powierzchnia plastycznego płynięcia została wyznaczona dla trzech orientacji naprężeń głównych względem osi symetrii perforacji (0° , $22,5^\circ$ i 45°). Większą anizotropię otrzymano w przypadku niższego współczynnika wiązadła. Stwierdzono, iż dla wartości równej 0,7 jest ona zanedbywalnie mała i dla większych wartości można pominąć niejednorodność wynikającą z siatki otworów. Litewka i Sawczuk [94] zaproponowali „tensor perforacji” uwzględniający anizotropię materiału perforowanego. Jego składowe były zależne od współczynnika wiązadła i układu perforacji. Zaprezentowane kryterium plastyczności było funkcją wyznaczonego eksperymentalnie „tensora perforacji” oraz wprowadzonych wartości stałych (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Teoretyczna i eksperymentalna powierzchnia plastyczności materiału perforowanego dla różnego współczynnika wiązadła μ oraz wybranej orientacji obciążenia α względem kierunku najgęstszej upakowania otworów perforacji prostej [94]

Celem pracy [95] było określenie wartości naprężeń stycznych występujących podczas jednoosiowego rozciągania materiałów perforowanych w przypadku gdy kierunek obciążenia nie pokrywa się z osią symetrii perforacji oraz oszacowanie wynikających z tego błędów popełnionych przy wyznaczaniu powierzchni plastycznego płynięcia. Badanym materiałem była płyta celuloidowa o grubości 3,9 mm z prostym i trójkątnym układem otworów okrągłych. Kierunek obciążenia tworzył z kierunkiem najgęstszej upakowania otworów kąt $22,5^\circ$ dla perforacji prostej oraz kąt 15° dla perforacji trójkątnej. Współczynnik osłabienia otworami wynosił 0,4, aby zapewnić stosunkowo silną anizotropię. Przeprowadzone badania umożliwiły znalezienie rozkładów naprężeń w charakterystycznych przekrojach struktury materiału perforowanego i oszacowanie rozmiarów zakłóceń osiowego stanu naprężenia przy niesymetrycznym rozciąganiu. Stwierdzono, iż zakłócenia te są zauważalne dopiero przy odkształceniach wzdłużnych perforowanej próbki wynoszących kilka procent i są większe w przypadku kwadratowego układu otworów.

Kontynuując problematykę własności blach perforowanych w obszarze plastycznym należy wymienić publikacje [97–103], w których zastosowano głównie metodę elementów skończonych, prace Chena i współautorów [104–106], a także Baika i współautorów [107–110]. W pracy [97] zbadano wpływ zmiennego obciążenia na rozkład odkształcenia wokół okrągłego otworu perforacji trójkątnej (równobocznej). Założono model idealnie plastycznego

materiału oraz zastosowano warunek plastyczności Hubera-Misesa wraz z prawem płynięcia Prandtla-Reussa. Współczynnik wiązadła wynosił 0,5 dla równomiernego dwuosiowego obciążenia oraz 0,2 w przypadku ścinania. Wyznaczono współczynnik koncentracji odkształcenia plastycznego dla obciążeń zmiennych w funkcji analogicznego parametru dla obciążeń monotonicznych. Przyjmując podobne założenia, w pracy [98] określono powierzchnię plastyczności dla takiego samego układu perforacji (trójkątnego równobocznego dla współczynnika wiązadła 0,2), uwzględniając umocnienie odkształceniowe materiału obciążanego monotonicznie. Warunek uplastycznienia dysku (grubość 1 mm) z perforacją prostą dla współczynnika wiązadła 0,2; 0,3; 0,5 i 0,7 (stała wartość skoku 10 mm) rozważano w pracy [99]. Wyniki otrzymane metodą elementów skończonych porównano m.in. z wcześniejszymi badaniami eksperymentalnymi [92]. Nakayama i inni [100] zbadali wpływ orientacji (przedział od 0° do 90° co 15°) prostokątnego układu perforacji na wartość granicy plastyczności, zakładając płaski stan naprężenia. Rozpatrywano warianty w których stosunek długości boków elementarnej komórki perforacji, zawierającej jeden centralnie umieszczony otwór okrągły o średnicy 2 mm, wynosił 2 oraz 3. Kierunek 0° był zgodny z krótszym boki elementarnej komórki. Stwierdzono, iż naprężenie uplastyczniające zależy od występującej wokół otworów koncentracji naprężeń. Reinhardt [101] zaproponował kryterium plastyczności w postaci funkcji drugiego i czwartego stopnia uwzględniający trójkątny układ perforacji dla grubych blach (płyt) występujących w wymiennikach ciepła. Modele analityczne porównano z wynikami obliczeń numerycznych (ANSYS 5.2) dla obciążenia działającego w płaszczyźnie blachy. W pracy [102], mocno nawiązującej do [101], również przedstawiono teoretyczne modele dotyczące kryterium plastyczności dla blach z perforacją prostą (otwory okrągłe) o współczynniku wiązadła 0,2; 0,3; 0,5 i 0,7. Przeprowadzona analiza numeryczna w oparciu o warunek plastyczności Tresca i von Misesa wykazała generalnie dużą zgodność z przedstawionymi modelami matematycznymi. Była ona jednak lepsza w przypadku modelu wyrażonego za pomocą funkcji stopnia czwartego, zwłaszcza w warunkach czystego ścinania oraz dla kierunku diagonalnego. Powierzchnię plastyczności dla blachy z prostym układem otworów cylindrycznych wyznaczono w [103], posługując się metodą elementów skończonych. Uzyskane wyniki porównano z wcześniejszymi publikacjami [81, 93, 99]. W zależności od rozważanego kierunku perforacji, współczynnika wiązadła, stosunku naprężeń w płaszczyźnie blachy, a także od zastosowanego w symulacji warunku plastyczności (Tresca lub von Misesa), otrzymano nieco różną zgodność. W pracy [104] określono teoretycznie warunek plastyczności i związane z nim prawo płynięcia dla blachy z heksagonalnym układem

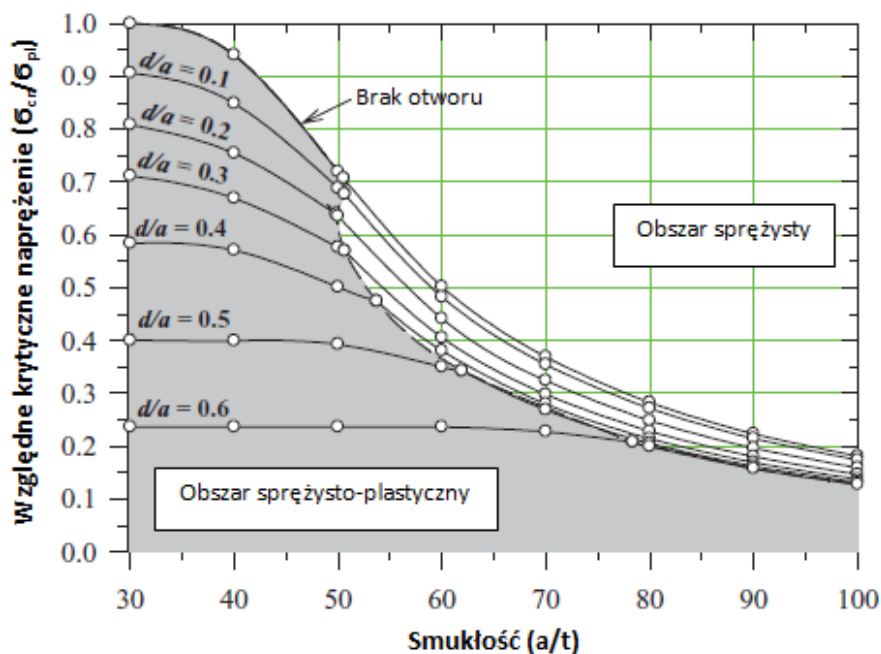
otworów okrągłych w oparciu o kryterium Hilla (dla materiału anizotropowego) i von Misesa, wprowadzając odpowiednie modyfikacje i zakładając płaski stan naprężenia. Jego weryfikację przeprowadzono za pomocą analizy MES i próby jednoosiowego rozciągania. W eksperymencie wykorzystano perforowane próbki ze stali nierdzewnej (AISI 304) o grubości 0,79 mm. Średnica otworu wynosiła 2,54 mm, natomiast skok 3.81 mm. Stwierdzono tylko nieznaczną anizotropię plastyczną spowodowaną badanym układem perforacji. Podobną analizę teoretyczną zawiera praca [105], która dotyczy perforacji heksagonalnej z niskim współczynnikiem wiązadła (0 – 0,5). Baik i inni [106] dokonali analizy odkształcenia (MES 2D i 3D oraz eksperymentalna próba jednoosiowego rozciągania) blachy (Fe-36Ni Invar) z otworami o zróżnicowanej średnicy (0,134 – 0,245 mm) na jej grubości (0,13 mm), stosowanej jako tzw. maska cieniująca kineskopu. Badania wykonano dla uśrednionej wartości średnicy otworu (0,213 mm). Podobny – zwłaszcza ze względu na przeznaczenie – rodzaj materiału rozpatrywano w pracach [107–111], gdzie m.in. wyznaczono krzywą odkształceń granicznych (teoretycznie i doświadczalnie) uwzględniając różne kierunki badanej perforacji [107]. Zaproponowano kryterium plastyczności dla pełnego zakresu współczynnika wiązadła poparte analizą MES i eksperymentalnie [108]. Wprowadzono koncepcję równoważności jednolitego okrągłego otworu m.in. w celu analizy plastycznej deformacji blach z niejednorodnym profilem otworów [109]. Określono warunek uplastycznienia dla blach z otworami podłużnymi o niejednorodnym profilu [110] oraz wykonano analizę termiczną [111]. Stosując podejście homogenizacji ośrodka niejednorodnego (blacha z trójkątnym równobocznym układem otworów okrągłych), przedstawiono powierzchnię plastyczności wraz z jej ewolucją [112]. Takizawa i Furuta [113], na podstawie elementarnego segmentu perforacji prostej i heksagonalnej (o podobnym prześwicie: odpowiednio 34,9 i 36%) dla stalowej blachy (grubość 0,3 mm), określili numerycznie warunek uplastycznienia uwzględniając zjawisko umocnienia materiału (wraz z odkształceniem plastycznym następuje zmiana kształtu powierzchni plastyczności dla tego typu materiałów). Zaproponowany model zweryfikowano eksperymentalnie (próba jednoosiowego rozciągania i głębokiego tłoczenia) otrzymując dobrą zgodność wyników. Podobne podejście przyjęto w pracy [114], analizując anizotropię związaną z plastyczną deformacją blachy perforowanej w układzie heksagonalnym. W dość szczegółowej i wnikliwej publikacji [115], Khatam i Pindera, stosując metodę objętości skończonych, analizowali mechanizmy deformacji plastycznej wokół okrągłego otworu bazując na elementarnym segmencie perforacji heksagonalnej. Rozpatrywano płaski stan naprężenia. Ścieżkę plastycznej deformacji blachy EN AW-5052 z mikrootworami (średnica 10 μm)

wykonanymi techniką laserową badano w pracy [116], rozważając nieregularne rozmieszczenie pustek oraz regularny trójkątny układ perforacji. Wang [117] za pomocą analizy numerycznej wspomaganej cyfrową korelacją obrazu (*DIC – Digital Image Correlation*), wyznaczył szereg krzywych ilustrujących zależność siły rozciągającej od wydłużenia dla różnie perforowanych próbek (łącznie cztery warianty: prosty i heksagonalny układ otworów o średnicy 2,5 mm oraz ich modyfikacje zaburzające w pewnym stopniu regularność otworów) ze stali niskowęglowej i z mosiądzu. Analizowano rozkład i lokalizację odkształcenia także w oparciu o wyniki doświadczalne.

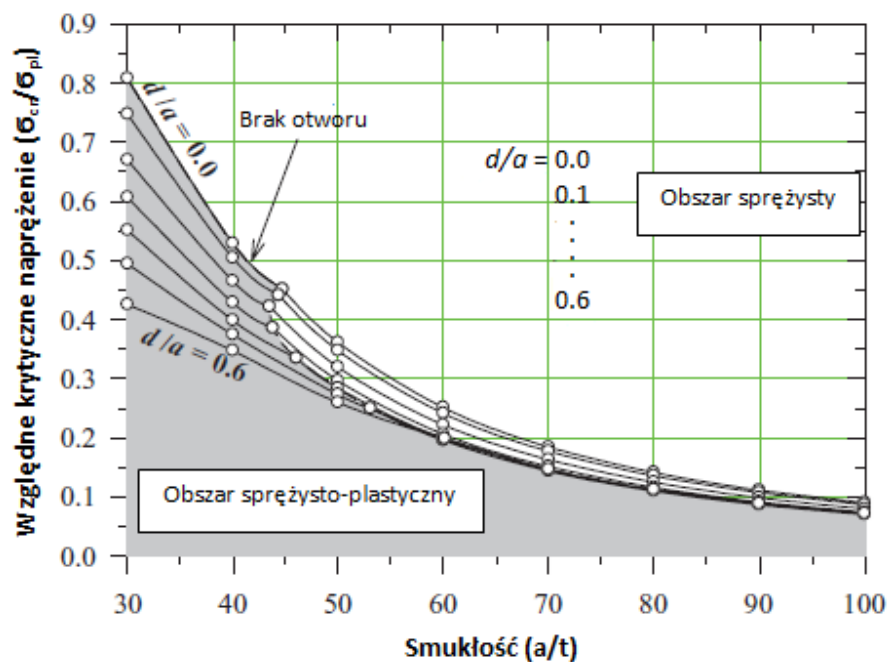
3.3. Zjawisko wyboczenia płyt (płytek) perforowanych

Szereg prac poświęcono zagadnieniu dotyczącym wyboczenia płytek/płyt perforowanych z jednym – najczęściej centralnie usytuowanym – otworem [118–157]. Narayanan i Chow zbadali wpływ kształtu (okrągłego i kwadratowego), rozmiaru oraz ekscentryczności otworu na wyboczenie płytki poprzez jednoosiowe ściskanie. Spadek sztywności spowodowany perforacją zaobserwowano nieco większy dla otworu kwadratowego. Zaproponowano przybliżoną metodę wyznaczania maksymalnego obciążenia, właściwą w przypadku gdy smukłość (stosunek szerokości do grubości płytki) nie przekracza 80 [119]. Ci sami autorzy wykonali podobne badania w warunkach dwuosiowego ściskania [120]. Metodą elementów skończonych (pakiet ABAQUS) analizowano m.in. podatność do wyboczenia płytek w zależności od wybranych parametrów perforacji (wielkość otworu okrągłego i kwadratowego), a także od warunków brzegowych i sposobu obciążenia (jedno lub dwuosiowe ściskanie). Podano formułę – z odpowiednio ustalonymi zestawami współczynników – pozwalającą obliczyć maksymalną siłę wyboczenia w funkcji prześwitu i smukłości [120]. Paik [122] badał numerycznie (ANSYS) związaną z wyboczeniem wytrzymałość prostokątnych płyt o różnym stosunku średnicy pojedynczego otworu do jej krótszej krawędzi. Analizował wpływ stosunku wymiarów zewnętrznych płyty (długość/szerokość oraz smukłość). Stosował osiowe obciążenie ściskające zgodne z kierunkiem dłuższej krawędzi, obciążenie ścinające [123] oraz kombinację obciążeń ściskających i ścinających [124]. Wang i inni [125] wyznaczyli metodą elementów skończonych (ANSYS) m.in. naprężenie wyboczenia płyt z okrągłym i podłużnym otworem różnej wielkości. Zmiennym parametrem był także stosunek wymiarów zewnętrznych materiału. Khaled i współautorzy sprawdzali numerycznie (ANSYS) sprężysty i sprężysto-plastyczny sposób wyboczenia kwadratowych i prostokątnych płyt (różne gatunki stali)

w zależności od ich smukłości oraz od średnicy i usytuowania otworu dla jednoosiowego ściskania [126], a także w warunkach obciążenia dwuosiowego [127]. Stwierdzili m.in. iż wraz ze wzrostem wielkości otworu maleje naprężenie krytyczne powodujące wyboczenie płyty, przy czym jego charakter znacząco zależy od jej smukłości (rys. 3.3 i 3.4).



Rys. 3.3. Wpływ smukłości na względne krytyczne naprężenie podczas wyboczenia blachy o długości boku a i grubości t dla różnej średnicy otworu d w warunkach jednoosiowego ściskania [127]



Rys. 3.4. Wpływ smukłości na względne krytyczne naprężenie podczas wyboczenia blachy o długości boku a i grubości t dla różnej średnicy otworu d w warunkach dwuosiowego równomiernego ściskania [127]

W pracy [128] dokonano numerycznej (ABAQUS) i eksperymentalnej analizy wyboczenia prostokątnych płytek (100 x 150 mm) ze stali konstrukcyjnej o grubości 2,07 mm bez perforacji oraz z otworem okrągłym (średnica 33,84 mm) i kwadratowym (długość boku 30 mm). W obu przypadkach wartość powierzchni otwartej (objętej perforacją) była jednakowa. Próbkę ściskano jednoosiowo przykładając równomierne obciążenie na różnej długości krótszej krawędzi (15, 30, 50, 75 mm oraz 100 mm dla materiału bez perforacji), zachowując jego symetrię względem osi płytki. Przeciwna krawędź była podparta swobodnie lub sztywno utwierdzona. Wyższą siłę wyboczenia zanotowano wówczas, gdy obciążenie obejmowało większy odcinek krawędzi płytki oraz w przypadku sztywnego utwierdzenia podpartej części (około dwukrotnie większa wartość w porównaniu do umocowania swobodnego). Nieznacznie wyższą wartość siły zaobserwowano dla otworu okrągłego. Benguediab i inni [129] badali metodą elementów skończonych (ABAQUS 6.10) wpływ kształtu (okrągłego i kwadratowego) i wielkości pojedynczego centralnego otworu dla wybranych stosunków długości do szerokości (1,0; 1,5 i 2,0) żeliwnej płytki o grubości 1 mm, przy czym szerokość była wartością stałą i wynosiła 200 mm. Średnica otworu okrągłego i bok otworu kwadratowego w stosunku do szerokości próbki mieścił się w zakresie 0 – 0,7 w odstępach równych 0,1. Stosowano jednorodne obciążenie ściskające wzdłuż szerokości płytki, natomiast pozostałe dwie krawędzie boczne poddawano sztywnemu umocowaniu lub pozostawały swobodne. Stwierdzono m.in., iż wzrost wielkości otworu w rozpatrywanym zakresie, przy różnych kombinacjach pozostałych parametrów, niekoniecznie musi skutkować obniżeniem krytycznej siły wyboczenia. Komur [130] przeprowadził numeryczną analizę (ANSYS) sprężysto-plastycznego wyboczenia cienkiej kwadratowej i prostokątnej płyty stalowej (gatunek A50) z eliptycznym otworem. Zmiennymi parametrami był stosunek długości do szerokości (1, 2, 3 i 4), smukłość (30 – 100 z odstępem 10), rozmiar elipsy wyrażony stosunkiem długości jej małej osi do szerokości próbki, kąt nachylenia wielkiej osi względem długości płyty (0° – 90° z odstępem 5°) oraz usytuowanie otworu. Kierunek równomiernego obciążenia ściskającego był zgodny z krawędzią dłuższą. Większe ryzyko wyboczenia wystąpiło dla płyt kwadratowych. Wykazano, iż smukłość ma znaczący wpływ na krytyczne naprężenie wyboczenia (większa smukłość skutkuje niższą wytrzymałością na wyboczenie). Ponadto zaobserwowano, iż sprężysto-plastyczne wyboczenie występuje w przypadku małej smukłości, natomiast jej wyższa wartość decyduje o sprężystym charakterze wyboczenia. Oszacowano zakres wartości smukłości od 53 do 81 w obrębie którego następuje przejście od wyboczenia sprężysto-plastycznego do wyboczenia sprężystego. Maksymalną siłę wyboczenia kwadratowej płytki (500 x 500 mm) o różnej

grubości (5, 6, 8, 10, 12 i 15 mm) i smukłości (1,17 – 3,54) z prostokątnym otworem o zmiennym stosunku długości krawędzi (szerokość otworu była stała i równa 100, natomiast długość zmieniała się w zakresie 50 – 450 mm z odstępem 50 mm) wyznaczono numerycznie (ANSYS) w pracy [131]. Wartość prześwitu mieściła się w przedziale od 0,02 do 0,18 z przyrostem równym 0,02. Kierunek jednoosiowego ściskania był prostopadły do krawędzi otworu o zmiennej długości. Zmiana siły maksymalnej miała charakter liniowy w przypadku gdy smukłość próbki była mniejsza od 2,23, natomiast po przekroczeniu tej wartości obserwowano nieliniowy przebieg. Autorzy prac [132–135] na podstawie obliczeń numerycznych (ANSYS) w oparciu o tzw. „*constructal design method*” dokonali optymalizacji kształtu centralnie usytuowanego otworu eliptycznego [132, 133, 135], sześciokątnego [132, 135] oraz innych (wzdłużnego, prostokątnego, rombowego [135]) dla stalowych płyt (grubość 10 mm) w celu uzyskania maksymalnie wysokiej siły wyboczenia. Dla otworu heksagonalnego i wzdłużnego rozważano dwa warianty, tzn. gdy ich dłuższa oś symetrii była równoległa lub prostopadła do długości próbki. Rozpatrywano płyty kwadratowe (1000 x 1000 mm [132–134], 1414,20 x 1414,20 mm [134, 135]) oraz prostokątne (2000 x 1000 mm [132–135]), o różnej smukłości (50, 100 [132, 134, 135], 100 [133]). Dodatkowym warunkiem była minimalna sumaryczna odległość granic otworu od wzdłużnych krawędzi płyty (200 mm) [132, 133, 135] oraz od krawędzi poprzecznych (200 mm) [134, 135]. Stały parametr stanowiły także udziały objętościowe perforacji w całej objętości pełnej płyty (0,2 [132], 0,02; 0,05; 0,08; 0,15; 0,20 i 0,25 [133], 0,10; 0,15; 0,20 i 0,25 [134], 0,08; 0,10; 0,15; 0,20 i 0,25 [135]). W każdym przypadku kierunek jednoosiowego obciążenia ściskającego był zgodny z kierunkiem wzdłużnym elementu. Wyboczenie ściskanej osiowo stalowej blachy (o wymiarach 150 mm x 100 mm x 2,07 mm) z podłużnym otworem (o szerokości 10 mm), usytuowanym centralnie w jej płaszczyźnie, badano eksperymentalnie i numerycznie (ABAQUS) w pracy [141]. Zmiennymi parametrami była długość otworu oraz jego nachylenie względem wzdłużnej osi blachy (0°, 30°, 45°, 60° i 90°). W pracy [142] badano wyboczenie stalowej blachy z jednym otworem poddanej ścinaniu za pomocą liniowej i nieliniowej analizy numerycznej. Rozpatrywano okrągły i prostokątny kształt otworu. Stosunek średnicy okrągłego oczka oraz krótszego boku otworu prostokątnego względem szerokości arkusza wynosił 0,1; 0,3 i 0,5. Dla kształtu prostokątnego stosowano dwa warianty, tzn. gdy dłuższa krawędź otworu (stanowiąca 1,5-krotność krawędzi krótszej) była prostopadła lub równoległa do osi wzdłużnej blachy. Zmienne było także usytuowanie otworu w płaszczyźnie blachy, zarówno w kierunku wzdłużnym jak i poprzecznym. Stosunek długości do szerokości arkusza był równy 1, 2 i 3, a smukłość

mieściła się w zakresie od 60 do 130 (z odstępem 10). W tym samym gronie współautorów [143] przeprowadzono analizę numeryczną dla blachy (o kształcie kwadratowym i prostokątnym) z okrągłym otworem o różnym usytuowaniu w jej płaszczyźnie (także centralnym). Stosunek średnicy otworu do szerokości arkusza wynosił: 0,1; 0,3 i 0,5. Rozważano jednoosiowe ściskanie, przy czym obciążenie przykładano tylko do fragmentu krawędzi (o szerokości 1000 mm) blachy, symetrycznie względem jej osi wzdłużnej. Stosunek długości odcinka do którego była przyłożona siła ściskająca względem całkowitej szerokości krawędzi był równy: 1; 0,6; 0,4 i 0,2. Smukłość blachy analizowano w przedziale od 30 do 100 (co 10). W badaniach uwzględniono trzy gatunki stali o różnej granicy plastyczności.

Wpływ różnego typu wzmocnień na wyboczenie płytek/płyt perforowanych z jednym centralnym otworem stanowił przedmiot badań prac [136–138, 140]. W publikacji [136] przeprowadzono sprężystą i sprężysto-plastyczną analizę MES (ANSYS) odpowiednio wzmocnionych i niewzmocnionych kwadratowych płytek z koncentrycznie położonym okrągłym otworem, które poddano jednoosiowemu ścisaniu. Rozpatrywano usztywnienie: w formie pierścienia (zamocowanego w otworze), płaskie (dodatkowa perforowana płytka umieszczona koncentrycznie względem materiału wzmacnianego) oraz wzdłużne i poprzeczne względem kierunku obciążenia zewnętrznego. W analizie przyjęto, iż elementy usztywniające są wykonane z tego samego materiału co wzmacniana perforowana płytka. Zmiennymi parametrami była smukłość (20 – 100 z odstępem 10) oraz średnica otworu w stosunku do długości krawędzi próbki (0,1 – 0,5 z przyrostem 0,1). Wzmocnienie za pomocą pierścienia i płaskiego elementu okazało się najlepsze dla grubych płytek (mała smukłość) w przypadku sprężysto-plastycznego wyboczenia, natomiast największy wzrost wytrzymałości cienkich płytek (duża smukłość) w obszarze sprężysto-plastycznym, a także wszystkich płytek z wyboczeniem sprężystym zanotowano dla usztywnienia wzdłużnego. W pracy [137] badano numerycznie (ABAQUS) i eksperymentalnie wpływ wzmocnienia okrągłego otworu (średnica 46; 62,2 i 86,8 mm) kwadratowych aluminiowych (AA1100) płytek (240 x 240 mm) o grubości 1,5 mm na siłę wyboczenia wywołanego jednoosiowym ścisaniem. Wzmocnienie stanowiły jednostronnie mocowane elementy w kształcie pierścienia (z aluminium AA1100) o grubości 1,5 mm, różnej średnicy wewnętrznej (równej średnicy otworu) i zewnętrznej (co determinowało jego szerokość równą 10, 15 i 20 mm), a także krótkie cylindryczne rurki (ze stopu aluminium AA6101) o wysokości 30 mm (usytuowane symetrycznie względem środkowej płaszczyzny płytki), różnej grubości (1,12; 2,03; 2,17 i 3,0 mm) i średnicy wewnętrznej (46; 62,2 i 86,8 mm). Elementy spajano za

pomocą żywicy termoutwardzalnej o wysokiej wytrzymałości. Materiałem referencyjnym była płytka tego samego gatunku bez perforacji. Analizowano różne warunki brzegowe. Zastosowane wzmocnienia podniosły wartość siły wyboczenia, przy czym wzrostowi szerokości pierścieniowego elementu towarzyszył przyrost liniowy. Ponadto, zwiększenie grubości cylindrycznej rurki znacząco podwyższyło wytrzymałość jednootworowo perforowanej płytki. Kim i inni [138] badali metodą elementów skończonych (MSC NASTRAN) trzy typy wzmocnienia stalowej (AH 32) dużej płyty (3182 x 860 mm) o grubości 14 mm z podłużnym otworem. Okolice perforacji usztywniano za pomocą płaskowników, a także poprzez dodatkowy element biegnący wokół brzegu otworu po jednej lub obydwu stronach płyty. Różne były wymiary wzmocnień (przy jednakowej masie). Smukłość płyty mieściła się w zakresie 0,9608 – 3,3629, natomiast szerokość oczka względem szerokości płyty wynosiła od 0,1744 do 0,8139. Stosowano ściskanie wzdłużne, poprzeczne i ścinanie. W zależności od schematu obciążenia zróżnicowany był wpływ danego wzmocnienia na maksymalną siłę wyboczenia. Loughlan i Hussain skoncentrowali się na numerycznym (pakiet PATRAN/NASTRAN) określeniu krytycznego naprężenia ścinającego i zachowania po wyboczeniu stalowej blachy w kształcie kwadratu (500 x 500 mm) o grubości 2 mm z centralnym okrągłym otworem bez [139] oraz z usztywnieniem [140]. Analizowano symetryczne i asymetryczne względem środkowej płaszczyzny blachy wzmocnienie (usztywnienie) otworu w postaci pierścienia o grubości 2 mm i wysokości wyrażonej względem szerokości blachy (wzmocnienie symetryczne: 0,025; 0,05 i 0,1 i wzmocnienie asymetryczne: 0,0125; 0,025 i 0,05). Stała była średnica otworu, którą także podawano w odniesieniu do szerokości krawędzi bocznej (0,5). Lepszy efekt uzyskano w przypadku usztywnienia symetrycznego. Kim i współautorzy [158] sprawdzali eksperymentalnie i numerycznie (MSC/NASTRAN) wytrzymałość na wyboczenie stalowej grubej blachy z jednym otworem, stosując także warianty z odpowiednimi umocnieniami (płaskowniki o przekroju poprzecznym 50 mm x 8 mm, usytuowane poziomo przy dolnej i górnej krawędzi otworu). Różny był stosunek długości blachy do jej stałej szerokości (400 mm), który wynosił 2, 3 oraz 4. Zmienna była także grubość blachy (4 mm, 6 mm i 8 mm), kształt (okrągły i podłużny) i wielkość otworu oraz jego usytuowanie. Stosowano jednoosiowe ściskanie w kierunku wzdłużnym arkusza. Na podstawie przeprowadzonych badań przedstawiono formułę pozwalającą wyznaczyć krytyczną wytrzymałość na wyboczenie. Liniową analizę numeryczną (ANSYS) wyboczenia płyty (grubość 8 mm) o różnym stosunku długości do szerokości (0,5 – 2,5) z trzema okrągłymi otworami (stosunek średnicy otworu do długości krawędzi bocznej płyty w zakresie 0,10 – 0,25) usytuowanymi

równomiernie na jej osi wzdluznej, stosujac trzy warianty wzmoznienia, badano w pracy [159]. Elementy usztywniajace stanowiły dwa płaskowniki (przekrój poprzeczny 56 mm x 6 mm) rozmieszczone: symetrycznie po obu stronach otworów równolegle wzgledem krawędzi wzdluznej płyty oraz pomiędzy otworami (w połowie odległości) równolegle wzgledem jej szerokości. Trzeci wariant był kombinacją dwóch wymienionych. Wpływ na wyboczenie rozpatrywanych wzmoznień sprawdzano także dla takiej samej płyty bez perforacji.

Utrata stateczności blach/płyt perforowanych poprzez wyboczenie sprężyste była rozważana głównie w oparciu o metodę obciążeń/przemieszczeń wtórnych („*Conjugate Load/Displacement Method*” – CLDM) [144–149] oraz metodę elementów skończonych [143, 151-157, 160]. Dla różnych warunków brzegowych, najczęściej rozpatrywano kwadratowe i prostokątne płytki z pojedynczym centralnie usytuowanym otworem (kwadratowym, prostokątnym i okrągłym) różnej wielkości, które poddawano: jednoosiowemu ściskaniu [144], kombinacji obciążeń dwuosiowych [145], zginaniu, ścinaniu, ściskaniu i ich kombinacji [146], jedno i dwuosiowemu ściskaniu, ścinaniu i zginaniu [147]. Badano wpływ usytuowania otworu prostokątnego [149] i okrągłego [150], a także stosunek wymiarów zewnętrznych prostokątnej płytki [151] na wartość siły wyboczenia. Stosowano obciążenie w postaci siły skupionej działającej zgodnie z osią symetrii próbki [153] oraz przyłożonej wzdluz jej krawędzi w różnej odległości od środka otworu [148]. Komur i Sonmez [154] badali wyboczenie sprężyste płytek (o różnym stosunku długości do szerokości: 1, 2, 3, 4 oraz grubości stanowiącej 0,05 szerokości) z pojedynczymi okrągłymi otworami usytuowanymi w różnej odległości od krawędzi bocznej próbki stanowiącej jej szerokość (przy jednoczesnym zachowaniu położenia środka otworu na osi wzdluznej płytki). Stosunek średnicy otworu do szerokości próbki zmieniał się w zakresie od 0,1 do 0,7 z odstępem 0,1. Stosowano liniowo zmienne obciążenie wzdluz szerokości płytki zapewniając różne przypadki ściskania i gięcia. Ci sami autorzy [155] analizowali zachowanie kwadratowych i prostokątnych płytek (grubość 1 mm) z centralnym otworem różnej wielkości (stosunek średnicy otworu do szerokości próbki: 0,1 – 0,5 z odstępem 0,1). Obciążenie ściskające przykładano w określonych punktach i na różnej długości przeciwnych krawędzi stanowiących szerokość płytki. Krytyczne obciążenie wyboczenia sprężystego płyty (2000 x 1000 x 10 mm) z centralnie usytuowanym otworem eliptycznym, prostokątnym i rombowym, poddanej jednoosiowemu ściskaniu (zgodnie ze wzdluznym kierunkiem próbki), rozpatrywano w pracy [156] w oparciu o tzw. koncepcję „*Constructal Design*”. Dla każdego typu otworu dokonano optymalizacji jego charakterystycznych

wymiarów w celu osiągnięcia maksymalnej wartości obciążenia krytycznego. Obliczenia wykonano dla różnych udziałów objętościowych otworu w całkowitej objętości płyty (0,02; 0,04; 0,15; 0,2; dodatkowo 0,3 w przypadku otworu eliptycznego oraz 0,3 i 0,4 dla otworu prostokątnego). Najwyższą wartość obciążenia krytycznego, gdy udział objętościowy pustki wynosił od 0,02 do 0,2, otrzymano dla otworu rombowego, natomiast w zakresie od 0,2 do 0,3 objętości perforacji, maksymalne obciążenie krytyczne zanotowano dla otworu eliptycznego. Optymalne położenie okrągłego otworu w płaszczyźnie blachy o różnych wymiarach zewnętrznych (stosunek długości do szerokości: 0,6 – 5,0 oraz grubości do szerokości: 0,1; 0,2 i 0,4), ze względu na jej maksymalną wytrzymałość związaną z wyboczeniem sprężystym w wyniku jednoosiowego ściskania, analizowano numerycznie (ANSYS) w [157]. Przeprowadzona optymalizacja (MATLAB) wykazała iż rozpatrywane parametry (oprócz grubości w badanym zakresie) mają istotny wpływ na wyboczenie, przy czym wielkość otworu (stosunek średnicy do szerokości: 0,2; 0,3 i 0,4) miała umiarkowane znaczenie. Moen i Schafer [160] zaproponowali uproszczone formuły pozwalające określić krytyczne naprężenie wyboczenia sprężystego prostokątnych cienkich (grubość 0,88 mm) stalowych elementów (podparcie swobodne trzech oraz czterech boków) z jednym lub wieloma otworami rozmieszczonymi równomiernie na ich długości. Rozważano obciążenie zewnętrzne w postaci jednoosiowego równomiernego ściskania oraz gięcia. Przeprowadzono numeryczną weryfikację (ABAQUS) przedstawionych modeli matematycznych dla otworów podłużnych, okrągłych i kwadratowych. Krytyczne naprężenie wyboczenia sprężystego także w postaci analitycznej (z uwzględnieniem takich samych warunków brzegowych) wyznaczono w pracy [161] dla stalowej płyty (kwadratowej i prostokątnej) z perforacją trójkątną (równoboczną) w oparciu o metodę elementów skończonych (ANSYS). Kierunek równomiernego obciążenia ściskającego był zgodny z kierunkiem najgęstszego upakowania otworów. Stała średnica otworu wynosiła 12,7 mm, smukłość płyty 20, 40, 60 i 80, natomiast skok mieścił się w przedziale od 13,4 mm do 101,6 mm (z różnymi odstępami pomiędzy wartościami pośrednimi), co determinowało wielkość prześwitu w zakresie od 1,4 do 81,8%. Długość boku płyty kwadratowej i szerokość płyty prostokątnej stanowiła dziewięciokrotność skoku. Dłuższa krawędź w przypadku kształtu prostokątnego była z kolei dziewięciokrotnie większa w stosunku do szerokości. Formuły pozwalające obliczyć wartość krytycznego naprężenia określono stosując dwa podejścia: definiując współczynnik redukcji (będący funkcją smukłości i stosunku średnicy otworu do skoku) oraz poprzez wprowadzenie równoważnej grubości (zależnej od współczynnika redukcji i grubości płyty bez perforacji). Poprawność zaproponowanych modeli zweryfikowano numerycznie otrzymując dobrą

zgodność w szerokim zakresie analizowanych parametrów. Stwierdzono m.in. silnie liniową zależność naprężenia krytycznego od stosunku średnica otworu/skok (zwłaszcza w zakresie od 0,250 do 0,857) w przypadku gdy podparcie swobodne dotyczyło czterech krawędzi płyty. Nieliniowy charakter tej zależności zaobserwowano, gdy jedna z krawędzi nie była podparta (szczególnie dla płyty prostokątnej). Badania eksperymentalne i numeryczne (ANSYS) dotyczące sprężystego wyboczenia stalowej płyty z centralnym wzdłużnym otworem i wycięciami przy jej wzdłużnych krawędziach bocznych (dwa wycięcia po każdej stronie usytuowane symetrycznie względem wzdłużnej osi elementu) zrealizowano w pracy [162]. Rozpatrywano jednoosiowe (w kierunku wzdłużnym i poprzecznym) i dwuosiowe ściskanie oraz obciążenie ścinające. Zmiennym parametrem była także smukłość płyty. Stosowano ponadto różne umocnienia w obszarze otworu dokonując oceny ich efektywności, uwzględniając ewentualną masę konstrukcji, a finalnie dokonano optymalizacji kształtu otworu.

3.4. Badania materiałów perforowanych w obszarze sprężystym

W kontekście analizy sprężystej omawianych materiałów inżynierskich należy wymienić prace [163–180]. Forskitt i inni [165] wyznaczyli metodą elementów skończonych m.in. efektywny moduł Younga i efektywny współczynnik Poissona w odniesieniu do analogicznych parametrów materiału litego (stal miękka). Rozważali prostokątny i trójkątny układ perforacji z otworami w kształcie elipsy o określonym stosunku długości osi (0,333; 1,0; 3,0; 5,0) dla różnych wariantów współczynnika wiązadła (0,2; 0,35; 0,5; 0,65; 0,8) w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Kontynuację tych badań stanowi publikacja tych samych współautorów [166], w której analizowano otwory o bardziej złożonych kształtach. Efektywne stałe sprężyste dla perforacji prostej i heksagonalnej określono numerycznie (ABAQUS) w zakresie współczynnika wiązadła 0 – 0,5 [167] oraz stosując podejście analityczne, rozważając także wyższe wartości współczynnika wiązadła [168]. Własności sprężyste materiałów z regularnym układem gęsto upakowanych otworów okrągłych badano analitycznie, numerycznie i eksperymentalnie, rozpatrując jednoosiowe obciążenie rozciągające [169]. Kang [170] określił teoretycznie za pomocą funkcji Airy’ego wartość naprężeń, odkształceń i przemieszczeń wokół cylindrycznego centralnego otworu w prostokątnej płycie poddanej liniowo zmiennemu obciążeniu wzdłuż jej krótszych krawędzi. Praca [171] zawiera wyniki analizy numerycznej (MSC/PATRAN i MSC/NASTRAN NX 7.0) badającej wpływ kąta nachylenia (0° , 30° i 60°) osi

cyldrycznego otworu (średnica 5 mm) na wartość naprężeń generowanych w jego otoczeniu dla płaskiego elementu (325 x 50 x 6 mm). Uwzględniono ponadto różną orientację jednoosiowego rozciągania względem wzdłużnej osi próbki ($0^\circ - 90^\circ$). Obliczenia wykonano dla stali niskowęglowej i nadstopu na bazie niklu. Pawar i inni [172] wyznaczyli rozkład intensywności naprężeń (hipoteza Von Misesa) i odkształceń dla rozciąganego jednoosiowo prostokątnego elementu (300 x 60 mm) o różnej grubości (4, 6, 8 i 10 mm) z pojedynczym centralnym otworem (średnica 10 mm) za pomocą MES (ANSYS). Analizę przeprowadzono m.in. dla stopu magnezu (nie podano nazwy i składu chemicznego) o gęstości $1,8 \text{ g/cm}^3$, module Younga 45 GPa, współczynnika Poissona 0,35 i granicy plastyczności 193 MPa. Wartości największych naprężeń ścinających dla perforowanej płytki (grubość 6,22 mm) z 16 okrągłymi otworami (średnica 10 mm) rozmieszczonymi w różny sposób w jej płaszczyźnie (wśród czterech rozważanych wariantów jeden stanowił układ prosty, natomiast pozostałe charakteryzowały się mniejszą regularnością) wyznaczono numerycznie (ANSYS 11.0), stosując jednoosiowe ściskanie w zakresie od 100 do 700 N (z odstępem 100 N) [173]. Uzyskane wartości porównano z wynikami eksperymentu, w którym wykorzystano metodę elastooptyczną, stosując jako materiał modelowy szkło akrylowe. W podobnej publikacji [174], dla takiej samej ilości otworów rozważano m.in. inny ich układ o różnym stopniu uporządkowania. Liniową analizę numeryczną (ANSYS 13.0) dotyczącą ugięcia pod własnym ciężarem, swobodnie podparte, stalowej perforowanej (układ mijany 45°) blachy w środkowym jej punkcie, przeprowadzono w pracy [175]. Różne były jej wymiary (kwadrat o boku 100 – 500 mm z przyrostem 100 mm). Stały stosunek długości boku do grubości wynosił 150. Zakładając także niezmienny udział objętościowy otworów okrągłych w całej objętości blachy, sprawdzono wpływ ich ilości na wartość ugięcia (stąd im więcej otworów tym mniejsza ich wielkość). Biorąc pod uwagę ilość otworów, rozważano 10 wariantów (liczba otworów odpowiadała wyrażeniu $2n^2$, gdzie n oznacza numer wariantu). Wykazano, iż wraz ze wzrostem ilości otworów (przy zachowaniu jednakowej wielkości prześwitu) ugięcie blachy wzrasta (największe tempo przyrostu ugięcia zanotowano w zakresie do ok. 50 otworów, natomiast powyżej tej wartości ugięcie rosło znacznie wolniej). Autorzy publikacji [176] na podstawie reprezentatywnego elementu objętości cienkiej gęstoperforowanej stalowej blachy (grubość 0,5 mm) z heksagonalnym układem otworów, określili numerycznie (ABAQUS) jej własności sprężyste. Zwrócono uwagę na znaczenie promienia zaokrąglenia krawędzi wewnątrz otworu (w kształcie foremnej sześciokąta) na wartość analizowanych parametrów. Stwierdzono dobrą zgodność z eksperymentem (próba jednoosiowego rozciągania oraz cyfrowa korelacja obrazu) oraz z wynikami pracy [177]. Song i inni [178]

badali analitycznie i numerycznie wpływ wzajemnego usytuowania dwóch okrągłych otworów na rozkład temperatury i naprężeń w ich sąsiedztwie (i pomiędzy nimi) w wyniku obciążenia termicznego. Wskazano m.in. iż znacząca jest w tym przypadku względna wielkość otworów (stosunek ich średnic). Celem prac [179, 180] było rozszerzenie koncepcji ekwiwalentnych stałych materiałowych (sprężystych) dla blachy perforowanej (grubość 5 mm) o sferycznym kształcie. Rozważano warianty w których boczne ścianki okrągłych otworów były prostopadłe względem powierzchni blachy lub równoległe w stosunku do promienia sfery. Analizę numeryczną (ANSYS) przeprowadzono dla perforacji trójkątnej równobocznej o średnicy otworu 19 mm i ze skokiem 20 mm. Współczynnik wiązadła mieścił się w zakresie od 0,05 do 1. Obliczenia wykonano także dla blachy płaskiej. Stwierdzono m.in., iż orientacja cylindrycznego otworu w blasze o powierzchniach sferycznych nie ma większego wpływu na badane ekwiwalentne stałe materiałowe.

3.5. Analiza sprężysto-plastyczna blach (płyt) perforowanych dla różnych schematów obciążenia

Sprężysto-plastyczne zachowanie blach/płyt perforowanych poddanych różnym schematom obciążenia analizowano w pracach [181–208]. Dla blachy z perforacją prostą (stop aluminium AlCuMg1, grubość 2 mm) poddanej jednoosiowemu rozciąganiu i ścisaniu wyznaczono efektywny moduł Younga i efektywną granicę plastyczności w zależności od względnej gęstości (gęstość materiału perforowanego/gęstość materiału macierzystego bez perforacji). Przy stałej średnicy otworu 1,5 mm zmienny był współczynnik wiązadła (0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,7). Dla najmniejszej rozpatrywanej względnej gęstości (ok. 0,5) wykonano tylko analizę MES (MSC/MARC) ze względu na trudności związane z przygotowaniem perforowanych próbek o tak małym skoku [181]. Khatam i inni [182] badali numerycznie (metoda skończonej objętości) efektywne stałe sprężyste i parametry w zakresie sprężysto-plastycznym dla blachy stalowej i aluminiowej w zależności od objętościowego udziału perforacji (0,1 – 0,6). Rozważano perforację prostą z otworami okrągłymi i kwadratowymi oraz perforację heksagonalną z otworami okrągłymi, sześciokątnymi i podłużnymi. Makroskopową charakterystykę dotyczącą relacji naprężenie – odkształcenie dla blachy z heksagonalnym układem otworów okrągłych o współczynniku wiązadła 0,3; 0,5 i 0,7, poddanej różnym schematom stałego obciążenia (jednoosiowe rozciąganie w kierunku najgęstszego upakowania otworów oraz w kierunku względem niego prostopadłym, dwuosiowe rozciąganie i czyste ścinanie), w podwyższonej temperaturze przez określony

czas, zawarto w pracy [183]. W analizie makroskopowej przyjęto koncepcje efektywnego naprężenia oraz prawo pełzania Nortona dla materiału macierzystego. Zaprezentowany model matematyczny zweryfikowano za pomocą metody elementów skończonych, bazując na równaniu opisującym zjawisko pełzania dla stopu Hastelloy X w temperaturze 800°C. Koncentrację naprężeń i odkształceń wokół otworu określono w oparciu o zmodyfikowaną tzw. zasadę Neubergera, stosując w proponowanym modelu analitycznym różne wykładniki potęgowe dla pierwszej i drugiej fazy pełzania. Wartości lokalnych odkształceń poddano weryfikacji eksperymentalnej korzystając z metody Moiré'a. W pracy [184] określono numerycznie (ANSYS) i doświadczalnie maksymalne naprężenie rozciągające dla blachy (200 x 70 x 2 mm) z perforacją prostą z otworami okrągłymi (średnica: 8, 10, 12 mm), heksagonalnymi (długość dłuższej przekątnej: 8, 10, 12 mm) i prostokątnymi (10 x 4, 12 x 6, 14 x 8 mm) wykonanej z miękkiej stali. Publikacja [185] zawiera wyniki analizy MES (ABAQUS) na podstawie której wyznaczono maksymalną siłę podczas jednoosiowego ściskania perforowanej kwadratowej płyty (500 x 500 mm) o różnej grubości (5, 6, 8, 10, 12 i 15 mm) z pojedynczym prostokątnym otworem, który był zorientowany dwuwariantowo tzn. jeden z jego boków charakteryzował się stałą długością (100 mm) i był skierowany równolegle (wariant I) lub prostopadłe (wariant II) względem kierunku obciążenia. W obu wariantach długość drugiego boku zmieniała się od 50 do 450 mm (co 50 mm). Smukłość płyty kształtowała się w zakresie od 1,18 do 3,54 (z niejednakowymi odstępami), a wielkość prześwitu w przedziale od 0,02 do 0,18 (z odstępem 0,2). Zmienne było również położenie otworu (oprócz jego usytuowania centralnego) mierzone jego odległością od środka płyty (zmiana położenia zgodnie z kierunkiem wyznaczonym przez bok o niezmienniej długości). W oparciu o otrzymane wyniki sporządzono odpowiednie formuły pozwalające ustalić stosunek maksymalnego naprężenia do granicy plastyczności (dla materiału bez perforacji) w zależności od rozpatrywanych w pracy parametrów. Chauhan i Deepak [186] zajęli się określeniem naprężenia maksymalnego (w obu rozpatrywanych prostopadłych kierunkach) dla płyty z jednym centralnym otworem (okrągłym i kwadratowym) o stałej szerokości (800 mm) i grubości (15 mm) oraz zmiennej długości (2400, 1600 i 800 mm), ściskanej dwuosiowo (różny stosunek osiowych obciążeń). Otwór kwadratowy zorientowano w ten sposób, iż jedna z jego przekątnych była równoległa względem długości płyty. Stosunek średnicy otworu okrągłego do szerokości płyty wynosił 0,1; 0,2; 0,3 i 0,4. Wymiary otworu kwadratowego wynikały z założenia dotyczącego równości powierzchni obu typów otworów. W analizie MES (ANSYS) przyjęto własności materiałowe stali HT-9 (12Cr-1MoVW). Wpływ parametrów perforacji prostej (wielkość otworu okrągłego: 12, 16, 20, 24 mm i skok:

40, 70, 90 mm) oraz grubości (2,0; 2,5; 3,0 i 4,0 mm) na maksymalne naprężenie zastępcze i deformację kwadratowego elementu (250 x 250 mm) obciążonego siłą skierowaną prostopadle i centralnie do fragmentu (koło o średnicy 145 mm) jego powierzchni badano w pracy [187]. Za pomocą metody elementów skończonych (ANSYS 16.2) i metody „*Design of Experiments*” (DoE) wykonano analizę oraz wyselekcjonowano trzy kombinacje rozważanych parametrów (trzy próbki) w celu przeprowadzenia eksperymentalnej weryfikacji wyników. Najmniejszą wartość maksymalnego naprężenia zastępczego (w analizie MES) spośród tych kombinacji otrzymano dla grubości 3 mm, skoku 45 mm i średnicy 12 mm przy obciążeniu 2724 N. W optymalizacji uwzględniono także masę perforowanego elementu. Desmukh [188] określił numerycznie zależność maksymalnego momentu od ugięcia dla podpartej swobodnie kwadratowej (2000 x 2000 x 10 mm) płyty z otworami okrągłymi (średnica 400 mm) i kwadratowymi (długość boku 400 mm), obciążonej równomiernie i prostopadle do jej płaszczyzny. Badano różny układ otworów (jeden z wariantów stanowił prosty wzór perforacji, natomiast pozostałe były jego pewną modyfikacją, tzn. różniły się tylko brakiem otworu/otworów w środku, przy krawędzi lub w narożu płyty). Wyższe wartości momentów maksymalnych i ugięć uzyskano dla otworów kwadratowych, zwłaszcza gdy były rozmieszczone diagonalnie. Saad-Eldeen i inni [189] badali wpływ cech geometrycznych (otworu i wstępnych niedoskonałości kształtu), wzdłużnych pęknięć oraz korozji na zachowanie prostokątnej stalowej blachy (300 x 150 mm), różnej grubości (2,12 – 3,03 mm), poddanej jednoosiowemu ścisłaniu. Przyjęta w eksperymencie duża średnica okrągłego otworu (100 mm) w stosunku do wymiarów blachy była podyktowana praktycznym zastosowaniem tego typu elementów (stanowiących tylko część większej konstrukcji) w branży morskiej. Publikacja nawiązuje i stanowi kontynuację wcześniejszych prac tych samych współautorów [190, 191]. W pracy [192] odpowiednio perforowana aluminiowa próbka w postaci krążka o średnicy 200 mm (z perforacją obejmującą centralną powierzchnię blachy w obrębie średnicy 150 mm) i grubości 1 mm z nieregularnym układem 168 otworów (średnica 2 mm), posłużyła jako model porowatego i zdefektowanego materiału poddanego dwuosiowemu rozciąganiu (wybrzuszaniu). Analizowano sprężysto-plastyczną deformację tego typu tworzywa (także za pomocą metody elementów skończonych). Sayed [193] badał numerycznie wpływ kształtu (okrągłego, kwadratowego, rombowego i sześciokątnego) i wielkości otworów na relację naprężenie – odkształcenie dla jednoosiowego rozciągania stalowej blachy (w zakresie grubości od 1 do 4 mm, z odstępem 1 mm) perforowanej w układzie prostym i trójkątnym. W podobnej tematycznie pracy [194] rozpatrywano blachę aluminiową i ze stali nierdzewnej (grubość 1 mm) z otworami

okrągłymi, trójkątnymi, kwadratowymi, sześciokątnymi i eliptycznymi, uwzględniając prosty i trójkątny układ perforacji. Chen i inni [195] analizowali zmianę własności mechanicznych materiałów porowatych na przykładzie blachy perforowanej (o różnym kształcie i otworach), stosując połączenie metody statystycznej (ARIMA) i metody elementów skończonych. W pracy [197] perforowana blacha aluminiowa (grubość 0,81 mm) z otworami okrągłymi (średnica 1,016 mm), rozmieszczonymi nieregularnie w jej płaszczyźnie, stanowiła model dwufazowego materiału. Dla sześciu różnych układów otworów (o dużej nieregularności) określono reprezentatywny segment perforacji. Przeprowadzone badania doświadczalne (jednoosiowe rozciąganie) i numeryczne (HyperMesh) pozwoliły wyznaczyć charakterystykę mechaniczną oraz obszary kumulacji odkształceń plastycznych dla rozpatrywanych materiałów. Zagadnienie kontynuowano w kolejnej pracy [198], gdzie na podstawie rozważań analitycznych, eksperymentu i analizy numerycznej (ABAQUS), określono ścieżki odkształcenia dla nieregularnych perforacji odpowiadające najmniejszej wytrzymałości na rozciąganie. W podobnej tematycznie publikacji [199] rozważano płaski model porowatego materiału bazując na perforowanej nieregularnie blasze aluminiowej o grubości 1 mm. Rozpatrywano perforację o jednakowej średnicy otworu (2 mm) oraz perforację z otworami o różnej średnicy (0,8; 1,0; 1,2; 1,5 i 2,0). Oprócz deformacji otworów analizowano m.in. mechanikę pęknięcia takiego ciągłego materiału, co było również przedmiotem badań pracy [200], w której wykorzystano blachę perforowaną (z odpowiednim nacięciem imitującym pęknięcie) o grubości 0,6 mm z otworami o średnicy 1 mm wykonaną ze stopu aluminium (5A06). Gordon i inni [201] wyznaczyli analitycznie i numerycznie (ABAQUS) dla trójkątnego równobocznego układu perforacji z otworami okrągłymi o współczynniku wiązadła 0,31733, obszar naprężeń powyżej którego następował znaczny przyrost odkształcenia plastycznego przy niewielkim wzroście obciążenia. Publikacje [202–208] dotyczą analizy stanu naprężenia i odkształcenia perforowanych płyt/blach (okrągłych [202–206], kwadratowych [207] i prostokątnych [208]) różnie umocowanych (często swobodnie podpartych) i obciążonych siłą (skierowaną prostopadle do powierzchni elementu) skupioną (przyłożoną w środkowym punkcie płyty) lub rozłożoną równomiernie do ich powierzchni. Rozpatrywano otwory okrągłe, a także inne kształty [207]. W przypadku płyt okrągłych otwory były rozmieszczone w różnej odległości od środka elementu (najczęściej na koncentrycznych okręgach o różnych promieniach [202–205]). Rozważano głównie płyty stalowe, chociaż analizowano także m.in. płytę złożoną z warstwy bazowej ze stali (S355J2) i cieńszej warstwy tytanowej [205]. W pracy [207] dla stalowej blachy perforowanej (w układzie mijanym 60°) w kształcie kwadratu (o bokach: 300 mm, 450 mm i 600 mm oraz

odpowiadających im kolejno grubościach: 2 mm, 3 mm i 4 mm – zachowując stały stosunek długości boku do grubości równy 1/150) badano numerycznie (ANSYS) wpływ kształtu otworów o różnej ilości (i długości) krawędzi (od 4 dla kwadratu – do 10, a także otwór okrągły) na ugięcie obciążanego elementu i wartość otrzymanych naprężeń. Dla blach o tych samych wymiarach, wartość prześwitu była jednakowa (33,18%; 35,41% i 36,63% odpowiednio dla długości krawędzi: 300 mm, 450 mm i 600 mm). Ponadto, rozpatrywano podparcie swobodne i utwierdzenie na krawędziach blachy. Stwierdzono m.in. iż ugięcie jest mniejsze dla otworów o większej ilości krawędzi (najmniejsze dla otworów okrągłych).

3.6. Koncentracja naprężeń w blachach (płytych) perforowanych

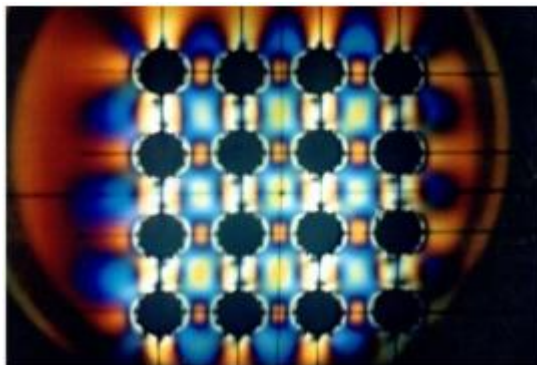
Obecność otworów w materiałach perforowanych poddanych różnym schematom obciążenia skutkuje powstawaniem w ich bezpośrednim sąsiedztwie koncentracji (spiętrzenia) naprężeń. Ten lokalny wzrost naprężenia może często przekraczać wartość dopuszczalną, pomimo iż naprężenie nominalne mieści się w bezpiecznym zakresie. Zagadnienie to w odniesieniu do blach/płyt perforowanych zostało poruszone w pracach [209–235], w których posługiwano się określeniem „*Stress Concentration Factor*” (*SCF*) – współczynnik koncentracji naprężeń, czyli parametrem zdefiniowanym jako stosunek naprężenia maksymalnego do naprężenia nominalnego (w przypadku blach perforowanych analizowanych pod kątem koncentracji naprężeń wokół otworów, naprężenie nominalne jest najczęściej rozpatrywane jako stosunek działającej siły do powierzchni przekroju poprzecznego nie uwzględniającej pustek). Podobnie jak w wielu innych pracach, gdzie blachy/płyty perforowane stanowią przedmiot badań (zwłaszcza najnowsze publikacje), również w tym przypadku główne narzędzie do analizy stanowiła metoda elementów skończonych, weryfikowana niekiedy eksperymentalnie. Babulal i współautorzy [209] wyznaczyli analitycznie i numerycznie (Solidworks) współczynnik koncentracji naprężeń dla stalowej płyty (500 x 300 x 25 mm) z centralnym otworem rozciąganej jednoosiowo zgodnie z jej kierunkiem wzdłużnym. Różny był stosunek średnicy otworu do szerokości płyty (0,2; 0,4 i 0,6). W pracy [210] przeprowadzono numeryczną analizę (ANSYS) koncentracji naprężeń dla stalowej blachy (200 x 200 x 5 mm) z różnego kształtu otworem (okrągły, kwadratowy i trójkątny) w jej centralnej części. Ponadto, rozpatrywano wpływ ostrości naroży (mierzonej za pomocą stosunku promienia zaokrąglenia naroża do promienia okręgu wpisanego w kształt otworu: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 i 1,0) i orientacji otworu względem kierunku siły rozciągającej (0°, 15°, 30°, 45° dla otworu kwadratowego oraz 0°, 15°, 30° dla

otworu trójkątnego, przy czym kąt 0° oznaczał prostopadłość jednego z boków trójkąta i dwóch boków kwadratu do osi wzdłuż której przykładano obciążenie). Zaobserwowano, iż wraz ze wzrostem ostrości naroży otworów wzrasta współczynnik koncentracji naprężeń. Orientacja otworu również była istotnym czynnikiem, jednak jej wpływ na wzrost naprężenia był mniejszy. Podobną pracę pod względem rozważanych parametrów przedstawili Jafari i Ardalani, stosując podejście analityczne [211]. Wpływ kształtu i wielkości pojedynczego centralnie usytuowanego otworu na lokalny wzrost naprężenia blachy perforowanej analizowali eksperymentalnie (metoda elastooptyczna z wykorzystaniem utwardzonej żywicy epoksydowej jako materiału modelowego) i numerycznie (ANSYS 14.5) Watsar i Bharule [212]. Blachę ($200 \times 100 \times 5$ mm) poddawano jednoosiowemu rozciąganiu zgodnie z jej kierunkiem wzdłużnym. Rozpatrywano otwory okrągłe, kwadratowe, trójkątne (średnica: 10, 20 i 30 mm, która w przypadku kształtu kwadratowego i trójkątnego określała wielkość okręgu na nich opisanego) i prostokątne (stosunek długości do szerokości wynosił 3, 4 i 5). Najmniejsza koncentracja naprężeń wystąpiła dla otworów okrągłych, a największa w przypadku otworów trójkątnych. Ciekawą analizę MES (ANSYS) wpływu cech geometrycznych i „materiałowych” otworu na lokalizację naprężenia w kwadratowej płycie przedstawili Zhuang i współautorzy [213]. Obliczenia prowadzono traktując pustki jako wtrącenia o skrajnie różnych własnościach, tzn. w pierwszym przypadku założono, iż ich moduł Younga wynosi 0 GPa, natomiast w drugim przyjęto wartość tego parametru równą 700 GPa i współczynnik Poissona 0,23. Z kolei stałe sprężyste izotropowego materiału z którego wykonano płytę perforowaną wynosiły odpowiednio 402 GPa – moduł sprężystości wzdłużnej i 0,34 - współczynnik Poissona. Rozpatrywano okrągły, prostokątny, eliptyczny i rombowy kształt otworu o bardzo małej wielkości (średnica otworu okrągłego $\leq 0,25$ mm). Stosowano jednoosiowe rozciąganie i ścinanie. Sprawdzano także możliwość zmniejszenia koncentracji naprężeń poprzez dodanie drugiego otworu (odległość między otworami: 0,1 i 0,5 mm), przyjmując ich wzajemne symetryczne położenie względem osi płyty (skutkowało to pewnym spadkiem koncentracji naprężenia). Praca [214] zawiera teoretycznie i numerycznie (MSC.NASTRAN) wyznaczoną wartość współczynnika koncentracji naprężeń dla prostokątnej płyty ($2000 \times 200 \times 10$ mm) z centralnym okrągłym otworem różnej wielkości (stosunek średnicy w odniesieniu do szerokości płyty wynosił 0,1 – 0,8 z odstępem 0,1) poddanej jednoosiowemu rozciąganiu zgodnie z jej osią wzdłużną. Zasadnicze obliczenia wykonano zakładając ortotropowy model badanego materiału i definiując dodatkowy współczynnik wyrażony jako stosunek dwóch wartości modułu Younga dla kierunków głównych leżących w płaszczyźnie płyty (2 – 50). Ponadto, dla kierunku zgodnego z jej

szerokością, moduł sprężystości wzdłużnej przyjęto jako stały (17,9 GPa). Stwierdzono, iż wysoki współczynnik ortotropii i niski stosunek średnicy otworu do szerokości płyty sprzyjają wzrostowi koncentracji naprężeń. W zwięzłej publikacji [215] oceniono numerycznie wpływ długości (wyrażonej w stosunku do szerokości) pojedynczo i centralnie perforowanej płyty rozciąganej jednoosiowo (zgodnie z jej dłuższą krawędzią) na koncentrację naprężeń. Średnicę okrągłego otworu także odnoszono do szerokości płyty ($0,1 - 0,8$ z przyrostem $0,1$). Zaobserwowano, iż wraz ze spadkiem wartości stosunku długość/szerokość (poniżej 2) wzrasta współczynnik koncentracji naprężeń. Yang i współautorzy [216] w oparciu o MES (ANSYS) badali zależność koncentracji naprężeń i odkształceń od grubości ($1 - 5$ mm) i współczynnika Poissona ($0,15 - 0,45$) dla rozciąganej jednoosiowo perforowanej blachy (100×100 mm). Średnica centralnego okrągłego otworu wynosiła 2 mm. Wykazano, iż największa koncentracja naprężenia i odkształcenia nie zawsze występuje w środkowej płaszczyźnie blachy, chociaż jest to możliwe w przypadku blach cienkich. Wzrost grubości blachy powodował przesunięcie koncentracji badanych parametrów w kierunku jej zewnętrznej płaszczyzny. Podział na blachy cienkie i grube zależał od stosunku grubość/średnica otworu (jego niższa wartość oznaczała blachę cieńszą). Stanley i Starr [217] na podstawie wcześniejszej pracy Stanleya i Daya [218], zaproponowali empiryczne równanie umożliwiające określenie współczynnika koncentracji naprężeń dla grubej płyty (długość: 650 mm oraz szerokość: 254 i 305 mm) z cylindrycznym otworem w różnym stopniu nachylonym ($0 - 60^\circ$ z przyrostem 15°) do jej osi normalnej (prostopadłej do płaszczyzny płyty). Stosunek grubości płyty do średnicy otworu ($19,0$; $25,4$ i $16,9$ mm) wynosił $1,33$; $2,0$ i $3,0$. Jednoosiowe obciążenie rozciągające było zorientowane względem wielkiej osi elipsy (czyli kształtu przekroju cylindrycznego otworu w płaszczyźnie płyty) pod kątem 0° , 30° , 60° i 90° (dla stosunku grubość płyty/średnica otworu równego 2 nie uwzględniono kąta 30°). Optymalizację wybranych parametrów geometrycznych dla blachy perforowanej (rozciąganej jednoosiowo zgodnie z jej kierunkiem wzdłużnym) w celu obniżenia współczynnika koncentracji naprężeń przeprowadzono w pracach [219–221]. Wankar i Mishra [219] poprzez numeryczną optymalizację (Hypermesh) określili dla stalowej blachy ($200 \times 100 \times 1$ mm) z jednym centralnym okrągłym otworem (średnica 10 mm) najbardziej odpowiedni obszar jej płaszczyzny w celu ulokowania dwóch otworów „pomocniczych”. W efekcie zostały one rozmieszczone na osi wzdłużnej i symetrycznie względem osi poprzecznej blachy. W dalszej eksperymentalnej próbie jednoosiowego rozciągania uwzględniano różne odległości każdego z otworów „pomocniczych” od otworu

centralnego (10, 20, 30 i 40 mm) dla wybranych wartości stosunku średnicy otworu do szerokości blachy (0,1 – 0,6 z odstępem 0,1). Ogólnie większy spadek współczynnika koncentracji naprężeń zaobserwowano w przypadku gdy wprowadzone dodatkowe otwory znajdowały się w bliższej odległości od otworu środkowego. Taką samą metodę pozwalającą zredukować lokalną koncentrację naprężeń dla stalowej blachy (400 x 100 x 1 mm) z jednym centralnym otworem kwadratowym zastosowano w pracy [220] w oparciu o MES (ANSYS). Analizowano różny stosunek przekątnej otworu do szerokości blachy (0,2 – 1,0 z odstępem 0,2) oraz średnicę (1 – 10 mm co 1 mm) i odległość każdego z dodatkowych otworów od otworu „głównego” (10,5 – 27 mm z różnym przyrostem). Dodano także drugą parę identycznych otworów, lecz zlokalizowanych w większej odległości od osi poprzecznej blachy. Największy spadek współczynnika koncentracji naprężeń (14 – 15%) uzyskano dla jednej pary dodatkowych otworów. Mirji [221] analizował numerycznie (ANSYS) możliwość zmniejszenia intensywności naprężeń wokół dwóch okrągłych otworów (średnica 20 mm) usytuowanych wzdłuż osi poprzecznej (wzajemnie oddalonych o 40, 50 i 60 mm) i symetrycznie względem osi wzdłużnej stalowej blachy (500 x 100 x 2 mm) poprzez przesunięcie jednego z nich zgodnie z kierunkiem obciążenia (0,1 – 1 mm co 0,1 mm zarówno w jedną jak i w drugą stronę). Najniższą wartość koncentracji naprężeń otrzymano gdy początkowa odległość między otworami wynosiła 40 mm, a przesunięcie jednego z nich było równe 0,1 mm. Lokalny wzrost naprężeń dla badanych materiałów perforowanych z wieloma otworami badano w pracach [222–224]. Bhattacharya i Venkat Raj [222] określili numerycznie (PAFEC, COSMOS/M, NISA II) tzw. „*Peak stress multipliers*” (definicyjnie tożsame ze współczynnikiem koncentracji naprężeń) dla cienkiej płyty z perforacją prostą (9 otworów w układzie 3 x 3), przy czym osobno rozpatrywano kierunek diagonalny (współczynnik wiązadła: 15,65; 16,67; 25,93; 33,33 i 49,25%) oraz kierunek najgęstszego upakowania otworów (dodatkowo dla współczynnika wiązadła 41,17%). Stosunek osiowych naprężeń głównych w płaszczyźnie płyty wynosił: -1, 0 oraz 1. Rozważano także gięcie. Wartość parametru wyrażonego jako grubość płyty/skok była mniejsza od 1. Przedstawiono rozkład naprężeń wzdłuż wiązadła, a dla orientacji diagonalnej (współczynnik wiązadła 33,33%) wykonano bardziej szczegółową analizę rozkładu naprężeń wokół otworu, ponieważ dla tego kierunku otrzymano najwyższą ich koncentrację. Eksperymentalną weryfikację przeprowadzono za pomocą metody elastooptycznej, którą posłużyli się także w swojej pracy Patil i Kumar [223]. Wyznaczyli oni współczynnik koncentracji naprężeń dla rozciąganej jednoosiowo prostokątnej blachy z prostym układem perforacji (16 otworów okrągłych w układzie 4 x 4 – rys. 3.5) dla różnej średnicy otworów (14,0; 15,5; 18,0 i 20,5 mm)

i odpowiadającym im współczynnikom wiązadła (44; 38; 28 i 18%). Analogiczne badania wykonano za pomocą MES (ANSYS 13.0). Koncentracja naprężeń rosła wraz ze spadkiem współczynnika wiązadła.



Rys. 3.5. Pole naprężeń wokół otworów perforacji prostej wyznaczone metodą elastooptyczną [223]

W pracy [224] numeryczną procedurę łączącą dwie hybrydowe formuły elementów skończonych zastosowano w celu określenia współczynnika intensywności naprężeń dla pękniętej płytki z periodycznie rozmieszczonymi otworami okrągłymi w układzie prostym. Weryfikację przeprowadzono za pomocą komercyjnego oprogramowania do analizy MES (NASTRAN) oraz eksperymentalnie metodą elastooptyczną. Rozważano różną długość podłużnego pęknięcia na brzegu oraz w centralnej części płytki zorientowanego zgodnie z jej szerokością dla wybranych wartości współczynnika wiązadła (0,5 – 0,8 z odstępem 0,1). Wpływ wzajemnego usytuowania 9 okrągłych otworów w prostym układzie perforacji (obejmującej centralną część okrągłej płyty) na koncentrację naprężeń analizowano w pracy [225], stosując podejście analityczne zweryfikowane za pomocą metody elementów skończonych i doświadczalnie (elastooptyka). Badania rozszerzono także dla układu diagonalnego, trójkątnego równobocznego i rombowego. Porowski i inni [226] wyznaczyli numerycznie (ANSYS) m.in. koncentrację naprężeń i odkształceń na granicy okrągłego otworu w wyniku pełzania, uwzględniając trójkątny (równomierne dwuosiowe rozciąganie) i prosty (czyste ścinanie) układ perforacji. Celem pracy [227] było określenie zmienności współczynnika koncentracji naprężeń na grubości izotropowej płyty z centralnym okrągłym otworem poddanej jednoosiowemu rozciąganiu, rozpatrując różną jej szerokość. W analizie metodą elementów skończonych (ANSYS) rozważano takie parametry jak: stosunek połowy szerokości płyty do promienia otworu (od 1,2 do 20 z różnymi odstępami) oraz stosunek jej grubości również odniesiony do wielkości otworu – jego promienia (od 0,2 do 30, także z różnymi odstępami). Stała była długość elementu równa 200 mm i promień otworu

wynoszący 5 mm. Stwierdzono m.in. silny wpływ szerokości (analizowanej w odniesieniu do promienia otworu) płyty na współczynnik koncentracji naprężeń. W publikacji [228] określono teoretycznie i numerycznie (LISA) koncentrację naprężeń w kierunku wzdłużnym i poprzecznym blachy (grubość 3 mm) z jednym okrągłym otworem (średnica 40 mm) rozciąganej jednoosiowo. Założono jednorodny i izotropowy model materiału macierzystego. Otrzymano podobny charakter rozkładu naprężeń stosując podejście teoretyczne i numeryczne, przy czym wartości uzyskane metodą elementów skończonych były wyższe zwłaszcza przy otworze. Badano także koncentrację naprężeń wokół eliptycznego otworu nanometrycznej wielkości [229]. Praca [230] przedstawia zwięzły opis technik (metod) wyznaczania rozkładu naprężeń w blachach/płytach perforowanych na przykładzie perforacji prostej.

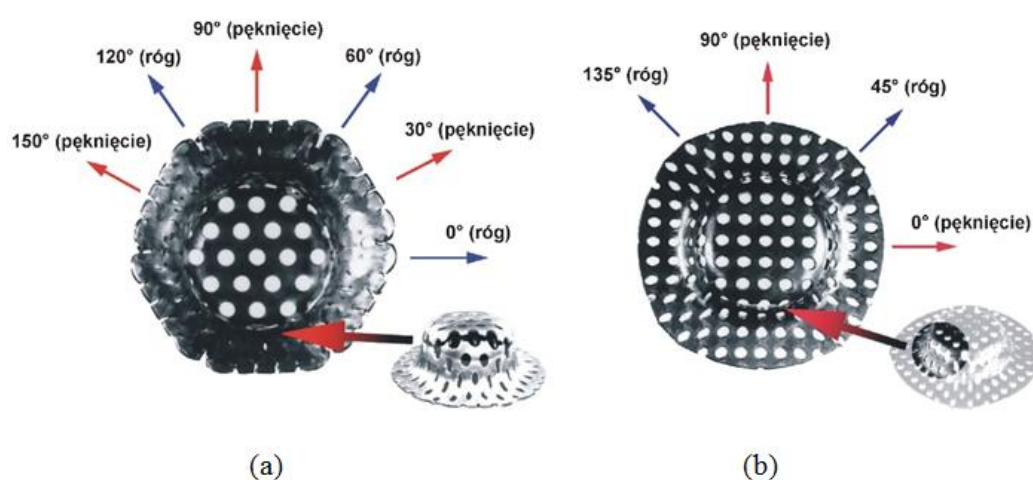
Zagadnienie związane z koncentracją naprężenia spowodowanego pęknięciem w obszarze otworu rozpatrywano w pracach [231–235]. Lai i Schijve [231] określili współczynnik intensywności naprężenia dla pęknięcia przy krawędzi okrągłego otworu usytuowanego w centralnej części prostokątnej płyty poddanej rozciąganiu. W analizie uwzględniono następujące parametry związane z wymiarami płyty: stosunek promienia otworu do połowy szerokości (0,1; 0,25 i 0,5), stosunek połowy długości do połowy szerokości (1; 2; 2,5 i 3) oraz stosunek łącznej długości pęknięcia i promienia otworu do szerokości (od 0,1 do 0,9). Ci sami autorzy [232], nawiązując do ich wcześniejszej pracy [231] rozważali otwór z dwoma pęknięciami rozmieszczonymi symetrycznie względem jego środka, otwór z jednym pęknięciem oraz samo pęknięcie bez otworu. Współczynnik intensywności naprężenia był zbliżony dla otworu z pojedynczym pęknięciem i dla samego pęknięcia. Wyższą wartość tego parametru uzyskano dla otworu z dwoma takimi defektami (oprócz pęknięć o małej długości). Ponadto stwierdzono, iż wzrost pęknięcia po jednej stronie otworu skutkuje wzrostem koncentracji naprężenia po przeciwnej jego stronie, co w konsekwencji może doprowadzić do powstania nowego pęknięcia. W pracy [233] analizowano numerycznie m.in. propagację pęknięcia od obszaru największej koncentracji naprężeń przy krawędzi okrągłego otworu, usytuowanego w środku okrągłej płyty (grubość 6 mm) z prostym układem perforacji. Dla wybranych wartości współczynnika wiązadła (17,14%, 28,57%, 37,14% i 48,57%) i dla różnych długości pęknięcia (maksymalnie do ok. 7 mm) wyznaczono współczynnik intensywności naprężenia. Parametr ten określono także w pracy [234] dla kwadratowej blachy (o boku 100 mm i grubości 1 mm) z jednym centralnym otworem (o średnicy 6, 10, 20 i 30 mm) wykazującym dwa pęknięcia (o jednakowej długości od 1 do 20 mm, gdzie dla otworu o średnicy 20 i 30 mm wynosiła ona

maksymalnie 10 mm) przy krawędzi (rozmieszczone symetrycznie względem jego środka) oraz w pracy [235], w której rozpatrywano stalową blachę perforowaną (240 mm x 120 mm x 4 mm) z centralnym pęknięciem (o długości od 10 do 50 mm, co 10 mm). Analizowano prosty i trójkątny układ perforacji z otworami o różnym kształcie (okrągłym, rombowym, podłużnym) i wielkości (średnica oczka: 5; 10; 15 mm; bok rombu: 3,13; 6,65; 9,38 mm; otwór podłużny: 10 mm x promień zaokrąglenia równy 2,5; 5 i 7,5 mm) [235].

3.7. Kształtowanie przestrzenne blach perforowanych

Istotny obszar badań blach perforowanych stanowiła analiza ich podatności do kształtowania przestrzennego [236–247]. Mechaniczne i technologiczne własności stalowej blachy z heksagonalnym układem otworów okrągłych wyznaczono w pracy [236]. W próbie jednoosiowego rozciągania określono parametry plastyczne i wytrzymałościowe, natomiast technologiczne za pomocą wytłaczania i próby Erichsena. Stwierdzono ponadto, iż w przypadku blachy z otworami wierconymi następuje szybsze jej uplastycznienie i intensywniejsze umocnienie w porównaniu, gdy otwory są wykrawane. Publikacja [239] przedstawia specyfikę i możliwości odkształcenia plastycznego blach perforowanych przeznaczonych do formowania ażurowych wyrobów powłokowych. Rozpatrywano procesy ciągnięcia (przetłaczania i dwukrotnego przetłaczania) oraz dwuosowego rozciągania (wybrzuszania). W pracy [241] rozpatrującej prosty i heksagonalny układ perforacji stwierdzono m.in. iż odkształcalność blach perforowanych zależy w dużo większym stopniu od stanu naprężenia w materiale niż w przypadku blach bez perforacji. Frąckowiak i współautorzy [244] dokonali oceny możliwości kształtowania obrotowego blachy perforowanej wykonanej z dwóch gatunków stali (DC01 oraz ocynkowanej ogniowo) o grubości 1 mm. Rozpatrywano heksagonalny układ otworów okrągłych w dwóch wariantach skoku i średnicy: odpowiednio 5 i 4 mm oraz 3 i 2 mm. Formowane krążki były objęte perforacją na całej swojej powierzchni lub charakteryzowały się obecnością niedziurkowanego kołnierza tylko w części obwodowej, co jak się okazało, utrudniało formowanie wyrobu o żądanym kształcie i powodowało większą deformację otworów. Szczególną uwagę rozważając problematykę przestrzennego formowania blach perforowanych należy zwrócić na kompleksową w tym wymiarze pracę [245]. Autor dokonuje szerokiej analizy odkształcalności tego typu materiału, która jest zdecydowanie inna w porównaniu do materiału macierzystego. Badania przeprowadzono na blasze stalowej karoseryjnej Ib-SB (0,75% C) o grubości 1 mm oraz blasze miedzianej M2R (Cu-DHP)

o grubości 1,08; 0,8 i 0,6 mm. Podstawowy wariant perforacji stanowił układ heksagonalny z otworami okrągłymi (średnica 3 mm) i skokiem dwukrotnie większym od ich średnicy. Badano również perforację prostą (średnica otworu 3 mm) i heksagonalną z większym otworem (4 mm), gdzie skok i średnica otworu pozostawały w takim samym stosunku. Oprócz własności mechanicznych i technologicznych wyznaczono krzywe odkształcalności granicznej blachy stalowej karoseryjnej Ia-SB o grubości 1 mm, uzupełniając te badania o dodatkowe: prosty układ otworów kwadratowych o boku 3 mm z dwukrotnie większym skokiem, a także układ heksagonalny ze średnicą otworu 3 mm i czterokrotnie większą wartością skoku. Wśród wielu istotnych i interesujących wniosków zawartych w analizowanej pracy warto wspomnieć m.in. o tym, iż własności blach perforowanych charakteryzują się silną kierunkowością, zależną od rodzaju perforacji (rys. 3.6), lokalizacją odkształcenia materiału w mostach pomiędzy otworami oraz „ściśliwością”, będącą wynikiem deformacji otworów w procesach ciągnięcia. Należy dodać, iż oprócz tradycyjnych (konwencjonalnych) metod wytłaczania rozpatrywano także kształtowanie przyrostowe blach perforowanych [246, 247].



Rys. 3.6. Płynięcie kołnierza i lokalizacja pęknięcia podczas wytłaczania ażurowych wyrobów powłokowych z blachy perforowanej otworami w układzie heksagonalnym (a) i prostym (b) [245]

Zagadnienie odkształceń granicznych blach perforowanych zostało poruszone także w pracach [248–262], przy czym były to głównie blachy aluminiowe [251–258]. Venkatachalam i współautorzy [252] wyznaczyli numerycznie (ABAQUS) wartość odkształceń granicznych w zakresie ujemnych mniejszych odkształceń dla blachy (długość 200 mm i zmienna szerokość 140 – 200 mm z odstępem 20 mm) z kwadratowym [252] i trójkątnym [253] układem perforacji dla różnych wartości: prześwitu (0 – 25% z odstępem

5%), współczynnika wiązadła (0,375; 0,444; 0,5 i 0,546) oraz wielkości kwadratowego otworu (długość boku: 10, 16 i 20 mm). W przypadku perforacji trójkątnej zmienna była także grubość blachy (0,8 – 2 mm z przyrostem 0,2). W pracy [254] badano numerycznie (ABAQUS) wpływ kształtu otworu (okrągłego i kwadratowego), układu perforacji (prostej i trójkątnej) oraz wielkości prześwitu (w takim samym zakresie jak w pracach [252, 253]) na odkształcalność graniczną blachy (200 x 200 mm) o grubości 1,6 mm dla ujemnych mniejszych odkształceń. Wyniki analizy numerycznej [253, 254] dotyczące prześwitu zweryfikowano doświadczalnie. Wykres odkształceń granicznych wyznaczony w procesie wytłaczania dla blachy aluminiowej 1050A (długość 250 mm i różna szerokość 170 – 250 mm z odstępem 20 mm) w zależności od wielkości powierzchni otwartej (identyczny przedział jak w [252–254]), średnicy otworu (14, 20 i 25 mm) i układu perforacji (kwadratowego i trójkątnego) przedstawia praca [255]. Rozważając nie tylko wielkość prześwitu (0; 1,57; 3; 14; 4,71 i 7,06%) i kształt otworu (okrągły, trójkątny, podłużny), ale także kształt części roboczej stempla (kwadratowy, eliptyczny i półkulisty), wyznaczono metodą elementów skończonych (ANSYS) odkształcenia graniczne dla blachy (100 x 100 mm) o grubości 1,5 mm [256]. W publikacji [257] zawarto wyniki analizy numerycznej (PAMSTAMP) na podstawie której sporządzono krzywe odkształceń granicznych dla blachy o grubości 1 mm. Zmienna była wielkość okrągłego otworu (średnica: 6, 8 i 10 mm), prześwit (5, 10 i 15%) oraz współczynnik wiązadła (0,3; 0,4 i 0,5). Dla rozważanych 9 kombinacji badanych parametrów (w oparciu o metodę Taguchiego) określono także drogę stempla przy której następowało pęknięcie blachy. Elangovan i współautorzy [258] określili graniczną odkształcalność blachy (grubość 2 mm) pełnej i perforowanej (heksagonalny układ perforacji) za pomocą sztucznej sieci neuronowej (ANN). Zaimplementowano model sieci neuronowej o wstecznej propagacji i sprzężeniu progresywnym (a feed forward back propagation neural network – BPNN) z zestawem zmiennych geometrycznych, stanowiących dane wejściowe oraz odkształceniami bezpiecznymi jako dane wyjściowe. Rozpatrywano średnicę otworu równą 3 mm dla skoku 6,5 mm oraz średnicę 4 mm dla skoku 7 mm. Wyniki zweryfikowano eksperymentalnie uzyskując zadowalającą zgodność. Najlepszą odkształcalnością graniczną charakteryzowała się blacha pełna, natomiast w przypadku blachy perforowanej – w rozważanym zakresie zmienności cech geometrycznych – jej nieznaczny wzrost towarzyszył wzrostowi współczynnika wiązadła. W kolejnej publikacji Elangovan i inni [259] (wykorzystując metodę Taguchiego) opracowali eksperymentalnie wykres odkształcalności granicznej dla blachy o grubości 1 mm ze stopu aluminium Al 8011 z prostym układem otworów okrągłych. Stosowano różne warianty szerokości wiązadła (5,0; 7,5 i 10 mm)

i średnicy otworu (3, 4 i 5 mm). Stwierdzono m.in., iż graniczna odkształcalność maleje wraz ze wzrostem wielkości otworu, natomiast rośnie wraz ze wzrostem szerokości wiązadła, w przypadku którego zaobserwowano silniejszy wpływ na formowalność. Krzywe odkształcalności granicznej w procesie wytłaczania dla blachy (100 x 100 mm) z miękkiej stali perforowanej w układzie prostym wyznaczono w pracy [260] i [261], odpowiednio dla otworów okrągłych i kwadratowych. Analizowano różną wartość prześwitu (15, 20 i 25%), wielkość otworu (4, 8 i 12 mm – zarazem średnica i długość boku dla otworu okrągłego i kwadratowego) oraz grubość blachy (0,5; 1,0 i 1,5 mm) w oparciu o metodę elementów skończonych (LS DYNA). Wyboru kombinacji badanych parametrów dokonano korzystając z metody Taguchiego. Graniczną odkształcalność perforowanej blachy stalowej (DC01) o grubości 0,6 mm dla prostego i trójkątnego układu otworów o średnicy 2 mm i 4 mm wyznaczono w pracy [262].

W celu oceny możliwości plastycznego kształtowania blach perforowanych zaproponowano również próbę wyboczenia Yoshidy (*YBT – Yoshida Buckling Test*) dla blachy (ze stali nierdzewnej o grubości 0,3 mm i ze stopu aluminium EN AW-6061 o grubości 1 mm) z jednym usytuowanym centralnie otworem (o średnicy: 5, 10, 15, 20 i 25 mm). Badania numeryczne (ABAQUS) i eksperymentalne przeprowadzono stosując takie same obciążenia i warunki brzegowe. Wyboczenie w kierunku prostopadłym do powierzchni próbki o wartości 0,1 mm było adekwatne z wystąpieniem zjawiska fałdowania ograniczającego możliwości przestrzennego kształtowania blach [263]. W pracy [264] bazując na reprezentatywnym elemencie objętości prostego układu otworów i rozpatrując różne kryteria niestateczności w zakresie odkształceń plastycznych, analizowano (w oparciu o obliczenia numeryczne) lokalizację odkształcenia w postaci przewężenia w blasze perforowanej. Rozważano okrągły, eliptyczny i kwadratowy kształt otworów (zmiennym parametrem była również ich wielkość). Nachylenie wielkiej osi otworu eliptycznego względem kierunku większego odkształcenia (stanowiącego składową wykresu odkształcalności granicznej) wynosiło 0°, 45° i 90°. Ponadto, badano wpływ anizotropii plastycznej materiału macierzystego i jego umocnienia (w przypadku otworów okrągłych) oraz warunków brzegowych na odkształcalność graniczną blachy perforowanej.

Na podstawie przedstawionych prac dotyczących odkształcalności granicznej blach perforowanych można ogólnie stwierdzić, iż podatność tego typu materiału do plastycznego kształtowania rośnie wraz ze spadkiem wielkości prześwitu i wzrostem grubości blachy. Najlepszą zdolność do odkształceń zaobserwowano dla trójkątnego układu perforacji i otworów okrągłych.

Zachowanie blach perforowanych badano także w procesach gięcia [265–269] i dotyczyło głównie zjawiska sprężynowania. Farsi i Arezoo [265] analizowali wpływ parametrów wyginania (kąt zbieżności powierzchni i rozstaw krawędzi matrycy z wycięciem w kształcie V oraz promień zaokrąglenia stempla) na kąt sprężynowania i siłę gięcia elementu ze stali niskowęglowej (grubość 0,75 i 0,95 mm) z podłużnym otworem o różnej wielkości usytuowanym symetrycznie wzdłuż linii gięcia. Zarówno kąt sprężynowania jak i siła gięcia malały wraz ze wzrostem wielkości otworu. Ten sam typ elementu, lecz wykonanego z wysokowytrzymałej niskostopowej stali badano w podobnej pracy tych samych autorów [266] oraz eksperymentalnie, numerycznie (ABAQUS) i za pomocą sieci neuronowej (gięcie na zacisku) [267]. Ponadto, przeprowadzono kilka prób eksperymentalnych na elemencie wykonanym ze stali St12 [267]. W zależności od wielkości i kształtu otworu (okrągłego i kwadratowego) oraz układu perforacji (prostej i trójkątnej) sprawdzano za pomocą MES (ANSYS) wartość sprężystego odkształcenia powrotnego dla aluminiowej blachy (100 x 100 mm) o grubości 1,5 mm poddawanej jednokątowemu gięciu [268]. Mniejsze sprężynowanie wystąpiło w przypadku otworów okrągłych oraz perforacji w układzie trójkątnym. W dość ogólnikowej i zwięzłej publikacji [269] analizowano wytrzymałość na zginanie blachy ze stopu aluminium 8090 zależnie od prześwitu (0 – 2,25 % z odstępem 0,75%), wielkości okrągłego otworu (średnica 4 – 10 mm z przyrostem 2 mm) i układu perforacji (prostego i trójkątnego). Wzrost powierzchni otwartej blachy (nawet dla tak niewielkiej wartości jaką rozpatrywano) skutkował zauważalnym spadkiem wytrzymałości, przy czym był on większy dla perforacji prostej.

3.8. Obciążenia dynamiczne blach perforowanych

Konstrukcje inżynierskie bardzo często są poddawane obciążeniom o charakterze dynamicznym. Z tego względu niezwykle ważna jest identyfikacja częstotliwości i postaci drgań własnych obciążonych elementów. Tego typu analizę w odniesieniu do blach perforowanych zawierają prace [270–282]. Burgemeister i Hansen [270] wyznaczyli numerycznie (ANSYS) rezonansowe częstotliwości drgań perforowanego elementu (380 x 300 x 2 mm) z miękkiej stali. Badano perforację trójkątną (w szerokim zakresie współczynnika wiązadła w dwóch wzajemnie prostopadłych charakterystycznych kierunkach) z otworami okrągłymi (średnica: 6, 15 i 25 mm) dla czterech wariantów ich ilości w poziomie i w pionie (8 x 5, 5 x 5, 8 x 3 oraz 5 x 3). Dodatkowo dla wariantu 5 x 3 rozważano średnicę otworu 40 mm. Analizę modalną przeprowadzono tylko dla dwóch przypadków (8 x 5 i 5 x 5

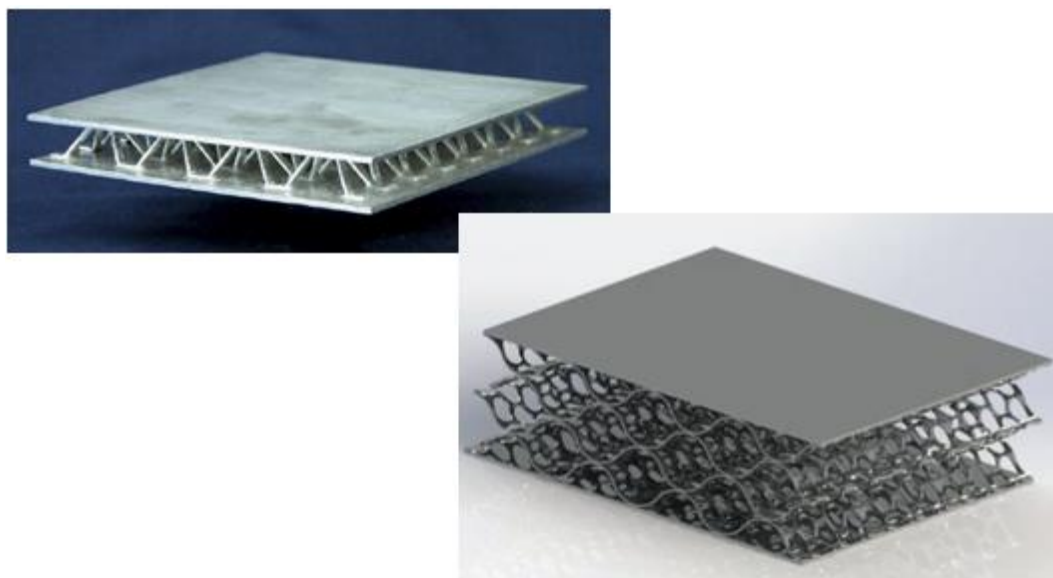
dla otworu o średnicy 25 mm). Otrzymane wyniki porównano z obliczeniami wykonanymi dla równoważnego materiału ciągłego, przyjmując efektywne własności materiałowe (w niepełnym zakresie współczynnika wiazadła) na podstawie prac [165, 271]. W opinii autorów publikacji, nie otrzymano zadowalającej zgodności, przy czym za wiążące i poprawne uznano wyniki uzyskane w oparciu o analizę MES i w pewnej części eksperymentalne. Może to prowadzić do ogólniejszego stwierdzenia, iż efektywne parametry materiałowe wyznaczone w warunkach statycznego obciążenia nie są zupełnie właściwe z punktu widzenia analiz dynamicznych. W pracy [272] na podstawie numerycznej analizy modalnej elementu w kształcie dysku ze stali nierdzewnej z otworami okrągłymi, sformułowano zależności stosunku E^*/E od współczynnika wiazadła dla prostego i heksagonalnego układu perforacji. W ten sposób obliczone wartości efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej wykorzystano w kolejnych analizach dynamicznych, co potwierdziło poprawność zaproponowanych modeli. Podobną metodykę przyjęto w pracy [273], w której dla aluminiowej blachy (384 x 384 x 3 mm) perforowanej w układzie prostym z otworami okrągłymi wyznaczono metodą elementów skończonych częstotliwości drgań własnych w zależności od współczynnika wiazadła. W przypadku blachy bez perforacji posłużono się także rozwiązaniem analitycznym. Opracowaną formułę (przy założeniu stałej wartości współczynnika Poissona), pozwalającą wyznaczyć efektywny moduł Younga, zweryfikowano poprzez zaimplementowanie jej wyników do analizy modalnej częściowo perforowanej blachy (600 x 600 x 3 mm w tym obszar centralnie perforowany 480 x 480 mm), którą przeprowadzono w oparciu o metodę numeryczną i teoretyczną. Zhang i inni [274] koncentrując się na elementarnym segmencie perforacji prostej z otworami okrągłymi, na podstawie analizy teoretycznej i numerycznej (Solidworks), określili efektywny moduł Younga, a także współczynnik koncentracji naprężeń w różnych wariantach dwuosiowego stanu naprężenia. Stwierdzono, iż najlepszą dokładność zaprezentowanego modelu teoretycznego można uzyskać dla wartości prześwitu poniżej 40%. W ten sposób wyznaczonym efektywnym modułem sprężystości wzdłużnej posłużono się w analizie drgań perforowanego elementu (prześwit 20%) ze stali nierdzewnej o grubości 2 mm stosowanego jako część (półka) w kolumnie destylacyjnej. Hybrydowe podejście stanowiące kombinację metody eksperymentalnej i numerycznej (ANSYS) wykorzystano do dynamicznej charakterystyki cienkiej blachy (180 x 145 x 0,15 mm) ze stopu aluminium 6061-T6, perforowanej w układzie trójkątnym z otworami okrągłymi (średnica: 10, 16, 24 i 30 mm) [275]. Odległość między środkami otworów w kierunku najgęstszej ich upakowania wynosiła 50 mm (poza jednym przypadkiem – 18 mm przy średnicy otworu 30 mm),

natomiast dla orientacji względem niego prostopadłej była równa 72,5 mm. Badania te pozwoliły wyznaczyć zależności między efektywnymi parametrami blachy perforowanej, wyrażonymi w postaci bezwymiarowych współczynników (czyli każdorazowo w odniesieniu do analogicznych parametrów dla blachy pełnej) a współczynnikiem stanowiącym stosunek powierzchni ciągłej (bez otworów) do powierzchni całkowitej blachy perforowanej. Dodatkową analizę numeryczną dotyczącą częstotliwości drgań własnych przeprowadzono w celu weryfikacji zaproponowanej formuły. Efektywny moduł Younga dla perforowanej blachy (200 x 100 x 0,5 mm) ze stali nierdzewnej określono w pracy [276], także w oparciu o wstępną analizę dynamiczną, teoretycznie i metodą elementów skończonych (Solidworks). Rozpatrywano prostokątny układ perforacji z prostokątnymi szczelinami (3 x 1,5 mm). Różna była odległość między sąsiednimi otworami w obu wzajemnie prostopadłych kierunkach (10 wariantów). Przeprowadzona analiza modalna dla równoważnego materiału bez perforacji (z przypisanym i wyznaczonym wcześniej efektywnym modułem sprężystości wzdłużnej) oraz dla materiału perforowanego, wykazały zadowalającą zgodność. Pang i inni [277] określili eksperymentalnie (metoda dzielonego pręta Hopkinsona) i numerycznie (LS-DYNA) dynamiczny współczynnik koncentracji naprężeń dla perforowanej płyty (200 x 200 x 16 mm) ze stali węglowej. Rozważano różną ilość (1 – 3), kształt (okrągły i podłużny), wielkość (otwór okrągły: średnica 10 i 20 mm; otwór podłużny z zaokrąglonymi końcami: długość 60 mm, szerokość 20 mm) i wzajemne ułożenie otworów (každorazowo w linii prostej wzdłuż przekątnej płyty). Wartości mierzonego parametru obliczono porównując wartości maksymalnego naprężenia wokół otworu danej próbki z naprężeniem płyty bez perforacji w jej centralnej części. Zaobserwowano m.in. iż wprowadzenie odpowiednio usytuowanego drugiego mniejszego otworu zmniejszyło koncentrację naprężeń. Patil i inni [278] wyznaczyli doświadczalnie i numerycznie (ANSYS) drgania swobodne blachy (216 x 162 x 2,3 mm) bez perforacji oraz perforowanej w układzie diagonalnym (mijanym 45° ze skokiem 27 mm) z okrągłymi otworami (średnica: 4 – 12 mm co 2 mm) wykonanej z miękkiej stali. Efektywna częstotliwość drgań malała wraz ze wzrostem wielkości otworów. Numeryczną analizę dynamiczną dla perforowanej płyty kwadratowej i prostokątnej (długość dwukrotnie większa od szerokości) z odpowiednio jednym centralnym otworem kwadratowym (o boku równym 1/3 i 1/5 długości krawędzi płyty) i prostokątnym (gdzie długość boków stanowiła 1/3 lub 1/5 długości równoległych krawędzi elementu) rozpatrywano w pracy [279]. Różny był stosunek grubości do szerokości płyty (0,01 i 0,1), która była podparta swobodnie lub całkowicie utwierdzona. Stwierdzono m.in. iż wzrost grubości blachy, a także większe jej skrępowanie powoduje zwiększenie naturalnych

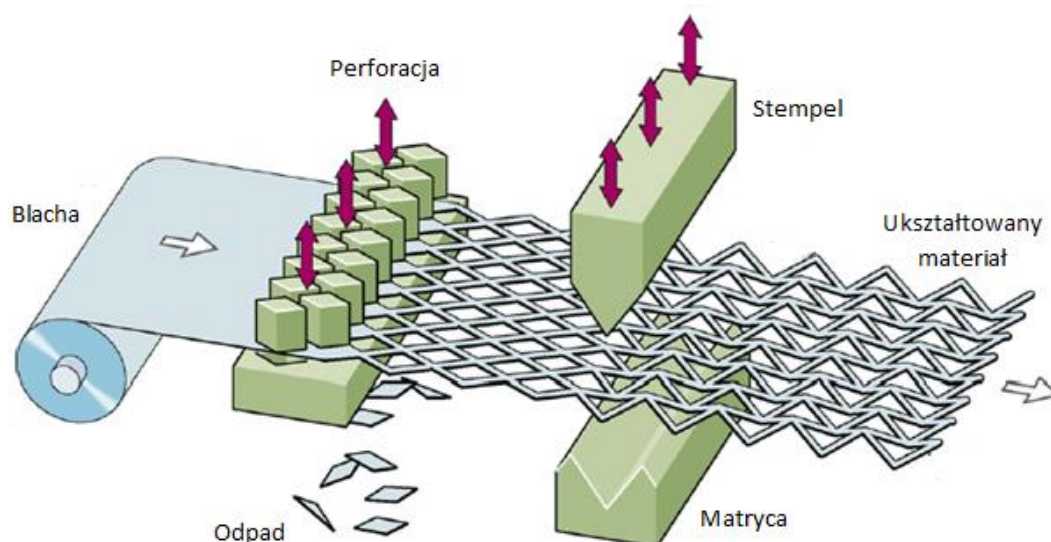
częstotliwości drgań. Mirji [280] badał wpływ kształtu (okrągłego, kwadratowego i prostokątnego) pojedynczego centralnie usytuowanego otworu na dynamiczne własności blachy (50 x 50 x 2 mm) z miękkiej stali. Najwyższe częstotliwości drgań własnych (poza blachą bez perforacji) zaobserwowano w przypadku otworów okrągłych, najniższe zaś dla otworów prostokątnych.

3.9. Blacha perforowana jako element materiałów kompozytowych

Analizowane materiały perforowane mogą stanowić także część składową tzw. kompozytów przekładkowych, tworząc ich warstwę wewnętrzną (rdzeń) pomiędzy zewnętrznymi litymi warstwami. Można zastosować blachę perforowaną bezpośrednio w postaci płaskiego arkusza [283, 284] lub odpowiednio ukształtowaną przestrzennie (rys. 3.7) [285, 286], także z siatki cięto-ciągnionej (rys. 3.8), co praktycznie całkowicie eliminuje odpad związany z perforacją [286]. Ponadto, uformowany rdzeń może tworzyć więcej niż jedną warstwę.



Rys. 3.7. Przykłady kompozytów przekładkowych zawierających rdzeń z odpowiednio ukształtowanej blachy perforowanej [285, 286]



Rys. 3.8. Proces wytwarzania wewnętrznej warstwy kompozytu z blachy perforowanej [286]

W pracy [283] analizowano metaliczny kompozyt składający się z dwóch zewnętrznych okładzin w postaci litej blachy różnej grubości (0,2; 0,4 i 0,6 mm) oraz rdzenia z blachy perforowanej (grubość 0,6 mm) w układzie heksagonalnym (skok 4,5 mm) z otworami okrągłymi (średnica 2,5 mm). Wszystkie warstwy wykonane z blachy miedzianej spajano dyfuzyjnie. Badano zachowanie plastyczne i odkształcalność laminatu oraz jego poszczególnych warstw dla jedno i dwuosiowego rozciągania (także metodą elementów skończonych). Blacha perforowana wykazywała anizotropię rozpatrywanych własności, która jednak była redukowana poprzez monolityczne warstwy zewnętrzne. Stwierdzono ogólnie, iż dla zmniejszonej masy laminatu nie uzyskano wystarczającej wytrzymałości i odkształcalności. Podobny typ materiału warstwowego rozpatrywano w pracy [284]. Rdzeń stanowiła blacha perforowana otworami okrągłymi (średnica 2 mm) w układzie prostym o grubości 1 mm wykonana z technicznie czystego aluminium oraz ze stopu aluminium 5754. Wartość prześwitu wynosiła 0,35; 3,14; 19,63 i 34,89%. Dwie zewnętrzne warstwy w postaci pełnych blach aluminiowych (każda o grubości 0,25; 0,5 i 1,0 mm) łączono z blachą perforowaną (zorientowaną względem osi próbki pod kątem 0° i 45° , przy czym kąt 0° to kierunek najgęstszego upakowania otworów) poprzez walcowanie na gorąco. Mniejszą wytrzymałość (próba jednoosiowego rozciągania) oraz podatność do tłoczenia (próby Erichsena, Engelhardta-Grossa, Fukui i miseczkowania) uzyskano w przypadku większej wartości prześwitu warstwy wewnętrznej oraz dla cieńszych okładzin. Poza tym zastosowanie stopu aluminium 5754 skutkowało wzrostem wytrzymałości, powodując jednocześnie spadek tłoczności.

Bardzo często od materiałów inżynierskich wymaga się wysokiej wytrzymałości przy jednocześnie niskiej ich gęstości. Z tego punktu widzenia szczególnie interesującym tworzywem są już wspomniane kompozyty z odpowiednio ukształtowanym rdzeniem z blachy perforowanej. Cechują się one wysoką sztywnością, zwłaszcza podczas gięcia, zachowując niską względną gęstość. Wykazują dużą zdolność do pochłaniania energii. Specyficzna konstrukcja warstwy wewnętrznej umożliwia ponadto przepływ płynów czy gazów, co poszerza możliwości aplikacyjne tych materiałów. W pracy [287] badano analitycznie i eksperymentalnie zachowanie tego typu kompozytu, złożonego z rdzenia w postaci uformowanej przestrzennie blachy perforowanej ze stopu aluminium AA6061 zawartego pomiędzy dwoma warstwami (blachami) ze stopu aluminium AA6951, stosując obciążenie ściskające prostopadłe do powierzchni zewnętrznej. Rozpatrywano różną względną gęstość rdzenia (0,02 – 0,08) zarówno w stanie wyżarzonym jak i utwardzonym poprzez przesycanie i starzenie. Stwierdzono, iż analizowana w badaniach warstwa wewnętrzna kompozytu charakteryzuje się wyższą wytrzymałością na ściskanie i lepszą zdolnością do absorpcji energii w porównaniu z innymi typami rdzeni wykonanymi np. z pianki aluminiowej. Możliwość kształtowania plastycznego cienkiego prototypowego kompozytu złożonego z warstwy wewnętrznej (o względnej gęstości 10%) wykonanej z blachy perforowanej o grubości 1,6 mm (stal niskowęglowa) i okładzin ze stali nierdzewnej (grubość 0,2 mm) badano w pracy [288] w procesach ciągnięcia połączonego z gięciem. Na podstawie eksperymentu zaobserwowano, iż główną przyczyną uszkodzenia części wewnętrznej kompozytu są naprężenia ścinające. Przeprowadzono analizę MES (LS-DYNA) pozwalającą lepiej rozpoznać zachowanie rdzenia na różnych etapach kształtowania. Następnie w oparciu o analizę teoretyczną, opracowano mapy projektowe opisujące wymaganą wytrzymałość na ścinanie rdzenia jako funkcje jego grubości, własności warstwy zewnętrznej i promienia ciągnięcia (gięcia). Ponadto, wyznaczono zależność pomiędzy wytrzymałością na ścinanie a względną gęstością warstwy wewnętrznej. Zasadniczy wniosek jaki sformułowano stwierdzał, iż wytrzymałość na ścinanie kształtowanego plastycznie materiału warstwowego powinna być przynajmniej o rząd wielkości większa od analogicznych komercyjnie stosowanych tworzyw komórkowych. Zasugerowano wartość względnej gęstości rdzenia powyżej 25% w celu uniknięcia jego uszkodzenia podczas formowania.

Blachę perforowaną jako część składową materiału kompozytowego rozważano także w pracach [289–292]. Wykazano m.in. iż może ona niekiedy stanowić alternatywę (a nawet lepsze rozwiązanie) dla wykonanych z tego samego gatunku stali prętów, stosowanych jako

faza zbrojąca (przy takim samym udziale objętościowym) w betonie. Rozpatrywano różną średnicę otworów i skok przy stałej grubości blachy perforowanej. Każdy z trzech wariantów uwzględniających blachę perforowaną był korzystniejszy (ze względu na wyższą sztywność i wytrzymałość badanego kompozytu) niż zbrojenie za pomocą prętów [289]. Z kolei w pracy [292] analizowano własności mechaniczne hybrydowego materiału złożonego z laminatu (o osnowie polimerowej wzmocnionej włóknami szklanymi) oraz z blachy perforowanej. Należy dodać, iż własności materiałów kompozytowych można kształtować również poprzez perforację samego kompozytu, co również stanowiło przedmiot analizy [293–300].

3.10. Pozostałe obszary badań

Blachy perforowane analizowano pod kątem ich własności akustycznych [301–319]. Na podstawie tych badań należy stwierdzić, iż poprzez dobór materiału, grubości blachy i parametrów perforacji można w pewnym stopniu kształtować zdolność pochłaniania dźwięku dla określonego zakresu częstotliwości. Oprócz absorberów wykonanych z pojedynczej blachy perforowanej, istnieje możliwość zastosowania układów złożonych z kilku jej warstw (także o różnej perforacji) odpowiednio względem siebie usytuowanych. Istotnym parametrem jest również odległość dźwiękochłonnego elementu od tylnej powierzchni takiej konstrukcji. Szereg prac dotyczy paneli akustycznych wykonanych z cienkiej blachy charakteryzującej się bardzo małą wielkością otworów (średnica często poniżej 1 mm) i stosunkowo niskim prześwitem (do ok. 5%) [304–314]. Absorber z mikroperforacją rozpatrywano także w pracy [308], gdzie średnica otworów nie przekraczała nawet 0,1 mm, natomiast wielkość prześwitu mieściła się w przedziale od 6,55 do 18,92%. Ponadto, blacha perforowana stanowi niekiedy element bardziej rozbudowanego układu, w którym główną funkcję związaną z pochłanianiem dźwięku spełnia inny (porowaty) materiał. W tym przypadku blacha o odpowiedniej perforacji osłania materiał absorbujący przepuszczając jednocześnie dźwięk [302, 315, 316].

Akustykę blach perforowanych związaną z przepływem określonego czynnika (np. powietrza) przez jej strukturę analizowano w pracach [320–322]. Zmiennymi parametrami były m.in. nominalna średnica otworu i grubość materiału. Przepływ powietrza przez pustki sprawdzano w dwóch kierunkach, aby uwzględnić ewentualną różnicę średnicy otworu po obu stronach blachy (brak idealnej cylindryczności oczka). Oprócz charakterystyki akustycznej perforowanych materiałów, rozpatrywano również inne parametry opisujące zjawisko przepływu przez tego typu ośrodki. Badano wpływ perforacji (np. jedno

i wielootworowej o tym samym prześwicie [322]) na spadek ciśnienia strumienia powietrza [324, 325] dla danego natężenia przepływu [326–329]. W tym aspekcie niejednokrotnie rozważano także blachy mikroperforowane [330–332]. Warto dodać, iż odpowiednia perforacja pozwala jednocześnie kontrolować przepływ danego czynnika oraz pochłaniać w określonym stopniu dźwięk [333].

Należy odnotować wybrane prace [334–350] poświęcone konstrukcjom typu SPSW (Steel Plate Shear Walls), które w ogólnym założeniu składają się z (często połączonych śrubowo): pionowych kolumn, poprzecznie względem nich usytuowanych belek (co tworzy ramę konstrukcji) oraz blachy wypełniającej przestrzeń pomiędzy nimi (rys. 3.9). Stosowane są w celu zabezpieczenia budynków (zwłaszcza wysokich) przed zewnętrznymi bocznymi obciążeniami. Niekiedy np. ze względów architektonicznych, użytkowych, kontrolnych czy konserwacyjnych istnieje konieczność uwzględnienia w strukturze takiej konstrukcji odpowiedniego prześwitu (mogącego finalnie również obniżyć jej masę), co może zapewnić blacha perforowana. W tym kontekście prowadzono badania eksperymentalne i numeryczne. Analizowano blachy z jednym [338] i wieloma różnie usytuowanymi otworami (tworzącymi często regularny układ perforacji) o różnej wielkości [339–342] i kształcie [343]. W pracy [344] określono doświadczalnie wpływ otworów okrągłych rozmieszczonych regularnie oraz w górnych narożach stalowej blachy na wytrzymałość konstrukcji SPWS, natomiast publikacja [345] stanowi jej uzupełnienie i niejako weryfikację poprzez analizę numeryczną MES. Oprócz parametrów związanych z samą perforacją, rozpatrywano także wpływ rodzaju materiału i grubości na własności mechaniczne układu [346]. Ponadto, wypełnienie tego typu konstrukcji może zostać dodatkowo wzmocnione np. w kierunku diagonalnym oraz na brzegach otworów w przypadku blachy perforowanej [347]. Istnieje wiele możliwych konfiguracji systemów SPWS dotyczących ilości i kształtu zastosowanych elementów (pionowych kolumn, poprzecznych belek), co determinuje wymiary i smukłość całej konstrukcji [348], a jej wypełnienie może stanowić także perforowana blacha falista [349] czy trapezowa [350].



Rys. 3.9. Przykład konstrukcji SPSW (Steel Plate Shear Walls)

Blachy/płyty perforowane mogą być również istotnym elementem rozwiązań SPG (Steel Plate Girders) [351–360], czyli tzw. blachownic wykonanych ze stali. W tym przypadku perforowany środek łączący dolny i górny pas konstrukcji zapewnia odpowiedni prześwit. Zdolność tego typu blachownic do efektywnego przenoszenia obciążeń zginających i ścinających decyduje o ich przydatności np. w budownictwie, okrętownictwie, konstrukcjach mostowych i przemysłowych [351]. Autorzy prac związanych z tą tematyką badali m.in. wpływ wielkości i kształtu otworów [352–356], a także ich usytuowania w płaszczyźnie środka na wytrzymałość konstrukcji [353]. Rozpatrywano różne wzmocnienia, zarówno samych otworów [357, 358] jak i pozostałych obszarów nieperforowanych [354, 356, 358, 359]. Analizowano smukłość blachy perforowanej (środku) [352, 356, 360].

Perforowane płyty są stosowane jako element w konstrukcjach przestrzennych lub warstwowych w systemach opancerzenia, aby zapewnić odpowiedni stopień ochrony [361–370]. W tym przypadku istotna jest nie tylko masa własna takiego układu (którą można obniżyć m.in. poprzez perforację wybranych jej warstw), ale także fakt, iż w wyniku uderzenia pocisku w krawędź otworu w materiale jego rdzenia powstaje złożony stan naprężenia z przeważającymi naprężeniami zginającymi. Sprzyja to pękaniu rdzenia i zmianie trajektorii lotu pocisku, co skutkuje obniżeniem jego zdolności penetracyjnych.

W uzupełnieniu rozważanego stanu zagadnienia warto przywołać prace przeglądowe [371–375], prace związane z ogólną koncepcją efektywnych i ekwiwalentnych własności (parametrów) materiałów perforowanych [376–379] oraz publikacje IPA (Industrial Perforators Association). Ostatnie z wymienionych są to opracowania o charakterze poradnikowym ukierunkowane głównie na aplikacyjny aspekt blach perforowanych.

Zajmowano się m.in. akustycznymi własnościami badanych materiałów, zwłaszcza transparentnością i możliwościami absorpcyjnymi [380]. Kolejne prace [381, 382] dotyczą tematyki praktycznych zastosowań, standardu asortymentowego IPA, norm jakości wykonania oraz wybranych własności mechanicznych i podatności do formowania.

Dokonany przegląd i analiza prac dotyczących własności blach perforowanych pozwala dostrzec pewien niedostatek badań rozważanych materiałów. W wielu przypadkach przedstawione publikacje bardzo często o charakterze teoretycznym i numerycznym (głównie metoda elementów skończonych) koncentrują się tylko na elementarnym fragmencie danego układu perforacji, a także na pojedynczym otworze w płaszczyźnie blachy. Należy dodać, iż analizy numeryczne niejednokrotnie przeprowadzano bez podawania nazwy macierzystego materiału blachy perforowanej, ograniczając się do implementacji wybranych wartości parametrów niezbędnych do obliczeń. Niekiedy otrzymane wyniki weryfikowano eksperymentalnie. W jednostkowych przypadkach przywołanych w przeglądzie prac, badano niemetaliczne materiały z regularną perforacją, uzyskując interesujące wnioski, które można uogólnić także dla perforowanych blach głównie poprzez uniezależnienie rozpatrywanych parametrów od własności materiału macierzystego.

Preferowany obszar badań, mając na uwadze aspekt poznawczy i możliwości aplikacyjne, powinien obejmować kompleksowe podejście dotyczące analizy własności sprężystych i wytrzymałościowych blachy perforowanej, zwłaszcza w kontekście konstrukcyjnego przeznaczenia tego specyficznego tworzywa.

4. Teza i cele pracy

Podstawowe wymagania stawiane materiałom konstrukcyjnym to przede wszystkim odpowiednia charakterystyka wytrzymałościowa. Ponadto, często oprócz określonej zdolności do przenoszenia obciążeń zewnętrznych zastosowane tworzywo musi cechować się niską masą właściwą. Oba aspekty są powiązane za pomocą tzw. wytrzymałości właściwej, zdefiniowanej jako stosunek wytrzymałości mechanicznej do gęstości danego materiału. Specyfika blach perforowanych wynikająca z obecności w litym materiale różnego kształtu i wielkości pustek sprawia, iż trudno mówić w tym przypadku o „gęstości” tego typu tworzyw w ujęciu globalnym (całej blachy wraz z obszarami perforowanymi). Niemal nieograniczona mnogość doboru parametrów perforacji skutkuje różnym spadkiem masy i zmianą własności blachy. Powstają tym samym niejako nowe materiały, mniej lub bardziej „gęste” i ściśliwe. Stąd, właściwe wydaje się podejście, w myśl którego parametry wytrzymałościowe blachy perforowanej są wyznaczane w oparciu o analogiczne charakterystyki blachy macierzystej o znanych własnościach. Taka koncepcja wymaga jednak rozpoznania wpływu konkretnej perforacji na obniżenie wytrzymałości blachy, a uwzględniając anizotropię spowodowaną siatką otworów – także w zależności od kierunku obciążenia. Mając na uwadze przywołane kwestie, analizę własności mechanicznych rozpatrywanych materiałów inżynierskich (w kontekście ich konstrukcyjnego przeznaczenia) przeprowadzono m.in. w odniesieniu do surowca macierzystego (blachy pełnej) oraz posługując się wprowadzonym wskaźnikiem ubytku masy. Istotę powyższych stwierdzeń można ująć w ogólniej wyrażonej tezie:

Mechanika odkształcenia blachy perforowanej pozwala na zachowanie relatywnie wysokich własności mechanicznych w stosunku do masy, co – ze względu na specyficzne cechy użytkowe blach z siatką otworów, takie jak obniżona masa, prześwit, przewiewność, dźwiękochłonność, właściwości filtracyjne, antypoślizgowe i inne – czyni blachy perforowane atrakcyjnym materiałem inżynierskim / konstrukcyjnym.

Treść tak sformułowanej tezy zweryfikowano wynikami badań eksperymentalnych i numerycznych, przeprowadzonych w oparciu o wyznaczone cele:

1. Określenie relacji pomiędzy zmianą (przeważnie obniżeniem) własności mechanicznych, w szczególności sprężystych i wytrzymałościowych, a wskaźnikiem ubytku masy blachy, spowodowanego perforacją.
2. Określenie wpływu perforacji na sztywność blachy poddanej obciążeniom zginającym.
3. Analizę numeryczną stanu naprężenia i odkształcenia materiału w warunkach obciążenia, odpowiadających zadany w eksperymencie.

5. Zakres i metodyka badań

Odpowiedni dobór i zastosowanie materiałów inżynierskich wymaga właściwego rozpoznania i opisu ich własności. W tym kontekście podjęta problematyka badawcza skoncentrowana na mechanicznej charakterystyce blachy perforowanej (wykonanej z różnych materiałów o wybranych parametrach perforacji) wynikała z konstrukcyjnego przeznaczenia tego typu tworzywa. Wyznaczono kluczowe parametry sprężyste i wytrzymałościowe badanych materiałów z perforacją prostą i heksagonalną w różnych schematach obciążenia. Analizę i kompleksową ocenę blachy perforowanej (w formie wcześniej nie kształtowanego przestrzennie arkusza) pod kątem jej możliwości aplikacyjnych przeprowadzono w oparciu o wyniki eksperymentalne i analizę numeryczną.

5.1. Materiał do badań

Zasadnicze badania przeprowadzono na blasze stalowej DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754 o tej samej grubości równej 1 mm. W obu przypadkach rozpatrywano perforację z prostym i heksagonalnym układem otworów cylindrycznych.

Zarówno różne gatunki stali jak i stopy aluminium należą do materiałów najczęściej stosowanych do produkcji blach perforowanych. Wśród wspomnianych grup należy wymienić m.in.: stale niskowęglowe oraz stopy aluminium serii 5XXX.

Stale o niskiej zawartości węgla (0,02 – 0,20%) są wytwarzane w największej ilości. Znajdują zastosowanie w budownictwie oraz w różnego typu konstrukcjach (np. mosty, gazo- i ropociągi, platformy wiertnicze, okręty, itp.). Do ich zalet należą m.in. dobra spawalność (można je łączyć praktycznie wszystkimi powszechnie stosowanymi metodami) oraz korzystna kombinacja wytrzymałości, ciągliwości i odporności na pękanie. Niskowęglowa i zimnowalcowana stal DC01 przeznaczona do kształtowania na zimno wykazuje podatność do tłoczenia, np.: obciążania podłużnego, gięcia i profilowania rolkowego. W celu ochrony przed korozją można nanieść na powierzchnię stalowej (DC01) blachy odpowiednią warstwę zabezpieczającą (np. powłokę metaliczną) [2, N186].

Teoretycznie stopy aluminium-magnez można obrabiać cieplnie, ale efekt tej obróbki jest znikomy. Z tego względu w praktyce ta grupa stopów jest umacniana za pomocą obróbki plastycznej na zimno. Własności mechaniczne stopów aluminium-magnez zbliżone są do własności stopów aluminium-mangan, zachowując jednak mniejszą gęstość ($2,6 \text{ g/cm}^3$). Dodatek manganu do tego typu stopów (kilka dziesiątych procent) podwyższa własności mechaniczne i polepsza odporność na korozję. Stop EN AW-5754 wykazuje dużą podatność

do obróbki plastycznej (szczególnie w stanach miękkich) i polerowania. Charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na korozję, także w warunkach wody morskiej. Ponadto, cechuje go dobra spawalność i wytrzymałość na zmęczenie. Nadaje się do anodowania. Stosowany jest m.in. w budownictwie, przemyśle morskim, chemicznym, spożywczym i transportowym [383, N187–N190].

Charakterystykę mechaniczną obu materiałów (bez perforacji) przedstawiono w tabelach 5.1 i 5.2.

Tabela 5.1. Własności mechaniczne blachy stalowej DC01 bez perforacji

Kierunek osi próbki względem KW	R_e MPa	R_m MPa	R_e/R_m	$A_{70\text{ mm}}$ %
0°	190	358	0,53	37
30°	188	345	0,54	36
45°	195	361	0,54	36
60°	195	357	0,55	34
90°	190	347	0,55	36
Wartość średnia (x)	192	354	0,54	36

Tabela 5.2. Własności mechaniczne blachy ze stopu aluminium EN AW-5754 bez perforacji

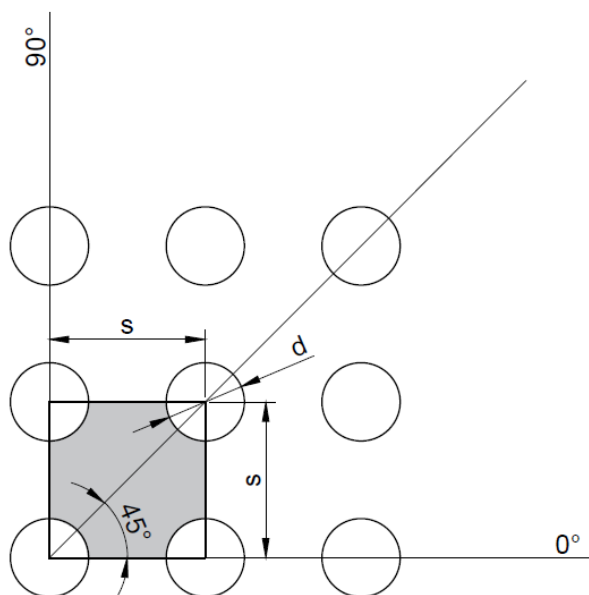
Kierunek osi próbki względem KW	R_e MPa	R_m MPa	R_e/R_m	$A_{70\text{ mm}}$ %
0°	173	221	0,78	8
30°	162	214	0,76	9
45°	160	210	0,76	10
60°	160	211	0,76	9
90°	160	215	0,74	8
Wartość średnia (x)	163	214	0,76	9

5.2. Charakterystyka badanych perforacji

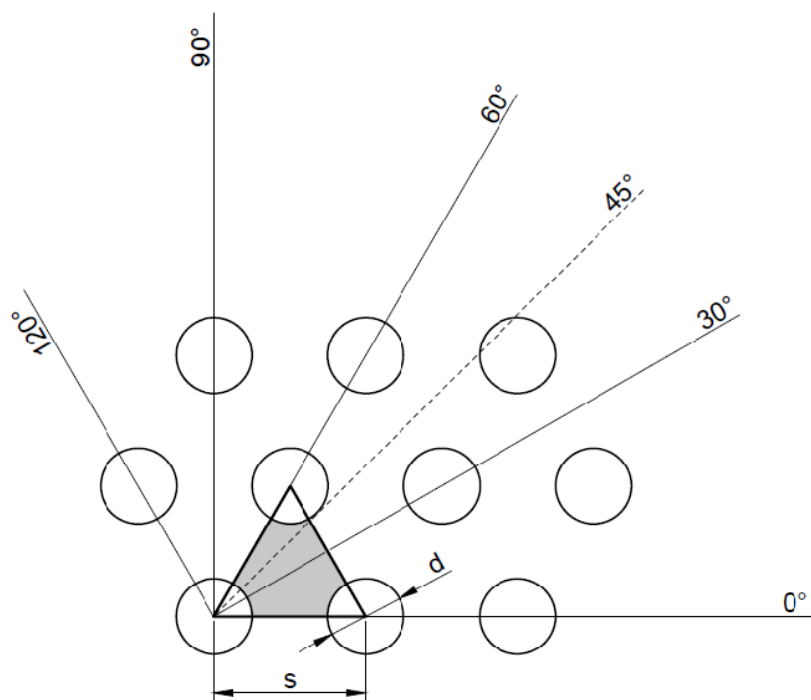
Największe praktyczne zastosowanie posiadają blachy perforowane z prostym i heksagonalnym układem otworów okrągłych (cylindrycznych), co w dużym stopniu zadecydowało o wyborze tego typu perforacji do badań (rys. 5.1 i 5.2). Średnica otworu wynosiła 2 mm, natomiast skok stanowił jej dwukrotność. W każdym przypadku kierunek walcowania (KW) blachy pokrywał się z kierunkiem najgęstszego upakowania otworów (0°),

które wykonano metodą wykrawania. Ze względu na symetrię siatek, także kierunek 90° dla perforacji prostej oraz kierunki 60° i 120° dla perforacji heksagonalnej są najliczniej obsadzone otworami. W oparciu o wymienione orientacje w płaszczyźnie blachy dla rozważanych perforacji, a także kierunki do nich prostopadłe, można wyznaczyć własności badanych materiałów inżynierskich, które są istotne i użyteczne zwłaszcza z praktycznego punktu widzenia, mając jednocześnie na uwadze pewną anizotropię blach perforowanych (inaczej mówiąc, znajomość wybranych parametrów tylko dla charakterystycznych kierunków perforacji jest często wystarczająca do oceny przydatności blachy perforowanej w danej konstrukcji).

Warto dodać, iż w przypadku perforacji heksagonalnej można uzyskać większą wartość prześwitu w porównaniu do perforacji prostej, zakładając taki sam skok, wielkość i kształt oczek (układ mijany 60° charakteryzuje się większym stopniem upakowania otworów). W niniejszej pracy dla tej samej średnicy otworu (2 mm) i wartości skoku (4 mm) prześwit blachy perforowanej w układzie prostym wynosił 19,625%, natomiast dla blachy z perforacją heksagonalną był równy 22,75%.



Rys. 5.1. Schemat perforacji prostej z zaznaczonymi charakterystycznymi kierunkami



Rys. 5.2. Schemat perforacji heksagonalnej (trójkątnej równobocznej) z zaznaczonymi charakterystycznymi kierunkami (linia ciągła)

5.3. Wyznaczanie własności mechanicznych

W przypadku materiałów perforowanych istotny jest sposób wyznaczania ich własności. Wartość zewnętrznego obciążenia mechanicznego można bowiem odnosić do całkowitego przekroju poprzecznego próbki (łącznie z pustkami) lub do przekroju czynnego (bez pustek). W niniejszej pracy rozpatrywane własności sprężyste i wytrzymałościowe określono uwzględniając udział powierzchni otworów w przekroju poprzecznym blachy. Znajduje to uzasadnienie zwłaszcza rozważając praktyczny aspekt związany z zastosowaniem badanych materiałów, często w postaci płaskiego i nie ukształtowanego przestrzennie arkusza. Wówczas najważniejsza jest znajomość odpowiedzi sprężystej i wytrzymałość blachy perforowanej w skali makroskopowej. W tym kontekście warto przywołać wspomniane wcześniej *podejście równoważnej ciągłości*, zgodnie z którym materiałowi perforowanemu można przypisać ściśle określone własności podobnie jak tworzywom litym.

Wartości średnie rozważanych charakterystyk w płaszczyźnie blachy perforowanej określono według zależności:

$$x = \frac{x_0 + 2x_{45} + x_{90}}{4} \quad \text{dla perforacji prostej} \quad (5.1)$$

$$x = \frac{x_0 + x_{30} + x_{45} + x_{60} + x_{90}}{5} \text{ dla perforacji heksagonalnej (5.2)}$$

w których x oznacza rozpatrywany parametr, a indeksy dolne oznaczają poszczególne kierunki w płaszczyźnie blachy.

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566 o maksymalnym nacisku 10 kN [384]. Zależnie od realizowanych prób i mierzonych parametrów stosowano także dodatkowe wyposażenie (np. ekstensometr, urządzenie do zginania).

5.3.1. *Moduł Younga*

Moduł sprężystości wzdłużnej wyznaczono za pomocą statycznej próby rozciągania. Do pomiaru odkształcenia wzdłużnego w zakresie sprężystym zastosowano dwuosiowy ekstensometr Instron o rozdzielczości pomiarowej $\pm 0,25 \%$ (rys. 5.3). Baza pomiarowa wynosiła 12,5 mm (rozstaw ekstensometru).

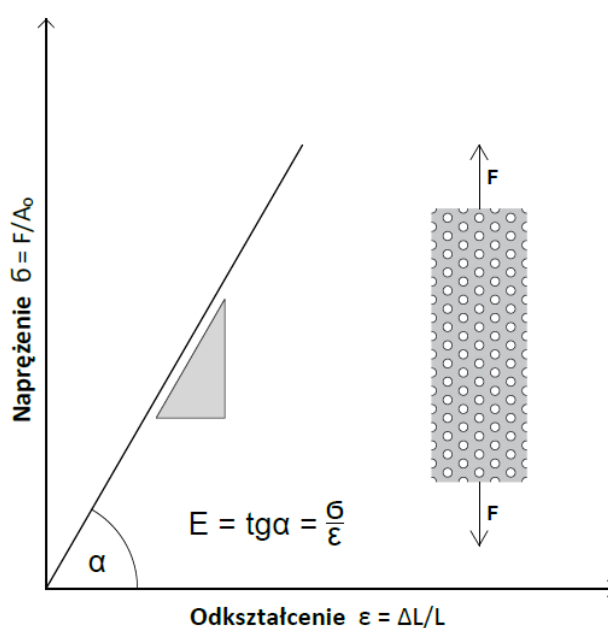


Rys. 5.3. Pomiar wydłużenia w zakresie sprężystym na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566, przy użyciu ekstensometru dwuosiowego

Dla każdego materiału (blacha pełna i perforowana ze stali DC01 i ze stopu aluminium EN AW-574) – na podstawie wstępnej próby rozciągania aż do zerwania próbki – ustalono wartości maksymalnego obciążenia zapewniającego odkształcenie w zakresie sprężystym. W przypadku blachy pełnej było to 2 kN i 1,5 kN odpowiednio dla stali DC01 i stopu EN

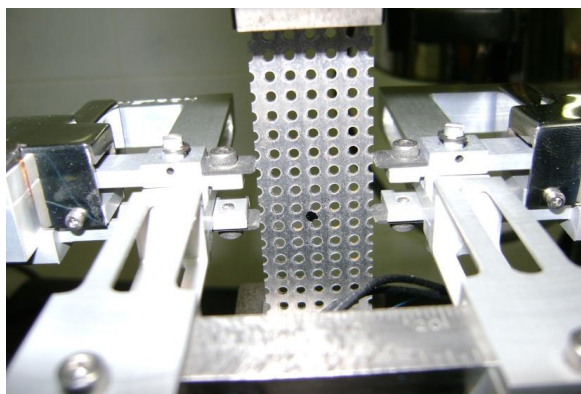
AW-5754, natomiast dla blachy perforowanej 1,5 kN (DC01) oraz 1 kN (EN AW-5754). Każdą próbkę obciążano i odciążano (1 cykl) trzykrotnie. Prędkość odkształcenia wynosiła 10^{-5}s^{-1} . Otrzymane wyniki posłużyły do sporządzenia wykresów we współrzędnych σ – ε (rys. 5.4). Moduł Younga wyznaczono w oparciu o kąt nachylenia prostej do osi odciętych według zależności:

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$



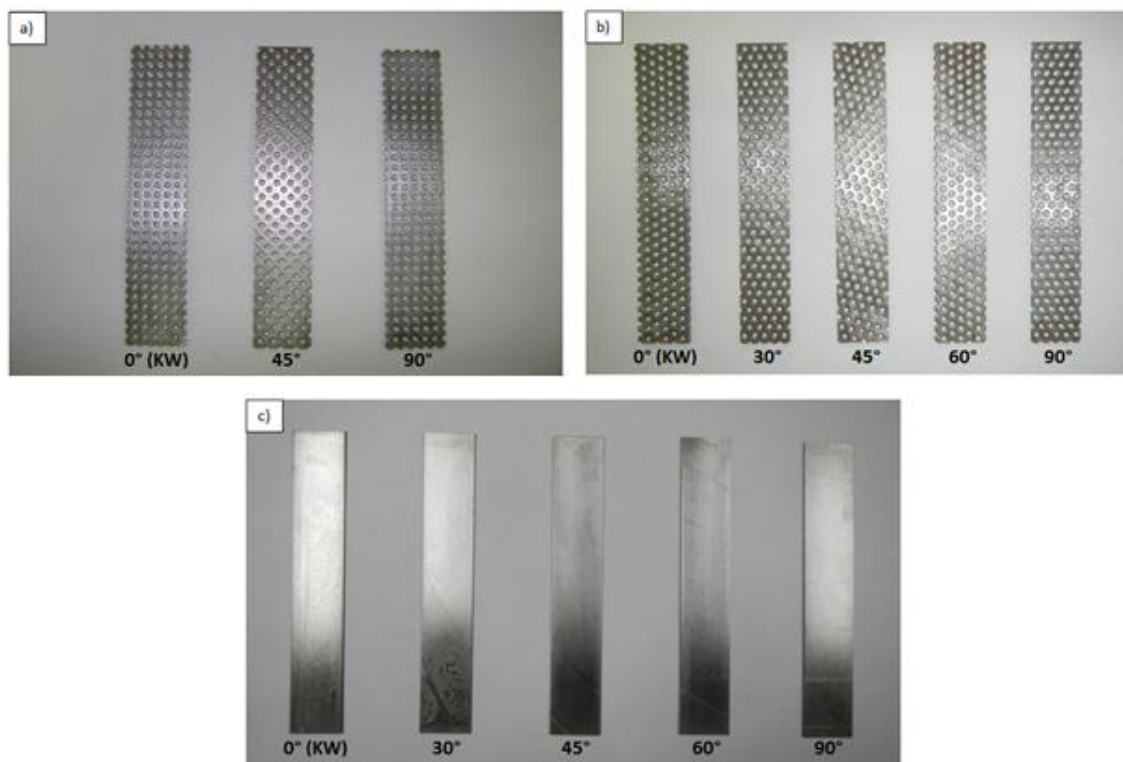
Rys. 5.4. Zależność odkształcenia od naprężenia w zakresie liniowosprężystym

Podczas określania modułu Younga blachy perforowanej bardzo istotne było, aby obydwie pary ostrzy ekstensometru w sposób stabilny przylegały do krawędzi próbki w miejscach nie objętych perforacją (rys. 5.5).

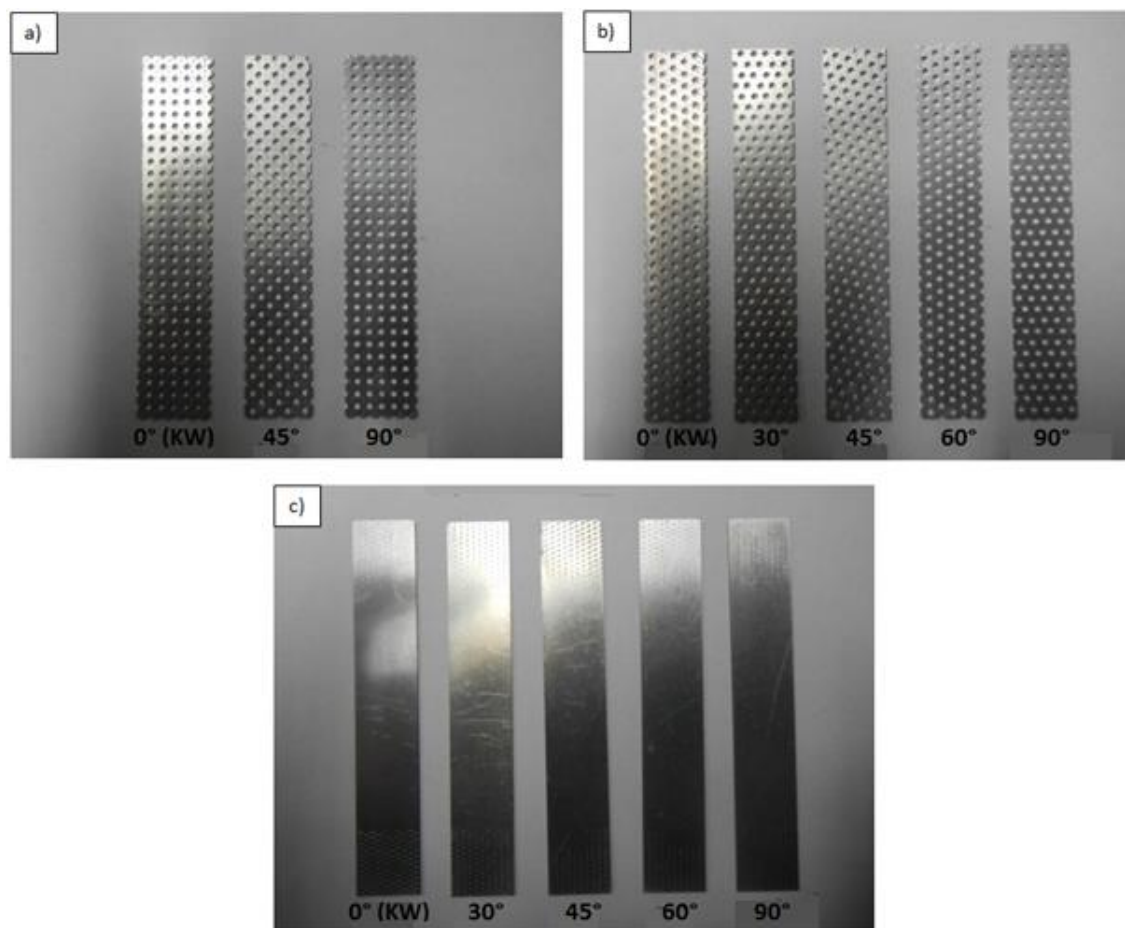


Rys. 5.5. Sposób mocowania ekstensometru na próbkach blachy perforowanej

Rozkład własności mechanicznych w płaszczyźnie blachy pełnej i perforowanej dla rozpatrywanych materiałów wyznaczono na podstawie pomiarów przeprowadzonych na odpowiednio przygotowanych próbkach (rys. 5.6 i 5.7), których oś wzdlużna tworzyła z kierunkiem walcowania (KW) kąty: 0° , 30° , 45° , 60° i 90° w przypadku blachy z perforacją heksagonalną i bez perforacji oraz 0° , 45° i 90° dla perforacji prostej. Paski blachy wycięto przy pomocy drążarki elektroiskrowej, eliminując umocnienie materiału przy powierzchni rozdzielienia, jakie towarzyszy cięciu mechanicznemu. Baza pomiarowa wszystkich próbek przeznaczonych do jednoosiowego rozciągania była równa 70 mm, a w przypadku blachy pełnej jednakowa była także ich szerokość wynosząca 20 mm. Dla blachy perforowanej ustalenie takiej samej szerokości często było niemożliwe ze względu na przyjętą zasadę, by oś oraz krawędzie boczne próbki przechodziły przez środki cylindrycznych otworów. Mając to na uwadze i dążąc jednocześnie do uzyskania próbek perforowanych o szerokości jak najbardziej zbliżonej do wartości 20 mm, ustalono następujące wartości tego wymiaru: perforacja prosta – 24 mm dla orientacji 0° i 90° oraz nieco mniejsza dla 45° (22,63 mm); perforacja heksagonalna – 20,78 mm dla orientacji 0° , 45° i 60° oraz 20 mm w przypadku orientacji 30° i 90° .



Rys. 5.6. Przykładowe zestawy stalowych próbek: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji



Rys. 5.7. Przykładowe zestawy próbek ze stopu aluminium EN AW-5754: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji

5.3.2. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie

Własności wytrzymałościowe ($R_e/R_{p0.2}$ i R_m) wyznaczono w pełnej próbie rozciągania (do zerwania materiału) prowadzonej z prędkością odkształcenia $10^{-3}s^{-1}$ i dla bazy pomiarowej próbki 70 mm (rys. 5.8). Odkształcenie wzdłużne określano na podstawie przemieszczenia trawersy maszyny. Pełne rozciąganie prowadzono na paskach blachy za pomocą których wcześniej wyznaczono moduł Younga.



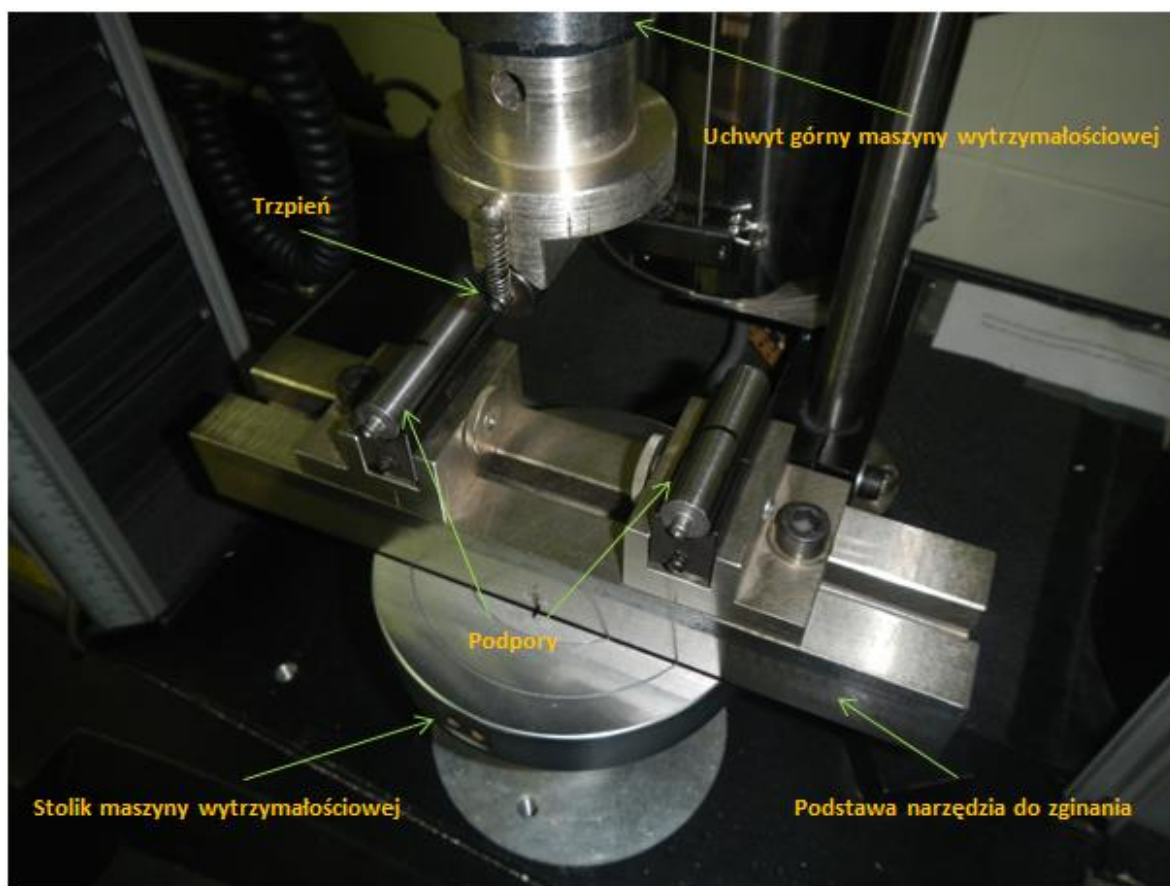
Rys. 5.8. Statyczna próba rozciągania

5.4. Wyznaczanie charakterystyk gięcia badanych materiałów

Zasadnicze badania omawianych materiałów poddanych trójpunktowemu gięciu dotyczyły obszaru sprężystego. Analiza takiego sposobu obciążenia jest szczególnie istotna w kontekście konstrukcyjnego przeznaczenia blachy perforowanej. Ponadto, próba gięcia dobrze odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacyjne w jakich często stosowany jest ten specyficzny materiał. Pozwala to lepiej poznać jego zachowanie w złożonych schematach naprężenia, a tym samym umożliwia bardziej świadome i efektywniejsze projektowanie zarówno elementów jak i całych konstrukcji wykonanych z tego typu tworzywa.

5.4.1. Konstrukcja narzędzi i opis stanowiska do prób zginania blachy

Trójpunktowe gięcie elementów w postaci pasków blachy realizowano za pomocą odpowiednio dostosowanego do maszyny wytrzymałościowej (Instron 5566 o maksymalnym nacisku 10 kN) narzędzia (rys. 5.9). Jego konstrukcja pozwoliła na przeprowadzenie pomiarów zgodnie z dobranymi parametrami gięcia [385, 386]. Szerokość i średnica podpór oraz trzpienia wynosiły kolejno 60 mm i 15 mm. Rozstaw podpór był równy 100 mm.



Rys. 5.9. Narzędzie do trójpunktowego gięcia zamocowane w maszynie wytrzymałościowej

Podczas zginania następował ruch trzpienia w kierunku równo oddalonych od niego podpór na których umieszczano badany element. W przypadku gięcia skutkującego pojawieniem się odkształceń trwałych próby prowadzono do uzyskania zadanej strzałki ugięcia, rejestrując jednocześnie wartość siły. Z kolei podczas prób w zakresie odkształceń odwracalnych maksymalna siła była wielkością ustaloną, natomiast strzałka ugięcia stanowiła wartość wynikową podczas pomiaru. Odległość pomiędzy górną powierzchnią podstawy narzędzia do zginania i dolną stroną nieodgiętej próbki stanowiła maksymalną możliwą do osiągnięcia strzałkę ugięcia (50 mm), co gwarantowało pewien zapas biorąc pod uwagę rozważane w badaniach wartości tego parametru.

5.4.2. Opis procedury badań

W celu wyznaczenia efektywnego modułu Younga badanych materiałów w próbie jednokątowego gięcia podczas pomiaru rejestrowano zależność strzałki ugięcia blachy od siły nacisku trzpienia w obszarze sprężystym (rys. 5.10). Dopuszczalną wartość zewnętrznego obciążenia określono na podstawie analogicznych wcześniejszych prób, doprowadzając do

uplastycznienia odkształcanej próbki, przy założonej strzałce ugięcia 25 mm i prędkości posuwu stempla 0,1 mm/s (rys. 5.11). Zależnie od rodzaju materiału oraz szerokości próbki (3 warianty dla każdego rozpatrywanego kierunku: szerokość bazowa oraz jej 1,5 i 2-krotność) różna była wartość siły skupionej. Dla bazowej szerokości wynosiła ona 8 N (blacha perforowana EN AW-5754) i 10 N (blacha perforowana DC01). W przypadku próbek szerszych obciążenie wzrastało wprost proporcjonalnie do szerokości. Rozpatrywany schemat obciążenia, a także stosunkowo mała grubość giętych materiałów determinowały niskie wartości przykładanej siły. Z kolei przy tak niewielkim obciążeniu nawet minimalne niedokładności związane na przykład z kształtem próbki czy niedopasowaniem elementów narzędzia i maszyny wytrzymałościowej mogły w pewnym stopniu rzutować na poprawność uzyskiwanego wyniku. Dlatego, aby zmaksymalizować wiarygodność pomiaru dla każdego badanego kierunku w płaszczyźnie blachy uwzględniano 4 próby, gdzie na każdą z nich przypadało 6 cykli pomiarowych (1 cykl obejmował fazę obciążania i odciązania). Ponadto, gięcie realizowano poprzez nacisk trzpienia na „górną” i „dolną” powierzchnię blachy (po 2 próby na każdą stronę). Wartość efektywnego modułu Younga stanowiła średnia arytmetyczna ze wszystkich prób. Każdorazowo stosowano obciążenie wstępne równe 2 N w celu eliminacji ewentualnych początkowych zakłóceń liniowego przebiegu zależności siły od strzałki ugięcia. Biorąc pod uwagę m.in. mnogość przeprowadzonych pomiarów można sądzić, iż określone za ich pomocą wartości efektywnego modułu Younga poprawnie charakteryzują sztywność badanych materiałów.

Do wyznaczenia efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej skorzystano ze wzoru:

$$S = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (5.3)$$

gdzie: S - strzałka ugięcia [mm], F - siła skupiona [N], l - rozstaw podpór [mm], E - moduł Younga [MPa], I - moment bezwładności [mm⁴]

Dla paska blachy o przekroju prostokątnym formuła (5.3) przyjmuje postać:

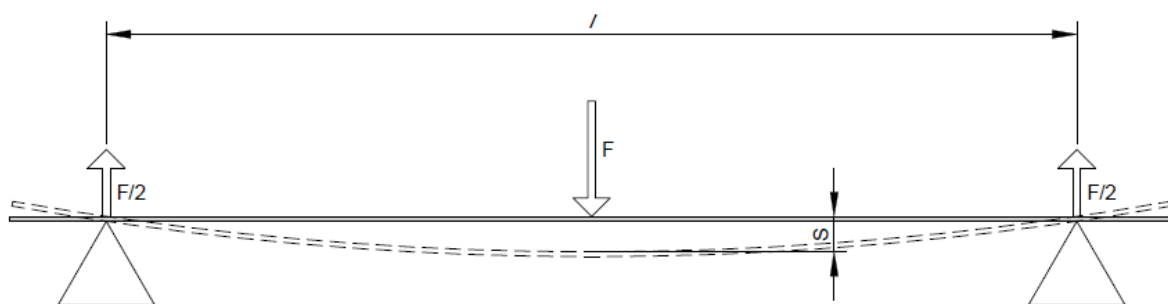
$$S = \frac{Fl^3}{4Ebg^3} \quad (5.4)$$

gdzie: b i g - odpowiednio, szerokość i grubość paska blachy [mm]

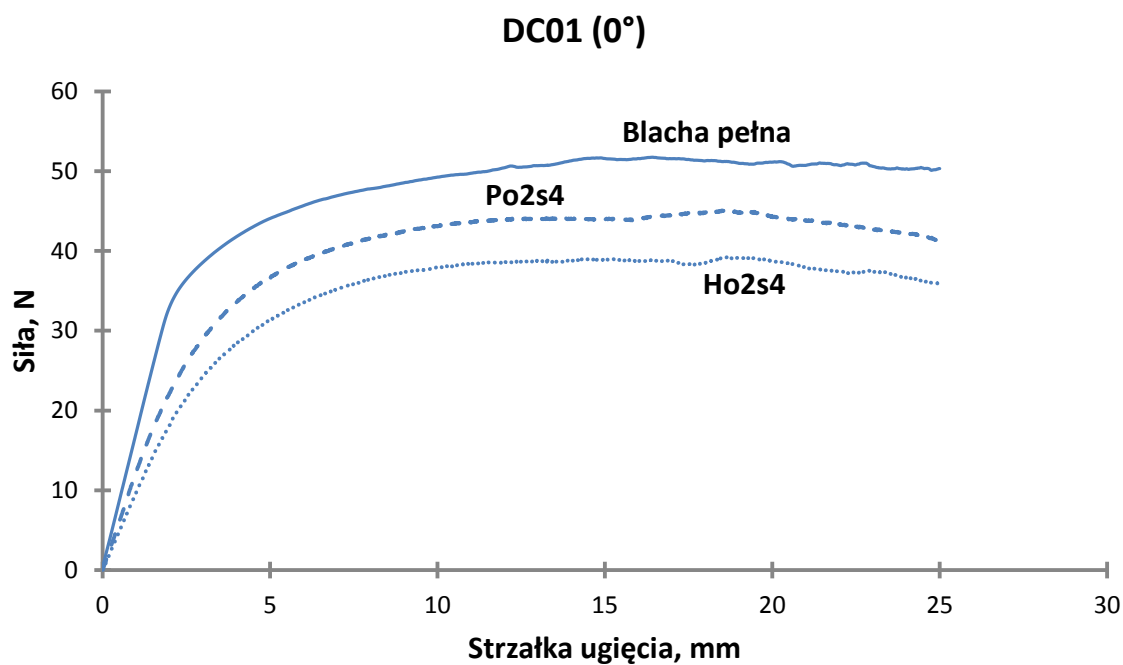
Zatem moduł Younga wyraża równanie:

$$E = \frac{l^3}{4bg^3} \cdot \frac{F}{S} \quad (5.5)$$

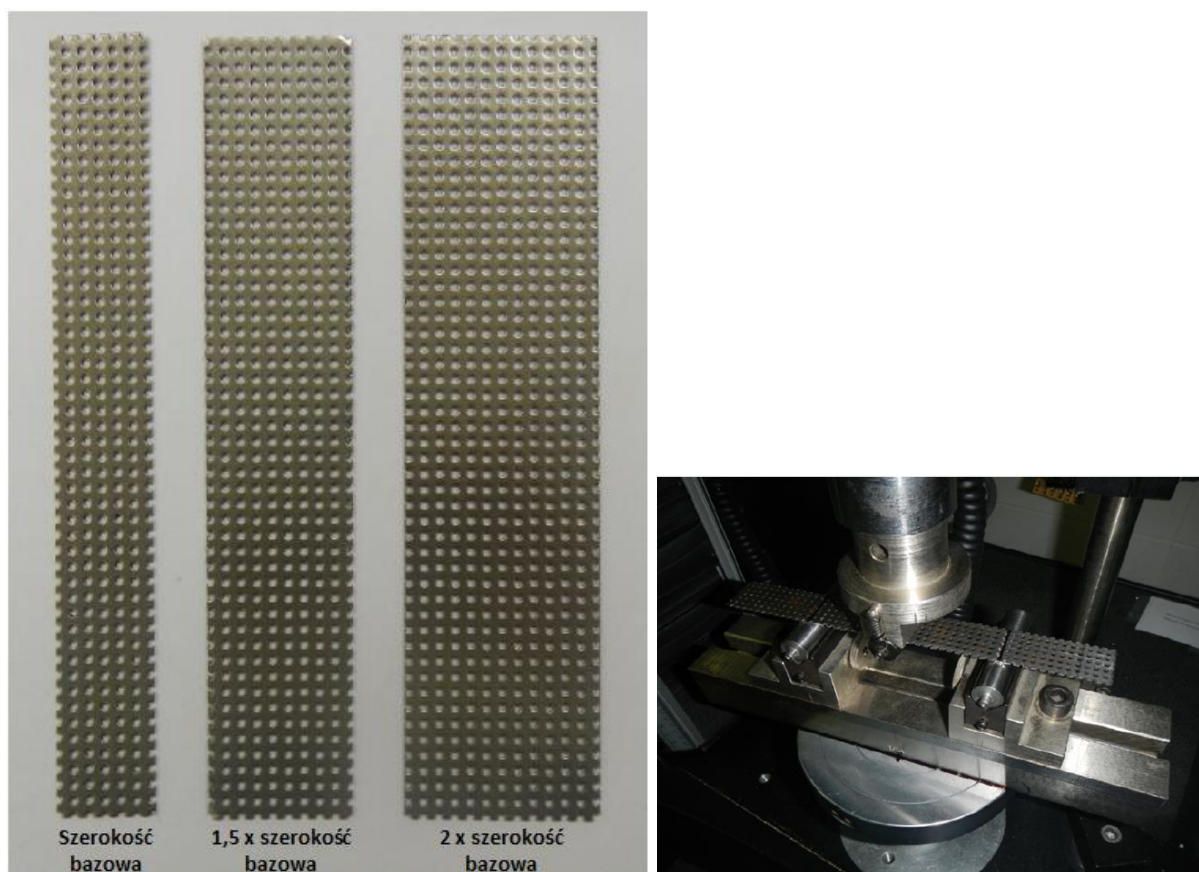
Dla przeznaczonych do trójpunktowego gięcia pasków blachy (rys. 5.12) przyjęto nominalną długość równą 200 mm. Podczas prób zachowywano ten sam sposób ich usytuowania względem podpór (środek bazy pomiarowej próbki znajdował się w połowie rozstawu).



Rys. 5.10. Schemat trójpunktowego gięcia (l - rozstaw podpór, S - strzałka ugięcia, F - siła skupiona)



Rys. 5.11. Przykładowa zależność siły od strzałki ugięcia dla blachy pełnej i perforowanej poddanej trójpunktowemu gięciu



Rys. 5.12. Przykładowy zestaw próbek blachy DC01 z perforacją prostą (Po2s4) dla kierunku 0° (KW) o różnej szerokości (z lewej) oraz pasek stalowej blachy perforowanej (Po2s4, 0°) odpowiednio usytuowany na podporach urządzenia do zginania (z prawej)

5.5. Symulacje numeryczne

Badania numeryczne (metoda elementów skończonych) przeprowadzono za pomocą oprogramowania *Solidworks 2016* z odpowiednim dodatkiem *Simulation*. Rozpatrywane w pracy blachy perforowane poddano liniowej analizie statycznej, symulując warunki jednoosiowego rozciągania i trójpunktowego gięcia w zakresie sprężystym. Uzyskane wyniki pozwoliły wyznaczyć efektywny moduł Younga oraz dokonać charakterystyki rozkładu naprężeń i odkształceń w rozważanych materiałach. Dobrane (na podstawie wstępnych symulacji) parametry docelowej analizy numerycznej różniły się w zależności od schematu obciążenia i materiału (stal DC01 lub stop aluminium EN AW-5754) przypisanego do geometrycznego modelu danej blachy perforowanej. Należy dodać, iż w obliczeniach założono izotropię własności materiału macierzystego (moduł Younga, granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie). Zostały one określone doświadczalnie i stanowiły średnią wartość w płaszczyźnie arkusza. Wymiary pasków blachy uwzględnionych w symulacji

odpowiadały wymiarom analogicznych próbek zastosowanych w badaniach eksperymentalnych.

W przypadku jednoosiowego rozciągania zastosowano solver FFEPlus wykorzystujący iteracyjne metody rozwiązywania równań algebraicznych. Z kolei warunki trójpunktowego gięcia zasymulowano w oparciu o solver bezpośredni Direct Sparse. Dyskretyzację geometrycznych modeli analizowanych materiałów wykonano za pomocą siatki opartej na krzywiźnie (bryłowej dla gięcia i mieszanej dla rozciągania). Zastosowanie siatki mieszanej w symulacji rozciągania wynikało stąd, iż oprócz siatki bryłowej utworzonej dla samej próbki (rys. 5.13), zastosowano także element sztywny (w celu odpowiedniego przyłożenia obciążenia zewnętrznego) o siatce naskórkowej z elementami skorupy. Maksymalna wielkość elementu skończonego była uwarunkowana najmniejszym wymiarem modelu blachy perforowanej (grubość 1 mm) i wynosiła 0,5 mm przy rozciąganiu (wygenerowany minimalny rozmiar elementu to 0.166665 mm) oraz 1 mm dla gięcia (minimalny rozmiar elementu wynosił 0,5 mm). Przyjęcie większego maksymalnego rozmiaru elementu w przypadku gięcia (rys. 5.14) było podyktowane redukcją czasu potrzebnego do wykonania przez oprogramowanie obliczeń przy zachowaniu wystarczającej dokładności otrzymanych wyników (co stwierdzono na podstawie wstępnych analiz dla obu maksymalnych rozmiarów elementu skończonego). Generalnie, symulacje trójpunktowego gięcia (wymagające określenia połączeń pomiędzy narzędziem a odkształcanym materiałem) charakteryzowały się zdecydowanie większą czasochłonnością w porównaniu do jednoosiowego rozciągania. Pozostałe parametry siatki dla rozważanych schematów obciążenia podano w tabelach 5.3 – 5.6 (Oprogramowanie *Solidworks* podaje niektóre szczegóły siatki, np. maksymalny współczynnik kształtu tylko dla siatki bryłowej).

Tabela 5.3. Parametry siatki dla jednoosiowego rozciągania

Parametr siatki	Rodzaj perforacji				
	Po2s4		Ho2s4		
	0°	45°	0°	30°	45°
Minimalna liczba elementów w okręgu	8		8		
Proporcja przyrostu rozmiaru elementu	1,5		1,5		
Punkty jakobianu	4		4		
Całkowita liczba węzłów	164049	145874	135947	134806	143224
Całkowita liczba elementów	98426	86697	80128	80037	85209

Tabela 5.4. Parametry siatki dla trójpunktowego gięcia (szerokość bazowa)

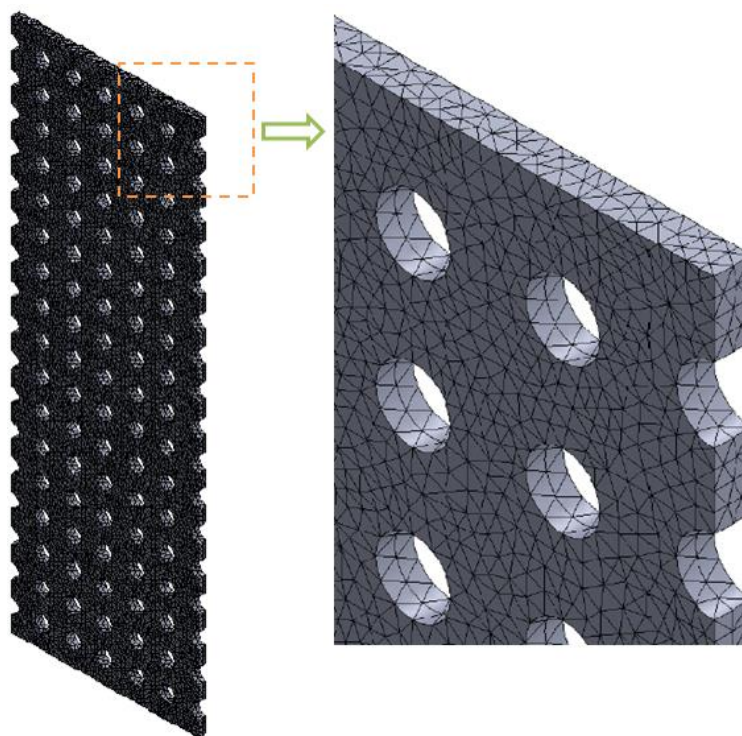
Parametr siatki	Rodzaj perforacji				
	Po2s4		Ho2s4		
	0°	45°	0°	30°	45°
Minimalna liczba elementów w okręgu	8		8		
Proporcja przyrostu rozmiaru elementu	1,6		1,6		
Punkty jacobianu	4		4		
Maksymalny współczynnik kształtu	4,8646	5,4719	5,2913	5,6949	124,16
Procent elementów o współczynniku kształtu < 3	99,7		99,4	99,5	99,4
Procent elementów o współczynniku kształtu > 10	0		0		0,0114
Procent zniekształconych elementów (Jacobian)	0		0		
Całkowita liczba węzłów	321476	313797	303879	296875	304071
Całkowita liczba elementów	203194	198706	193404	188758	193161

Tabela 5.5. Parametry siatki dla trójpunktowego gięcia (próbka – 1,5 x szerokość bazowa)

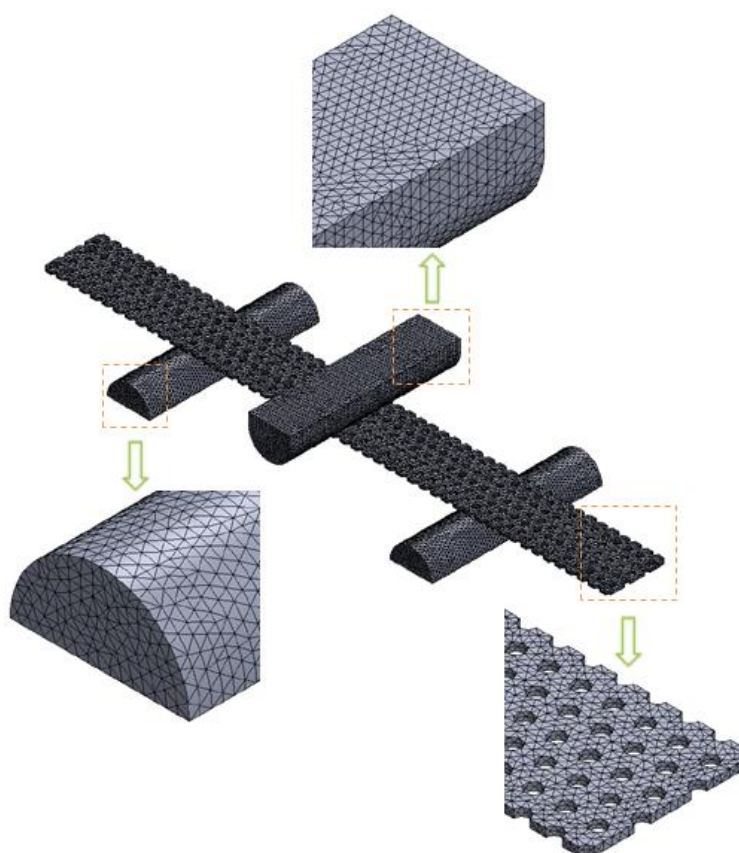
Parametr siatki	Rodzaj perforacji				
	Po2s4		Ho2s4		
	0°	45°	0°	30°	45°
Minimalna liczba elementów w okręgu	8		8		
Proporcja przyrostu rozmiaru elementu	1,6		1,6		
Punkty jacobianu	4		4		
Maksymalny współczynnik kształtu	4,8393	5,4719	5,5531	6,1444	24,458
Procent elementów o współczynniku kształtu < 3	99,6	99,7	99,3	99,6	99
Procent elementów o współczynniku kształtu > 10	0		0		0,00663
Procent zniekształconych elementów (Jacobian)	0		0		
Całkowita liczba węzłów	372821	359334	346097	341147	341003
Całkowita liczba elementów	230573	222440	215207	212462	211308

Tabela 5.6. Parametry siatki dla trójpunktowego gięcia (próbka – 2 x szerokość bazowa)

Parametr siatki	Rodzaj perforacji				
	Po2s4		Ho2s4		
	0°	45°	0°	30°	45°
Minimalna liczba elementów w okręgu	8		8		
Proporcja przyrostu rozmiaru elementu	1,6		1,6		
Punkty jacobianu	4		4		
Maksymalny współczynnik kształtu	6,1489	5,4719	5,1842	4,5749	24,458
Procent elementów o współczynniku kształtu < 3	99,6		99,2	99,3	99,1
Procent elementów o współczynniku kształtu > 10	0		0		0,00255
Procent zniekształconych elementów (Jacobian)	0		0		
Całkowita liczba węzłów	418743	413174	395569	392421	387413
Całkowita liczba elementów	253892	250880	242069	240572	235612



Rys. 5.13. Podział na elementy skończone na przykładzie blachy z perforacją prostą (Po2s4, 0°) dla jednoosiowego rozciągania

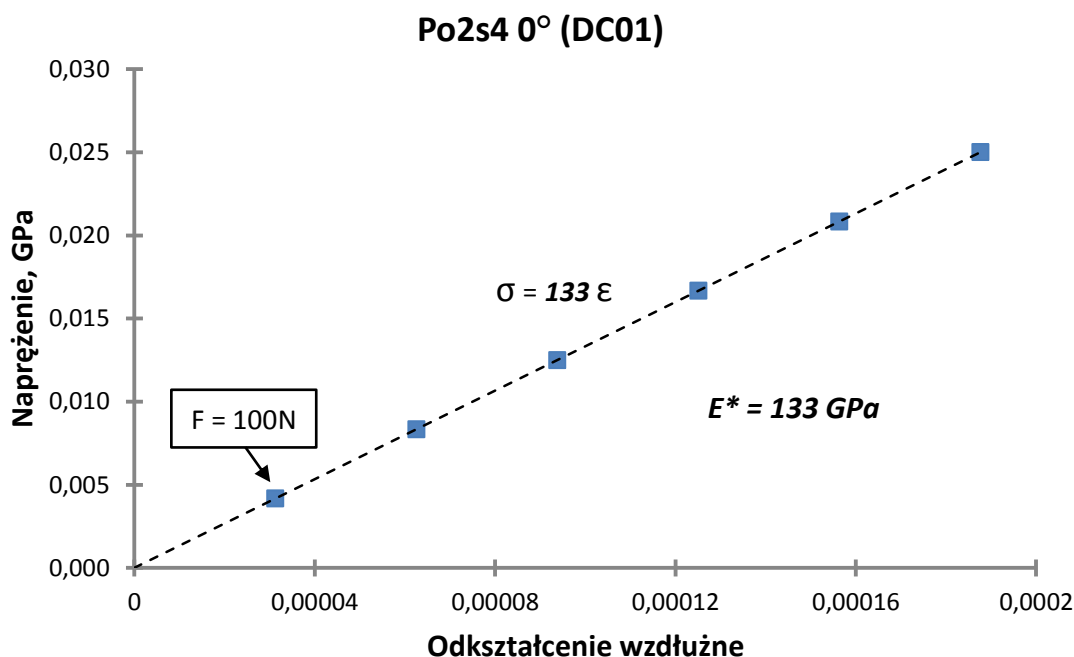


Rys. 5.14. Podział na elementy skończone zastosowany dla trójpunktowego gięcia na przykładzie blachy z perforacją heksagonalną (Ho2s4, 0°)

Różnica dotycząca ilości węzłów i elementów siatki (przy zachowaniu podobnej jej gęstości) w obrębie danego schematu obciążenia była spowodowana m.in. nieco inną (nie zamierzoną, a wynikającą z przyjętego w badaniach kryterium dotyczącego usytuowania osi i krawędzi bocznych każdej próbki) szerokością pasków blachy. Co oczywiste, w przypadku próbek o dobranych intencjonalnie odmiennych szerokościach, zamodelowanych w celu zbadania wpływu tego parametru na efektywny moduł Younga w warunkach trójpunktowego gięcia, różnice te są odpowiednio większe.

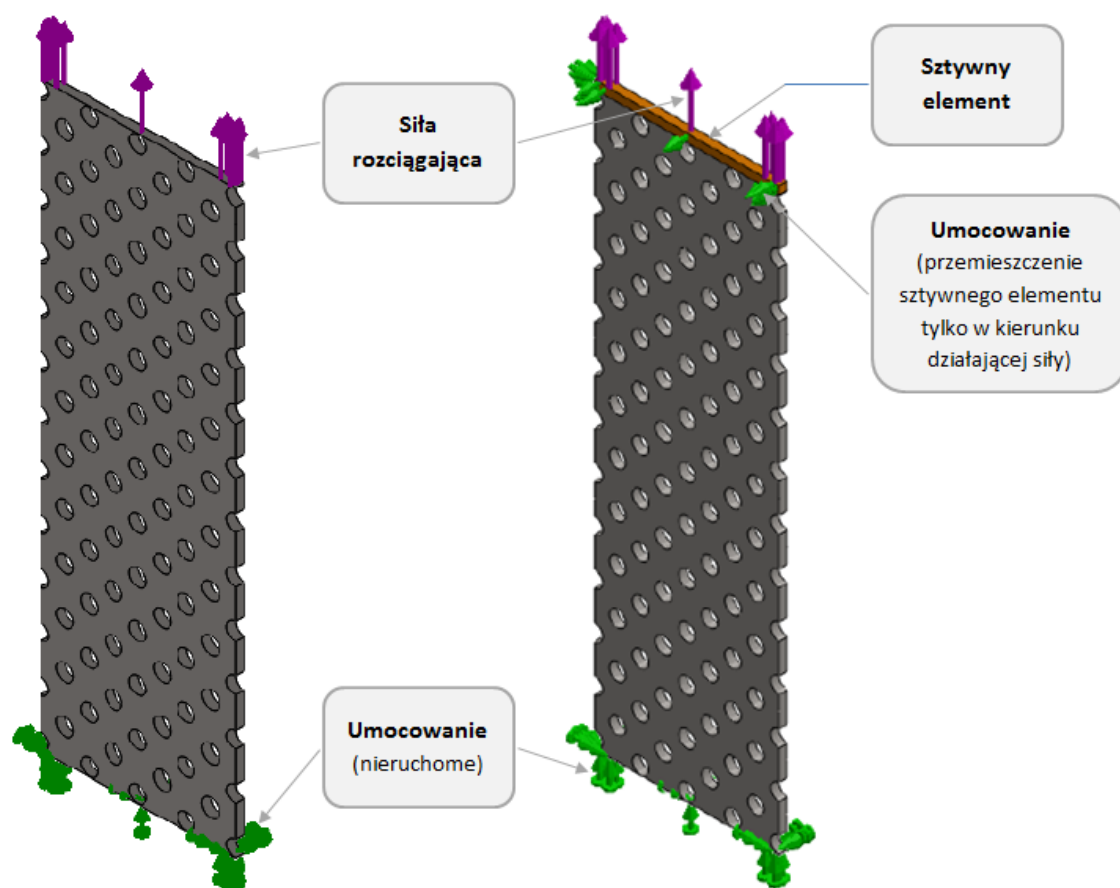
5.5.1. Jednoosiowe rozciąganie w zakresie sprężystym

Otrzymana dla jednoosiowego rozciągania liniowa zależność naprężenie – odkształcenie (wzdłużne) posłużyła do wyznaczenia efektywnego modułu Younga (równemu współczynnikowi kierunkowemu danej prostej – rys. 5.15) rozpatrywanych materiałów z prostym i heksagonalnym układem otworów. Przyjęte wartości siły rozciągającej (generującej w blasze perforowanej naprężenia odpowiednio niższe od granicy plastyczności materiału bazowego) zapewniały sprężysty charakter odkształcenia. Dla perforowanej blachy stalowej DC01 obciążenie to wynosiło od 100 do 600N, natomiast dla blachy perforowanej wykonanej ze stopu aluminium EN AW-5754 mieściło się w przedziale od 100 do 500N (w obu przypadkach stosowano odstęp równy 100N).

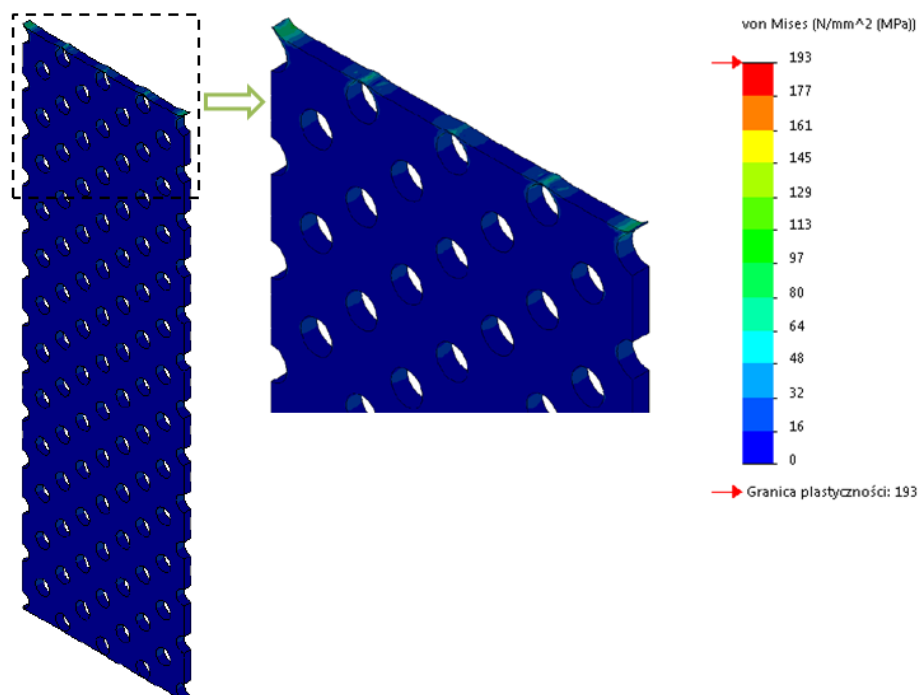


Rys. 5.15. Przykładowa zależność naprężenie – odkształcenie (wzdłużne) dla blachy DC01 z prostym układem perforacji (Po2s4, 0°) wyznaczona za pomocą badań numerycznych

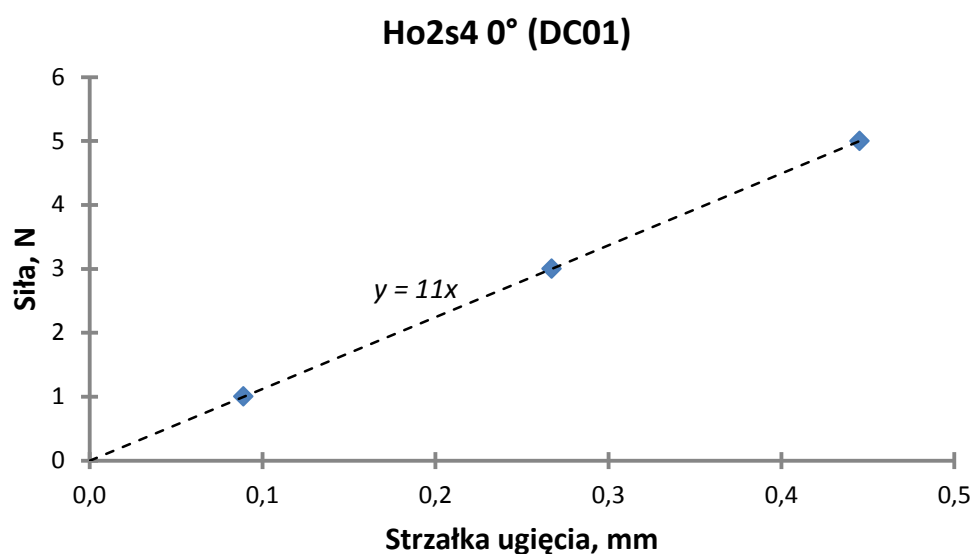
Przy ustalonej długości bazy pomiarowej próbek z blachy perforowanej w niektórych przypadkach (zależnie od parametrów perforacji i kierunku wycięcia) może wystąpić niedogodność związana z symulacją obciążenia zewnętrznego. Wynika to, z faktu, iż różny może być kształt i wielkość powierzchni (odpowiadająca przekrojowi poprzecznemu wyznaczonemu przez linię cięcia próbki) do której przykładana jest siła rozciągająca. Choć nie ma to istotnego znaczenia w kontekście wyznaczonej wartości efektywnego modułu Younga, to jednak może utrudniać analizę rozkładu naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej (poprzez m.in. zbyt wysoką koncentrację naprężeń w miejscu przyłożonego obciążenia w porównaniu do pozostałej objętości próbki). Na rys. 5.16 zaprezentowano przykładowy różny sposób symulacji obciążenia siłą rozciągającą dla blachy stalowej DC01 z perforacją prostą. W niniejszych badaniach numerycznych siłę osiową przykładano do sztywnego elementu (odpowiednio połączonego z perforowaną próbką – zapewniając nieodkształcalność powierzchni przekroju poprzecznego paska blachy w miejscu wiązania), co jak pokazały wstępne analizy, eliminuje to ewentualną nadmierną koncentrację naprężenia wynikającą ze sposobu symulacji takiego obciążenia. Przykładowo na rys. 5.17 i 5.18 przedstawiono rozkład naprężeń w blasze stalowej DC01 z perforacją prostą dla przypadków gdy następował bezpośredni kontakt siły rozciągającej (100N) z próbką (rys. 5.17) oraz gdy stosowano pośredni element sztywny (pominięty na schemacie w celu uwidocznienia powierzchni przekroju poprzecznego próbki w miejscu wiązania – rys. 5.18). Ze względu na małe wartości odkształceń, w celu lepszego zobrazowania różnic pomiędzy tymi wariantami, współczynnik skalowania dla zdeformowanych próbek przyjęto na poziomie 200.



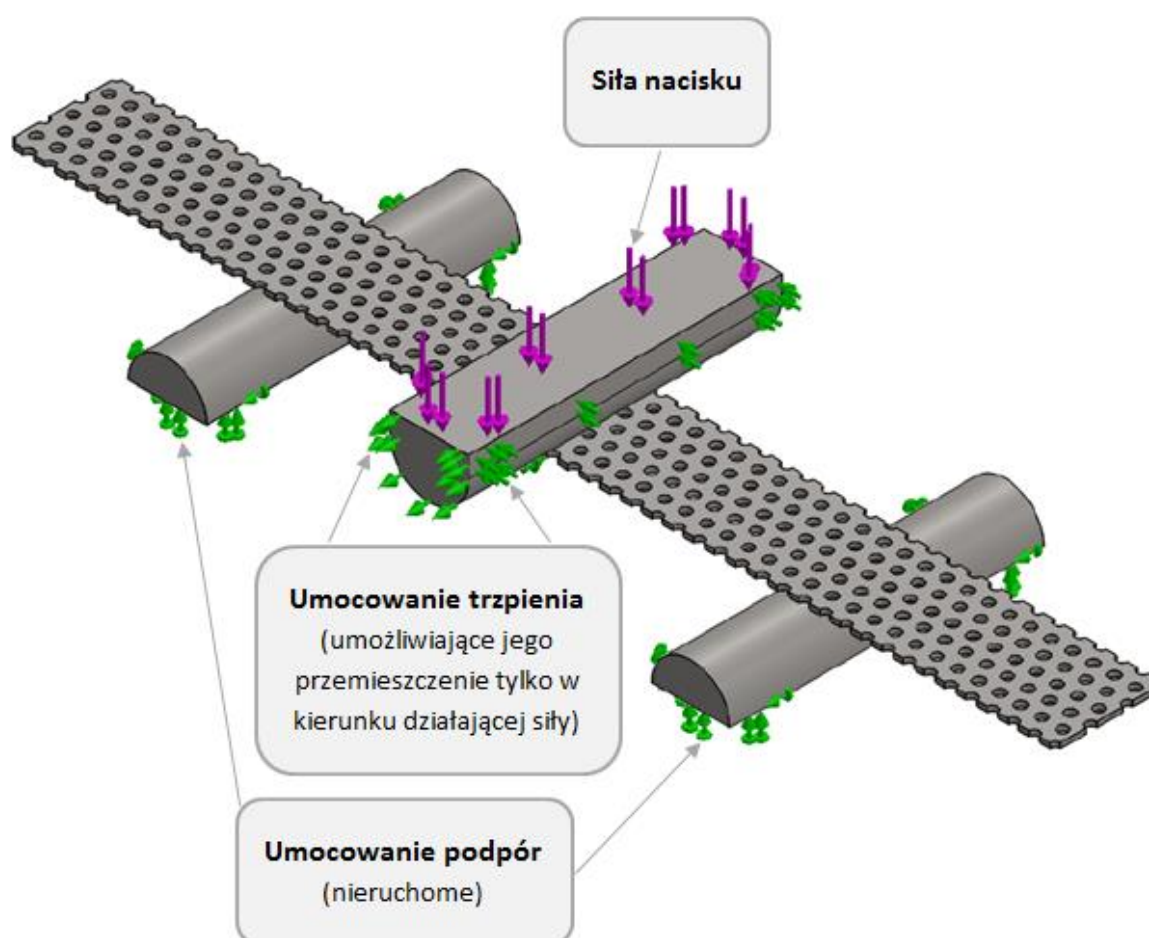
Rys. 5.16. Różne sposoby symulacji obciążenia zewnętrznego przyłożonego do stalowej blachy perforowanej (Po2s4, 45°) w próbie jednoosiowego rozciągania



Rys. 5.17. Rozkład naprężeń w blasce DC01 z prostym układem perforacji (45°), otrzymany poprzez bezpośrednie przyłożenie siły rozciągającej do próbki



Rys. 5.19. Przykładowa zależność siła – strzałka ugięcia dla blachy DC01 z heksagonalnym układem perforacji (Ho2s4, 0°), otrzymana na podstawie badań numerycznych



Rys. 5.20. Schemat symulacji trójpunktowego gięcia na przykładzie blachy z perforacją heksagonalną (Ho2s4, 0°)



Rys. 5.21. Umocowanie próbki z blachy perforowanej (Ho2s4, 0°)

Przeprowadzone wstępne symulacje gięcia pokazały, iż oprócz odkształcenia próbki może niekiedy nastąpić także jej niewielkie przesunięcie na podporach (choć nie wpływało to znacząco na wyznaczony finalnie efektywny moduł sprężystości wzdłużnej). Jednakże w celu jeszcze lepszego odzwierciedlenia wykonanych prób doświadczalnych (w żadnym przypadku nie zaobserwowano przesunięcia odkształcanego paska blachy perforowanej względem podpór) utworzono dodatkowe umocowanie giętych materiałów, co pozwoliło w zupełności wyeliminować tę niedogodność (rys. 5.21).

Podpory i trzpień narzędzia do trójpunktowego gięcia były w symulacji rozważane jako deformowalne i przypisano im własności stali narzędziowej 1.2083 (X40Cr14).

6. Wyniki badań i ich analiza

Niniejszy rozdział zawiera wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych rozpatrywanych materiałów perforowanych, istotnych w kontekście ich konstrukcyjnego przeznaczenia. Dokonano analizy wpływu wybranych parametrów perforacji na własności sprężyste i wytrzymałościowe blach perforowanych ze stali DC01 [387–389] i ze stopu aluminium EN AW-5754 dla jednoosiowego rozciągania i trójpunktowego gięcia. Ponadto, rozważane własności mechaniczne przedstawiono i przedyskutowano w odniesieniu do materiału referencyjnego (bez siatki otworów), a także uwzględniając wskaźnik ubytku masy W_m , co pozwala na bardziej wnikliwą charakterystykę rozpatrywanych materiałów inżynierskich. Otrzymane wyniki zaprezentowano m.in. w formie wykresów biegunowych (w zakresie od 0 do 90°), wizualizując rozkład badanych parametrów w płaszczyźnie blachy.

6.1. Wskaźnik ubytku masy blachy perforowanej

Jednym z kluczowych aspektów rozważanych podczas projektowania różnego typu konstrukcji jest jej masa. Przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości, na ogół dąży się do obniżania wartości tego parametru. W tym celu często rozpatruje się różne materiały biorąc pod uwagę ich wytrzymałość właściwą (stosunek wytrzymałości do gęstości). Generalnie, wyższa jej wartość w lepszym stopniu spełnia wymagania projektowe danej konstrukcji. Co oczywiste, w przypadku blachy perforowanej zawsze występuje pewien spadek masy (zależny od parametrów perforacji) w porównaniu do blachy macierzystej. Może to dodatkowo obniżyć masę elementów konstrukcyjnych wykonanych np. ze stopów metali lekkich [390, 391] czy też wysokowytrzymałych gatunków stali [392]. Ze względu na makroskopową niejednorodność blach perforowanych (obecność pustek oraz obszarów materialnie ciągłych) trudno odnosić się do gęstości, a w rezultacie także do wytrzymałości właściwej tego typu tworzywa. Mając to na uwadze, zaproponowano tzw. wskaźnik masy W_m [393], zdefiniowany jako stosunek masy blachy perforowanej m_p do masy blachy pełnej m :

$$W_m = \frac{m_p}{m} \quad (6.1)$$

W przypadku blach, perforowanej i pełnej, z tego samego materiału (ta sama gęstość materiału) i tej samej grubości, wskaźnik W_m można wyrazić za pomocą formuły:

$$W_m = 1 - P \quad (6.2)$$

gdzie: P - prześwit, zdefiniowany jako stosunek powierzchni otworów do całkowitej powierzchni blachy, objętej perforacją. Wywód, prowadzący od ogólnej definicji (6.1) do zależności (6.2), określającej wskaźnik masy dla przypadku spełniającego przyjęte założenia, jest następujący:

$$W_m = \frac{m_p}{m} = \frac{\rho V_p}{\rho V} = \frac{V_p}{V} = \frac{A_p g}{A g} = \frac{A_p}{A} = \frac{A - A_0}{A} = 1 - \frac{A_0}{A} = 1 - P$$

gdzie: ρ - gęstość materiału blachy, g - grubość blachy, V_p i A_p - odpowiednio objętość i powierzchnia blachy perforowanej, V i A - odpowiednio objętość i powierzchnia blachy pełnej, A_0 - powierzchnia otworów perforacji.

Określony spadek masy blachy perforowanej (wyrażony w niniejszej pracy za pomocą wskaźnika masy W_m) skutkuje pewną zmianą jej własności, której wartość zależy od podstawowych parametrów perforacji (układ, prześwit, kształt i profil otworów). Z tego względu dokonując analizy wybranych własności blach perforowanych istotne jest uwzględnienie poziomu ubytku masy. W tym celu dany parametr wygodnie jest odnieść bezpośrednio do wyznaczonego wskaźnika masy (np. E^*/W_m). Blachy perforowane wykonane z takiego samego materiału o jednakowym prześwicie i grubości (czyli identycznej wartości W_m), lecz z innym układem perforacji i/lub kształtem otworów mogą wykazywać różne własności. Wynika zatem stąd, iż istotne znaczenie ma także sposób „rozłożenia” masy, co w konsekwencji przekłada się na rozkład i wartość naprężeń w blasze z siatką otworów wywołany określonym schematem obciążenia.

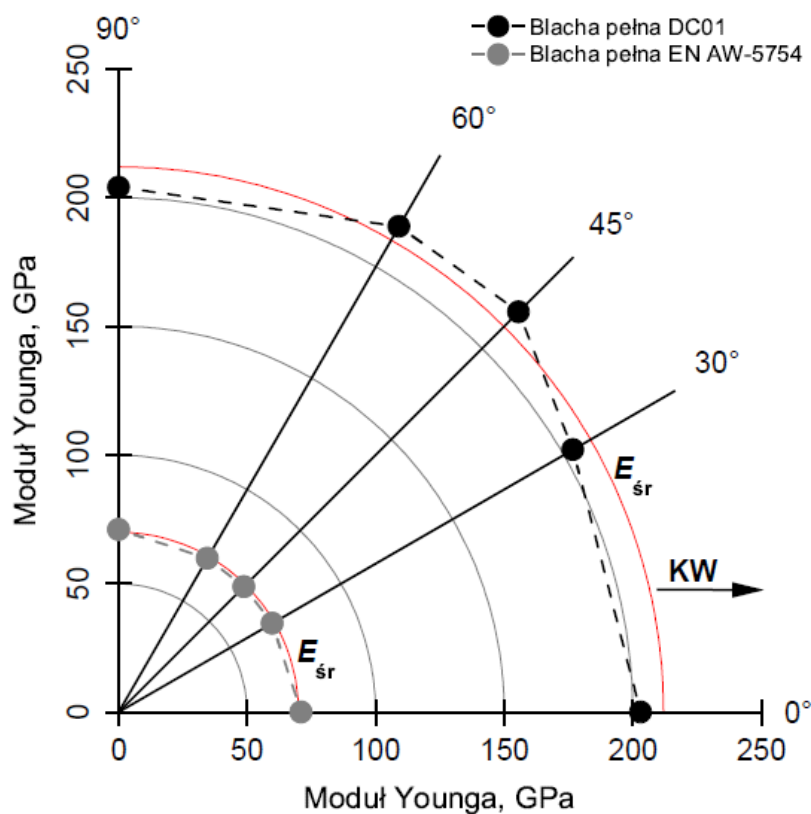
Jak wynika ze wzoru (6.2), wskaźnik masy W_m blachy bez perforacji (czyli o zerowym prześwicie) wynosi 1, natomiast dla blachy perforowanej jest zawsze niższy od podanej wartości ($0 < W_m < 1$) i maleje wraz ze wzrostem prześwitu. Tym samym im większy prześwit blachy perforowanej tym wskaźnik masy w większym stopniu kompensuje (odpowiednio podnosi) wartości rozważanych parametrów. Uwzględnienie wskaźnika masy pozwala ocenić efektywność danego rodzaju perforacji dotyczącą ilościowego przełożenia masy blachy perforowanej na jej własności. W ten sposób można na przykład porównać wpływ różnego typu perforacji na obniżenie wybranych własności blachy niezależnie od wartości prześwitu [394]. Należy dodać, iż analiza własności blach perforowanych w oparciu

o tak zdefiniowany wskaźnik masy jest uzasadniona wówczas, gdy jej celem jest określenie i porównanie wybranych charakterystyk z blachą macierzystą (tej samej grubości i gatunku).

6.2. Wartości i rozkład modułu Younga

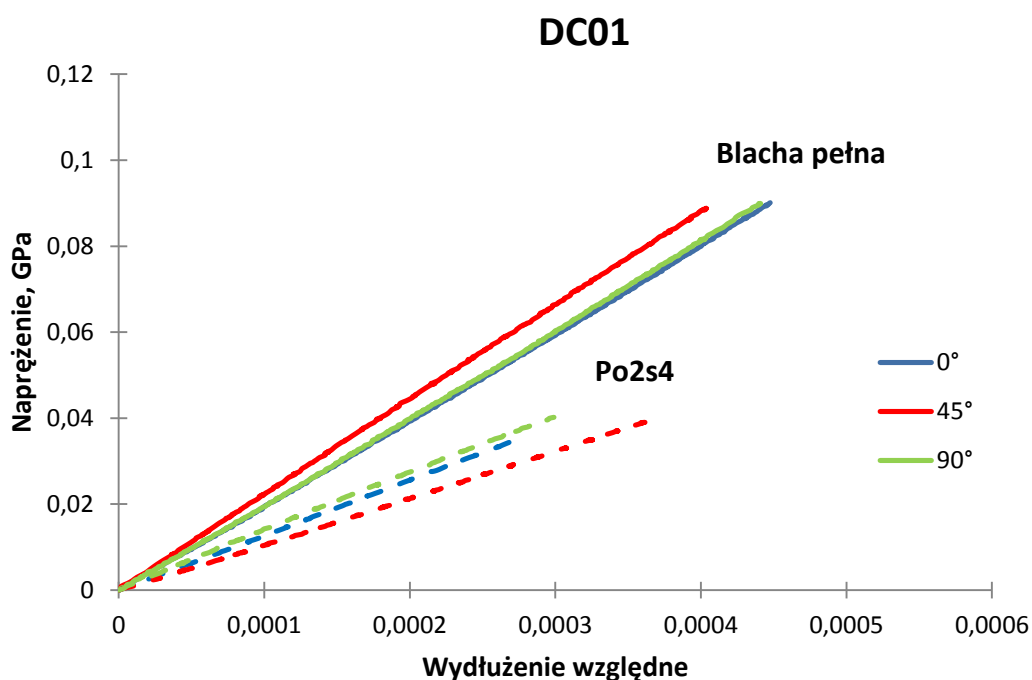
Moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) jako podstawowy parametr opisujący zachowanie materiałów konstrukcyjnych w stanie sprężystym wyznaczono dla charakterystycznych kierunków perforacji prostej i heksagonalnej. W tej części skoncentrowano się na analizie własności sprężystych w oparciu o wartości i rozkład modułu Younga określonego w statycznej próbie jednoosiowego rozciągania.

Moduł Younga dla rozpatrywanych kierunków w płaszczyźnie blachy pełnej: stalowej DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754, przedstawiono na rys. 6.1. W przypadku blachy stalowej, charakteryzującej się zdecydowanie wyższą wartością tego parametru (równy trzy krotnie, biorąc pod uwagę otrzymane wartości średnie dla obu materiałów) zaobserwowano mniej jednorodny jego rozkład w płaszczyźnie arkusza. Pod tym względem blacha EN AW-5754 odznaczała się wysoką izotropią (niemal taka sama wartość modułu Younga dla wszystkich badanych kierunków).



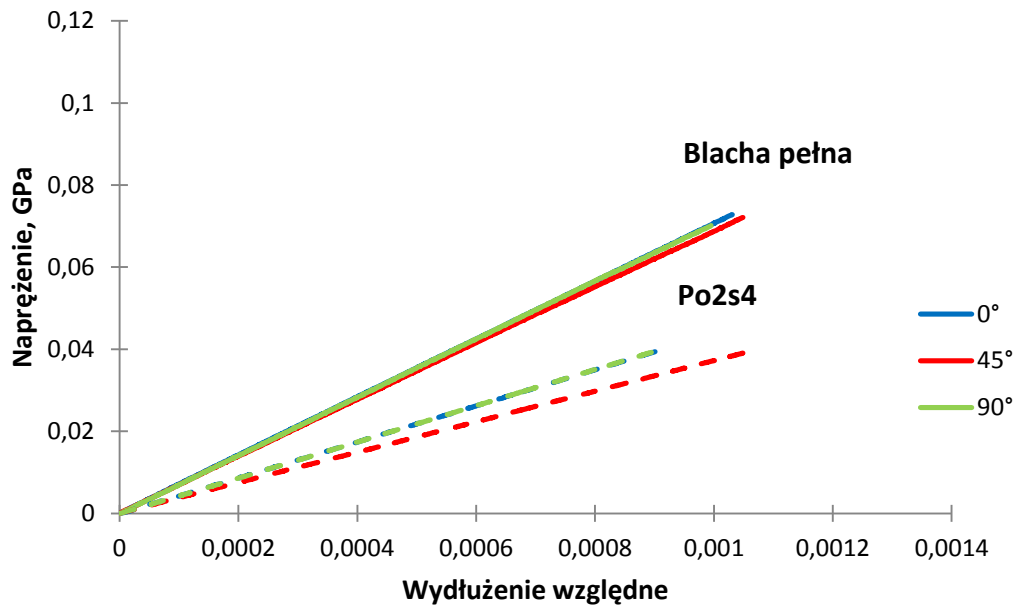
Rys. 6.1. Rozkład modułu Younga blachy stalowej DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754 bez perforacji

Przykładowe charakterystyki $\sigma - \epsilon$ dla blachy stalowej DC01 i ze stopu EN AW-5754 z perforacją prostą, zaprezentowano odpowiednio na rys. 6.2 i 6.3, natomiast z perforacją heksagonalną na rys. 6.6 i 6.7. Chociaż wartość średnia modułu Younga dla danego kierunku mogła się nieco różnić od jego poszczególnych wartości uzyskanych w określonych cyklach pomiarowych, to przedstawione przykładowe zależności $\sigma - \epsilon$ w zakresie liniowo-sprężystym dobrze odzwierciedlają bardziej ogólną charakterystykę, dokonaną na podstawie otrzymanych wyników cząstkowych (są w tym względzie reprezentatywne).



Rys. 6.2. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \epsilon$ w zakresie sprężystym blachy DC01 z perforacją prostą

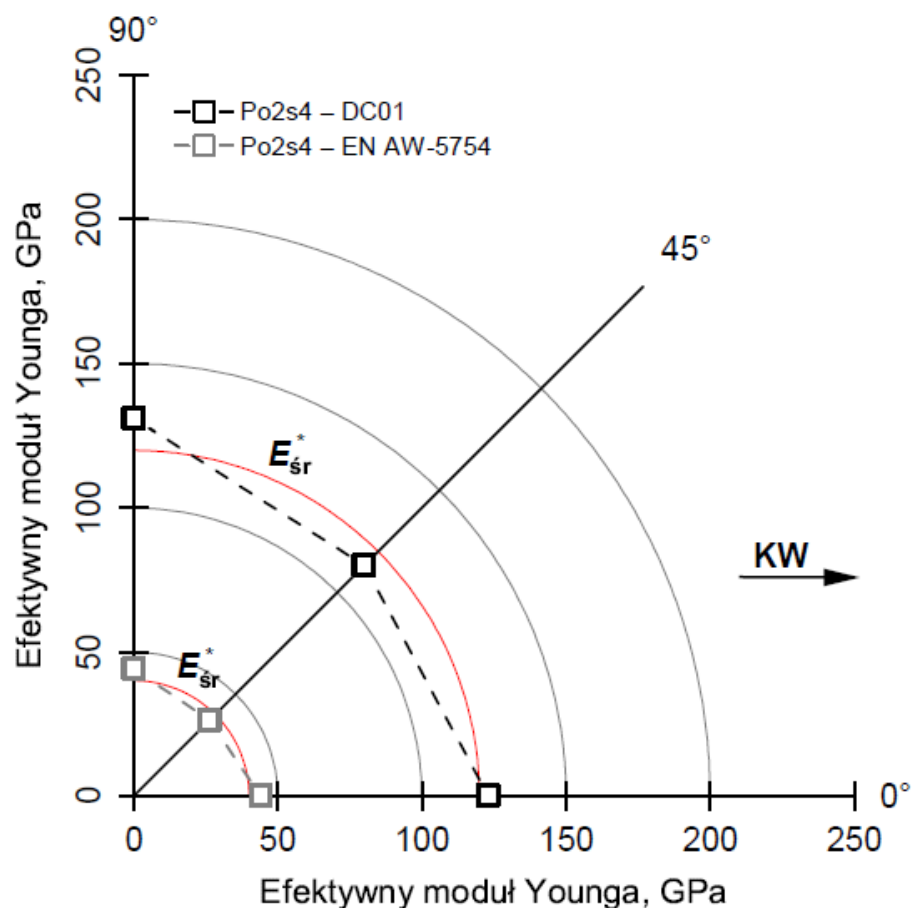
EN AW-5754



Rys. 6.3. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \epsilon$ w zakresie sprężystym blachy EN AW-5754 z perforacją prostą

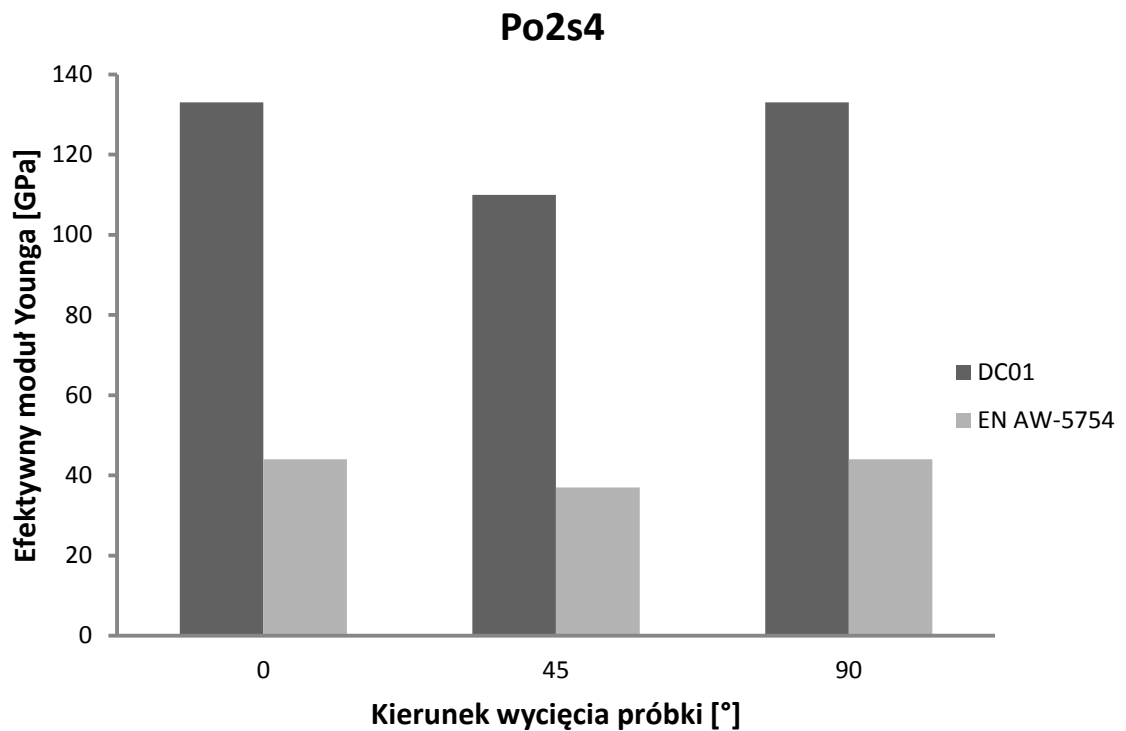
Zarówno blacha stalowa DC01 jak również EN AW-5754 wykazuje podobny spadek modułu Younga dla odpowiednich kierunków spowodowany perforacją w układzie prostym (rys. 6.4). Dla orientacji 0° i 90° w przypadku blachy stalowej DC01 jego wartość wyniosła odpowiednio 40 i 36%, natomiast dla blachy EN AW-5754 była identyczna, na poziomie 38%. Zauważalnie większy spadek rozważanego parametru wystąpił dla kierunku 45° i wynosił kolejno 49 i 46% dla blachy stalowej i ze stopu aluminium.

W wyniku perforacji prostej średnia wartość modułu Younga w płaszczyźnie blachy stalowej DC01 zmalała o 44%, a blachy ze stopu EN AW-5754 o 42% (rys. 6.4). Warto dodać, iż anizotropia własności sprężystych blachy perforowanej wynikająca tylko z geometrycznych cech siatki otworów jest tym lepiej dostrzegalna im wyższa jednorodność rozkładu modułu Younga blachy macierzystej (przed perforacją). Odnosząc to do analizowanego przypadku, nieco dokładniejszej oceny anizotropowego wpływu prostego układu otworów na zachowanie blach z tym rodzajem perforacji w obszarze sprężystym (bez porównania z materiałem referencyjnym) można dokonać na podstawie wyników dla blachy perforowanej ze stopu aluminium, gdzie efektywny moduł Younga dla kierunku 45° stanowił ok. 84% wartości tego parametru w stosunku do kierunków 0° i 90° , natomiast dla blachy stalowej był to stosunek równy odpowiednio ok. 92 i 86%.



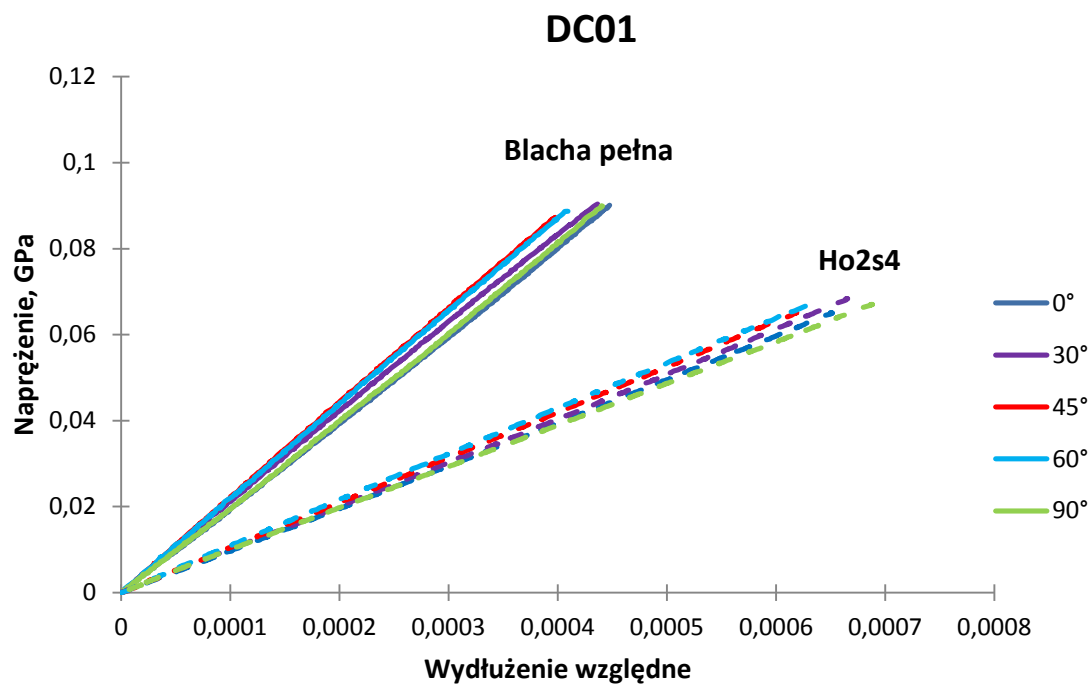
Rys. 6.4. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z prostym układem perforacji

Badania numeryczne dotyczące prostego układu perforacji (rys. 6.5), przeprowadzone w oparciu o model materiału idealnie izotropowego, wykazały dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi. W tym przypadku, niezależnie od materiału, dla kierunków 0° i 90° wartość modułu Younga uległa obniżeniu o 37%, natomiast w kierunku pośrednim 45° odnotowano 48 i 47% spadek, odpowiednio dla blachy DC01 i EN AW-5754 (tym samym wartość rozważanej stałej sprężystej dla orientacji 45° stanowi nieco ponad 80% jej wartości względem kierunków wzajemnie prostopadłych 0° i 90°). Ponadto, wyznaczony numerycznie średni efektywny moduł Younga w płaszczyźnie blachy perforowanej (122 GPa – blacha DC01 i 41 GPa – blacha EN AW-5754) był mocno zbliżony do wyniku otrzymanego eksperymentalnie (120 GPa – blacha DC01 i 40 GPa – blacha EN AW-5754).

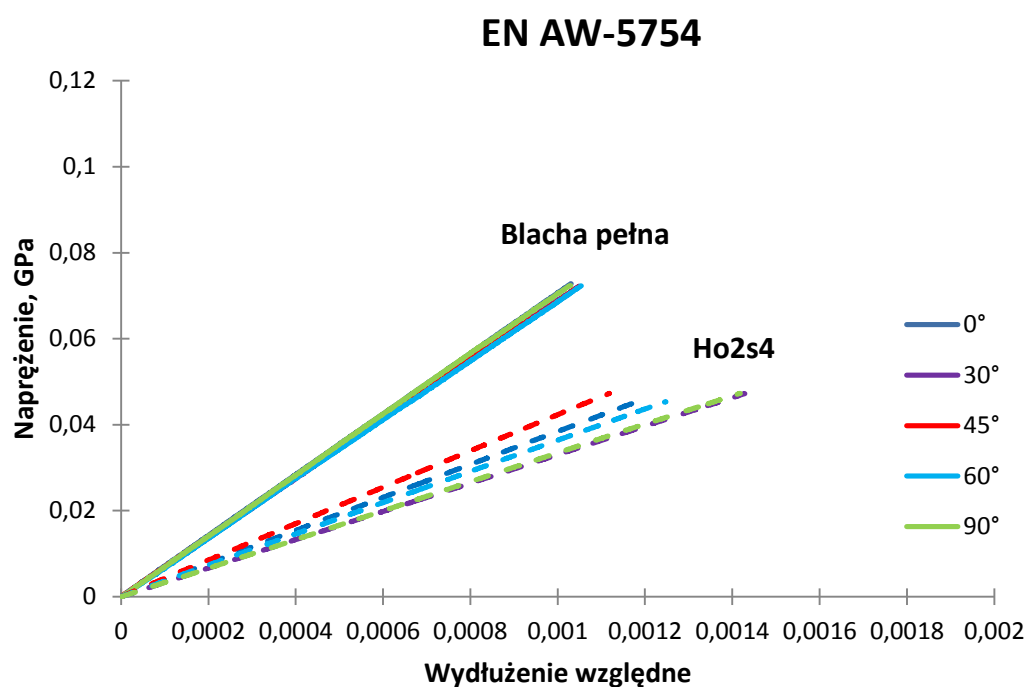


Rys. 6.5. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z prostym układem perforacji (symulacja numeryczna)

Perforacja heksagonalna spowodowała silnie równomierny spadek modułu Younga w płaszczyźnie blachy stalowej DC01, który dla kierunków 0° i 60° wynosił 51%, natomiast w kierunkach 30° i 90° był równy 52% (rys. 6.8). Dla orientacji pośredniej 45° odnotowano 53% obniżenie rozpatrywanego parametru. W przypadku blachy ze stopu aluminium, heksagonalny układ otworów skutkował także zbliżonym spadkiem modułu Younga w jej płaszczyźnie tj. dla kierunków 0° i 60° wynosił odpowiednio 46% i 48 %, nieco większą jego wartość równą 52% i 53% otrzymano kolejno dla orientacji 30° i 90°. Kierunek 45° charakteryzował się pod tym względem najmniejszym 40% spadkiem.



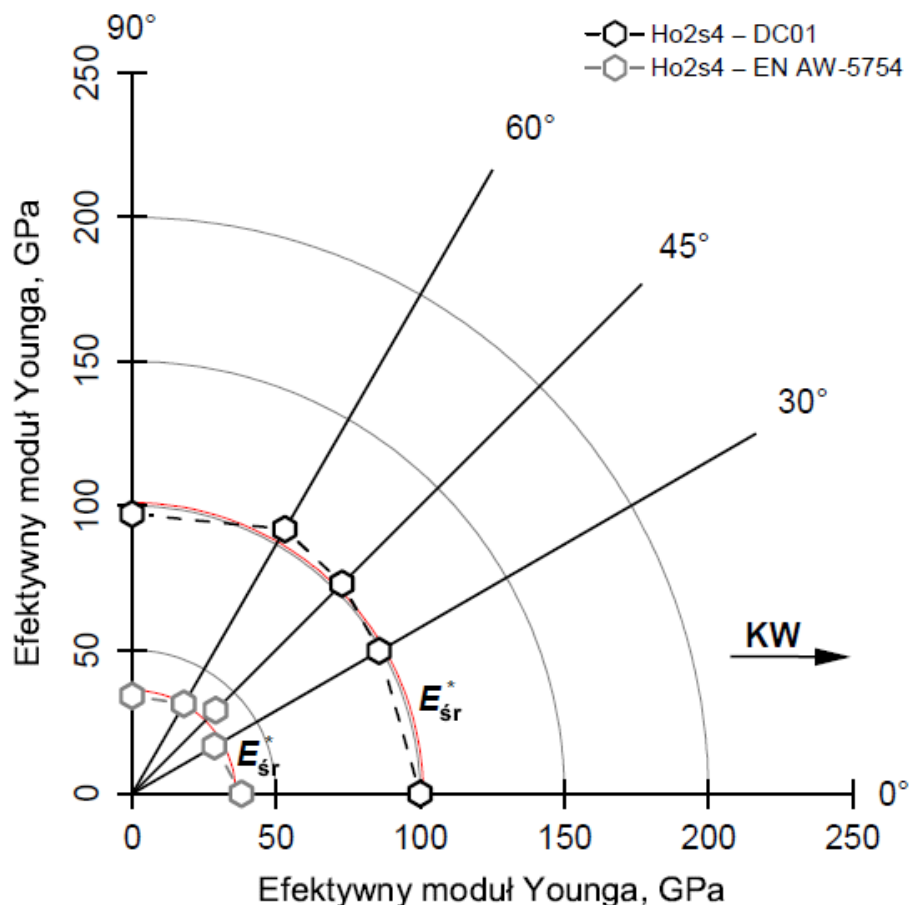
Rys. 6.6. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \epsilon$ w zakresie sprężystym blachy DC01 z perforacją heksagonalną



Rys. 6.7. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \epsilon$ w zakresie sprężystym blachy EN AW-5754 z perforacją heksagonalną

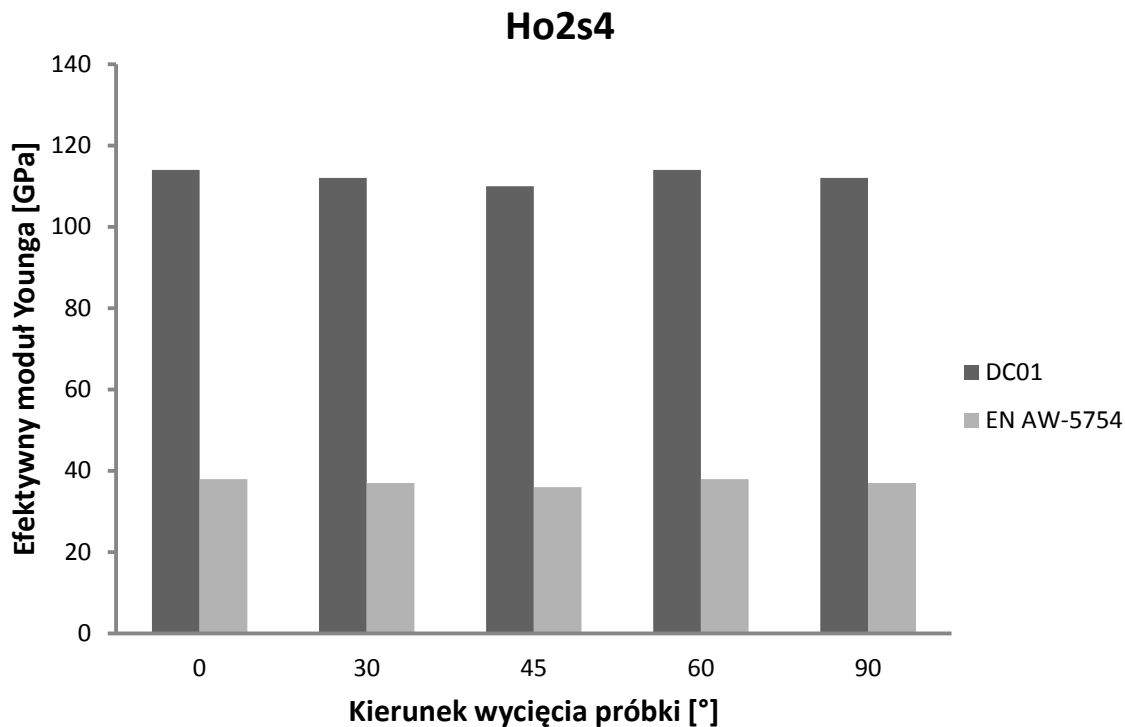
Średnia wartość efektywnego modułu Younga blachy stalowej DC01 z perforacją heksagonalną w odniesieniu do blachy macierzystej uległa obniżeniu o 52%, natomiast blacha

EN AW-5754 z takim samym rodzajem perforacji wykazywała o 48% mniejszą wartość tej stałej sprężystej w stosunku do analogicznego parametru dla materiału referencyjnego (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji

Analiza numeryczna potwierdziła, iż perforacja w układzie heksagonalnym skutkuje bardzo podobnym obniżeniem modułu sprężystości wzdłużnej blachy pełnej w każdym z rozpatrywanych kierunków (rys. 6.9), tj. dla orientacji 0° i 60° spadek był równy 46%, a dla kierunków 30° i 90° wynosił 47% niezależnie od materiału. Dla kierunku pośredniego 45° efektywny moduł Younga perforowanej blachy stalowej był o 48% niższy w porównaniu do modułu Younga blachy macierzystej, natomiast dla perforowanej blachy EN AW-5754 spadek ten wynosił 49%. Obliczona numerycznie średnia wartość analizowanej stałej sprężystej w płaszczyźnie blachy z perforacją heksagonalną była wyższa w porównaniu do badań doświadczalnych, przy czym w przypadku blachy stalowej różnica wynosiła ok. 10%, a dla blachy ze stopu aluminium ok. 3%.

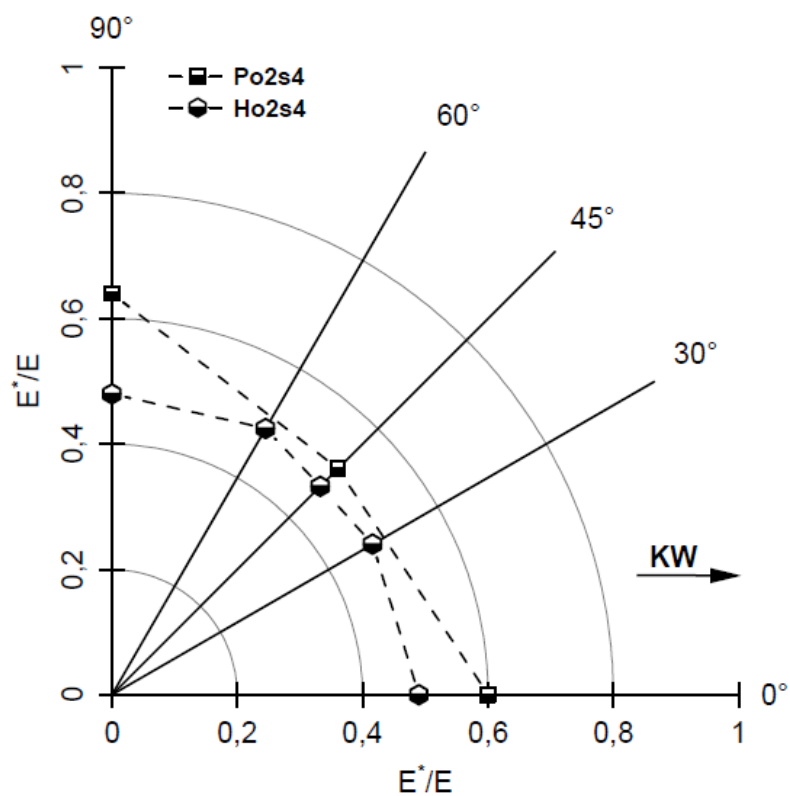


Rys. 6.9. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji (symulacja numeryczna)

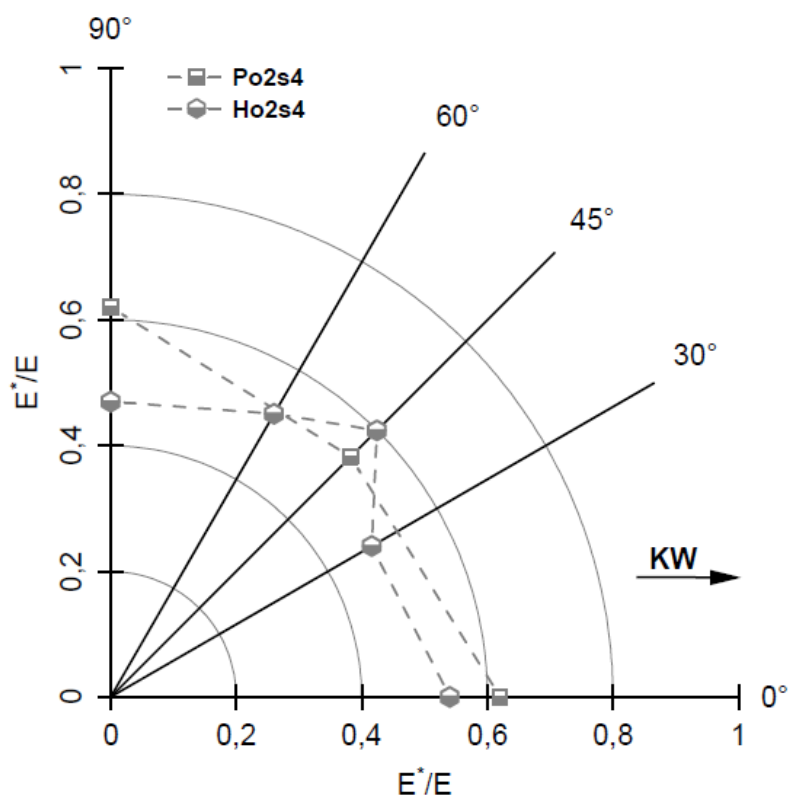
Uzyskane wyniki doświadczalne i numeryczne wykazały, iż spadek modułu Younga blachy pełnej (zarówno dla wybranego kierunku w jej płaszczyźnie jak i wartości średniej) spowodowany regularnym (prostym i heksagonalnym) układem perforacji jest niemal taki sam dla obu badanych materiałów. Stąd widać, iż wpływ samej perforacji na zmianę określonych własności blachy litej można uniezależnić od rodzaju materiału i wyrazić za pomocą ogólnego stosunku X^*/X , gdzie: X^* to rozpatrywany efektywny parametr dla blachy perforowanej, natomiast X to analogiczny parametr dla macierzystej blachy pełnej.

Wyznaczony w ten sposób współczynnik (w zależności od rodzaju perforacji i związanej z tym stopniem anizotropii, potrzebny jest więcej niż jeden taki parametr do wystarczającej charakterystyki mechanicznej blachy perforowanej) pozwala łatwo określić własności blachy po perforacji dla danego materiału z którego została wytworzona.

Efektywny moduł Younga badanych blach perforowanych w odniesieniu do modułu Younga materiału referencyjnego wyrażony poprzez stosunek E^*/E przedstawiono na rys. 6.10 i 6.11 dla blachy stalowej i na rys. 6.12 i 6.13 dla blachy ze stopu aluminium.



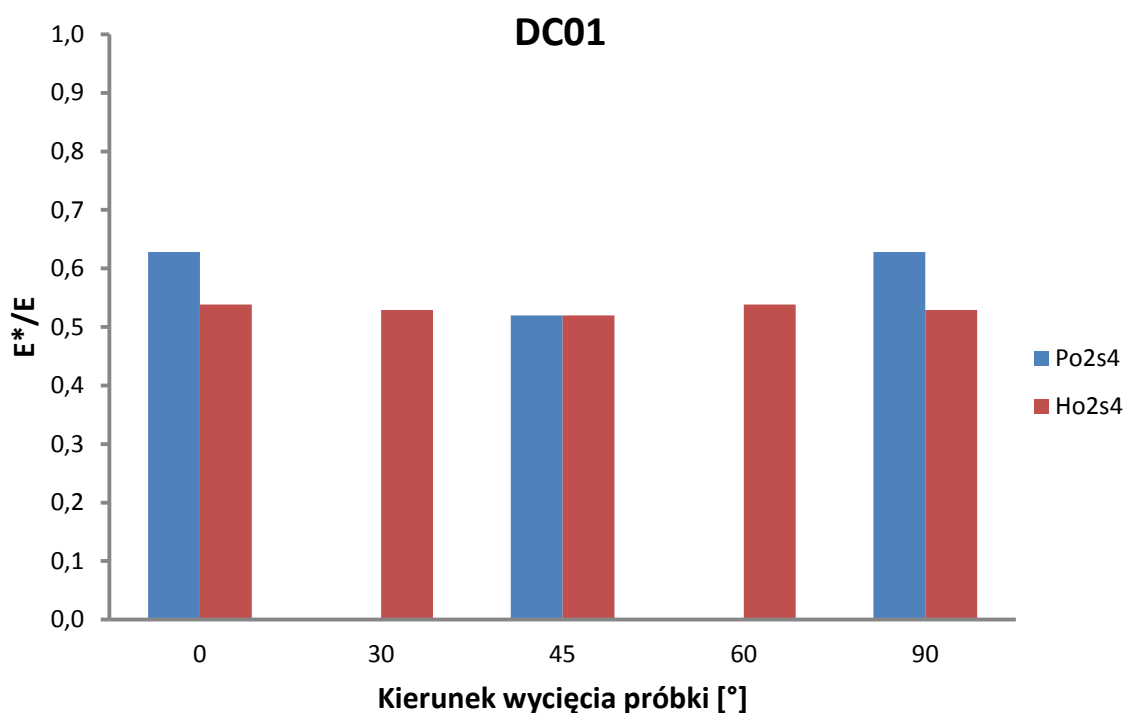
Rys. 6.10. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy DC01 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej



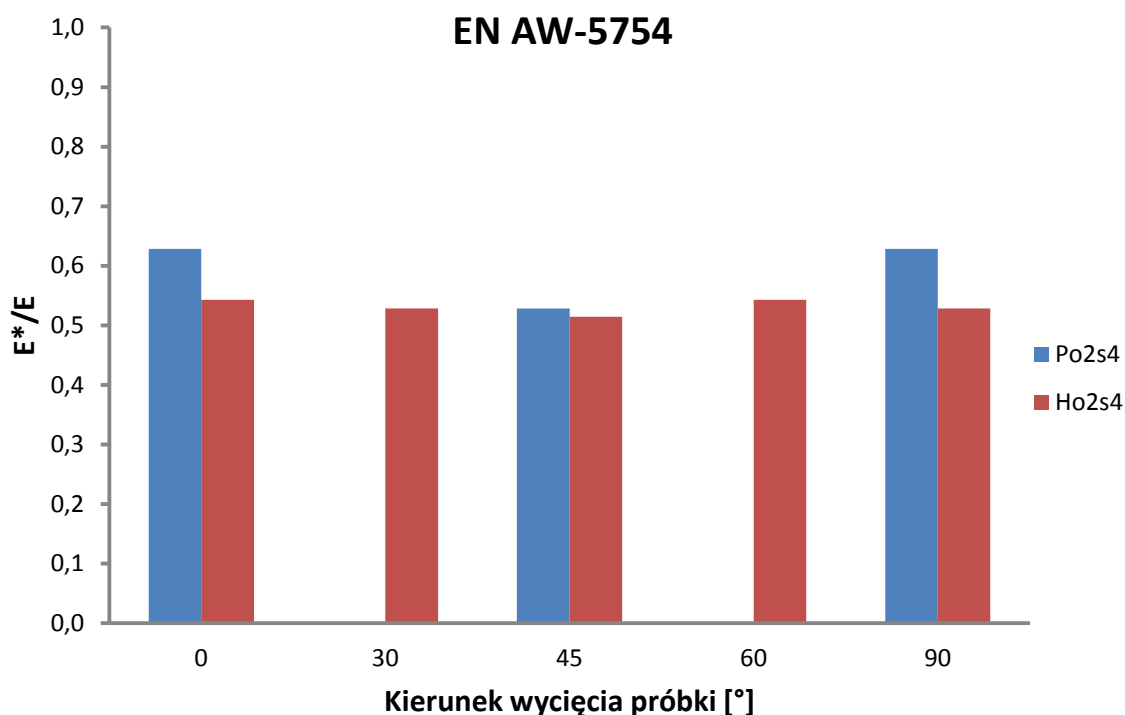
Rys. 6.11. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej

Dla charakterystycznych kierunków perforacji prostej 0° i 90° stosunek efektywnego modułu Younga do modułu Younga blachy macierzystej wyniósł odpowiednio 0,60 i 0,64 w przypadku blachy stalowej, natomiast taka sama wartość 0,62 wystąpiła dla obu tych kierunków w płaszczyźnie blachy EN AW-5754. Mniejszą wartość rozważanego parametru otrzymano dla orientacji 45° , która wynosiła: 0,51 – blacha DC01 oraz 0,54 – blacha EN AW-5754. Zarówno blacha stalowa jak i ze stopu aluminium z perforacją heksagonalną wykazywały dość jednorodny rozkład efektywnego modułu Younga, przy czym jego wartość była niemal taka sama lub identyczna dla odpowiednich zestawień kierunków tej perforacji tj. 0° i 60° (0,49 – blacha stalowa, 0,54 i 0,52 – blacha EN AW-5754) oraz 30° i 90° (0,48 – blacha stalowa, 0,48 i 0,47 – blacha EN AW-5754).

Stosunek E^*/E dla orientacji 0° i 90° w płaszczyźnie blachy stalowej i ze stopu EN AW-5754 z perforacją prostą był wyższy w porównaniu z analogicznymi kierunkami perforacji heksagonalnej. W przypadku blachy stalowej różnica wynosiła 19% (0°) i 26% (90°), natomiast dla blachy EN AW-5754 12% (0°) i 23% (90°). Bardziej zbliżone wartości dla obu zestawionych ze sobą kierunków rozpatrywanych perforacji dostarczyła analiza numeryczna, gdzie otrzymano 14% (0°) i 16% (90°) różnicę dla blachy stalowej (rys. 6.12) i ze stopu aluminium (rys. 6.13).



Rys. 6.12. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy DC01 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej (symulacja numeryczna)

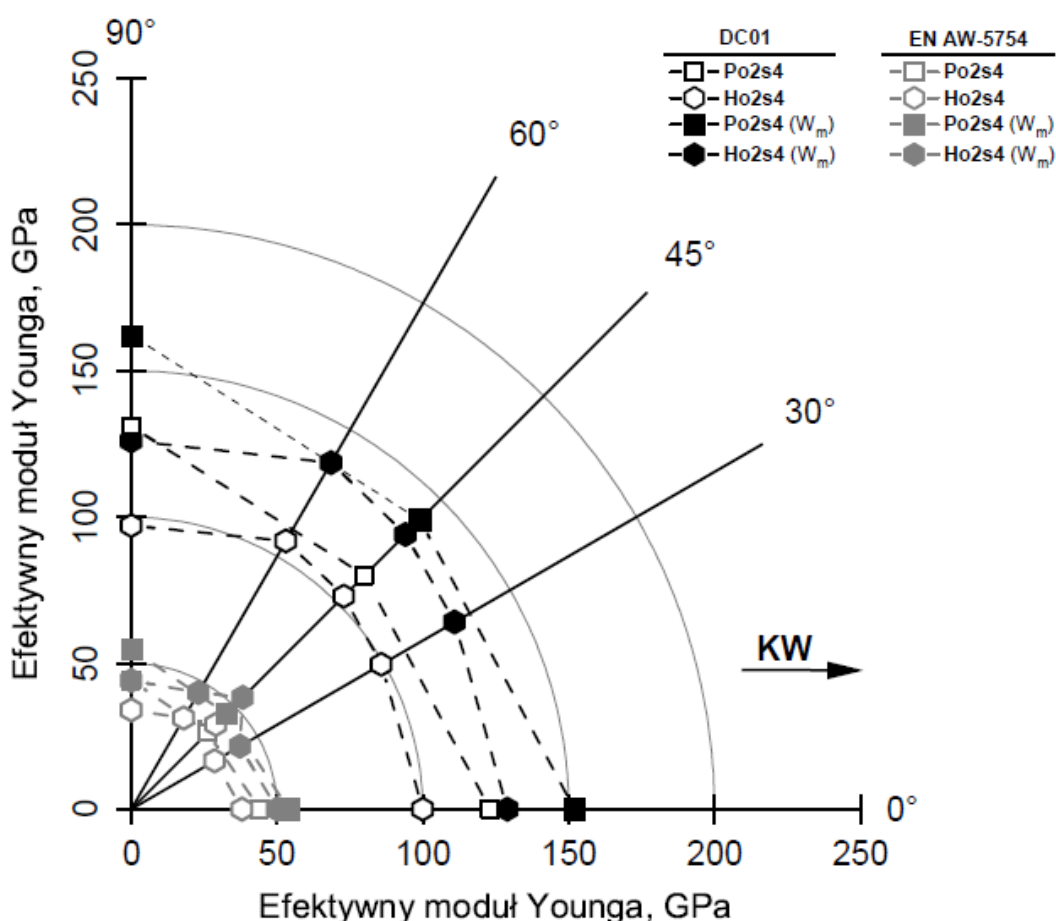


Rys. 6.13. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej (symulacja numeryczna)

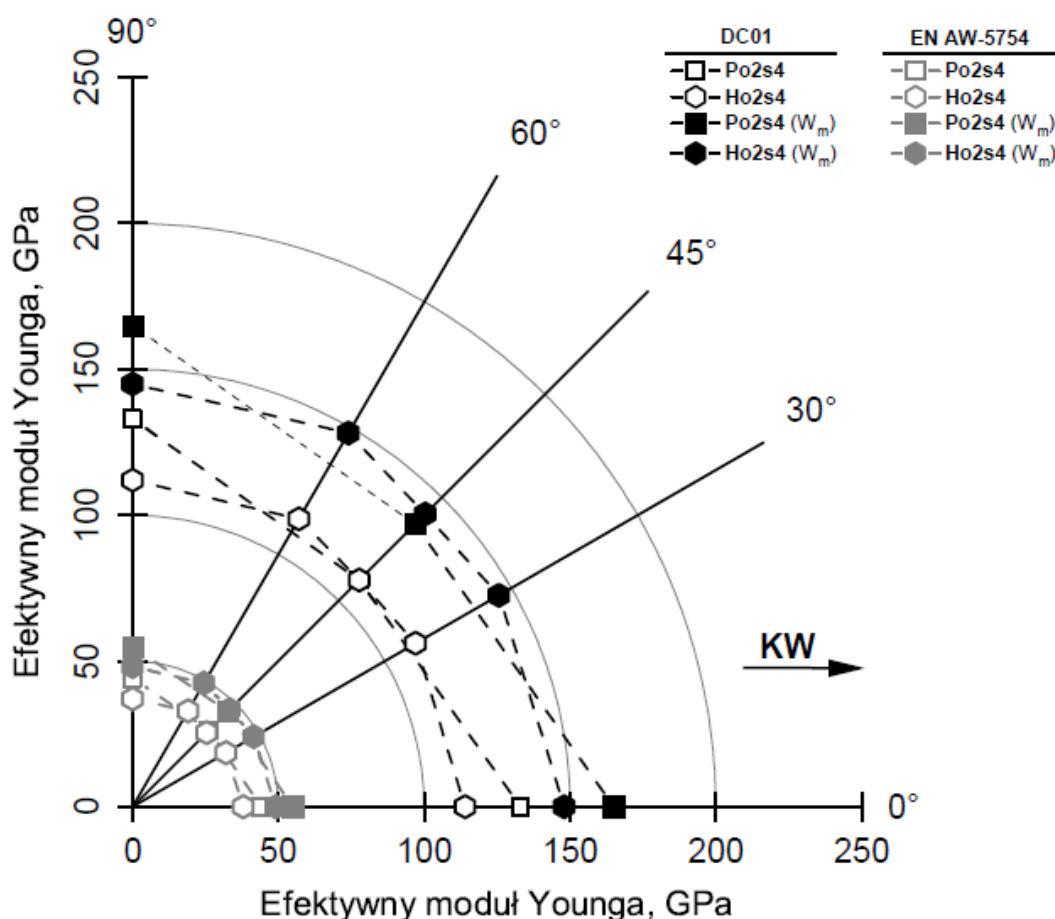
Ogólnie można stwierdzić, iż rozważane własności blach perforowanych (zazwyczaj dla wybranych charakterystycznych kierunków regularnego układu otworów) można określić poprzez odpowiednią modyfikację własności blachy macierzystej, np. posługując się już wyznaczonym dla danej perforacji współczynnikiem (np. E^*/E), przyjmującym najczęściej różną wartość zależnie od orientacji w płaszczyźnie blachy.

Ponadto, użyteczne odniesienie dla blachy perforowanej może stanowić blacha pełna tego samego gatunku i grubości także w celu obliczenia wskaźnika ubytku masy (zdefiniowanego w podrozdziale 6.1.). Na rys. 6.14 i 6.15 przedstawiono odpowiednio wyniki eksperymentalne i numeryczne efektywnego modułu Younga z uwzględnieniem tego parametru. Co oczywiste, w każdym rozważanym przypadku wartość tego parametru wzrosła wprost proporcjonalnie do wielkości prześwitu danej perforacji. Dla blachy perforowanej w układzie prostym wzrost tej stałej sprężystej był zatem równy ok. 20%, natomiast dla heksagonalnego układu otworów wynosił ok. 23%. Analizując wyniki eksperymentalne dotyczące własności sprężystych badanych materiałów w odniesieniu do wskaźnika ubytku masy, można stwierdzić, iż dla prostego układu otworów, średnia wartość efektywnego modułu Younga perforowanej blachy stalowej była mniejsza o ok. 30% w stosunku do blachy

macierzystej, natomiast blacha perforowana ze stopu EN AW-5754 wykazywała pod tym względem o 28% niższą wartość względem materiału referencyjnego. W przypadku heksagonalnego układu otworów, średni efektywny moduł sprężystości wzdłużnej był niższy o ok. 38% i 32% odpowiednio dla perforowanej blachy stalowej i ze stopu aluminium w porównaniu do materiału bazowego. Można zatem stwierdzić, iż nawet po uwzględnieniu wskaźnika ubytku masy (mniejszego dla perforacji heksagonalnej) blacha z perforacją prostą charakteryzuje się nadal (choć w mniejszym stopniu) wyższą średnią wartością efektywnego modułu Younga niż blacha z heksagonalnym układem otworów. Dla kierunku 0° różnica wynosiła 15% – blacha stalowa i 9% – blacha EN AW-5754, natomiast dla orientacji 90° była równa 23% – blacha stalowa i 20% – blacha EN AW-5754. Wyniki analizy numerycznej potwierdziły tę tendencję.



Rys. 6.14. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną z uwzględnieniem wskaźnika masy



Rys. 6.15. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną z uwzględnieniem wskaźnika masy (symulacja numeryczna)

Widać zatem, iż prosty układ otworów cylindrycznych skutkuje nieco wyższymi własnościami sprężystymi. Z kolei, heksagonalny układ perforacji charakteryzuje się niższą anizotropią rozkładu efektywnego modułu Younga.

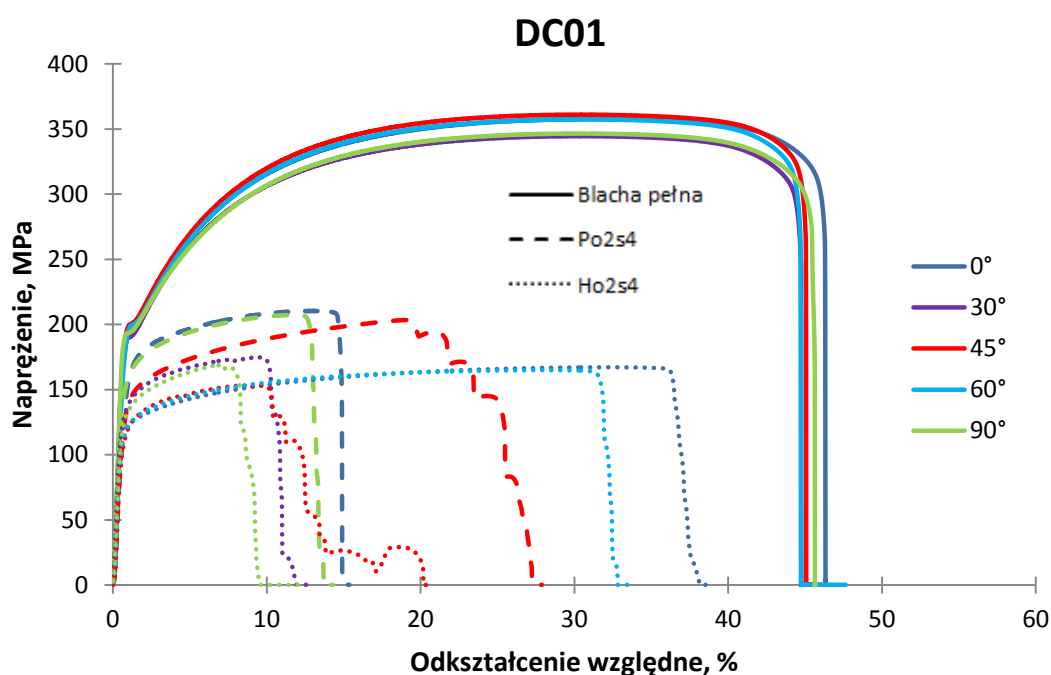
Należy dodać, iż geometryczne cechy siatki otworów badanych perforacji stanowiły dominujący czynnik, wpływający na stopień jednorodności rozważanych własności w płaszczyźnie perforowanej blachy stalowej i ze stopu aluminium. Mniejsze znaczenie miała anizotropia materiału macierzystego.

6.3. Wartości i rozkład własności wytrzymałościowych

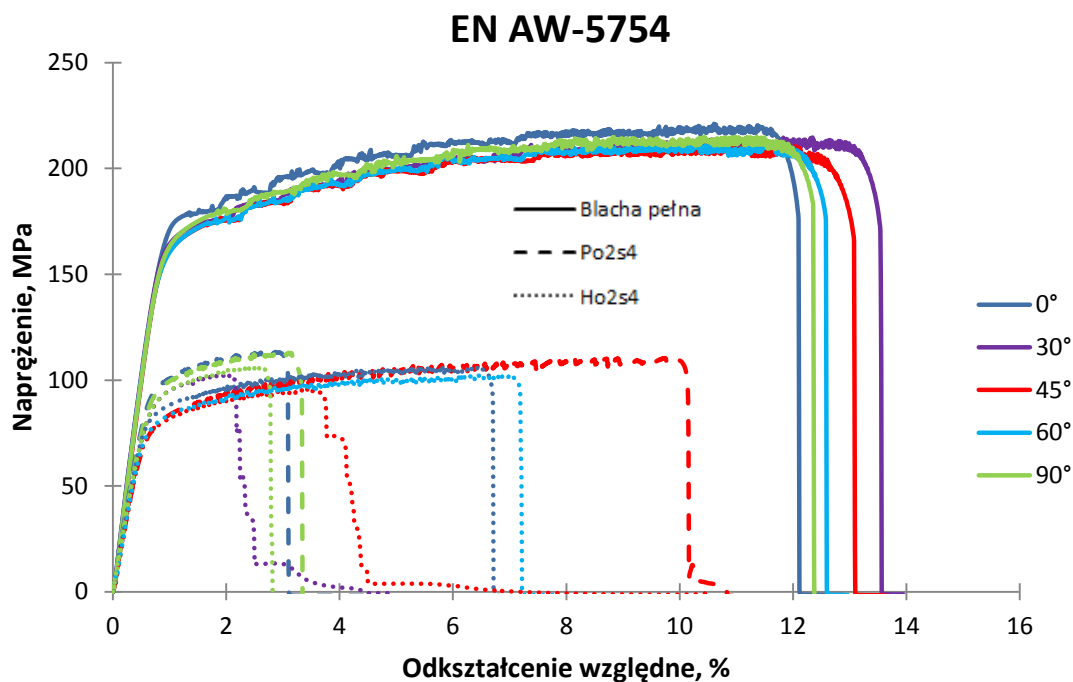
Inne kluczowe parametry rozpatrywane w projektowaniu konstrukcji obok modułu sprężystości wzdłużnej to granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie. Perforacja powoduje nie tylko spadek własności wytrzymałościowych blachy macierzystej, ale wpływa także na zmianę kształtu krzywej reprezentującej zależność $\sigma - \epsilon$ w zakresie odkształceń trwałych. Warto dodać, iż obniżeniu wartości efektywnego modułu Younga blachy perforowanej nie towarzyszy utrata liniowego charakteru rozważanej relacji w obszarze sprężystym.

Na globalne odkształcenie blachy perforowanej składa się odkształcenie materiału i deformacja otworów, która może skutkować zmianą stanu naprężenia i odkształcenia w poszczególnych jej obszarach (nawet w przypadku jednoosiowego rozciągania). Niestabilność stanu naprężenia blach perforowanych jest istotna zwłaszcza w przypadku gdy kierunek obciążenia zewnętrznego nie pokrywa się z osią symetrii ośrodka (badana perforacja prosta i heksagonalna wykazują odpowiednio symetrię podwójną i potrójną). Zakłócenia te wynikają z pojawiających się odkształceń postaciowych obecnych w płaszczyźnie blachy perforowanej obok jej odkształceń liniowych (przewężenia i wydłużenia osiowego).

Przebieg odkształcenia badanych materiałów aż do momentu utraty ich spójności w statycznej próbie jednoosiowego rozciągania przedstawiono na rys. 6.16 i 6.17.

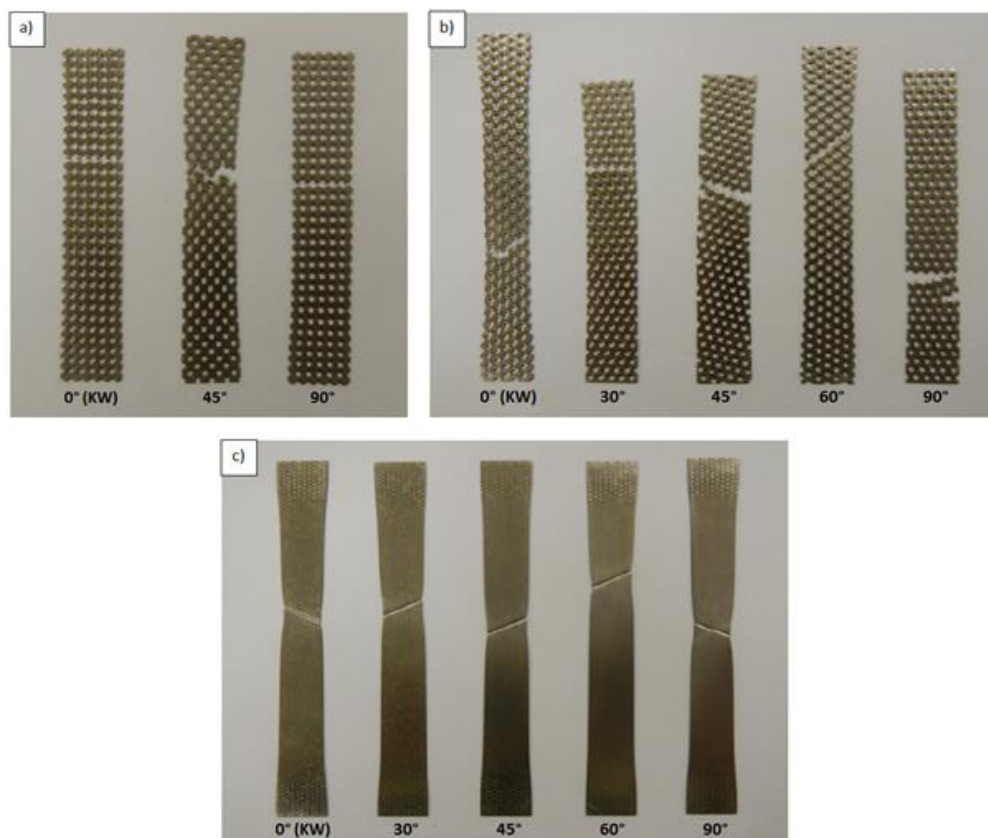


Rys. 6.16. Zestawienie krzywych rozciągania blachy DC01 pełnej oraz z perforacją prostą (Po2s4) i heksagonalną (Ho2s4)

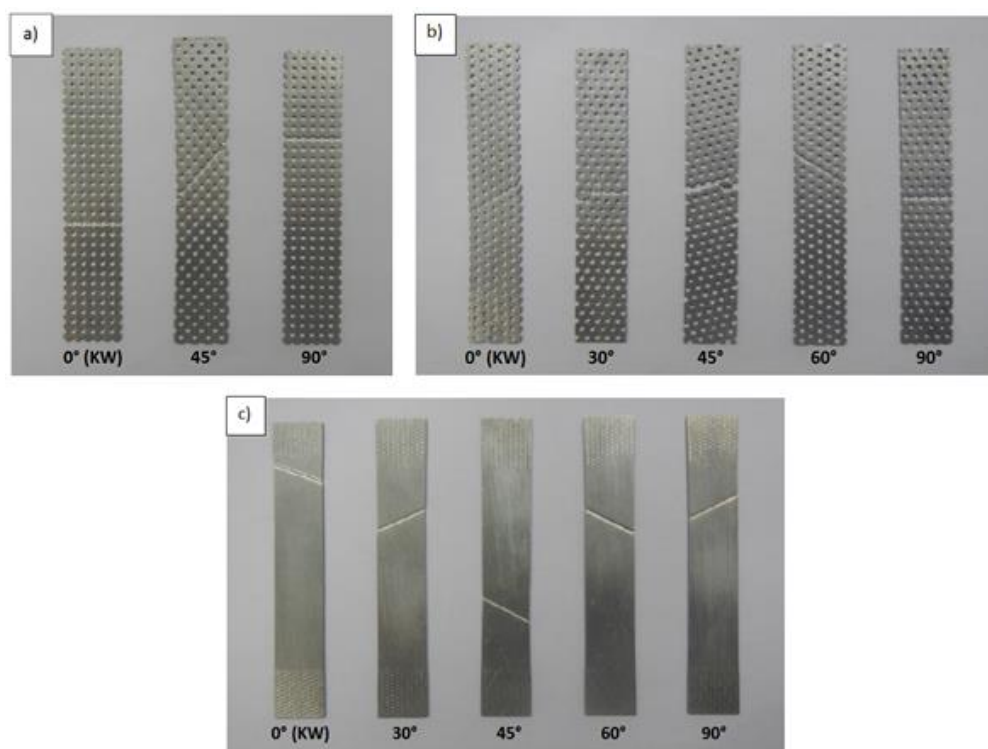


Rys. 6.17. Zestawienie krzywych rozciągania blachy EN AW-5754 pełnej oraz z perforacją prostą (Po2s4) i heksagonalną (Ho2s4)

Zarówno nieperforowana blacha stalowa jak i ze stopu aluminium EN AW-5754 wykazują podobny charakter krzywych rozciągania w rozważanych kierunkach. W tym aspekcie, blacha perforowana oprócz niższych własności wytrzymałościowych, odznacza się zdecydowanie wyraźniejszym ich zróżnicowaniem w zależności od badanego układu otworów (prostego lub heksagonalnego). Nieregularności na krzywych ilustrujących zachowanie analizowanych blach perforowanych w statycznej próbie jednoosiowego rozciągania są wynikiem deformacji (załamania) otworów, która może następować dość gwałtownie powodując skoki siły rozciągającej. Efekt ten może przejawiać się z różną intensywnością i zależy przede wszystkim od kierunku obciążenia. Kształt krzywej rozciągania blachy perforowanej może być szczególnie nietypowy (np. zawierać uskoki) zwłaszcza po przekroczeniu maksymalnego naprężenia, co jest związane z propagacją pęknięcia przez mosty pomiędzy otworami. Fotografie przykładowych rozciągniętych próbek stalowych i ze stopu aluminium EN AW-5754 dla perforacji prostej i heksagonalnej (rys. 6.18 i 6.19) ilustrują wpływ kierunku siły rozciągającej względem kierunku najgęstszego upakowania otworów na charakter odkształcenia i sposób pęknięcia badanych blach perforowanych.

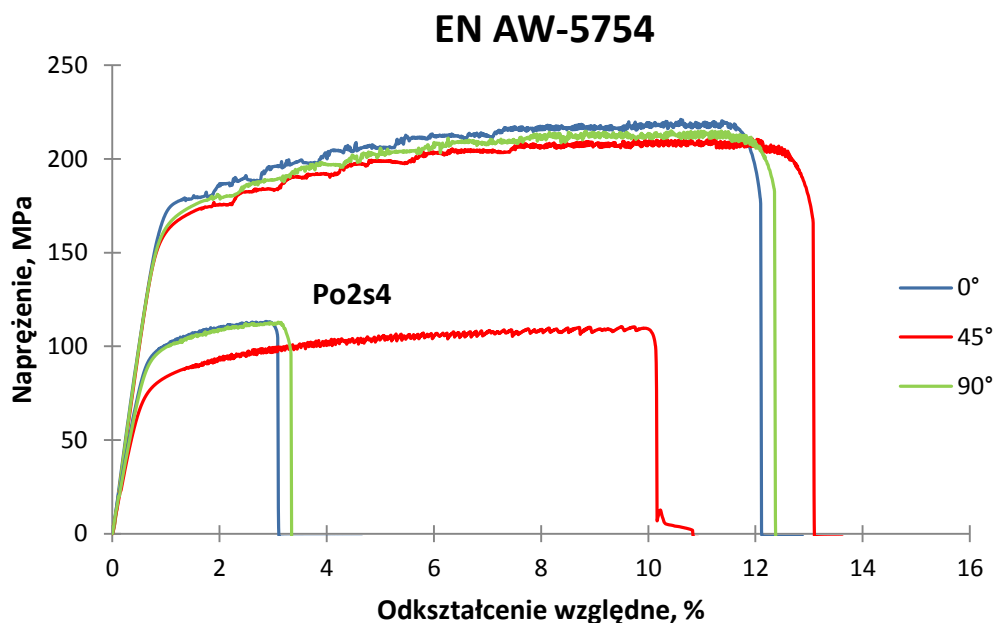


Rys. 6.18. Rozciągnięte próbki blachy stalowej DC01: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji

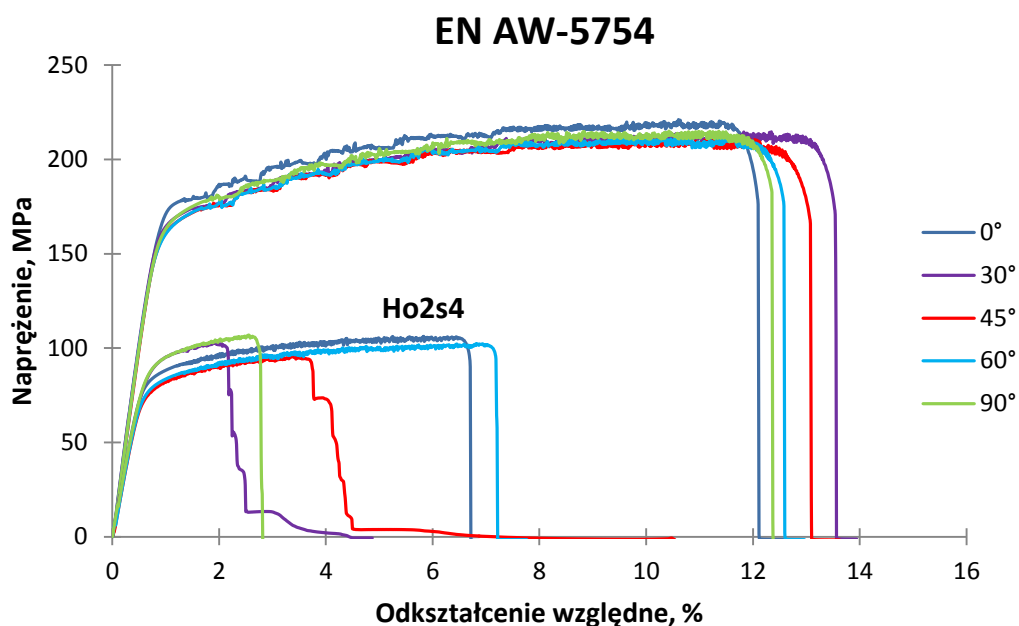


Rys. 6.19. Rozciągnięte próbki blachy ze stopu aluminium EN AW-5754: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji

W przypadku blachy pełnej EN AW-5754 niestateczność siły (naprężenia) podczas rozciągania związana jest z charakterystycznym dla tego rodzaju stopów tzw. zjawiskiem (efektem) Portevina-LeChateliera (PLC) [395–397]. Blacha perforowana wykonana z tego samego stopu aluminium i tej samej grubości również wykazuje ten efekt, natomiast jego intensywność jest zauważalnie mniejsza (zależnie od rodzaju perforacji i kierunku rozciągania – rys. 6.20 i 6.21).



Rys. 6.20. Zestawienie krzywych rozciągania blachy EN AW-5754 pełnej i z perforacją prostą (Po2s4)

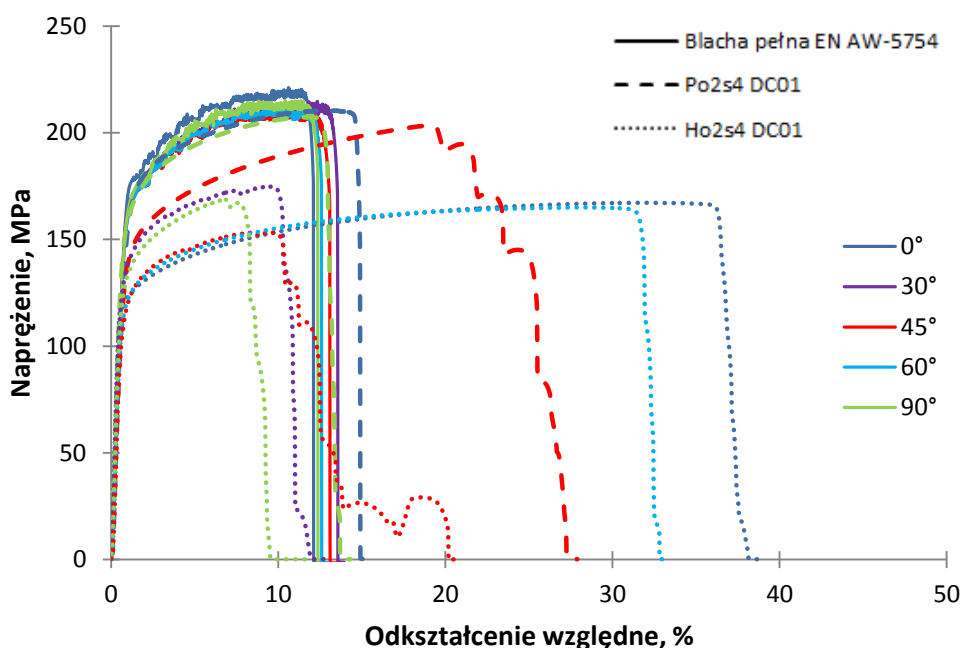


Rys. 6.21. Zestawienie krzywych rozciągania blachy EN AW-5754 pełnej i z perforacją heksagonalną (Ho2s4)

Największe osłabienie efektu PLC blachy EN AW-5754 występuje w kierunkach: 0° i 90° dla perforacji prostej oraz 30° i 90° dla perforacji heksagonalnej, czyli wówczas gdy kierunek obciążenia jest prostopadły względem kierunku najgęstsze upakowania otworów. Natomiast dla pozostałych orientacji badanych perforacji nadal widoczny jest dość wyraźny wpływ tego zjawiska na przebieg krzywej rozciągania.

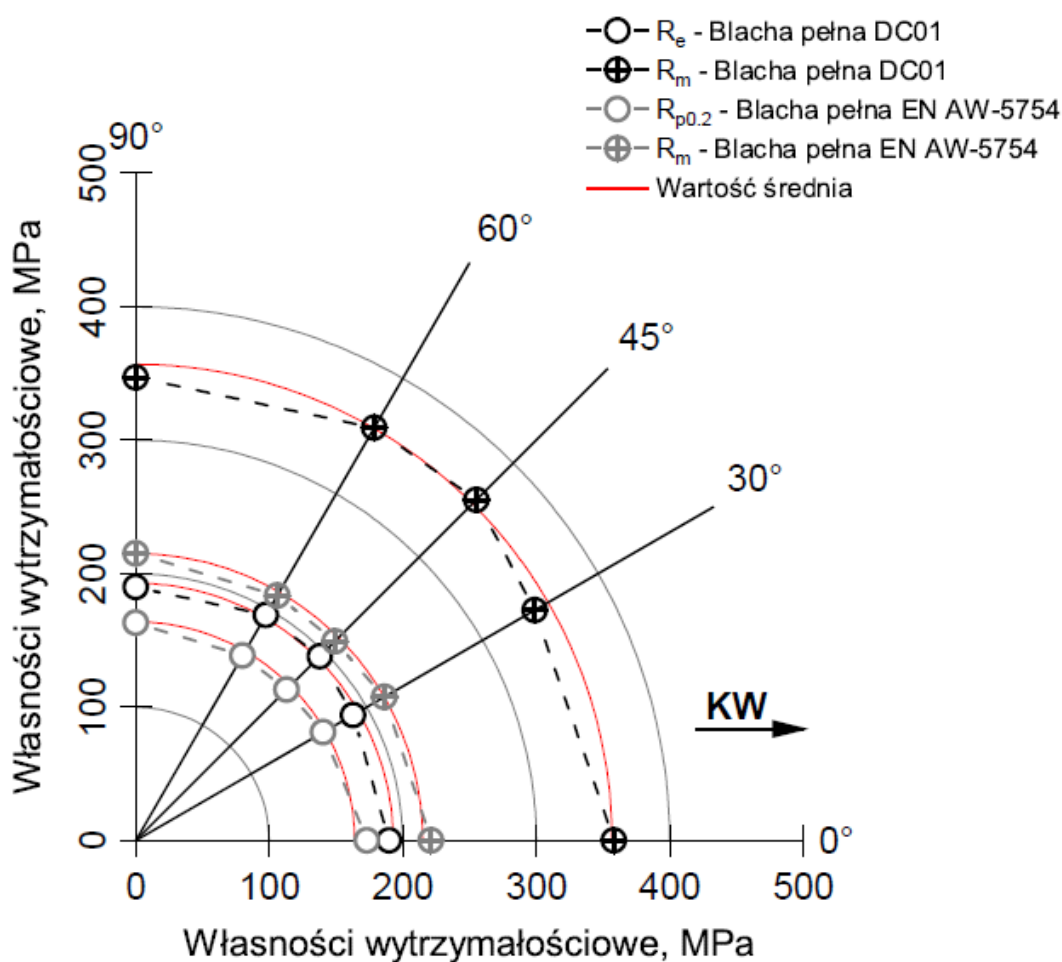
Ponadto, zwraca uwagę brak wyraźnej granicy plastyczności blachy perforowanej, nawet wówczas, gdy odznaczała się nią blacha macierzysta (w tym przypadku blacha stalowa – rys. 6.16). Wynika to z deformacji otworów rozciąganej próbki, podczas gdy dla blachy bez perforacji wzrost siły rozciągającej jest związany tylko z umocnieniem odkształceniowym.

Co oczywiste, krzywe rozciągania blachy perforowanej leżą odpowiednio poniżej analogicznych krzywych dla blachy macierzystej. Niemniej jednak, warto dokonać bezpośredniego zestawienia obejmującego krzywe otrzymane w próbie jednoosiowego rozciągania blachy pełnej EN AW-5754 oraz stalowej blachy perforowanej (Po2s4 i Ho2s4), co przedstawiono na rys. 6.22. W niektórych przypadkach (orientacja 0° i 90° prostego układu otworów) perforowana blacha stalowa DC01 wykazuje podobny przebieg krzywych rozciągania w porównaniu do blachy bez perforacji ze stopu aluminium EN AW-5754. Widać zatem, iż poprzez właściwie dobrane parametry perforacji można w pewnym zakresie niejako połączyć właściwości użytkowe, wynikające z obecności w blasze siatki otworów oraz właściwości innego materiału litego.



Rys. 6.22. Zestawienie krzywych rozciągania blachy pełnej EN AW-5754 i blachy DC01 z perforacją prostą (Po2s4) i heksagonalną (Ho2s4)

Blacha pełna, zarówno stalowa DC01 jak i ze stopu aluminium EN AW-5754, charakteryzują się silnie jednorodnym rozkładem własności wytrzymałościowych w ich płaszczyźnie, o czym świadczy bliskie położenie wartości analizowanych parametrów dla poszczególnych kierunków względem wartości średniej (rys. 6.23). Oba materiały zauważalnie różnią się natomiast pod względem wartości stosunku granicy plastyczności do wytrzymałości na rozciąganie ($R_{p0,2}/R_m$) określanego jako tzw. zapas plastyczności. Wraz z jego wzrostem podatność materiału do trwałych odkształceń maleje. Średnia jego wartość w płaszczyźnie blachy stalowej wynosi 0,54, natomiast w przypadku blachy EN AW-5754 jest równa 0,76.



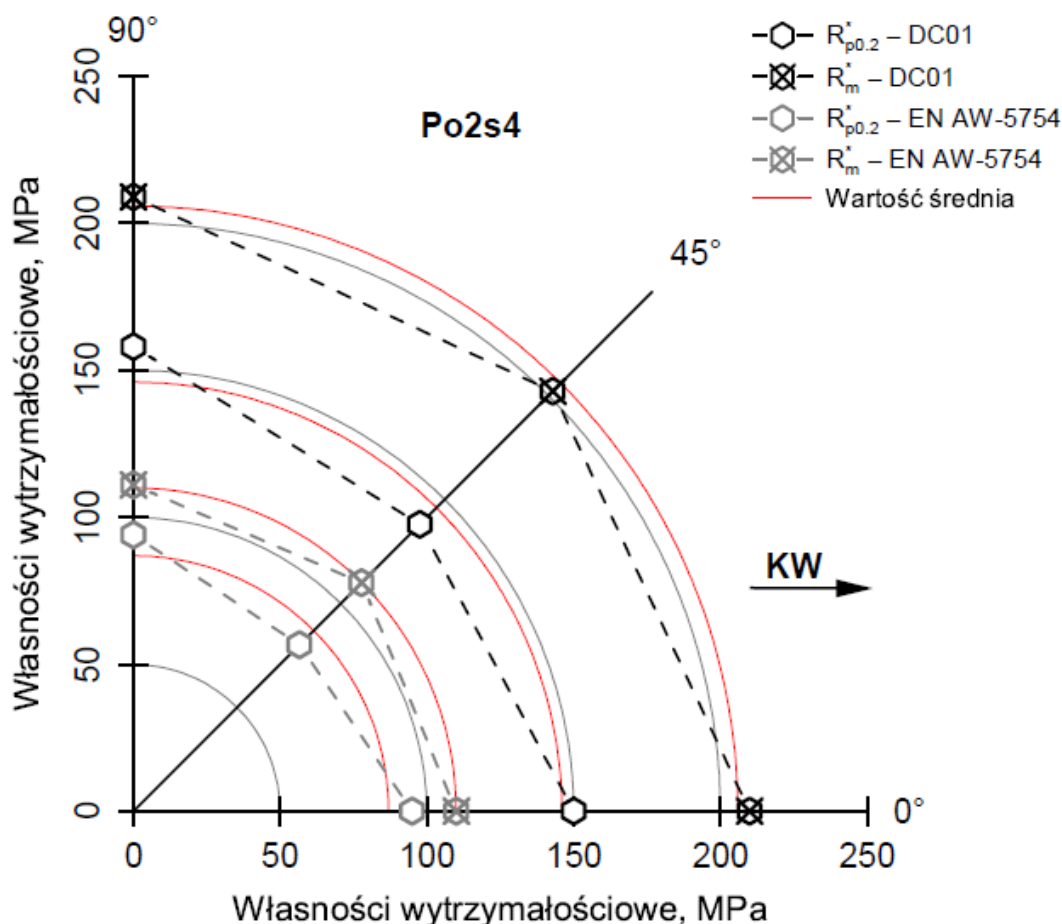
Rys. 6.23. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 bez perforacji

Spadek granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w płaszczyźnie blachy EN AW-5754 w wyniku perforacji prostej wyniósł odpowiednio 47% i 49%, przy czym w poszczególnych kierunkach obniżenie własności wytrzymałościowych kształtowało się na podobnym poziomie – zwłaszcza dla R_m^* (spadek w zakresie od 48% do 50%), natomiast wartość $R_{p0,2}^*$ w nieco większym stopniu zmalała w kierunku diagonalnym, stanowiąc 50% wartości analogicznego parametru dla blachy pełnej (w kierunkach 0° i 90° $R_{p0,2}^*$ uległa obniżeniu o odpowiednio 45% i 42%). Dla blachy stalowej z prostym układem otworów zanotowano wyraźnie mniejszy spadek granicy plastyczności (o 24% w porównaniu do materiału referencyjnego), przy czym w kierunku 45° był największy i równy 29%, natomiast dla orientacji 0° i 90° wynosił odpowiednio 21% i 17% (rys. 6.24). W przypadku wytrzymałości na rozciąganie zaobserwowano bardziej równomierny spadek w płaszczyźnie blachy stalowej z perforacją prostą, który dla kierunków 0° , 45° i 90° wynosił kolejno 41%, 44% i 40%, przy wartości średniej równej 42%.

Ogólnie można stwierdzić, iż najniższymi własnościami wytrzymałościowymi charakteryzował się kierunek diagonalny perforacji prostej (podobnie jak w przypadku efektywnego modułu Younga, jednak z mniejszą różnicą w porównaniu do pozostałych rozważanych kierunków), w którym granica plastyczności w stosunku do orientacji 0° i 90° stanowiła odpowiednio 92% i 87% dla blachy stalowej oraz kolejno 84% i 85% dla blachy EN AW-5754. Ponadto, odnotowano dość jednorodny rozkład wytrzymałości na rozciąganie, której wartość dla kierunku 45° perforowanej (Po2s4) blachy DC01 tylko o ok. 4% była mniejsza względem kierunków o najgęstszym upakowaniu otworów. Pod tym względem blacha EN AW-5754 z tą samą perforacją wykazywała jeszcze nieco wyższą izotropię.

Średnia wartość stosunku $R_{p0,2}^*/R_m^*$ w płaszczyźnie blachy stalowej z perforacją prostą wynosiła 0,71, natomiast dla blachy EN AW-5754 z tym samym układem otworów była równa 0,79. Należy dodać, iż dla obu materiałów parametr ten był najniższy w kierunku 45° (0,68 – blacha stalowa oraz 0,72 – blacha EN AW-5754), co potwierdza regułę, iż kierunek diagonalny perforacji prostej wykazuje lepsze własności plastyczne w porównaniu do innych jej charakterystycznych kierunków tj. 0° i 90° , dla których w tym przypadku stosunek $R_{p0,2}^*/R_m^*$ wynosił odpowiednio: 0,71 i 0,76 – blacha stalowa oraz 0,87 i 0,84 – blacha EN AW-5754.

W wyniku perforacji w układzie prostym otworów wytrzymałość na rozciąganie blachy EN AW-5754 spadała poniżej wartości granicy plastyczności blachy stalowej z tą samą perforacją (rys. 6.24).

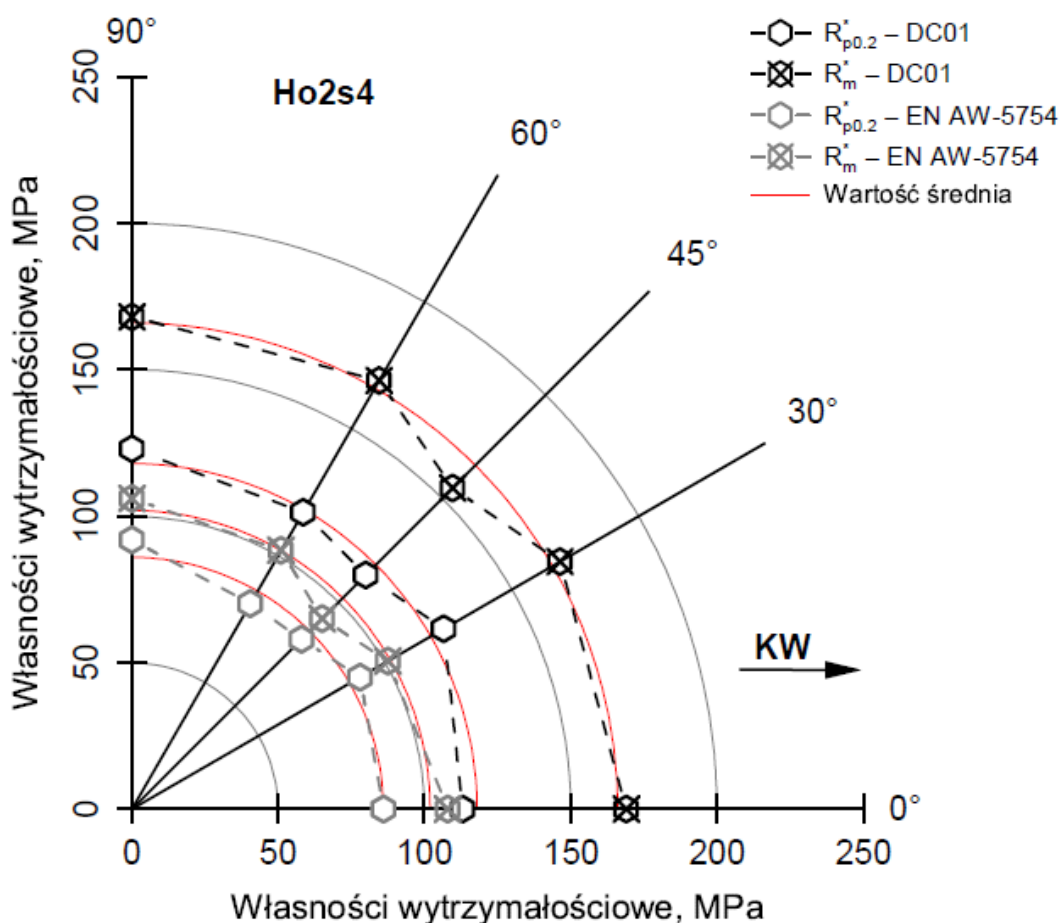


Rys. 6.24. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą

Wysoką jednorodność własności wytrzymałościowych obserwuje się dla heksagonalnego układu otworów, zwłaszcza w charakterystycznych kierunkach tej perforacji (rys. 6.25). Dotyczy to przede wszystkim wytrzymałości na rozciąganie, której spadek w porównaniu do materiału referencyjnego w przypadku blachy stalowej w kierunkach 0° i 60° wynosił 53%, a w kierunkach 30° i 90° był równy 51%. Biorąc pod uwagę kierunek pośredni 45° (z najwyższym spadkiem $R_m^* = 57\%$), zanotowano obniżenie wartości średniej tego parametru o 53%. Dla blachy EN AW-5754 spadek wytrzymałości na rozciąganie spowodowany perforacją heksagonalną kształtował się podobnie wynosząc dla kierunków 0° i 60° odpowiednio 51% i 52%, a dla orientacji 30° i 90° kolejno 53% i 51%, przy czym największy 56% spadek wystąpił również w kierunku 45°, co przełożyło się na wartość średnią równą 52%. Mniejszą jednorodność uzyskano w przypadku granicy plastyczności. Zauważalnie parametr ten był niższy w kierunkach 0° i 60°, gdzie jego wartość w wyniku perforacji zmalała odpowiednio o 41% i 40% dla blachy stalowej oraz o 50% dla blachy EN AW-5754. Natomiast naprężenie uplastyczniające w kierunkach 30° i 90° wiązało się ze

spadkiem równym odpowiednio 34% i 35% dla blachy stalowej oraz 45% i 44% dla blachy EN AW-5754.

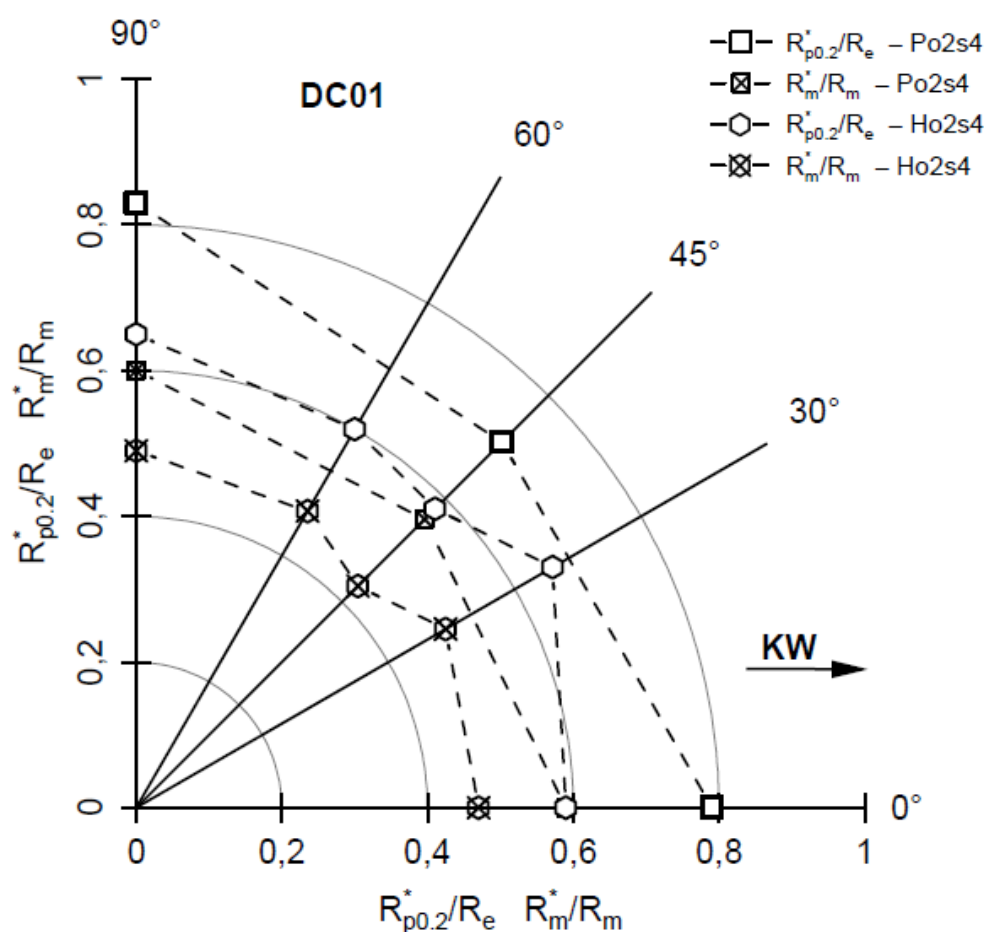
Konsekwencją mocno zbliżonego w rozpatrywanych kierunkach perforacji heksagonalnej obniżenia wytrzymałości na rozciąganie oraz mniej równomiernego spadku granicy plastyczności – mając na uwadze dość jednorodny rozkład tych charakterystyk w płaszczyźnie blachy pełnej – jest różna wartość stosunku $R_{p0,2}^*/R_m^*$ dla orientacji 0° i 60° (lepsza plastyczność) oraz 30° i 90° . Średnia wartość tego parametru (z uwzględnieniem kierunku 45° o $R_{p0,2}^*/R_m^*$ podobnym do kierunków wykazujących niższą podatność do odkształceń trwałych – 30° i 90°) dla blachy stalowej wynosiła 0,71, a dla blachy EN AW-5754 była równa 0,84.



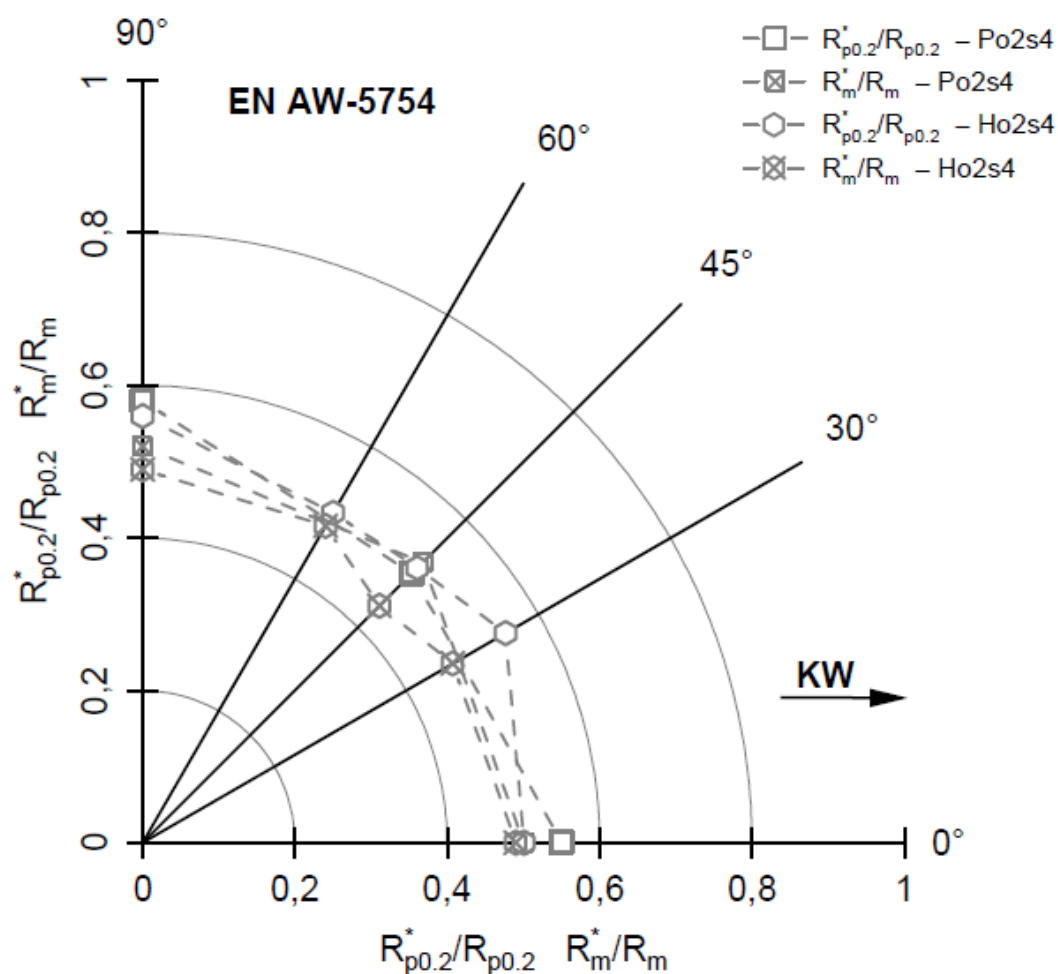
Rys. 6.25. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją heksagonalną

Stosunek parametrów wytrzymałościowych blachy perforowanej i pełnej ($R_{p0,2}^*/R_{p0,2}$ oraz R_m^*/R_m) przedstawiono na rys. 6.26 i 6.27. Dla obu badanych perforacji, są one generalnie wyższe w przypadku granicy plastyczności. Bardziej dostrzegalne jest to zwłaszcza na rys. 6.26 dotyczącym blachy stalowej, gdzie średnia wartość $R_{p0,2}^*/R_{p0,2}$ wyniosła 0,76 (Po2s4) i 0,61 (Ho2s4), natomiast stosunek R_m^*/R_m był równy 0,58 (Po2s4) i 0,47 (Ho2s4). Dla blachy EN AW-5754 (rys. 6.27) wystąpiły pod tym względem mniejsze różnice, przy czym perforacja prosta i heksagonalna charakteryzowała się taką samą średnią wartością $R_{p0,2}^*/R_{p0,2}$ równą 0,53, natomiast parametr R_m^*/R_m wynosił średnio 0,51 (Po2s4) i 0,48 (Ho2s4).

Porównując odpowiednie kierunki charakterystyczne dla perforacji prostej i heksagonalnej można stwierdzić, iż ogólnie wyższe własności wytrzymałościowe zarówno w kierunku 0° jak i 90° wykazuje blacha z prostym układem otworów. Prawidłowość ta jest również spełniona biorąc pod uwagę średnie wartości parametrów wytrzymałościowych w płaszczyźnie perforowanej blachy stalowej DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754.

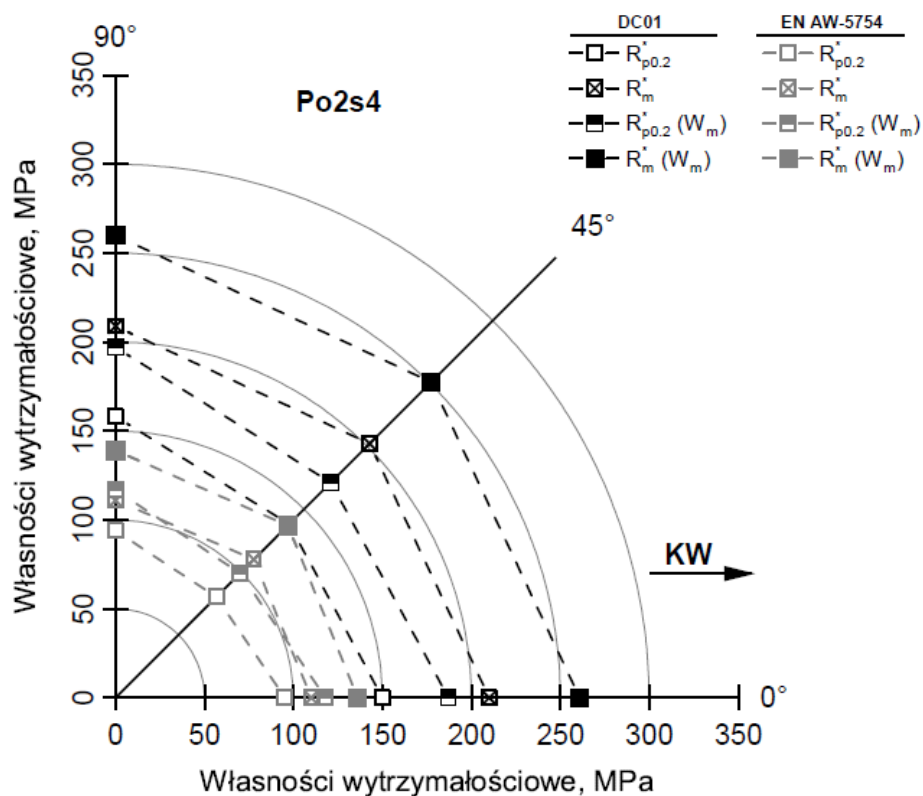


Rys. 6.26. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 z perforacją prostą i heksagonalną w stosunku do blachy pełnej

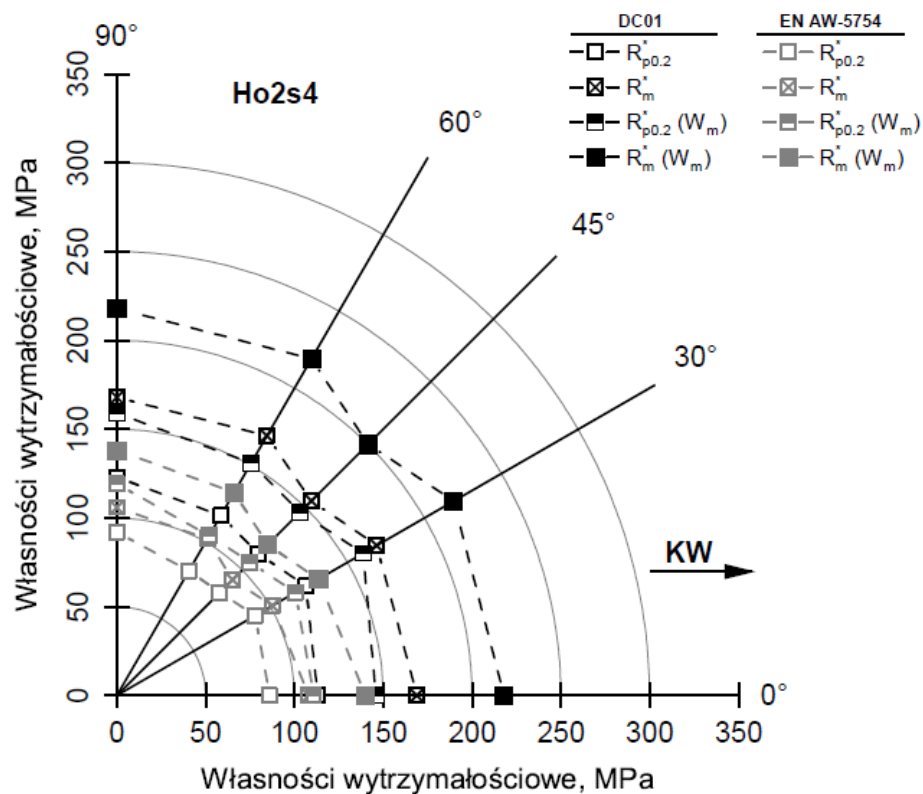


Rys. 6.27. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną w stosunku do blachy pełnej

Uwzględnienie wskaźnika masy odpowiednio podnosi (adekwatnie do wartości prześwitu danej perforacji) analizowane własności wytrzymałościowe blachy perforowanej (rys. 6.28 i 6.29). Dla prostego układu otworów wzrost ten wynosi dokładnie 19,625%, a dla perforacji heksagonalnej jest równy 22,75%. W rezultacie granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie perforowanej blachy stalowej (Po2s4 i Ho2s4) zbliżyły się względem analogicznych wartości dla blachy macierzystej kolejno o 18% i 14%. W przypadku blachy EN AW-5754 wzrost ten był równy 13% (dotyczy zarówno $R_{p0,2}^*$ jak i R_m^*) dla perforacji prostej oraz 15% ($R_{p0,2}^*$) i 14% (R_m^*) dla perforacji heksagonalnej.



Rys. 6.28. Rozkłady własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą z uwzględnieniem wskaźnika masy

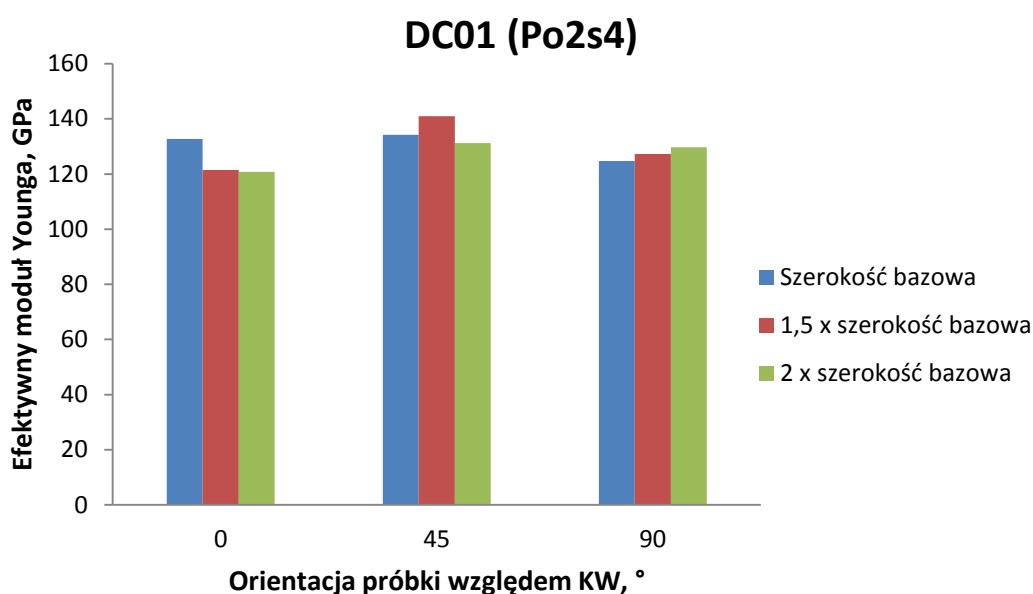


Rys. 6.29. Rozkłady własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją heksagonalną z uwzględnieniem wskaźnika masy

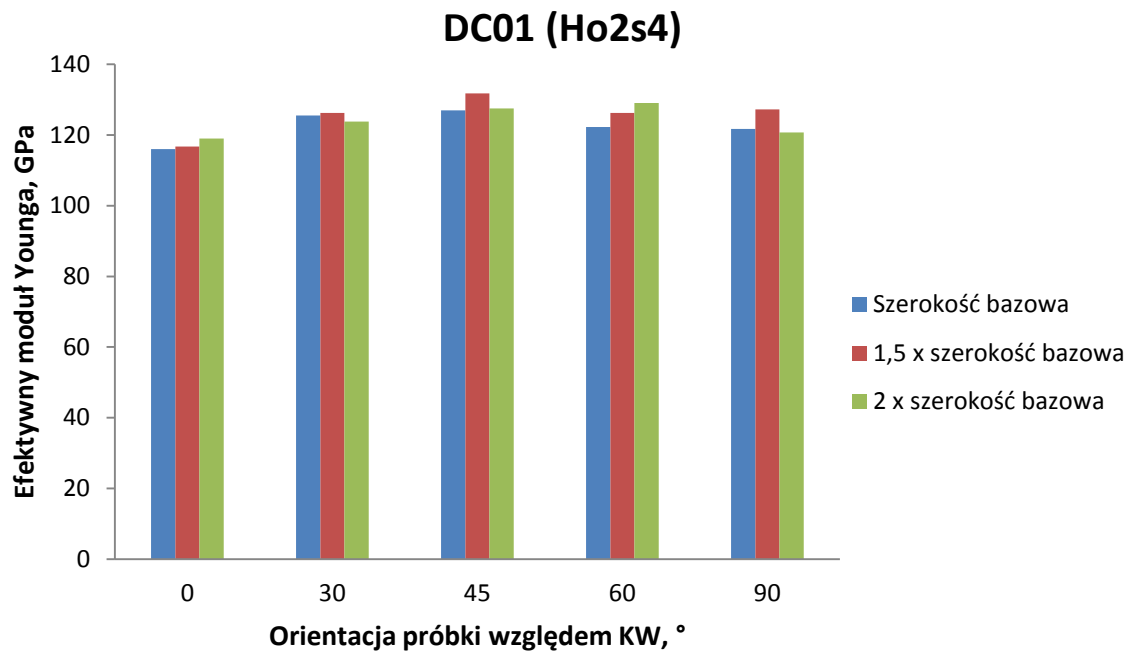
6.4. Analiza wpływu perforacji na sztywność blachy

W przypadku blachy perforowanej można zaobserwować pewne różnice dotyczące wartości efektywnego modułu Younga w zależności od sposobu obciążenia (jednoosiowe rozciąganie i trójpunktowe gięcie). Tym samym, można mówić nie tylko o anizotropii własności sprężystych w zależności od rozpatrywanego kierunku w płaszczyźnie blachy perforowanej, ale także o zróżnicowaniu, spowodowanym schematem obciążenia. Zgodnie z przyjętym w niniejszej pracy makroskopowym podejściem *równowaznej ciągłości (równowaznego materiału litego)* w celu poprawnego opisu zachowania sprężystego blachy z danym rodzajem perforacji – zwłaszcza z praktycznego i konstrukcyjnego punktu widzenia – właściwym jest wyznaczenie ilościowej zależności pomiędzy efektywnym modułem sprężystości wzdłużnej w próbie jednoosiowego rozciągania oraz wartością tego parametru dla trójpunktowego gięcia.

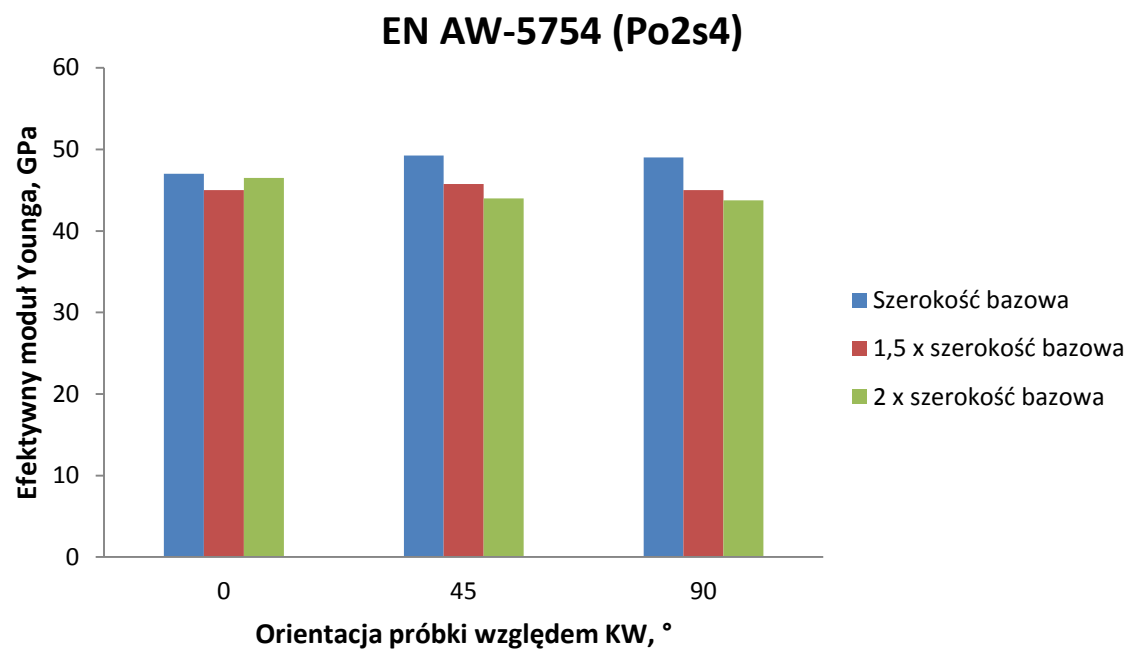
Sztywność blachy perforowanej (z uwzględnieniem różnej szerokości próbek) dla rozpatrywanych kierunków perforacji prostej i heksagonalnej przedstawiono na rys. 6.30 – 6.33. Niezależnie od rozważanej szerokości własności sprężyste blachy stalowej z perforacją prostą i heksagonalną są mocno zbliżone w badanych kierunkach. Podobnie jest w przypadku blachy ze stopu EN AW-5754, tzn. dla żadnej orientacji i szerokości paska blachy perforowanej nie występuje wyraźne (mogące mieć zwłaszcza praktyczne znaczenie) odstępstwo od pozostałych rozpatrywanych wariantów pod względem wartości efektywnego modułu Younga.



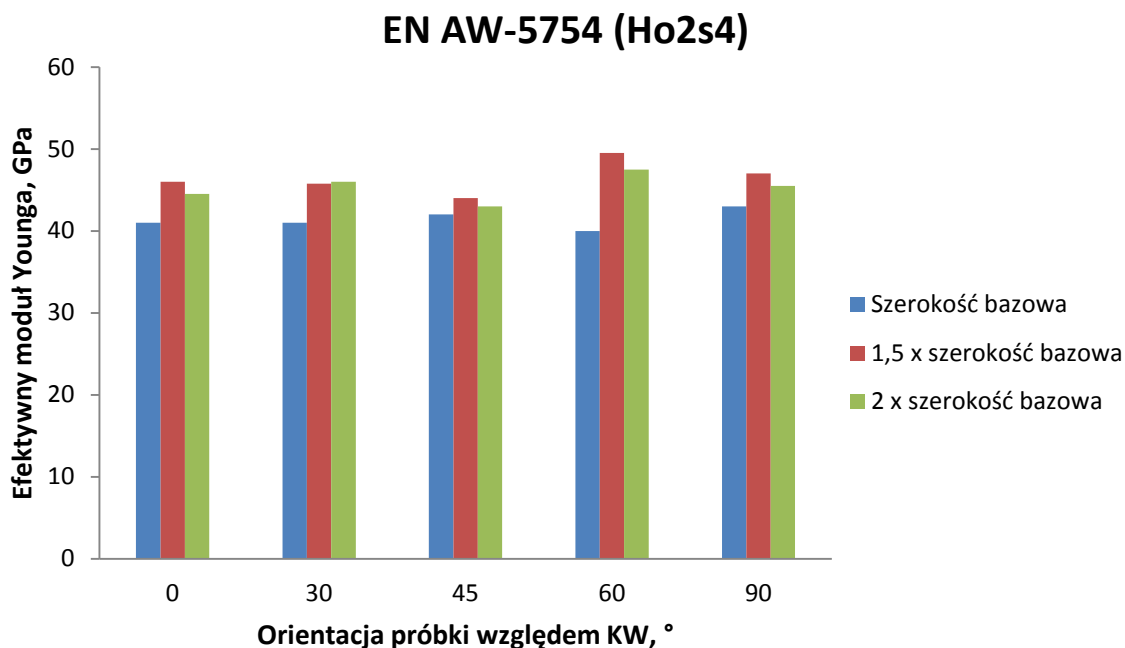
Rys. 6.30. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia



Rys. 6.31. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia



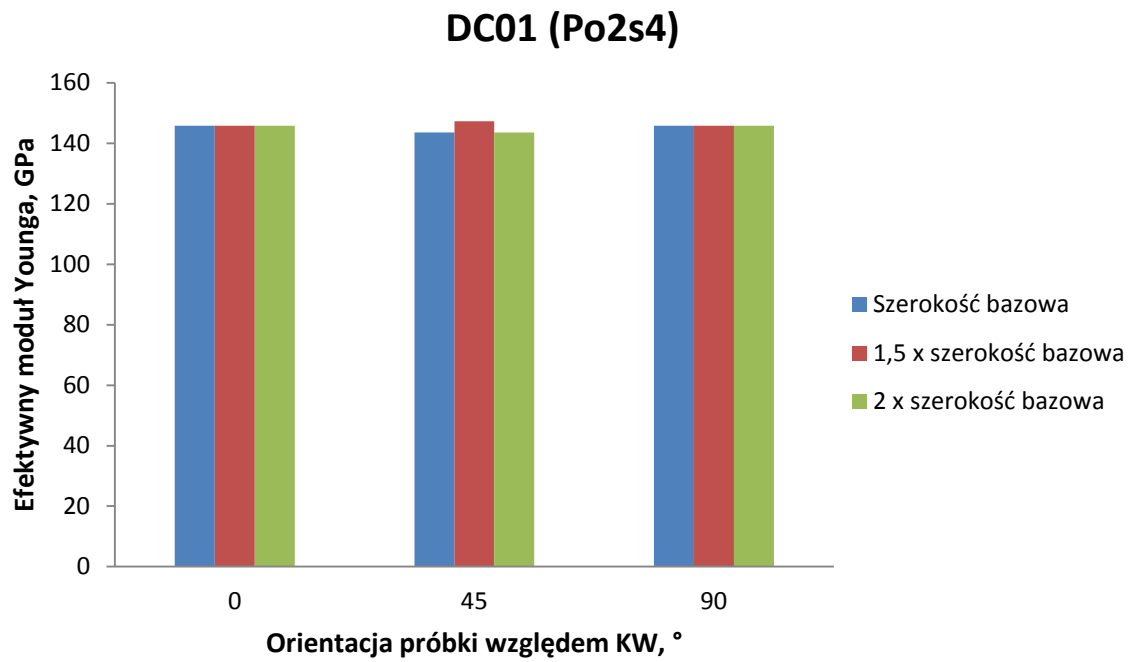
Rys. 6.32. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia



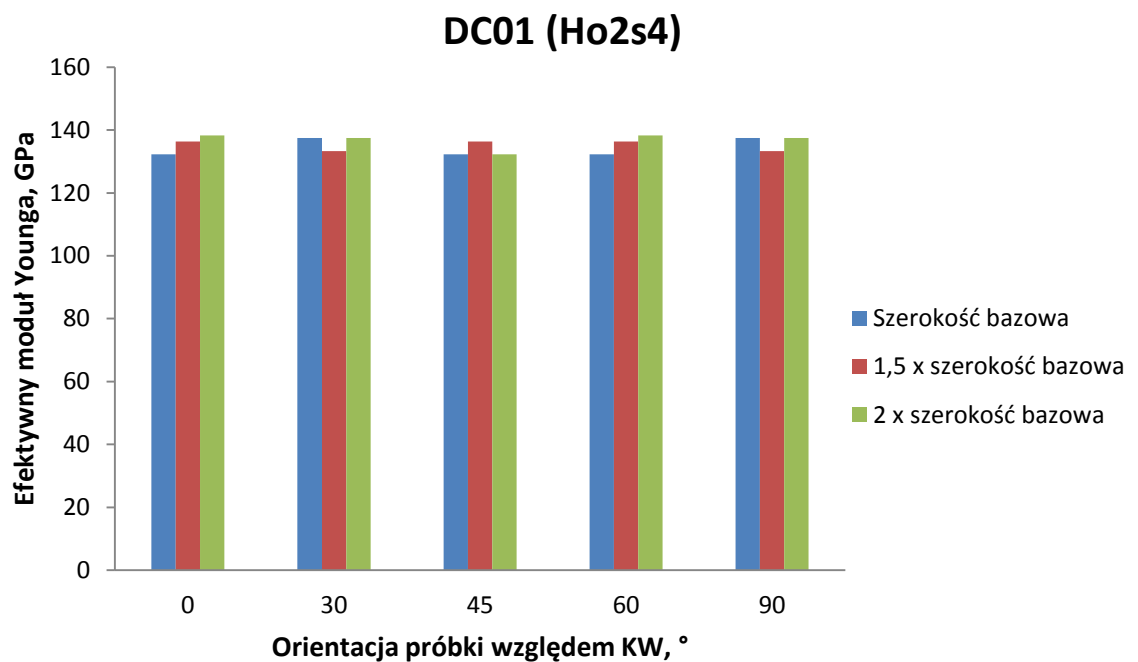
Rys. 6.33. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia

Warto zauważyć, iż w przypadku trójpunktowego gięcia różnice wyznaczonej stałej sprężystej pomiędzy odpowiednimi kierunkami prostego i heksagonalnego układu perforacji dla blachy stalowej i ze stopu aluminium są mniejsze niż w próbie jednoosiowego rozciągania (najczęściej nie przekraczają 10%). Można zatem stwierdzić, iż przyłożone obciążenie zewnętrzne w postaci momentu gnącego skutkowało nie tylko mniejszą niejednorodnością własności sprężystych w płaszczyźnie danej blachy perforowanej, ale także ujawniło w tym względzie mniejsze znaczenie samego układu perforacji (przynajmniej w kontekście rozpatrywanych w niniejszej pracy).

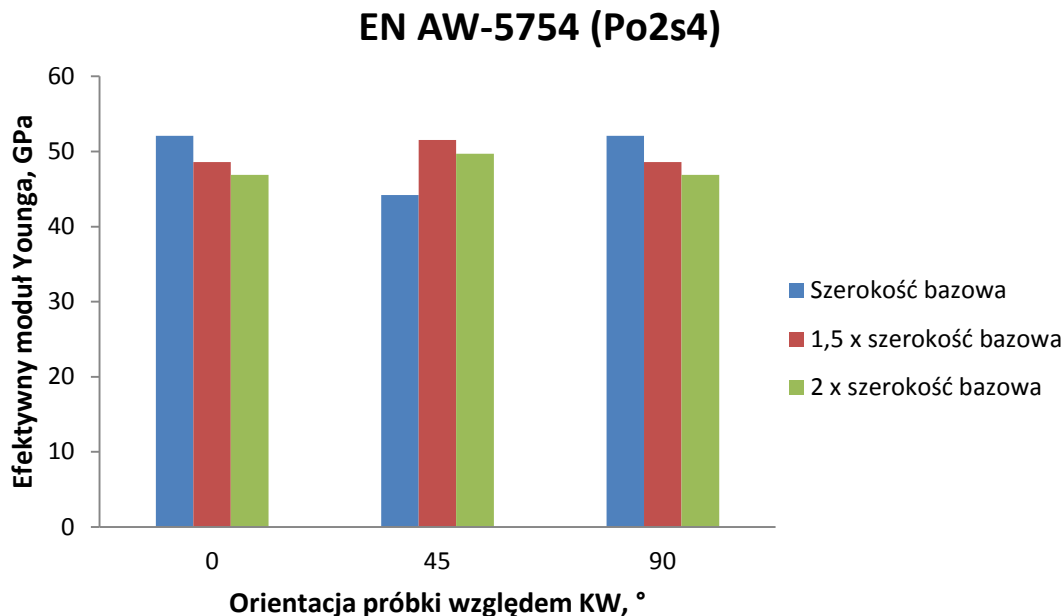
Podobne wartości efektywnego modułu Younga badanych blach perforowanych dla trójpunktowego gięcia uzyskano za pomocą symulacji numerycznej (rys. 6.34 – 6.37).



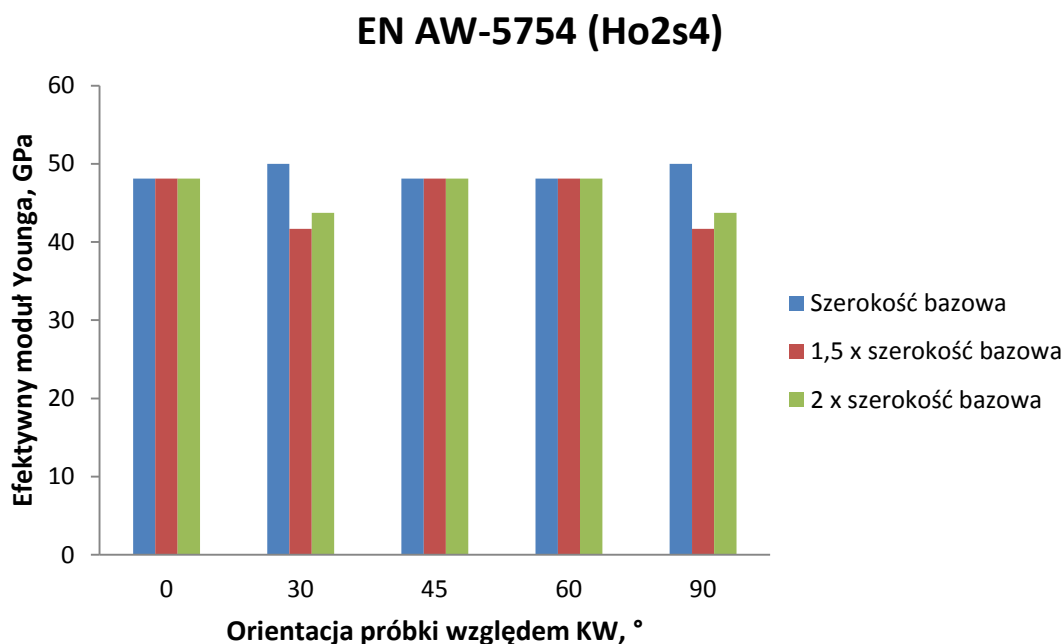
Rys. 6.34. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna)



Rys. 6.35. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna)

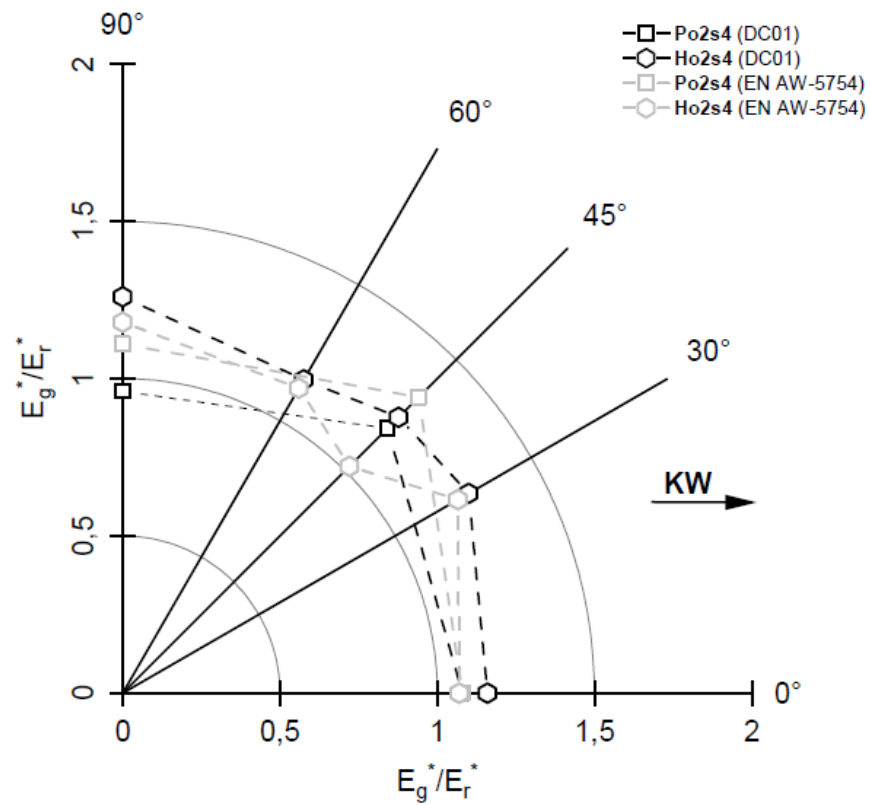


Rys. 6.36. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna)

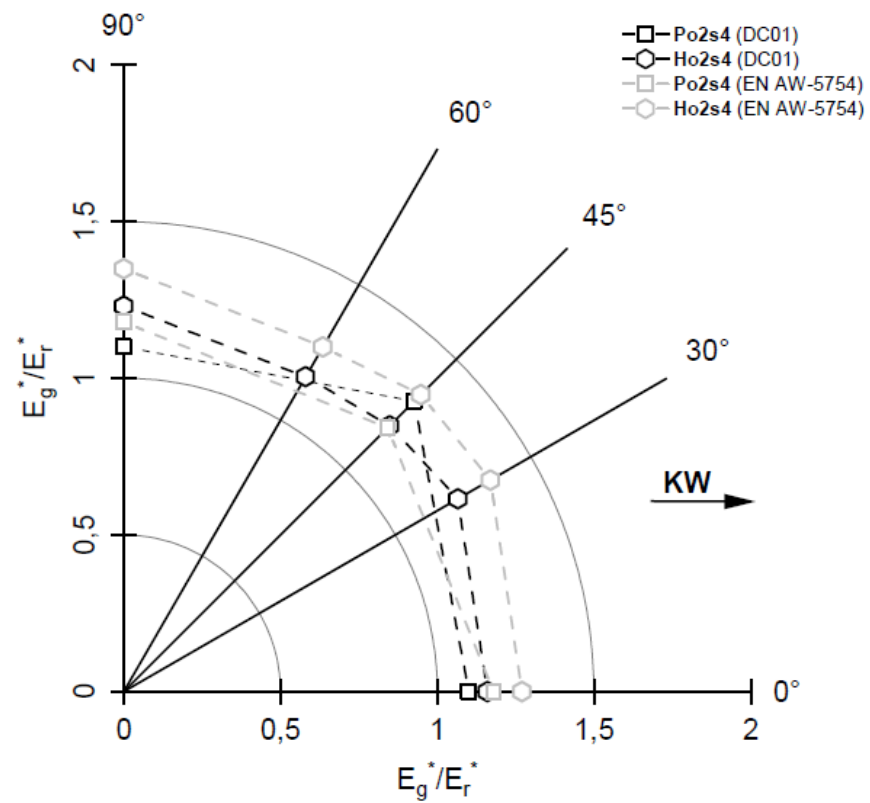


Rys. 6.37. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna)

Wartość efektywnego modułu Younga wyznaczonego w próbie trójpunktowego gięcia odniesiona do wartości tego samego parametru otrzymanego w próbie jednoosiowego rozciągania (E_g^*/E_r^*) dla badanych materiałów zaprezentowano na rys. 6.38 i 6.39. Do obliczeń wykorzystano wyniki uzyskane dla szerokości bazowej paska blachy perforowanej.



Rys. 6.38. Wartość stosunku E_g^*/E_r^* dla blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną



Rys. 6.39. Wartość stosunku E_g^*/E_r^* dla blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną (symulacja numeryczna)

W każdym rozważanym wariancie (z wyjątkiem orientacji 90° blachy stalowej Po2s4 – wyniki doświadczalne na rys. 6.38) efektywny moduł Younga jest wyższy w przypadku trójpunktowego gięcia w porównaniu z analogiczną wartością odnotowaną w jednoosiowej próbie rozciągania. Dla prostego układu otworów, niezależnie od rodzaju materiału macierzystego, stosunek E_g^*/E_r^* jest nieco większy w kierunku pośrednim 45° w odniesieniu do pozostałych orientacji 0° i 90°. Natomiast perforacja heksagonalna wyższą wartość E_g^*/E_r^* wykazuje w kierunkach 30° i 90° na tle orientacji o najgęstszym upakowaniu otworów. Warto dodać, iż dla perforacji prostej większy stosunek E_g^*/E_r^* występujący w kierunku 45° ma swoje odzwierciedlenie w bardziej jednorodnym rozkładzie efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej w płaszczyźnie blachy perforowanej (Po2s4) poddanej trójpunktowemu gięciu (dla jednoosiowego rozciągania orientacja 45° cechowała się wyraźnie mniejszym efektywnym modułem Younga niż kierunki 0° i 90° skutkując wyższą anizotropią własności sprężystych).

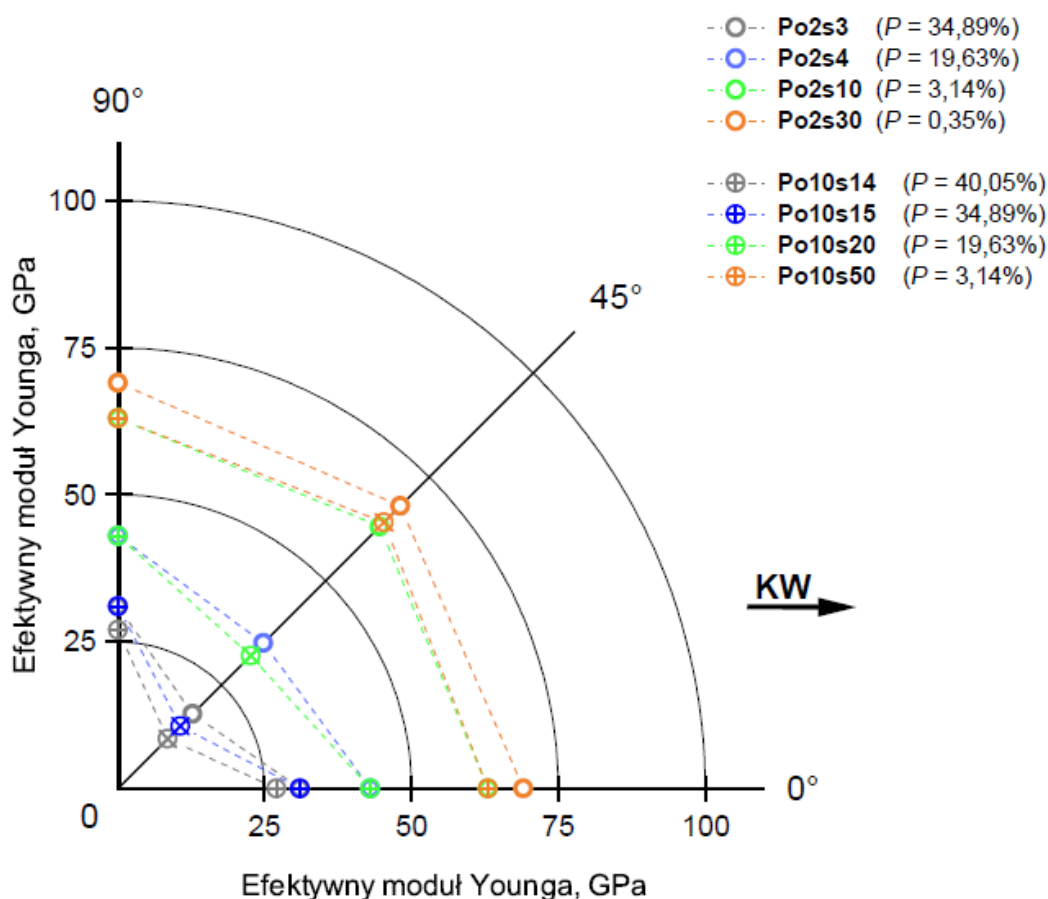
6.5. Wpływ prześwitu i wielkości otworów na własności sprężyste blachy perforowanej

Poza określonym sposobem rozmieszczenia otworów w płaszczyźnie blachy perforowanej istotny jest także wpływ prześwitu na jej własności mechaniczne [398, 399]. W analizie numerycznej (*Solidworks*) uwzględniono otwory cylindryczne o średnicach 2 mm i 10 mm w prostym układzie perforacji dla blachy aluminiowej EN AW-1050A o grubości 1 mm (stan umocnienia H24) z różną wartością skoku (tab. 6.1). Parametry symulacji jednoosiowego rozciągania były podobne jak w przypadku badań numerycznych perforowanej (Po2s4 i Ho2s4) blachy stalowej DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754 dla tego samego schematu obciążenia. Ponadto, dla wariantu ze średnicą oczka 2 mm wykonano badania eksperymentalne (rys. 6.49 – 6.53).

Tabela 6.1. Parametry perforacji prostej

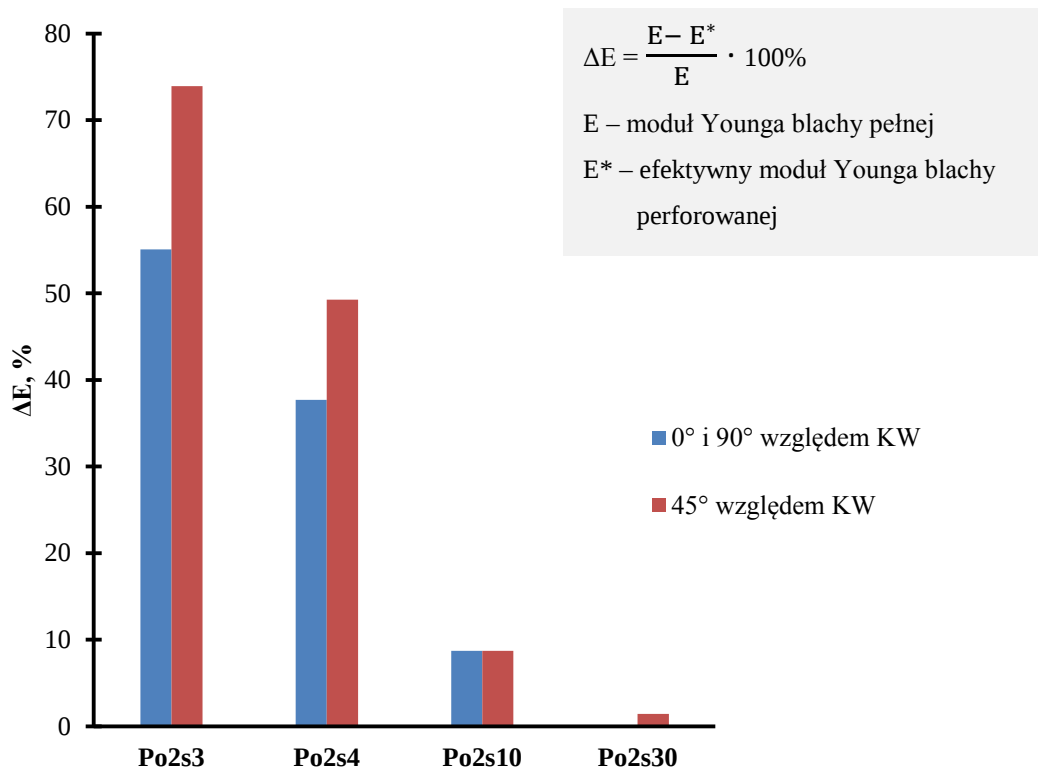
Perforacja	Średnica otworu d [mm]	Skok s [mm]	Prześwit P [%]
Po2s3	2	3	34,89
Po2s4		4	19,63
Po2s10		10	3,14
Po2s30		30	0,35
Po10s14	10	14	40,05
Po10s15		15	34,89
Po10s20		20	19,63
Po10s50		50	3,14

Na wartość efektywnego modułu Younga blachy z perforacją prostą dominująco wpływa wielkość prześwitu. Dla różnej średnicy otworu (2 mm i 10 mm), lecz przy takim samym udziale powierzchni otwartej w całkowitej powierzchni blachy, obserwuje się bardzo podobne własności sprężyste (rys. 6.40). Ponadto, wraz ze wzrostem prześwitu zmniejsza się nie tylko efektywny moduł sprężystości wzdłużnej, ale także jednorodność jego rozkładu w płaszczyźnie blachy perforowanej.

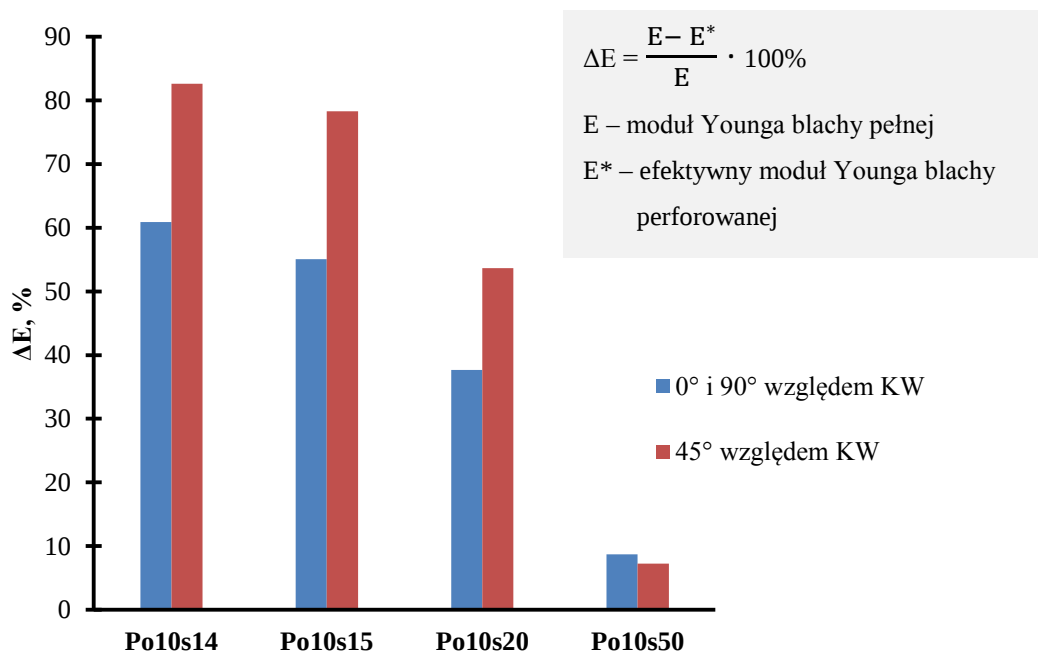


Rys. 6.40. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla różnych wartości prześwitu (średnica otworu 2 mm i 10 mm)

W analizowanym przypadku dla małego prześwitu 0,35% i 3,14% nie następuje jeszcze zauważalne obniżenie izotropii sprężystej, natomiast przy 19,63% prześwicie anizotropia jest już wyraźnie widoczna i wynika z większego spadku rozpatrywanej stałej sprężystej w kierunku pośrednim 45° w stosunku do kierunków 0° i 90° (rys. 6.41 i 6.42).

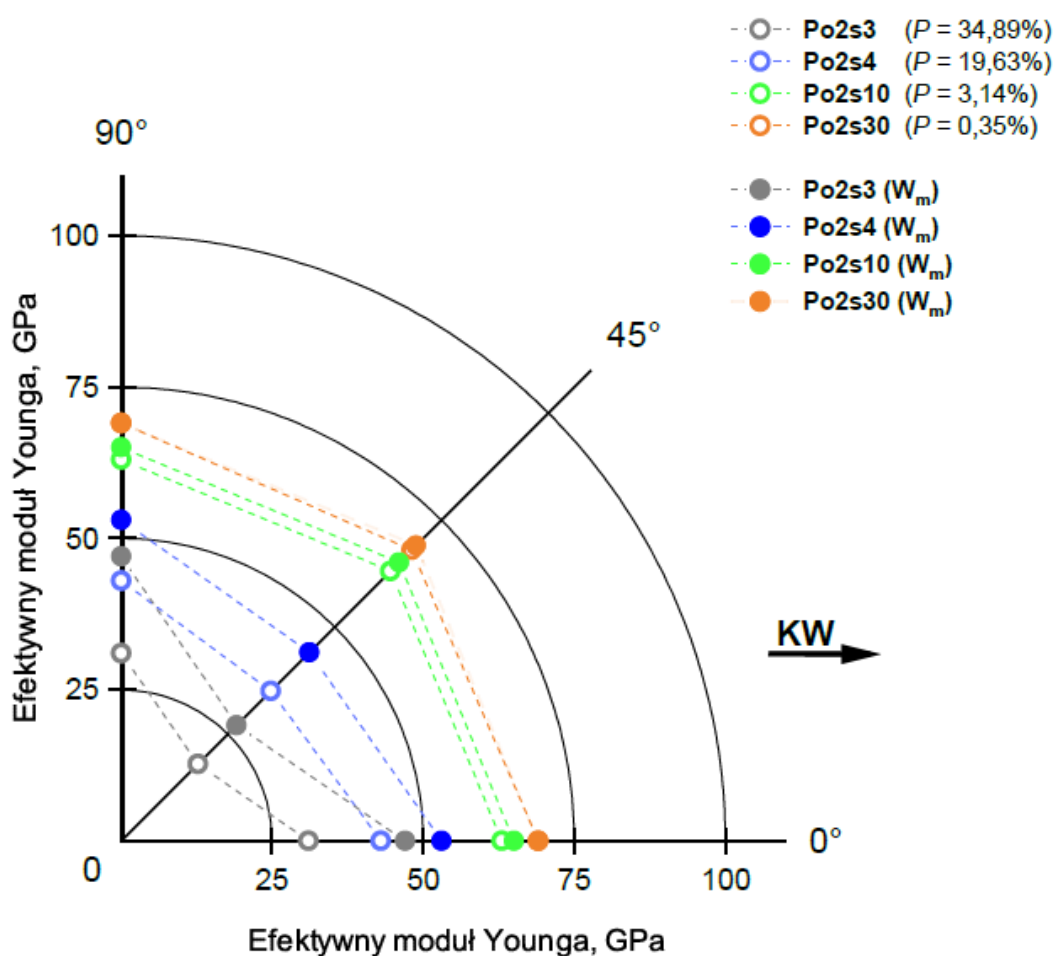


Rys. 6.41. Spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku perforacji dla średnicy otworu 2 mm

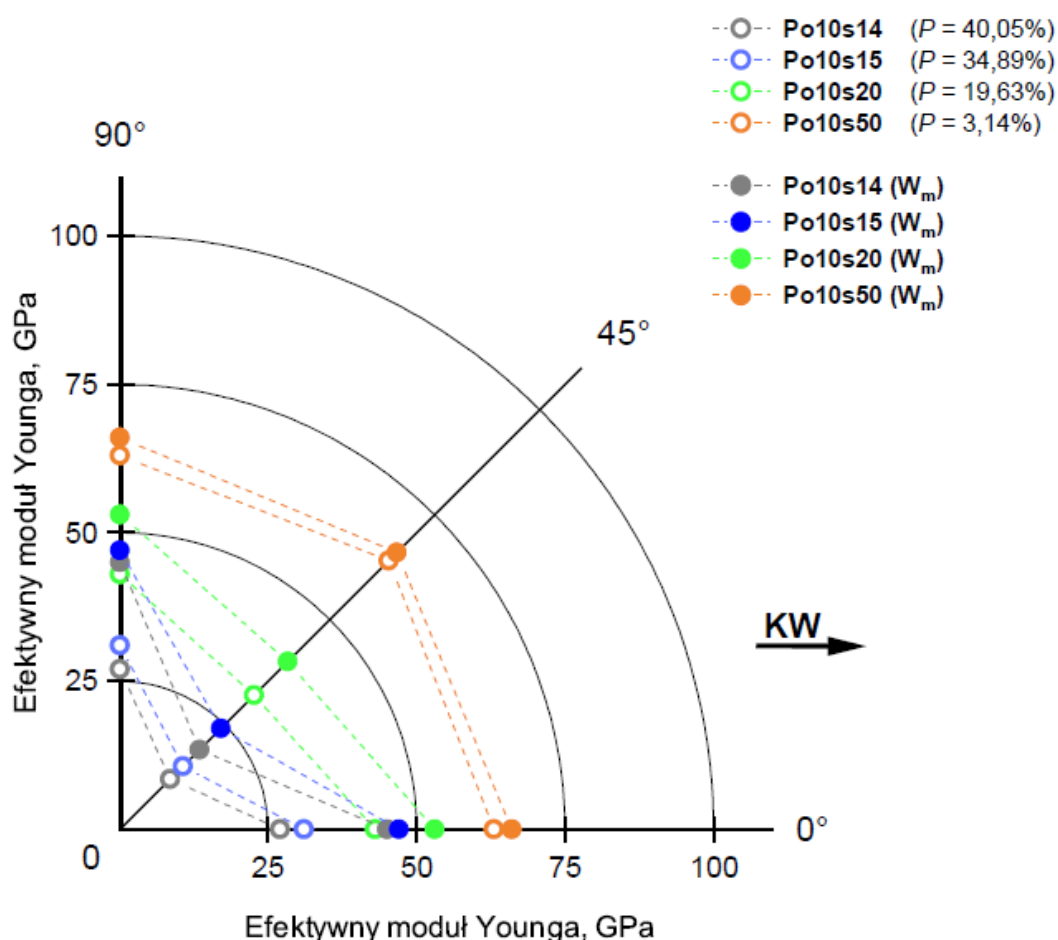


Rys. 6.42. Spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku perforacji dla średnicy otworu 10 mm

Po uwzględnieniu wskaźnika masy W_m wartość efektywnego modułu Younga wzrasta adekwatnie do prześwitu (rys. 6.43 i 6.44). Generalnie, przyrost ten (odpowiadający odległości pomiędzy odpowiednimi punktami na wykresie) jest tym większy im niższy jest wskaźnik masy W_m . Należy jednak dodać, iż wzrost tej stałej sprężystej nie musi być zawsze większy dla blachy charakteryzującej się nieco większym udziałem powierzchni otwartej, gdyż w takim przypadku określona wartość wskaźnika masy W_m nie kompensuje wystarczająco spadku własności sprężystych wywołanego perforacją (przyrost dla blachy Po10s14 i Po10s15 w kierunku 45° – rys. 6.44).



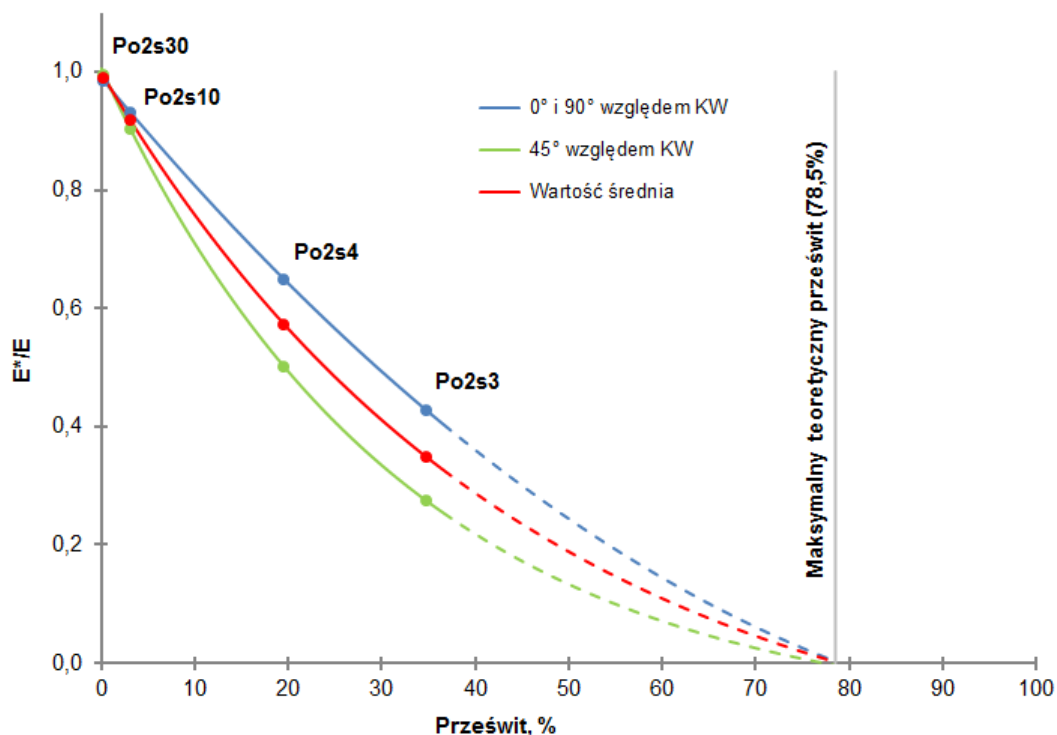
Rys. 6.43. Efektywny moduł Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla średnicy otworu 2 mm z uwzględnieniem wskaźnika masy W_m



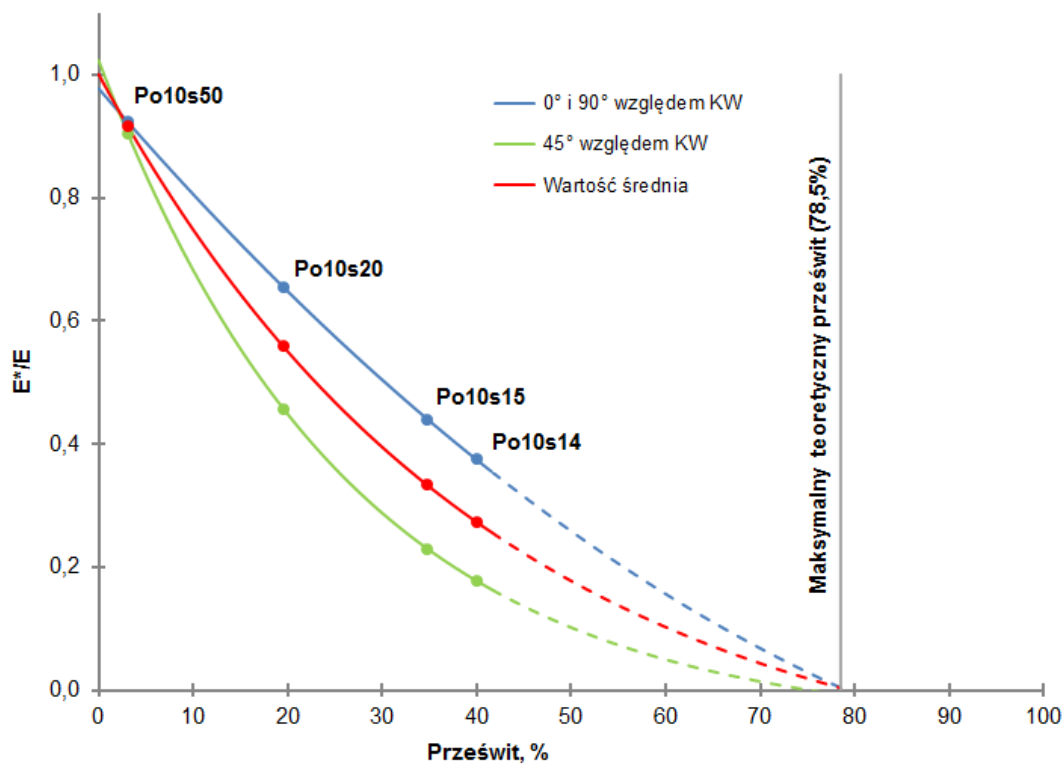
Rys. 6.44. Efektywny moduł Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla średnicy otworu 10 mm z uwzględnieniem wskaźnika masy W_m

Zależność efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej od prześwitu blachy perforowanej nie jest liniowa i nieco inna dla określonych orientacji, co widać na rys. 6.45 i 6.46, gdzie posłużono się współczynnikiem wyrażającym stosunek E^*/E . Dla rozpatrywanych wielkości otworów przebieg odpowiednich krzywych jest podobny, chociaż w kierunku 45° nieznacznie niższe wartości występują w przypadku większej średnicy otworu, czego graficznym odzwierciedleniem jest szerszy zakres wartości E^*/E zawarty pomiędzy krzywymi dla kierunku pośredniego a kierunkami 0° i 90°. Ponadto, można przyjąć, iż maksymalna i teoretyczna wartość prześwitu dla perforacji z prostym układem otworów cylindrycznych wynosi 78,5%, co pokazano na rys. 6.47. W praktyce maksymalna wielkość tego parametru jest niższa, gdyż minimalna szerokość wiązań między sąsiednimi otworami musi być większa od zera aby zachować spójność materiału. Warto dodać, iż podana teoretyczna wartość 78,5% stanowi współczynnik uwzględniany we wzorze na

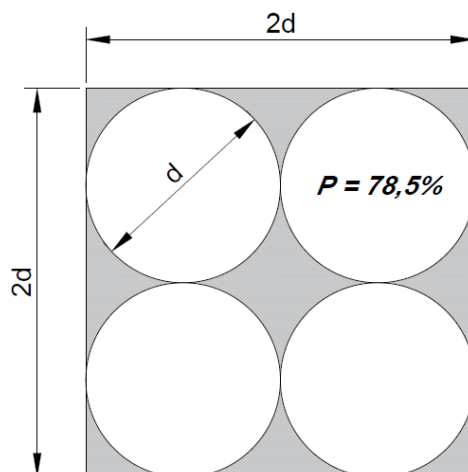
prześwit blachy perforowanej (tabela 2.1) z prostym układem otworów cylindrycznych (dla heksagonalnego układu otworów okrągłych współczynnik ten wynosi 91%).



Rys. 6.45. Wpływ prześwitu na wartość E^*/E dla perforacji prostej o średnicy otworu 2 mm

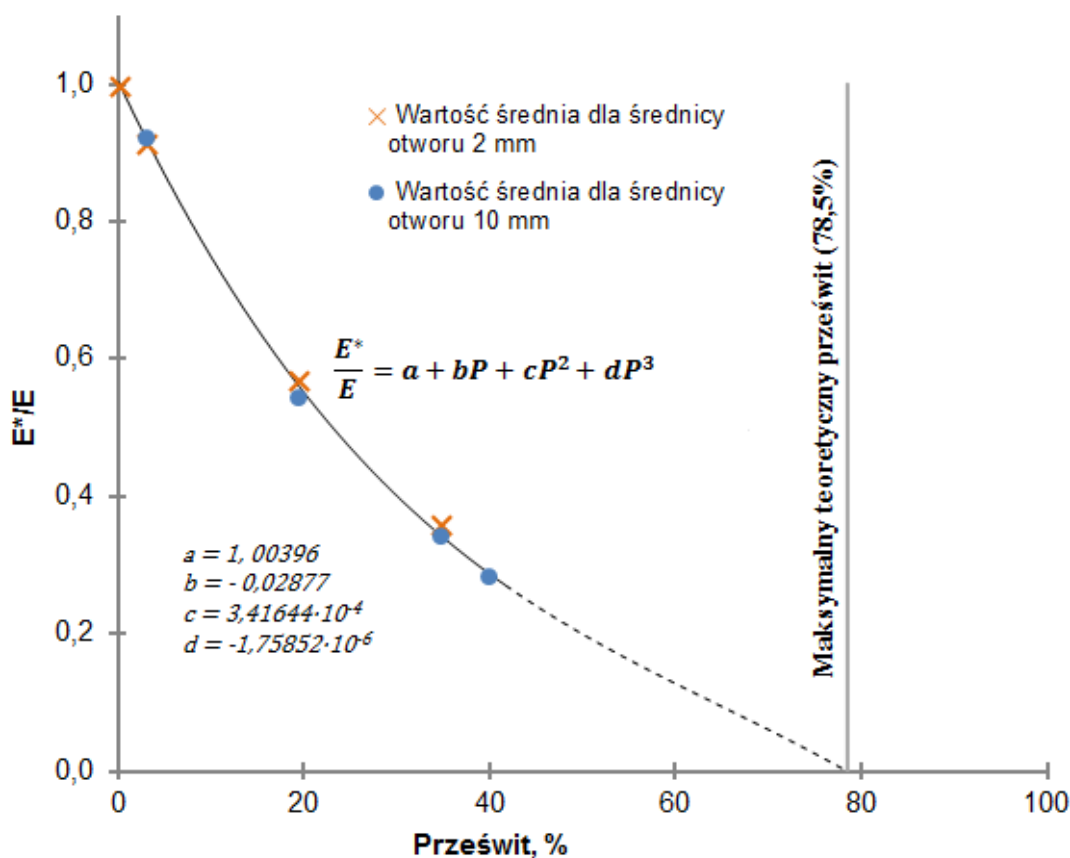


Rys. 6.46. Wpływ prześwitu na wartość E^*/E dla perforacji prostej o średnicy otworu 10 mm



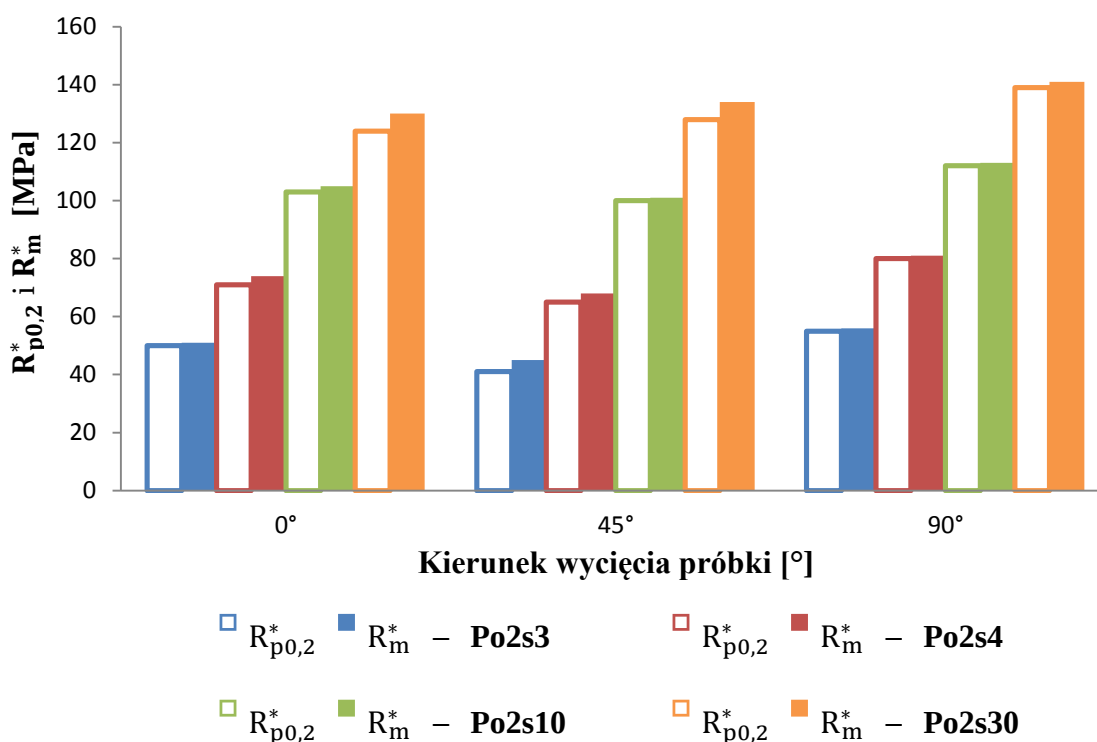
Rys. 6.47. Maksymalny teoretyczny prześwit perforacji prostej z otworami cylindrycznymi

Przeprowadzona analiza numeryczna dla różnej średnicy otworu blachy EN AW-1050A perforowanej w układzie prostym posłużyła do wyznaczenia krzywej aproksymującej otrzymane wyniki (rys. 6.48), której postać analityczna (wielomian trzeciego stopnia z odpowiednio dobranymi współczynnikami) wyraża stosunek E^*/E w funkcji prześwitu P .

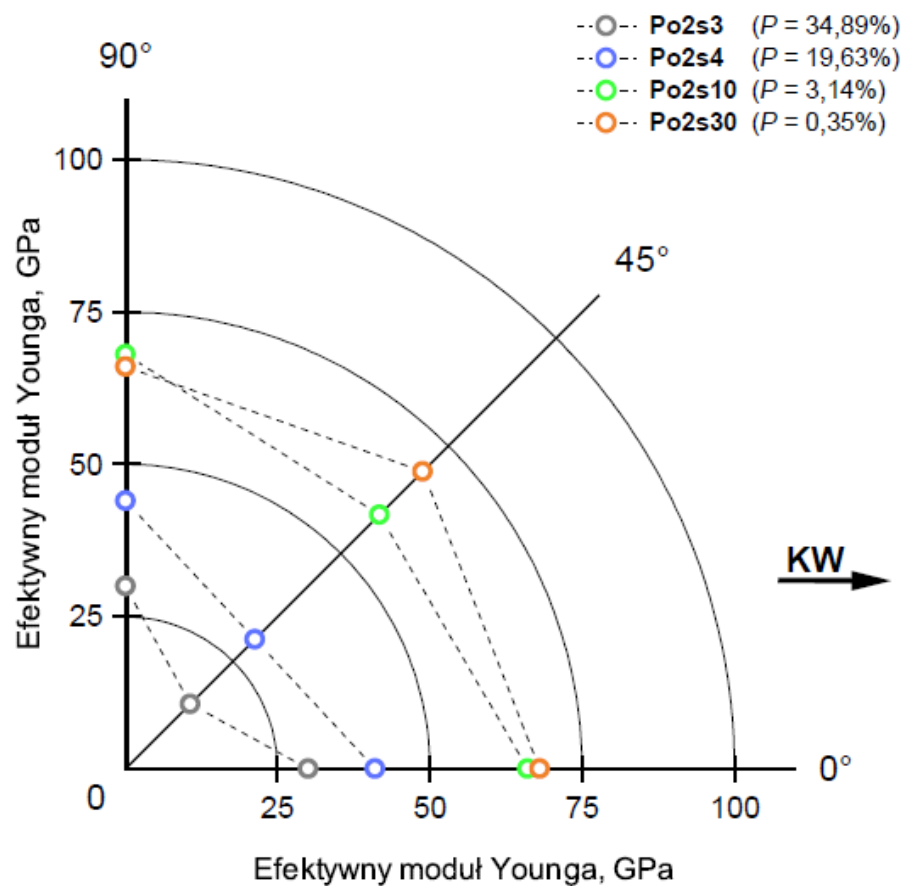


Rys. 6.48. Krzywa przedstawiająca wpływ prześwitu na wartość E^*/E , wyznaczona dla perforacji prostej ze średnicą otworu 2 mm i 10 mm

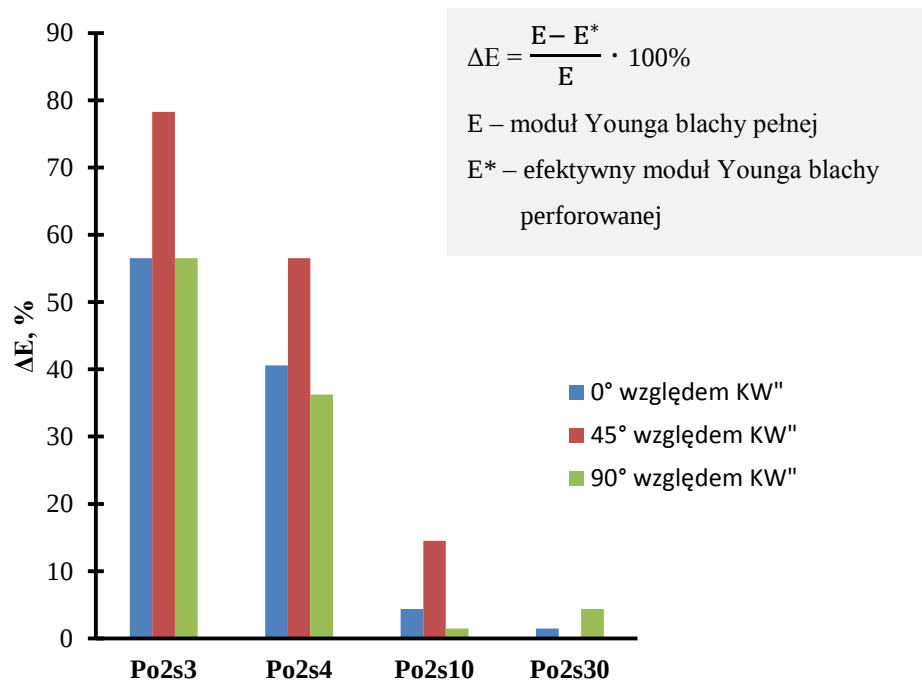
Wyznaczony eksperymentalnie rozkład efektywnego modułu Younga dla perforowanej w układzie prostym blachy EN AW-1050A ze średnicą otworu 2 mm (charakterystyka wytrzymałościowa – rys. 6.49) jest mocno zbliżony do rozkładu tego parametru otrzymanego w analizie numerycznej i potwierdza m.in. fakt, iż większy prześwit generuje wyższą niejednorodność własności sprężystych w płaszczyźnie blachy z perforacją prostą (rys. 6.50). Ponadto, badania doświadczalne wykazały podobnie jak symulacja numeryczna, największy spadek efektywnego modułu Younga rozpatrywanej blachy perforowanej dla orientacji 45° (rys. 6.51). Chociaż w przypadku blachy Po2s30 nie można tego stwierdzić, to należy to tłumaczyć bardzo małą wartością prześwitu wynoszącą 0,35% (przy tak niskiej wartości prześwitu anizotropia własności sprężystych wynikająca z perforacji jest bardzo mała lub praktycznie niedostrzegalna).



Rys. 6.49. Charakterystyka wytrzymałościowa blachy perforowanej EN AW-1050A z prostym układem otworów cylindrycznych dla różnej wartości prześwitu

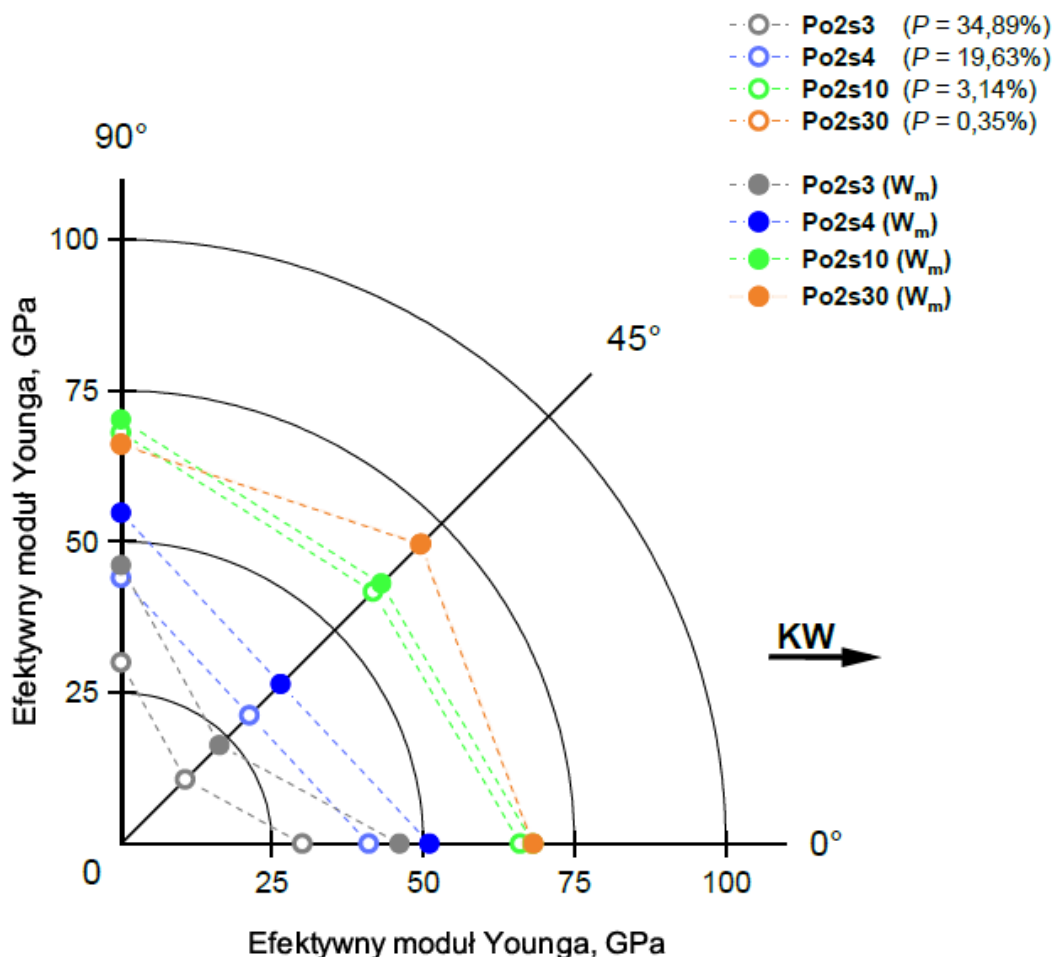


Rys. 6.50. Wyznaczony eksperymentalnie rozkład efektywnego modułu Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla różnych wartości prześwitu (średnica otworu 2 mm)



Rys. 6.51. Spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku perforacji dla średnicy otworu 2 mm (wyniki eksperymentalne)

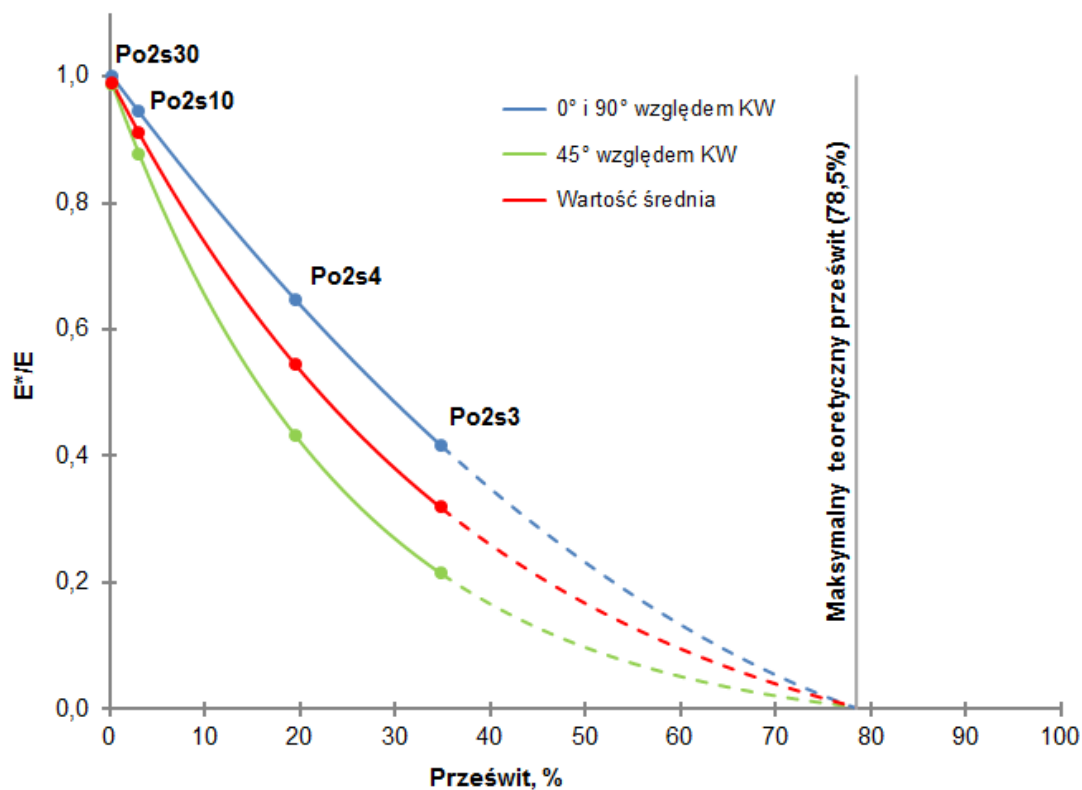
Podobnie jak w przypadku wyników badań numerycznych, na rys. 6.52 zaprezentowano określony doświadczalnie efektywny moduł Younga rozpatrywanej blachy perforowanej z uwzględnieniem wskaźnika masy W_m .



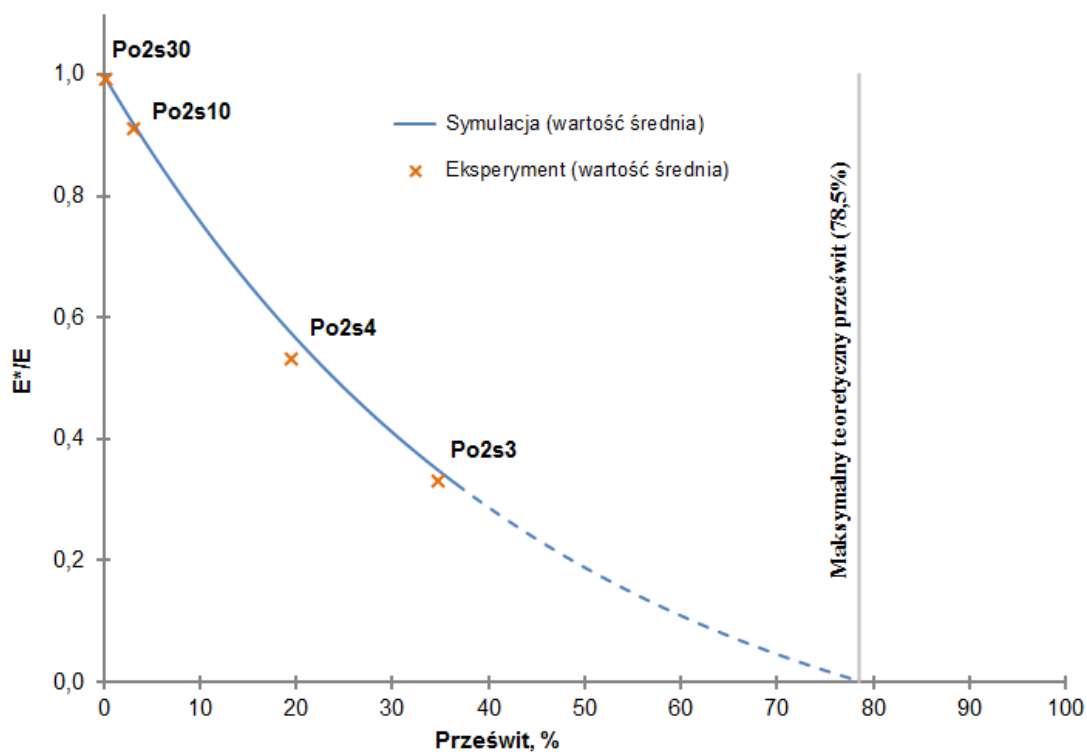
Rys. 6.52. Efektywny moduł Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla średnicy otworu 2 mm z uwzględnieniem wskaźnika masy W_m (wyniki eksperymentalne)

Krzywe wyznaczone na podstawie wyników doświadczalnych przedstawiające zależność stosunku E^*/E od prześwitu zaprezentowano na rys. 6.53. Ich kształt i przebieg jest mocno zbliżony do analogicznych krzywych otrzymanych za pomocą analizy numerycznej.

Zgodność wyników analizy numerycznej i badań eksperymentalnych przedstawiono na rys. 6.54. Uzyskane wartości charakteryzują się dużą zgodnością, co świadczy o poprawności dokonanej na ich podstawie oceny wpływu prześwitu na własności sprężyste blachy perforowanej z prostym układem otworów cylindrycznych.



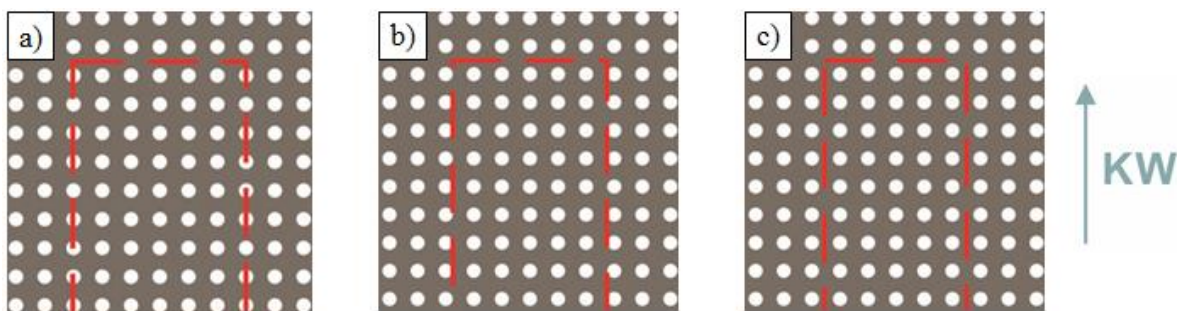
Rys. 6.53. Wpływ prześwitu na wartość E^*/E dla blachy EN AW-1050A z perforacją prostą o średnicy otworu 2 mm (wyniki eksperymentalne)



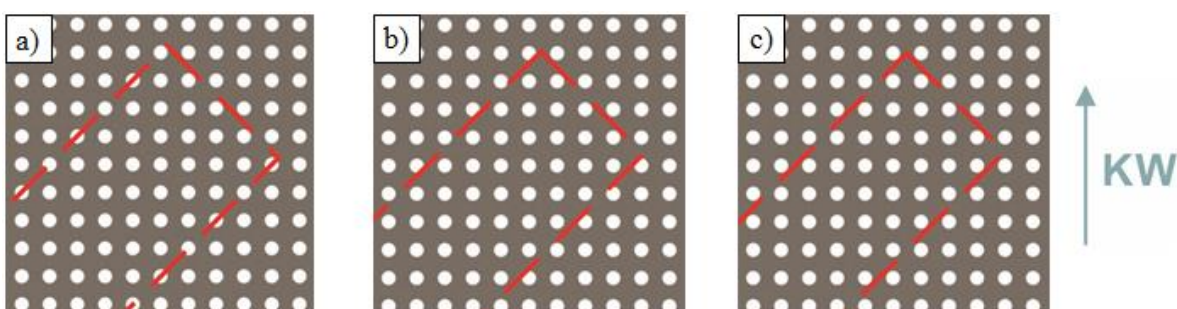
Rys. 6.54. Zestawienie wyników symulacji numerycznej i badań eksperymentalnych dotyczących wpływu prześwitu na spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku prostego układu perforacji

6.6. Wpływ szerokości próbki i usytuowania linii cięcia blachy perforowanej na efektywny moduł Younga

W odróżnieniu od blachy pełnej, czyli tworzywa litego, któremu można przypisać określone stałe materiałowe, blacha perforowana wykazuje inne własności w zależności od poprzecznego przekroju czynnego. Dla elementarnego segmentu danej perforacji i jego wielokrotności własności mechaniczne kształtują się na takim samym poziomie, natomiast w przypadku gdy linia cięcia (krawędź boczna) blachy perforowanej zaburza tę periodyczność (a tym samym wpływa na rozkład naprężeń i odkształceń w materiale) odpowiedź sprężysta badanego tworzywa może być nieco inna. Określone umiejscowienie linii cięcia determinuje nie tylko szerokość blachy, ale decyduje także o różnym udziale (w przypadku gdy krawędź boczna blachy perforowanej zakłóca podstawową powtarzalność sekwencji otworów) pustej powierzchni w całkowitym przekroju poprzecznym perforowanego materiału. W tym celu na podstawie wyników badań numerycznych (*Solidworks*) przeanalizowano wpływ różnego umiejscowienia linii cięcia (rys. 6.55 i 6.56) i szerokości blachy (DC01) z perforacją prostą (Po2s4) na efektywny moduł Younga. Dla orientacji 0° (KW) szerokość bazowa wynosiła 24 mm z krawędziami bocznymi przechodzącymi przez środki otworów oraz warianty stanowiące jej podwójną (48 mm) i poczwórną wartość (96 mm). Gdy linia cięcia przebiegała stycznie do krawędzi otworów (rys. 6.55b i 6.56b) szerokość paska blachy perforowanej wynosiła odpowiednio 22 mm, 46 mm i 94 mm, natomiast jej usytuowanie pomiędzy otworami (rys. 6.55c i 6.56c) odpowiadało wartościom kolejno 20 mm, 44 mm i 92 mm. Analogiczne zestawienia rozpatrywano dla kierunku 45° tej perforacji, gdzie w przypadku krawędzi bocznej pokrywającej się ze środkami otworów (rys. 6.56a) szerokość blachy perforowanej była równa 22,63 mm, 45,26 mm i 90,52 mm. Dla pozostałych wariantów orientacji pośredniej (45°), czyli z linią cięcia umiejscowioną stycznie do krawędzi oczek i pomiędzy nimi szerokość perforowanych pasków wynosiła odpowiednio 20,63 mm, 43,26 mm i 88,52 mm oraz 19,8 mm, 42,43 mm i 87,69 mm.

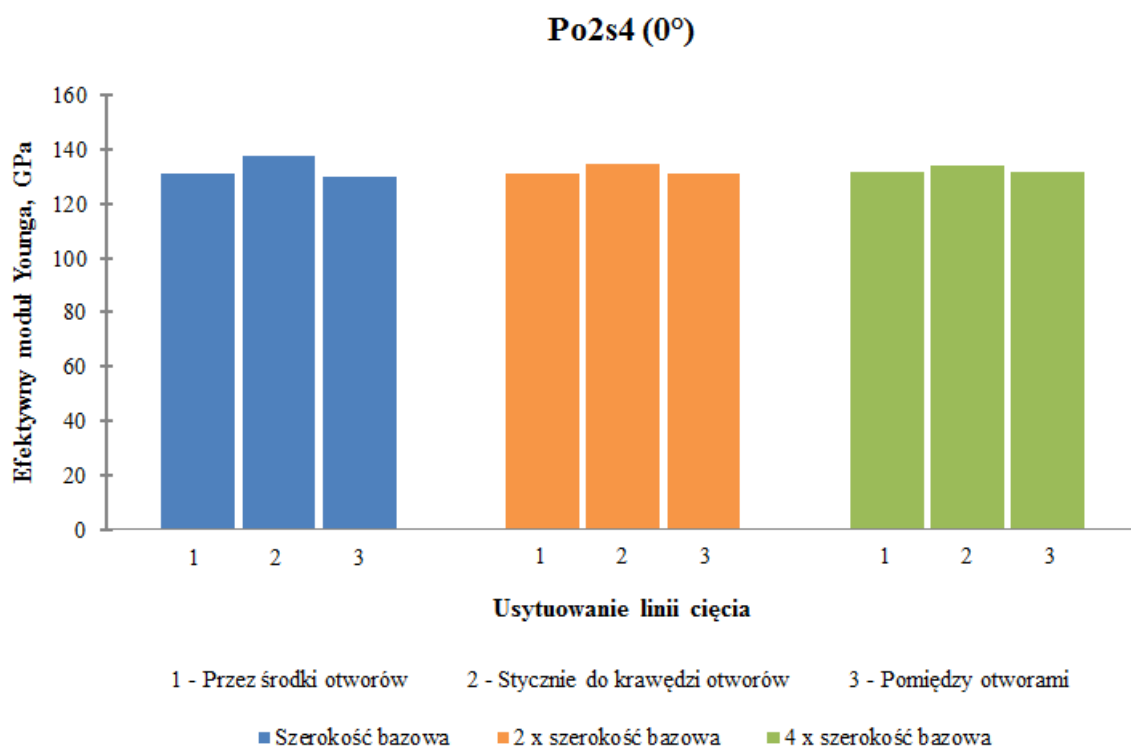


Rys. 6.55. Usytuowanie krawędzi bocznej dla orientacji 0° (KW) perforacji Po2s4: a) przez środki otworów, b) stycznie do krawędzi otworów, c) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości)

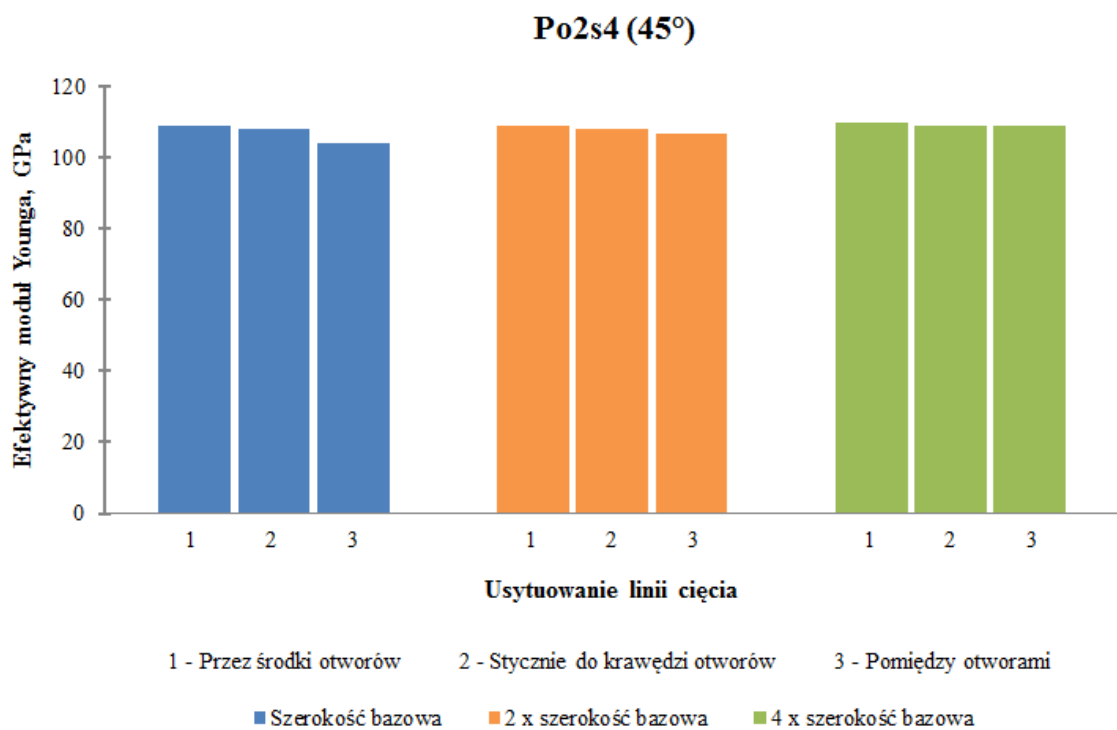


Rys. 6.56. Usytuowanie krawędzi bocznej dla orientacji 45° perforacji Po2s4: a) przez środki otworów, b) stycznie do krawędzi otworów, c) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości)

Na podstawie rys. 6.57 i 6.58 można stwierdzić, iż usytuowanie krawędzi bocznej blachy perforowanej w niewielkim stopniu wpływa na wartość efektywnego modułu Younga. Generalnie, wraz ze wzrostem szerokości próbki wpływ ten maleje, chociaż z nieco inną intensywnością w zależności od jej orientacji względem kierunku najgęstszego upakowania otworów. Dla kierunku 0° wyższe wartości badanej stałej sprężystej występowały wówczas gdy boczna linia cięcia blachy perforowanej była styczna do krawędzi otworów, natomiast w pozostałych przypadkach parametr ten kształtował się na delikatnie niższym i mocno zbliżonym (dla szerokości bazowej) lub nawet identycznym poziomie (dla szerokości zwiększonej dwu- i czterokrotnie względem jej wartości bazowej). Z kolei orientacja 45° charakteryzowała się najwyższym efektywnym modułem Younga dla linii cięcia przechodzącej przez środki otworów blachy z perforacją prostą.

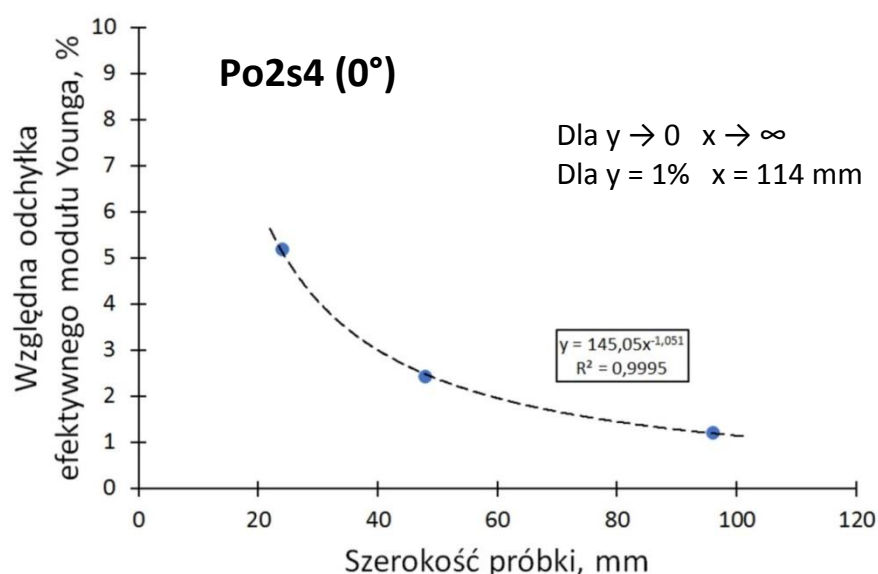


Rys. 6.57. Efektywny moduł Younga dla różnej szerokości i usytuowania linii cięcia blachy z perforacją prostą (orientacja 0°)

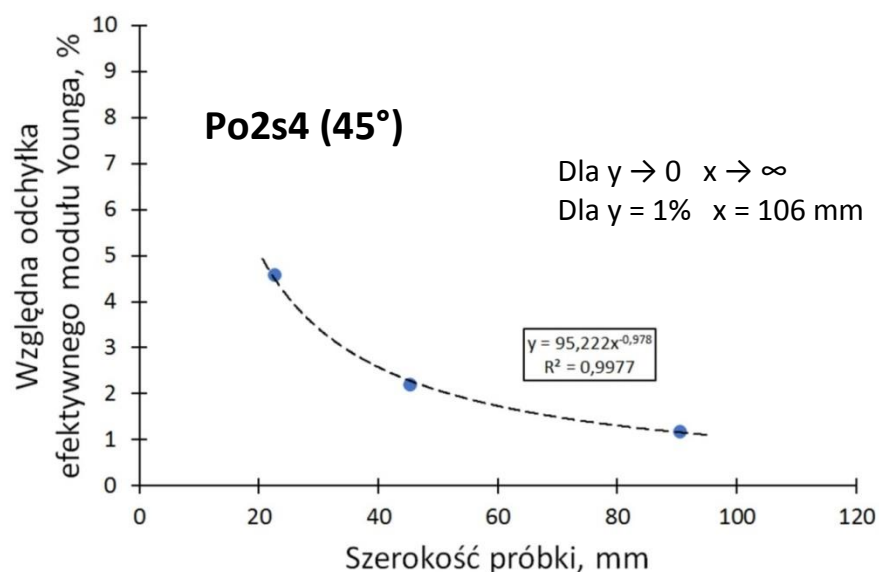


Rys. 6.58. Efektywny moduł Younga dla różnej szerokości i usytuowania linii cięcia blachy z perforacją prostą (orientacja 45°)

W praktyce zazwyczaj szerokość blach perforowanych jest zdecydowanie większa od szerokości próbek rozpatrywanych w niniejszej analizie. Zatem, dla arkusza blachy o często dostępnym formacie 1000 mm x 2000 mm, wpływ usytuowania jego krawędzi bocznej będzie wręcz niedostrzegalny, a z aplikacyjnego punktu widzenia nawet mało istotny. Można jednak, dla założonej odchyłki efektywnego modułu Younga (wynikającej z niedokładności usytuowania krawędzi bocznej) określić szerokość próbki blachy perforowanej [400]. W tym kontekście, przyjmując, iż krawędź boczna blachy perforowanej powinna pokrywać się ze środkami otworów, wyznaczono zależność względnej odchyłki efektywnego modułu Younga od szerokości próbki dla kierunku 0° i 45° perforacji prostej (rys. 6.59 i 6.60). Wartość odchyłki dla każdej rozważanej szerokości określono poprzez odniesienie maksymalnej różnicy efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej spowodowanej innym usytuowaniem krawędzi bocznej próbki (3 warianty), do wartości tej stałej sprężystej w przypadku gdy boczna linia cięcia przechodziła przez środki otworów. Na podstawie otrzymanych wartości, aproksymowano krzywą, której postać analityczna posłużyła do wyznaczenia szerokości próbki dla przyjętej odchyłki równej 1 % (rys. 6.59 i 6.60).

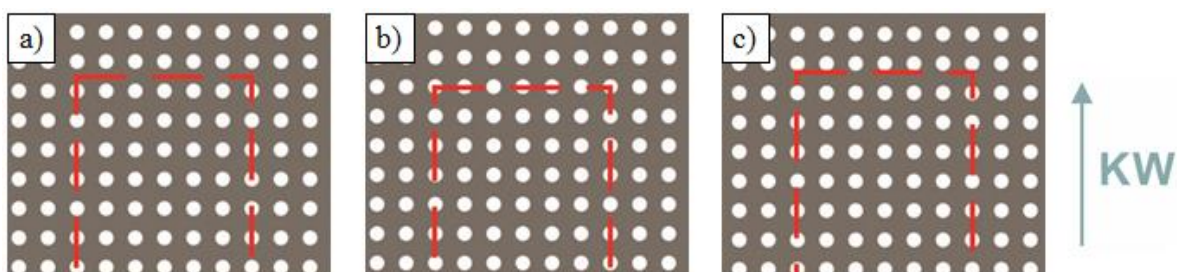


Rys. 6.59. Względna odchyłka efektywnego modułu Younga w zależności od szerokości próbki blachy z perforacją prostą dla kierunku 0°

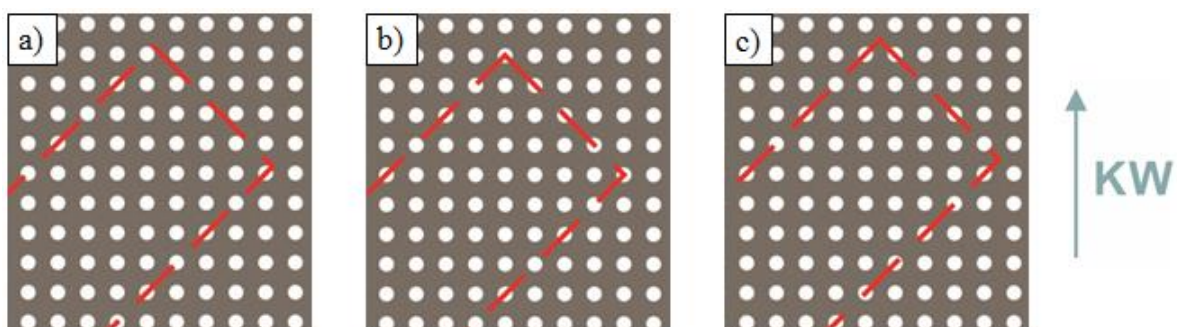


Rys. 6.60. Względna odchyłka efektywnego modułu Younga w zależności od szerokości próbki blachy z perforacją prostą dla kierunku 45°

Dopełnieniem niniejszych rozważań jest analiza wpływu usytuowania linii wyznaczających bazę pomiarową pasków blachy perforowanej (Po2s4) na efektywny moduł sprężystości wzdłużnej. Na rys. 6.61 i 6.62 przedstawiono rozpatrywane warianty odpowiednio dla kierunku 0° i 45°.

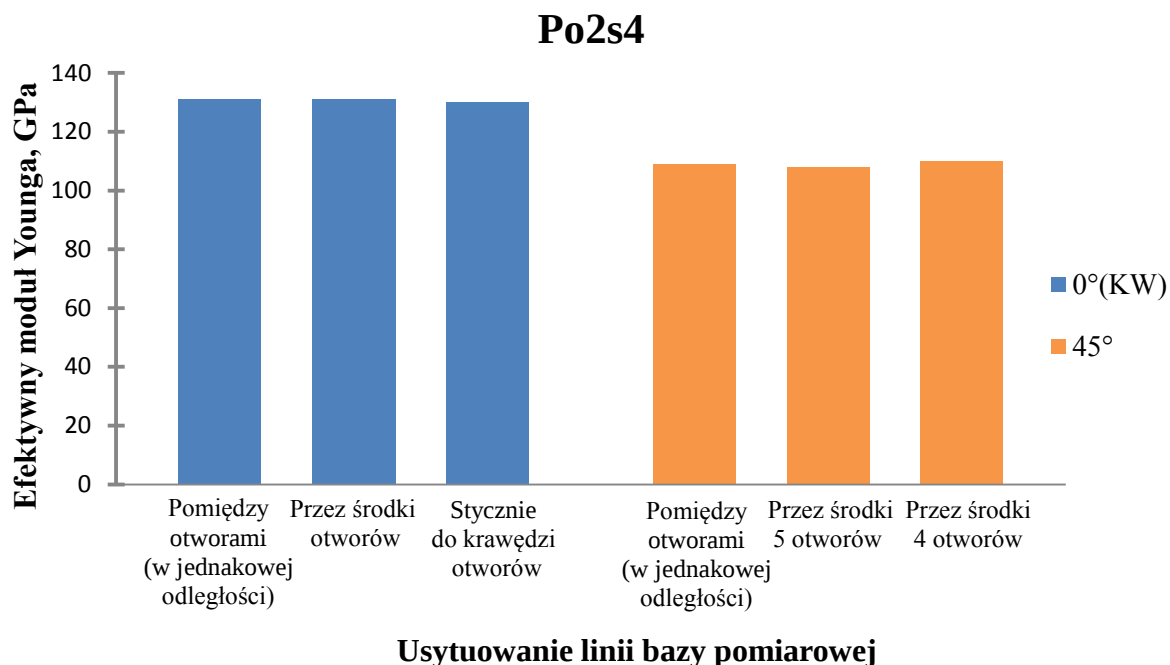


Rys. 6.61. Linia bazy pomiarowej dla orientacji 0° (KW) perforacji Po2s4: a) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości), b) przez środki otworów, c) stycznie do krawędzi otworów



Rys. 6.62. Linia bazy pomiarowej dla orientacji 45° perforacji Po2s4: a) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości), b) przez środki 5 otworów, c) przez środki 4 otworów

Wartości efektywnego modułu Younga (rys. 6.63) praktycznie nie zależą od usytuowania linii bazy pomiarowej dla badanej perforacji w obu analizowanych kierunkach (0° i 45°).



Rys. 6.63. Wartości efektywnego modułu Younga blachy z perforacją prostą dla orientacji 0° i 45° w zależności od usytuowania linii bazy pomiarowej próbki

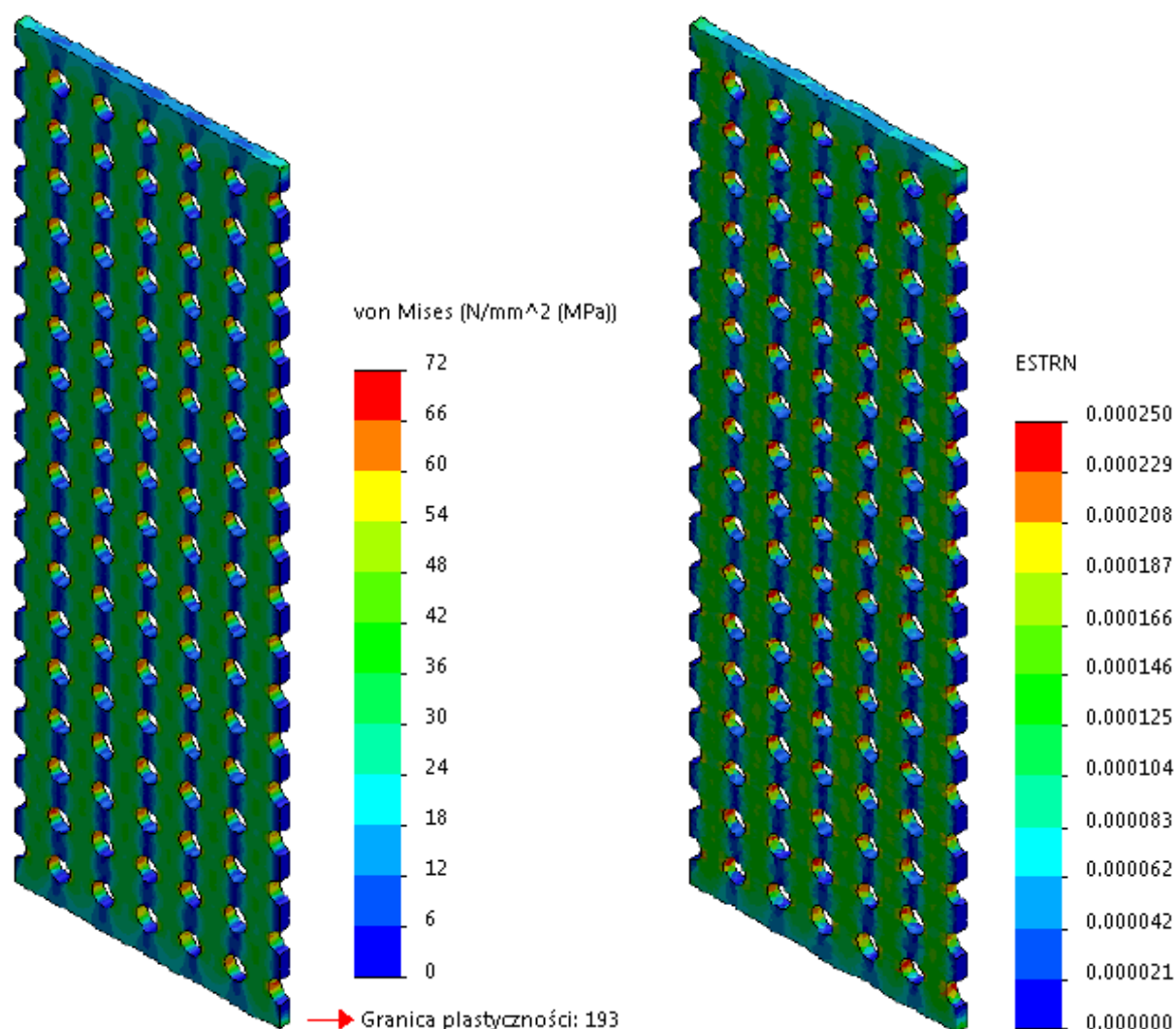
6.7. Analiza stanu naprężenia i odkształcenia w blachach perforowanych

Rozkłady naprężeń i odkształceń dla poszczególnych kierunków perforacji prostej (Po2s4) i heksagonalnej (Ho2s4), poddanej jednoosiowemu rozciąganiu (wartość siły równa 500 N) oraz trójpunktowemu gięciu (nacisk trzpienia równy 5 N), zaprezentowano na przykładzie blachy stalowej DC01. Co oczywiste, charakter rozkładu analizowanych parametrów pozostaje taki sam, niezależnie od materiału macierzystego blachy. Dla każdego przypadku przyjęto indywidualny zakres skali, którego górna wartość odpowiada największej wartości naprężenia zastępczego lub odkształcenia zastępczego w materiale. W legendzie wykresów przyjęto wygenerowane przez oprogramowanie (*Solidworks*) określenia: von Mises i ESTRN, odpowiednio dla intensywności naprężenia i odkształcenia.

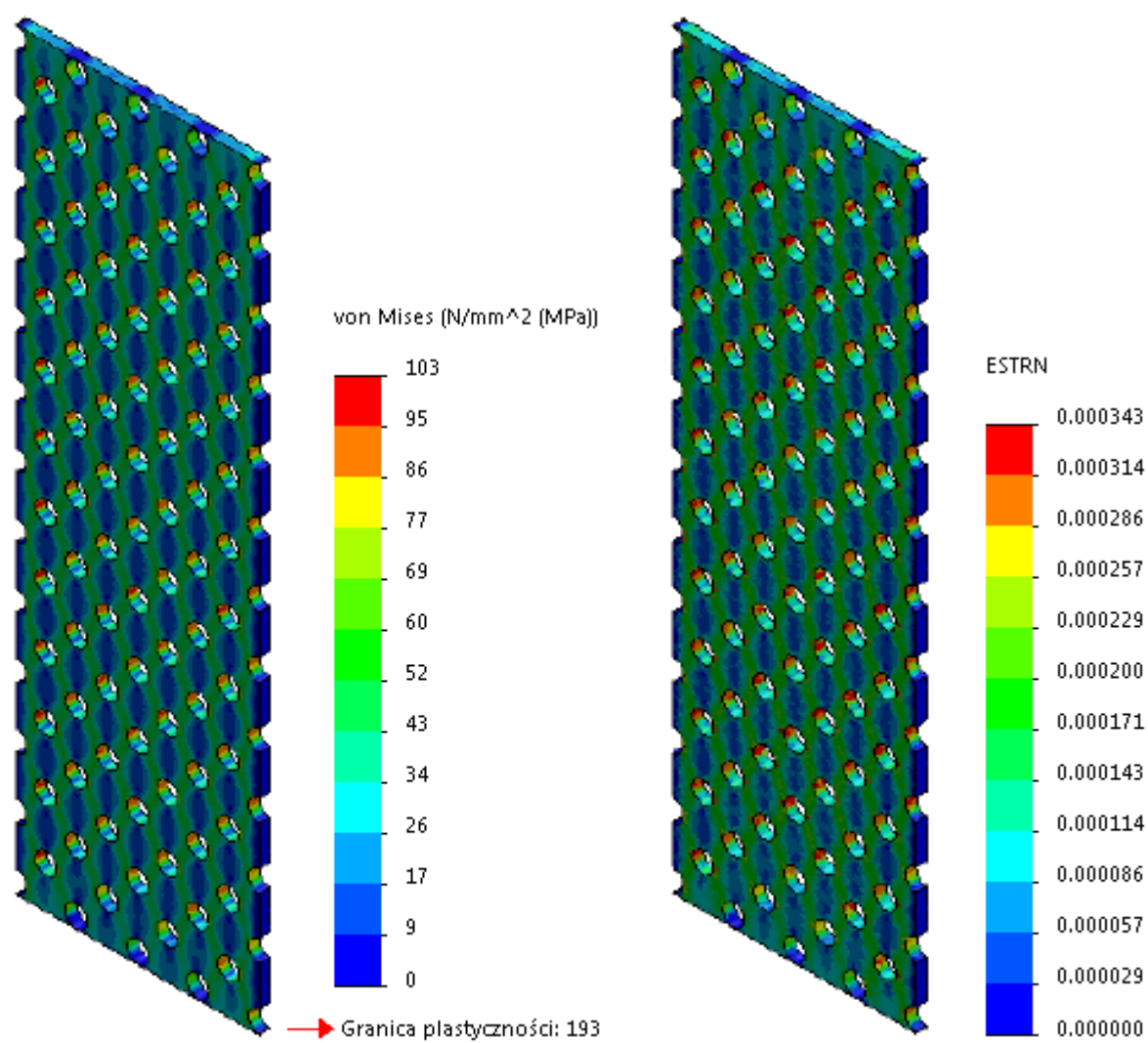
6.7.1. Jednoosiowe rozciąganie

Niższe wartości naprężeń maksymalnych występują w blasze z perforacją prostą. Pod tym względem zdecydowanie wyróżnia się kierunek 0° tego układu otworów dla którego największe naprężenie wynosi 72 MPa i jest najniższe ze wszystkich rozważanych

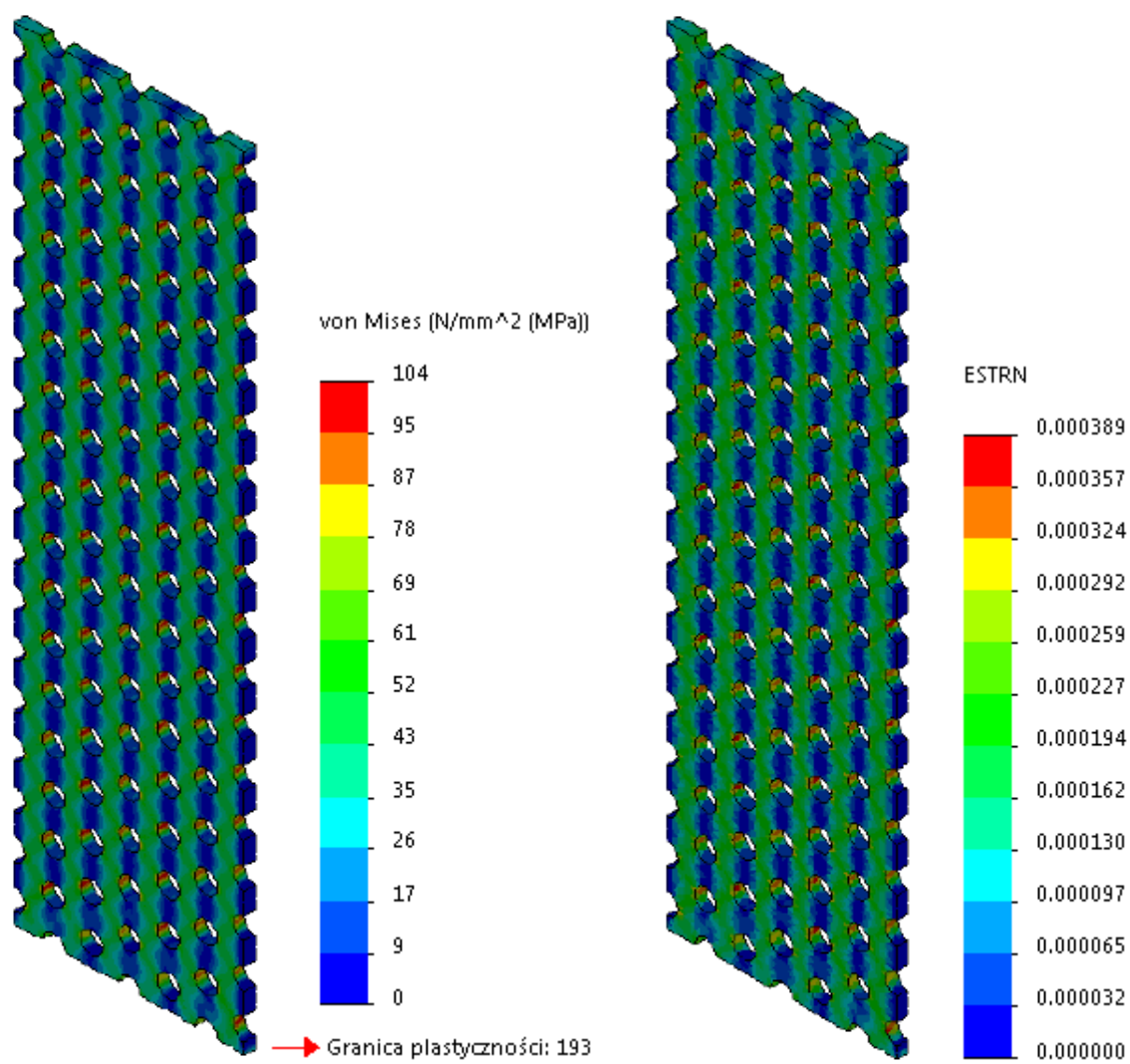
przypadków. Z kolei najwyższą wartość naprężenia maksymalnego obserwuje się dla kierunku 45° perforacji heksagonalnej, która jest równa 159 MPa. Dla pozostałych orientacji perforacji prostej (45°) i heksagonalnej (0° i 30°) parametr ten jest bardzo zbliżony i mieści się w zakresie od 103 do 106 MPa. Podobną tendencję obserwuje się w przypadku maksymalnych wartości odkształcenia, z tą różnicą, iż blacha Ho2s4 0° pomimo nieco mniejszej intensywności naprężenia (maksymalnie 104 MPa) charakteryzuje się większą intensywnością odkształcenia (maksymalnie 0,000389) w porównaniu do blachy Ho2s4 30° (naprężenie maksymalne – 106 MPa i odkształcenie maksymalne – 0,000376).



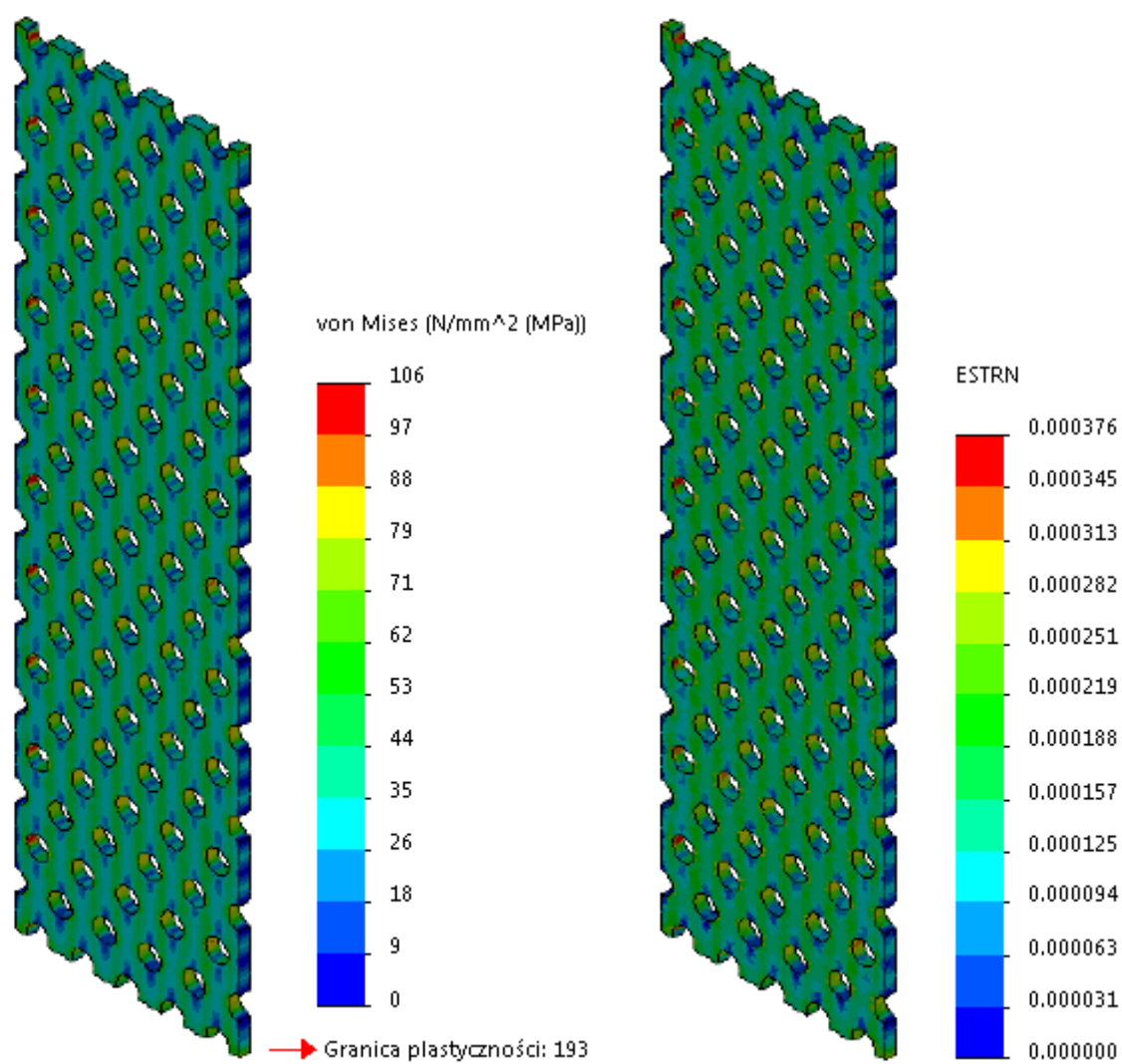
Rys. 6.64. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 0°



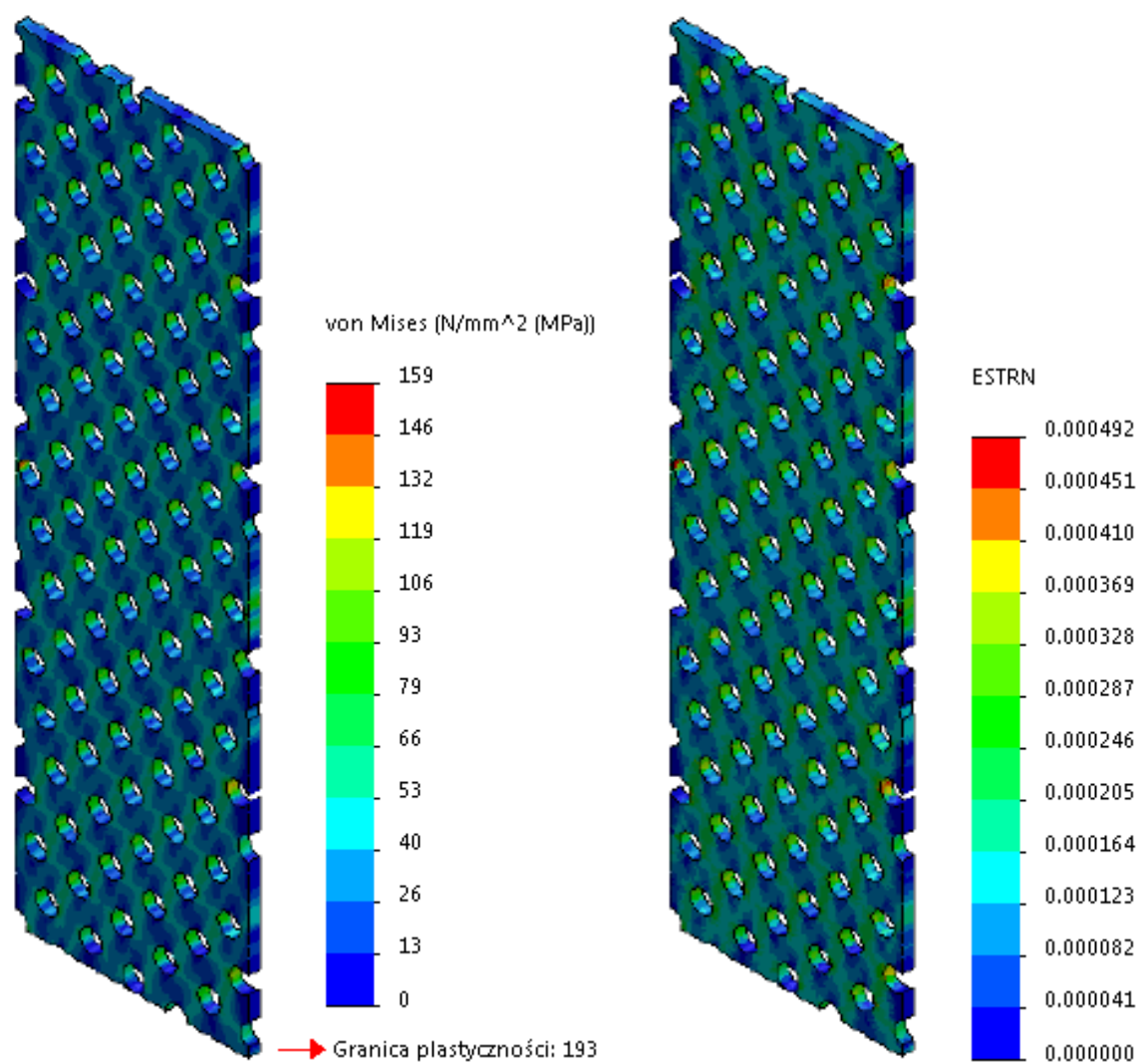
Rys. 6.65. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 45°



Rys.6.66. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 0°



Rys. 6.67. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 30°

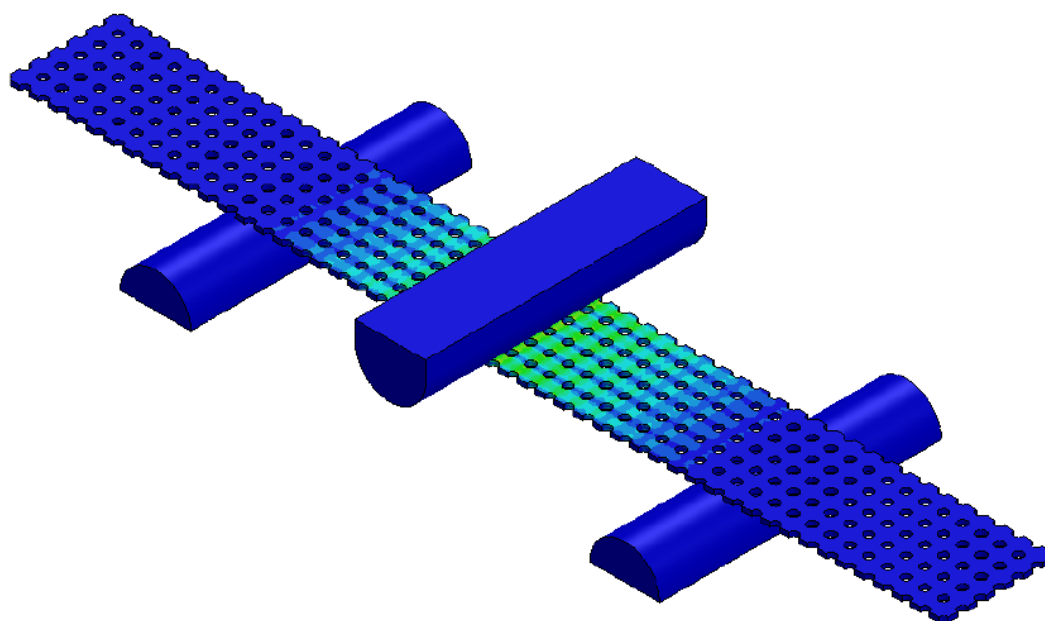


Rys.6.68. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 45°

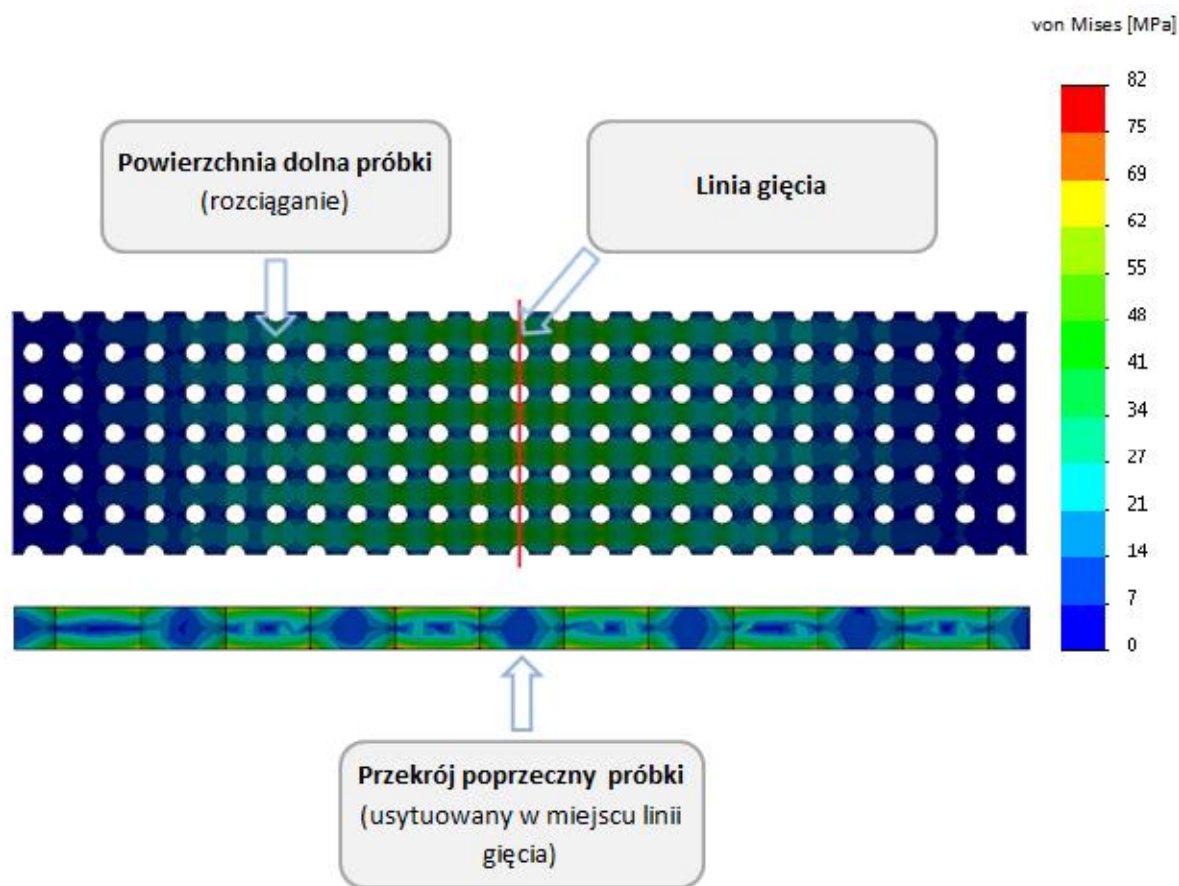
Na podstawie przedstawionych wykresów (rys. 6.64 – 6.68) widać wyraźnie, iż określony układ otworów w blasze powoduje niejednorodny stan naprężenia, co determinuje niejednorodność odkształcenia materiału. Rozkład naprężenia i odkształcenia zależy od usytuowania siatki otworów w stosunku do kierunku obciążenia zewnętrznego. Dla blach: Po2s4 45°, Ho2s4 0° i Ho2s4 45° naprężenie i odkształcenie jest skoncentrowane w mostach pomiędzy otworami w układzie romboidalnym. Z kolei blachy: Po2s4 0° i Ho2s4 30° cechują się pod tym względem innym rozkładem, tzn. naprężenie i odkształcenie jest zlokalizowane głównie pomiędzy otworami tworząc charakterystyczne pasy wzdłuż kierunku siły rozciągającej. Ponadto, należy dodać, iż dla każdego rozpatrywanego przypadku, obszary o największej lokalizacji naprężenia i odkształcenia występują przy krawędzi (na ścianie) cylindrycznego otworu (po obu jego stronach).

6.7.2. Trójpunktowe gięcie

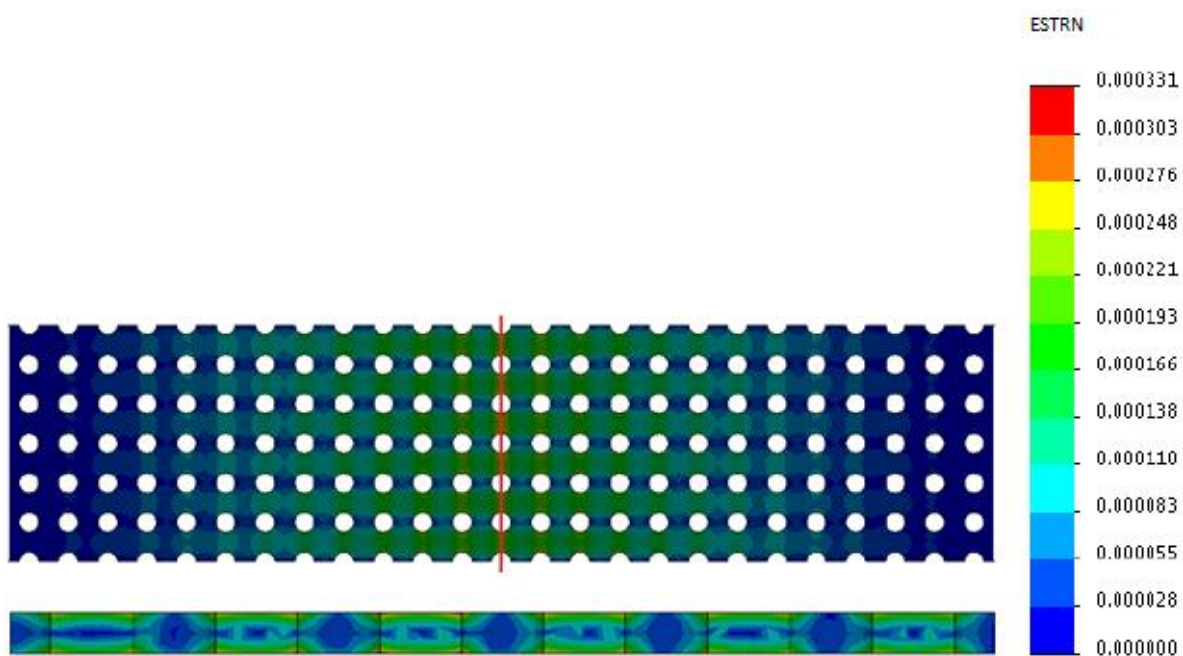
Na rys. 6.69 podano schemat symulacji trójpunktowego gięcia na przykładzie perforacji Po2s4 dla kierunku 0°. Z kolei, na rys. 6.70 zamieszczono krótki opis sposobu prezentacji rozkładu analizowanych parametrów, który odnosi się także do pozostałych analizowanych przypadków. Długość pasków blachy (o szerokości bazowej), na których przedstawiono rozkład naprężeń i odkształceń odpowiada rozstawowi podpór (100 mm).



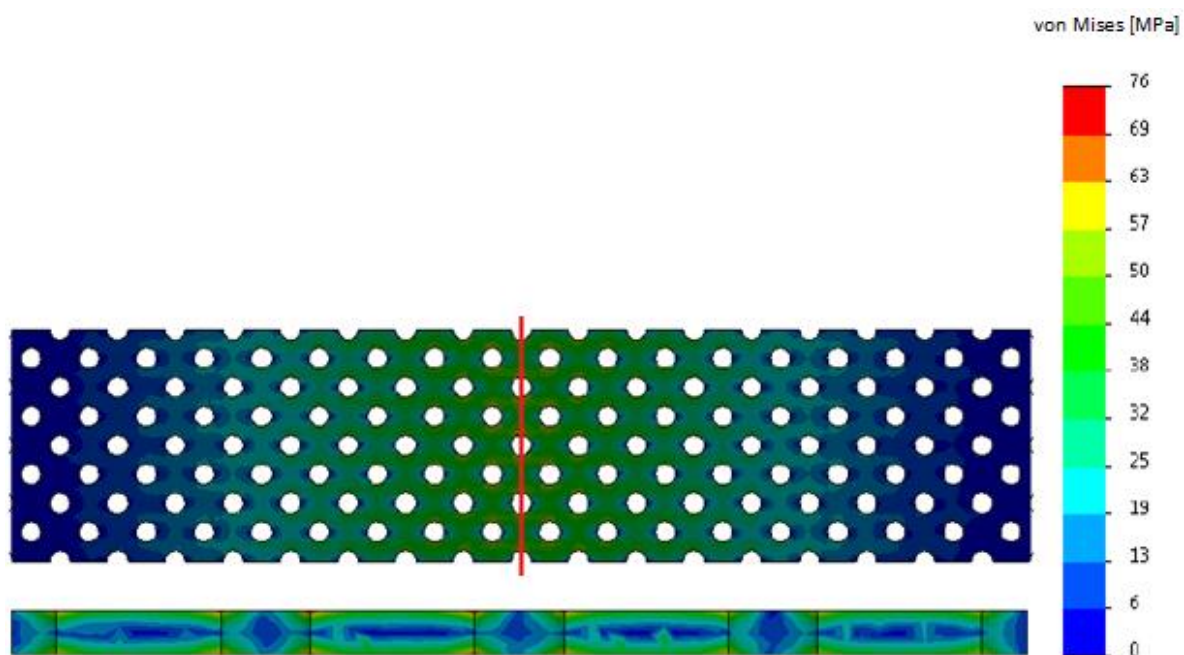
Rys. 6.69. Symulacja numeryczna trójpunktowego gięcia dla przykładowej blachy Po2s4 ze stali DC01



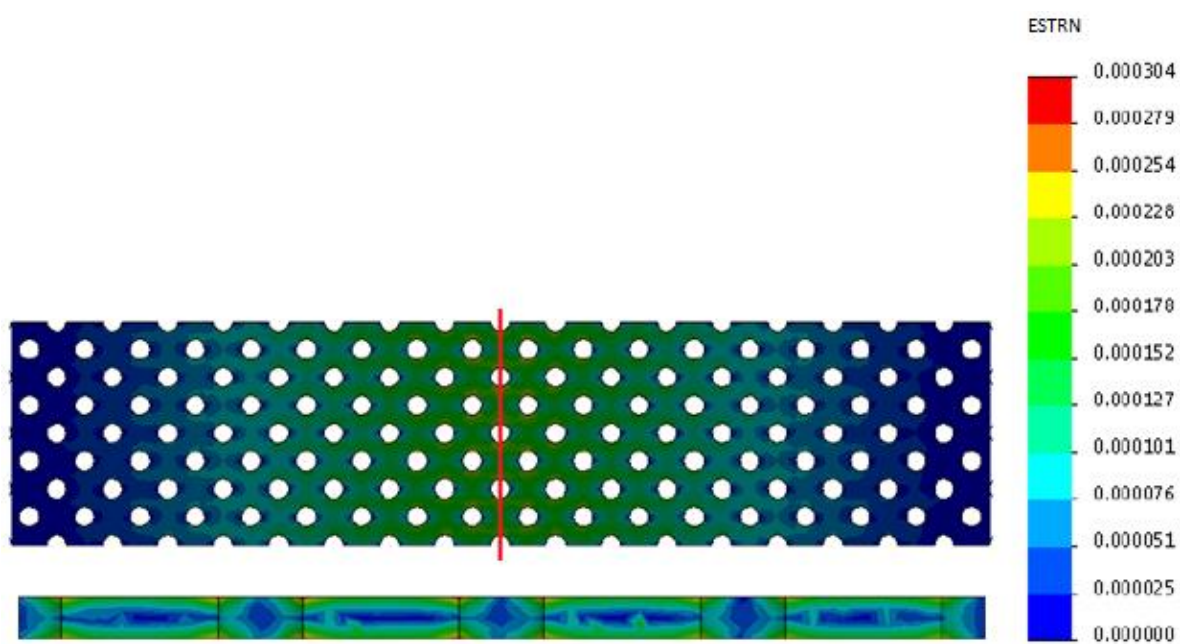
Rys. 6.70. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 0°



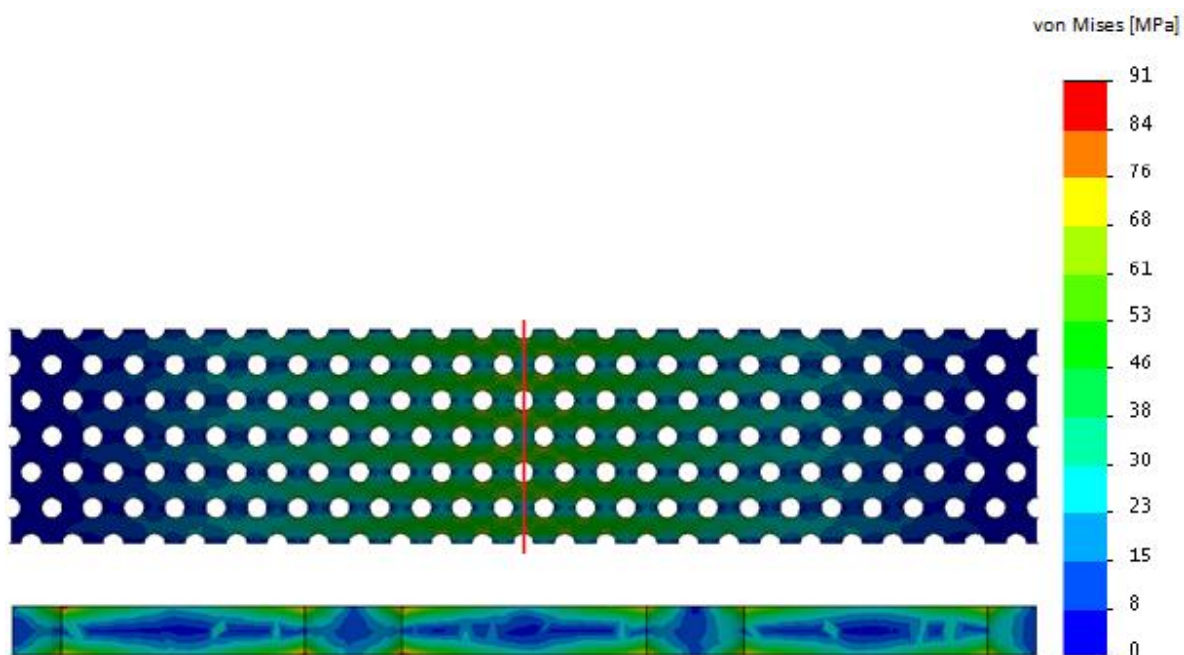
Rys. 6.71. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 0°



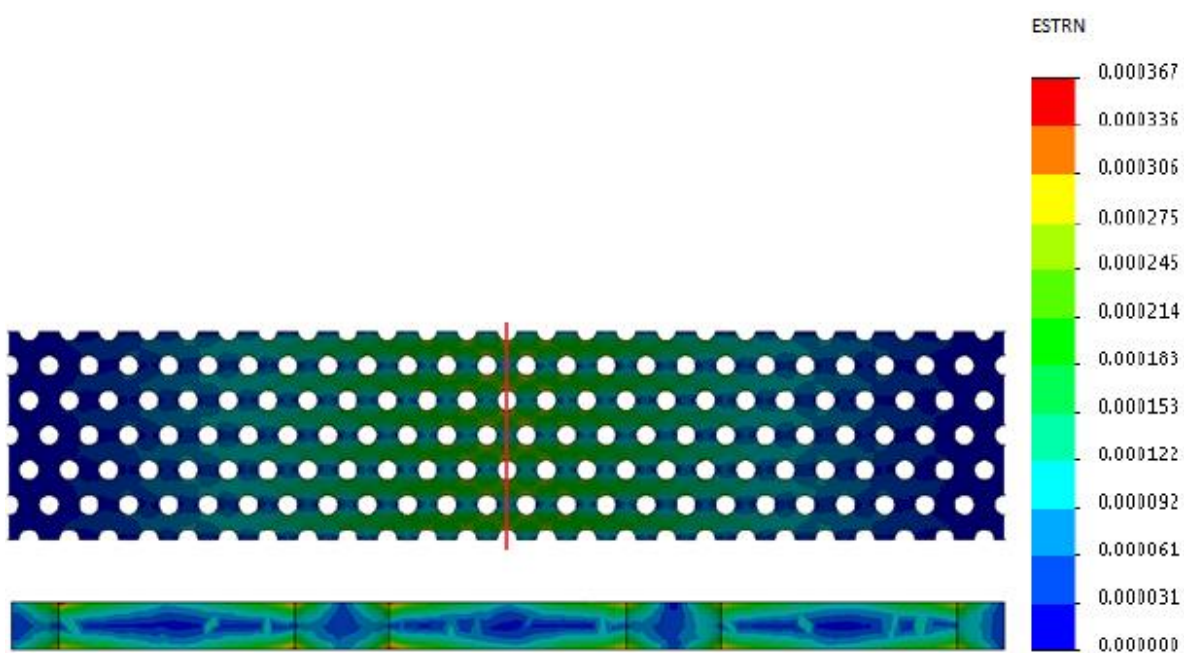
Rys. 6.72. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 45°



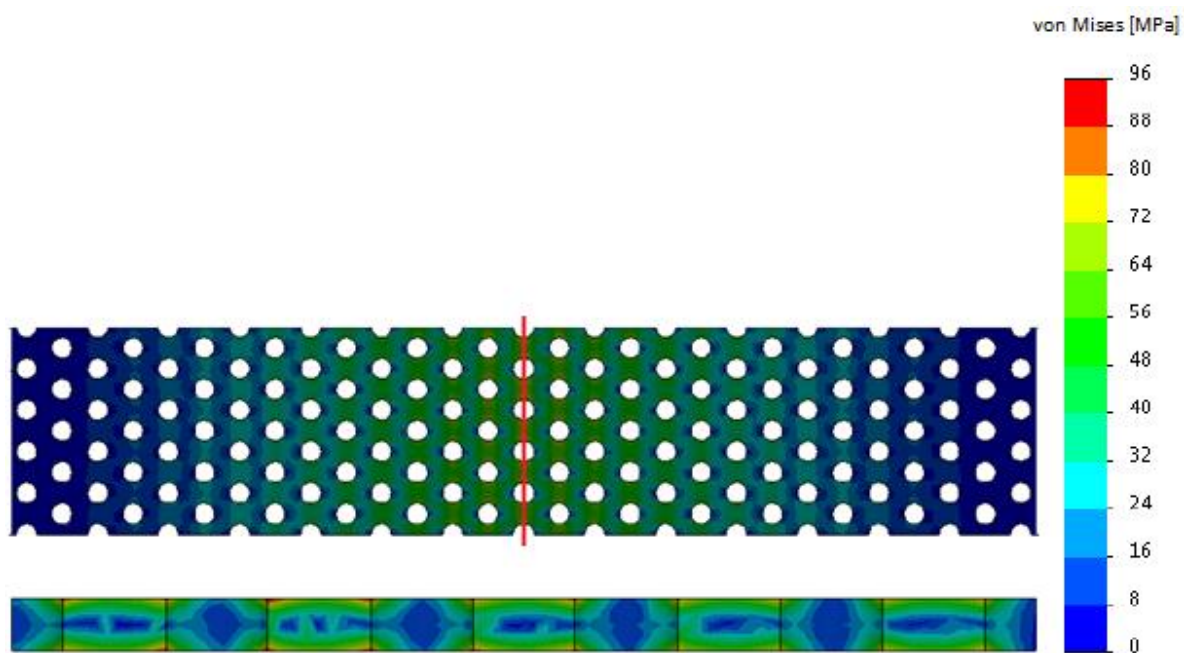
Rys. 6.73. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 45°



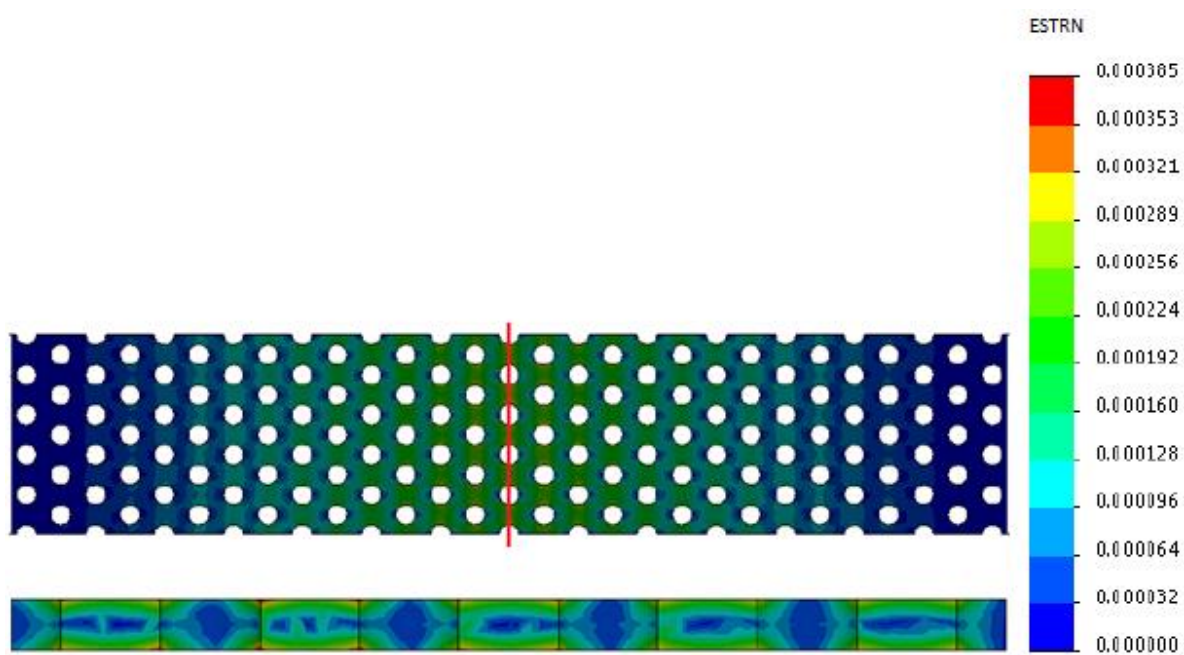
Rys. 6.74. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 0°



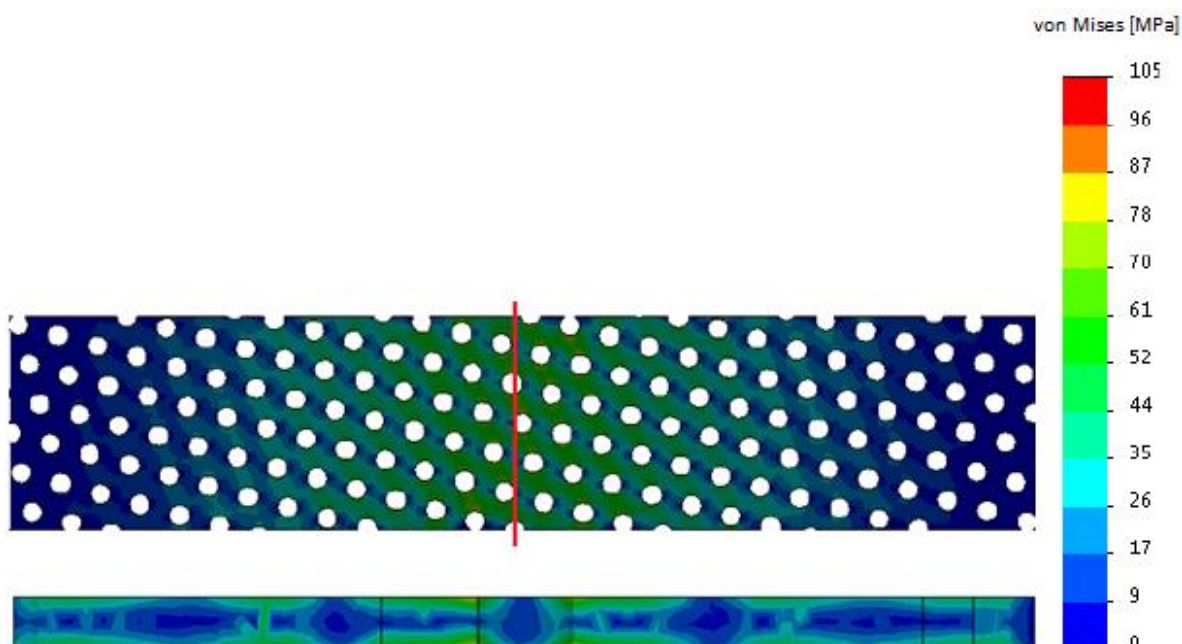
Rys. 6.75. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 0°



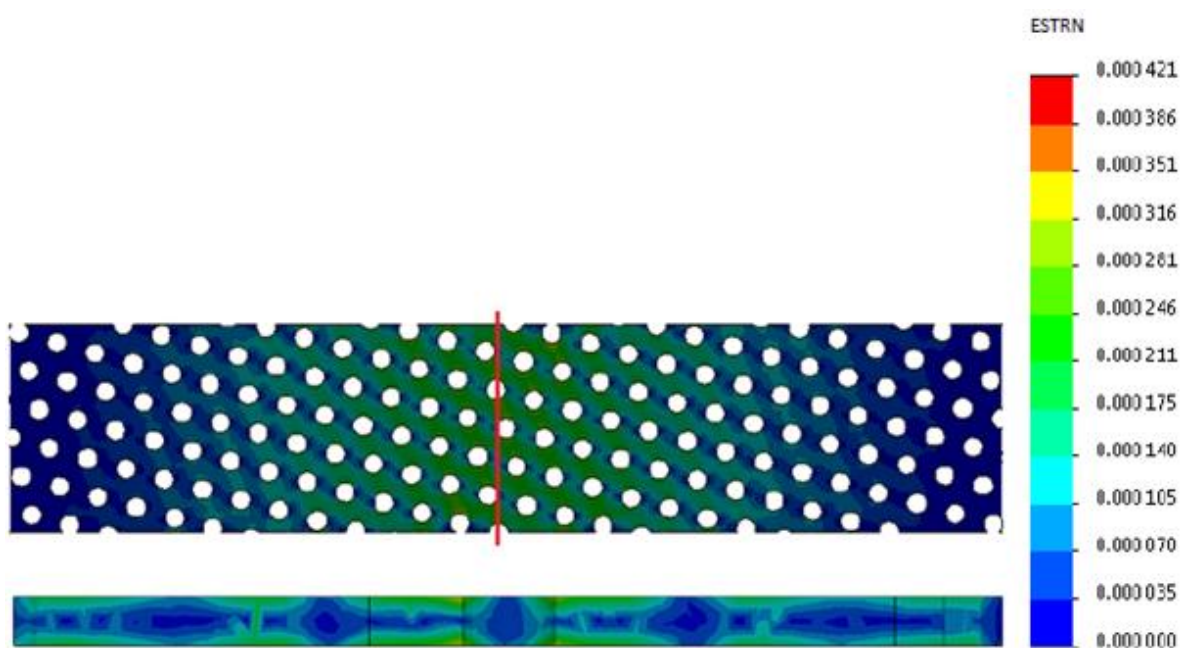
Rys. 6.76. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 30°



Rys. 6.77. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 30°



Rys. 6.78. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 45°



Rys. 6.79. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 45°

Podobnie jak w przypadku jednoosiowego rozciągania, wyższe wartości naprężeń i odkształceń wystąpiły dla heksagonalnego układu otworów (najwyższe dla kierunku 45°). Należy zauważyć, iż obciążenie zewnętrzne w postaci trójpunktowego gięcia skutkowało niższą wartością maksymalnego naprężenia i odkształcenia zastępczego dla kierunku 45° perforacji prostej w porównaniu z kierunkiem 0° tego układu otworów (inaczej niż dla

jednoosiowego rozciągania). Potwierdza to wcześniej zaprezentowane wyniki (rozdział 6.4) dotyczące efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej dla tych samych blach perforowanych poddanych trójpunktowemu gięciu, gdzie otrzymano większą jednorodność tej stałej sprężystej w stosunku do próby rozciągania (głównie ze względu na wyższą sztywność blachy Po2s4 dla orientacji 45° w tym schemacie obciążenia).

6.8. Badania aplikacyjne

W tematykę niniejszej pracy wpisują się także badania numeryczne dotyczące reakcji blachy perforowanej o założonej konstrukcji i z ustalonego materiału na przyłożone obciążenie w zakresie sprężystym zrealizowane w ramach współpracy naukowo-badawczej z Firmą Produkcyjno-Handlowo-Usługową ESTAL [401]. Blacha perforowana i napinający ją element sprężysty (sprężynujący) stanowiły części składowe innowacyjnego rozwiązania zespołu powierzchniowego stosowanego jako panele elewacyjne [402]. Celem badań było określenie przedziału dopuszczalnych obciążeń konstrukcji (zespołu powierzchniowego z blachą perforowaną) poprawiających sztywność blachy oraz ocena zachowania się elementu sprężystego, poddanego takim obciążeniom.

Przeprowadzono analizę numeryczną (*Solidworks*) rozkładu naprężeń i odkształceń blachy EN AW-5754 (tab. 6.2) o grubości 2 mm w stanie umocnienia H22 z perforacją prostą. Rozpatrywano otwory kwadratowe o boku 5 mm ze skokiem 8 mm (Pk5s8) i otwory okrągłe o średnicy 8 mm ze skokiem 15 mm (Po8s15). Długość blachy wynosiła 500 mm (oczka okrągłe) i 505 mm (oczka kwadratowe). Zależnie od typu perforacji różna była szerokość blachy – długość boku do którego przykładano obciążenie oraz wartość siły rozciągającej (tab. 6.3).

W analizie wykorzystano rodzaj umocowania blachy umożliwiający jej beztarciowy ruch po wirtualnym podłożu (rys. 6.80). Pozwoliło to – po przyłożeniu do bocznych powierzchni badanego elementu przeciwnie skierowanych sił i zastosowaniu symetrii (rys. 6.81) – na zasymulowanie procesu rozciągania blachy z uwzględnieniem zmiany jej przekroju poprzecznego oraz wydłużenia.

Tabela 6.2. Własności blachy pełnej, wykonanej z materiału EN AW-5754 w stanie umocnienia H22

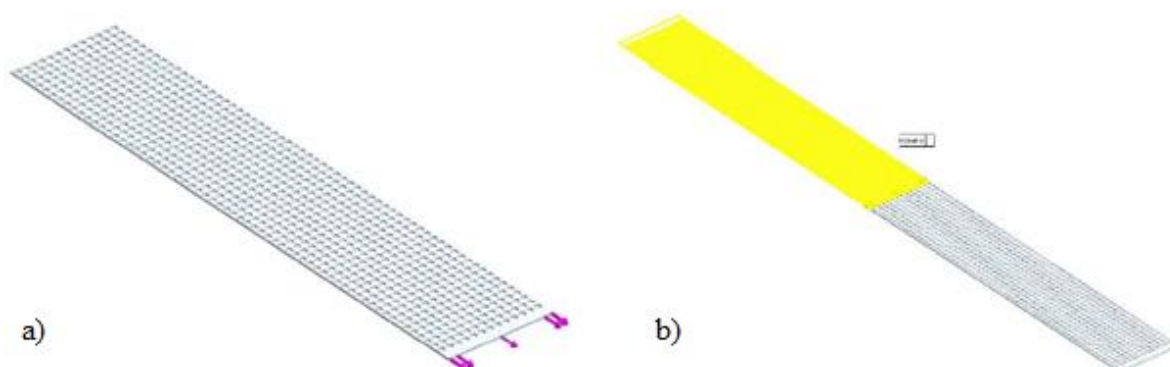
Parametr	Wartość
Moduł Younga	70,5 GPa
Granica plastyczności	144 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	221 MPa

Tabela 6.3. Parametry analizy numerycznej blach perforowanych

Typ perforacji	Bok blachy, mm	Przedział stosowanych obciążeń, kN
Pk5s8	48	1 – 8
	104	1 – 20
	193	1 – 35
Po8s15	45	1 – 8
	105	1 – 16
	195	1 – 32

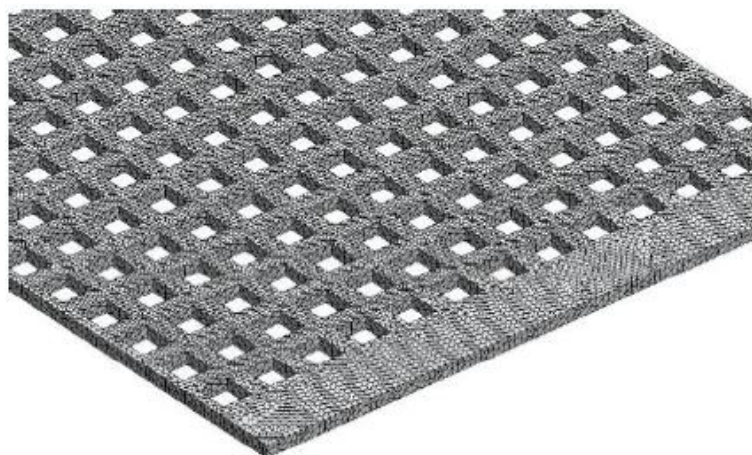


Rys. 6.80. Miejsce przyłożenia mocowania



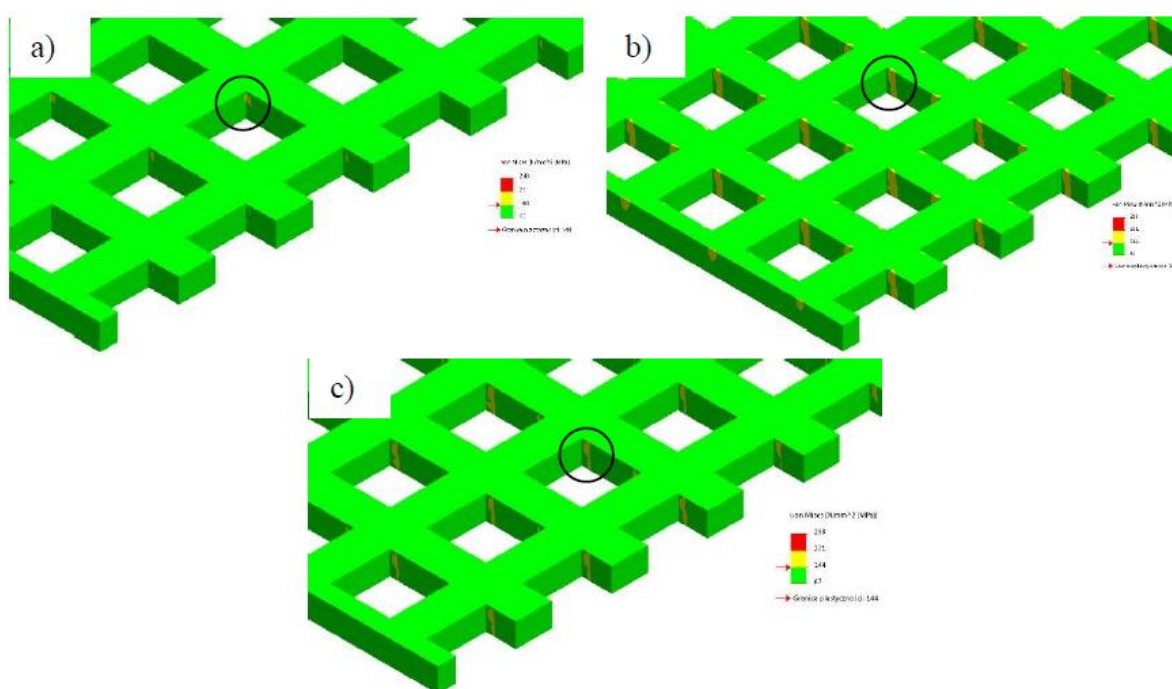
Rys. 6.81. Miejsce przyłożenia: a) obciążenia b) symetrii

Wielkość elementu skończonego dobrano tak, aby zapewnić odpowiednią ich ilość (co najmniej 4) na powierzchni przekroju poprzecznego blachy.

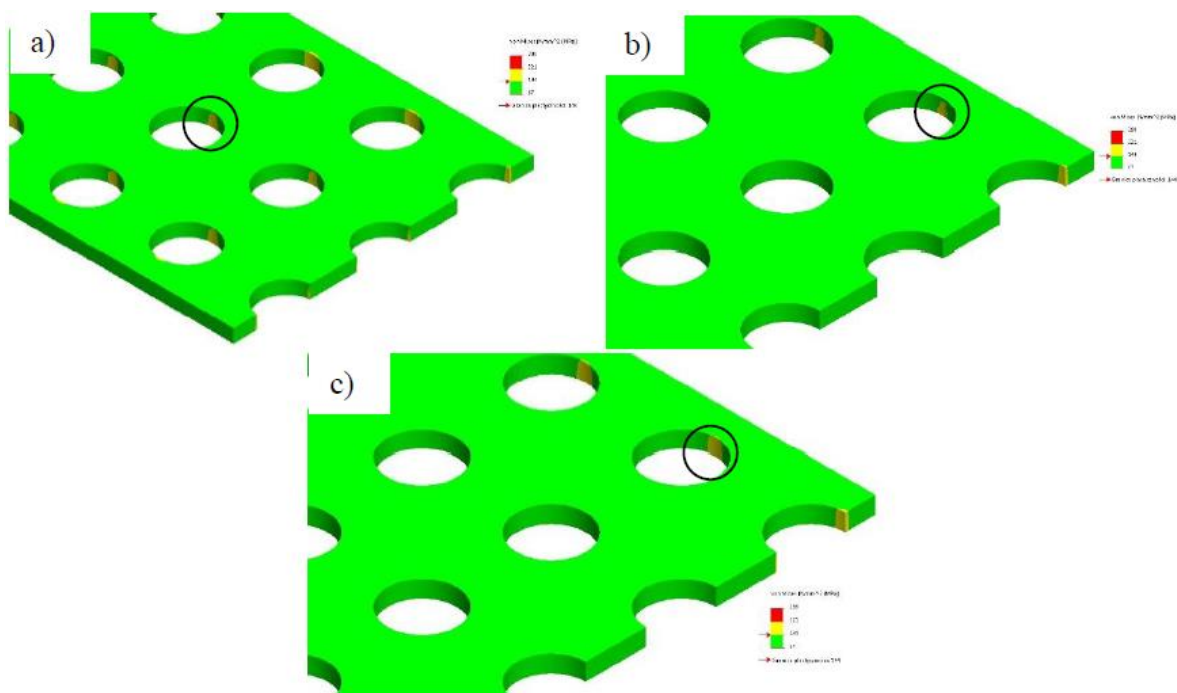


Rys. 6.82. Przykładowa siatka elementów skończonych

Rozkład naprężeń w badanych blachach perforowanych powstałych w wyniku przyłożonego obciążenia z uwzględnieniem naprężeń niebezpiecznych osiągających wartości na poziomie granicy plastyczności przedstawiono na rys. 6.83 i 6.84.

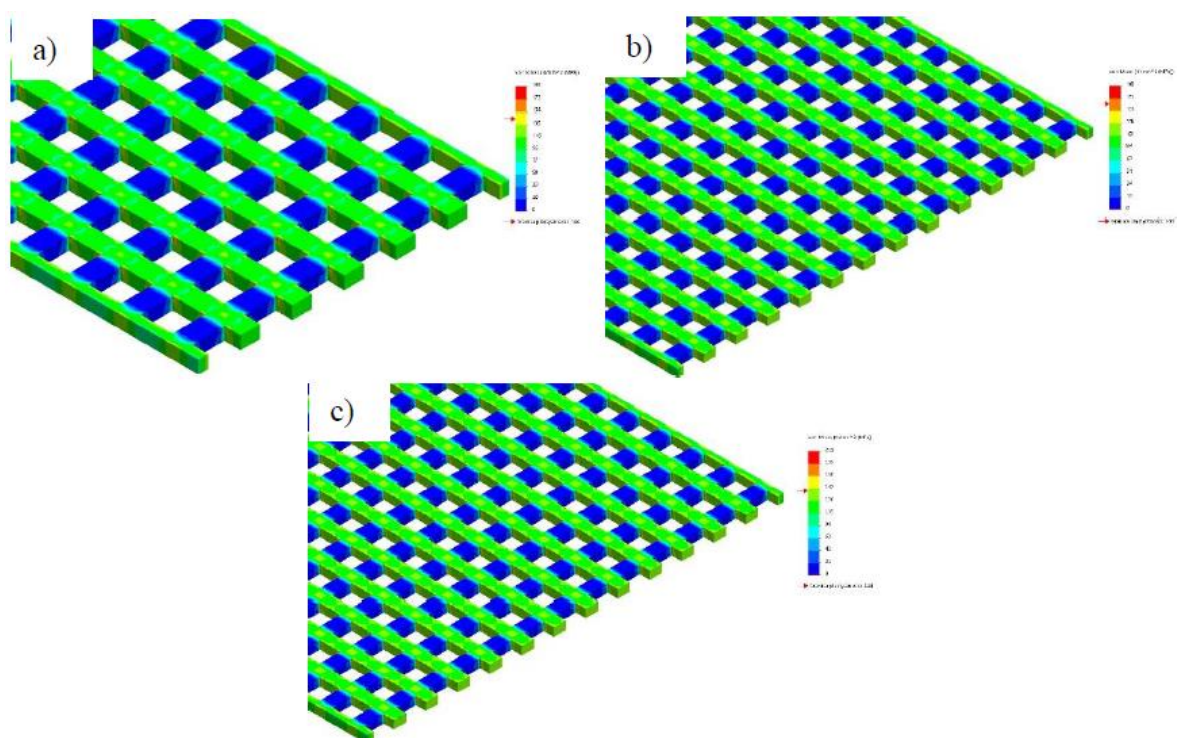


Rys. 6.83. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Pk5s8 o szerokości: a) 48 mm (8 kN), b) 104 mm (20 kN), c) 193 mm (35 kN)

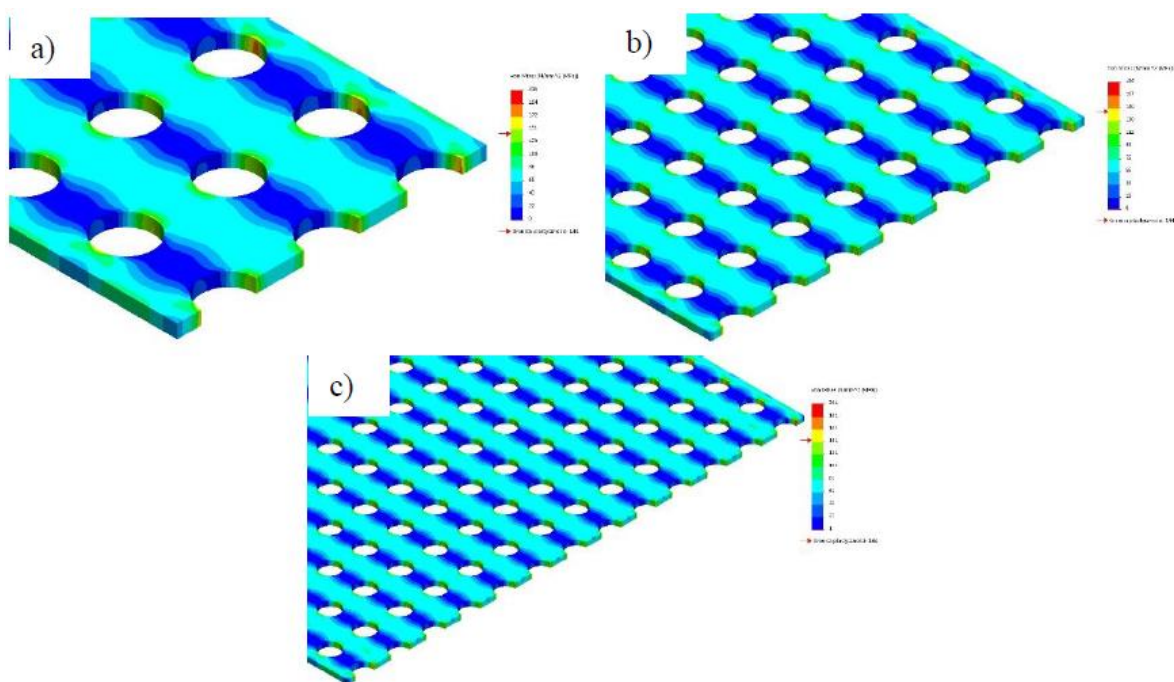


Rys. 6.84. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Po8s15 o szerokości: a) 45 mm (8 kN), b) 105 mm (16 kN), c) 195 mm (32 kN)

Wyrażone w skali indywidualnej, ujmującej wartości naprężeń maksymalnych dla danej blachy perforowanej, przykładowe rozkłady naprężeń zaprezentowano na rys. 6.85 i 6.86.

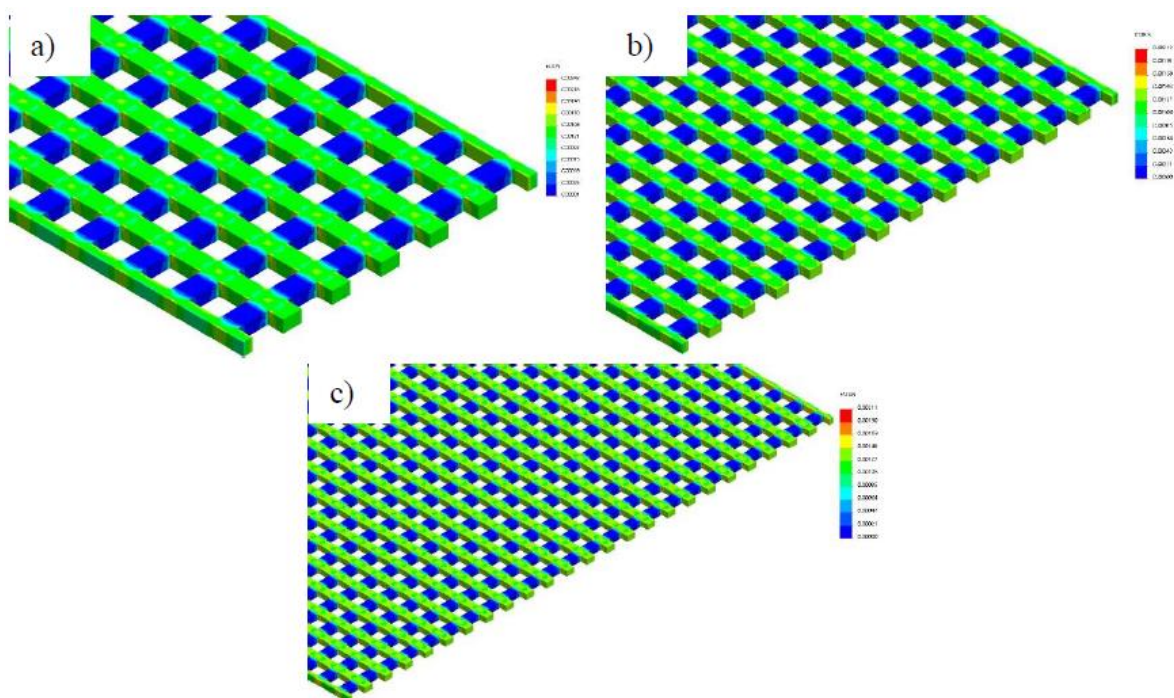


Rys. 6.85. Rozkład naprężeń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Pk5s8 o boku: a) 48 mm, b) 104 mm, c) 193 mm

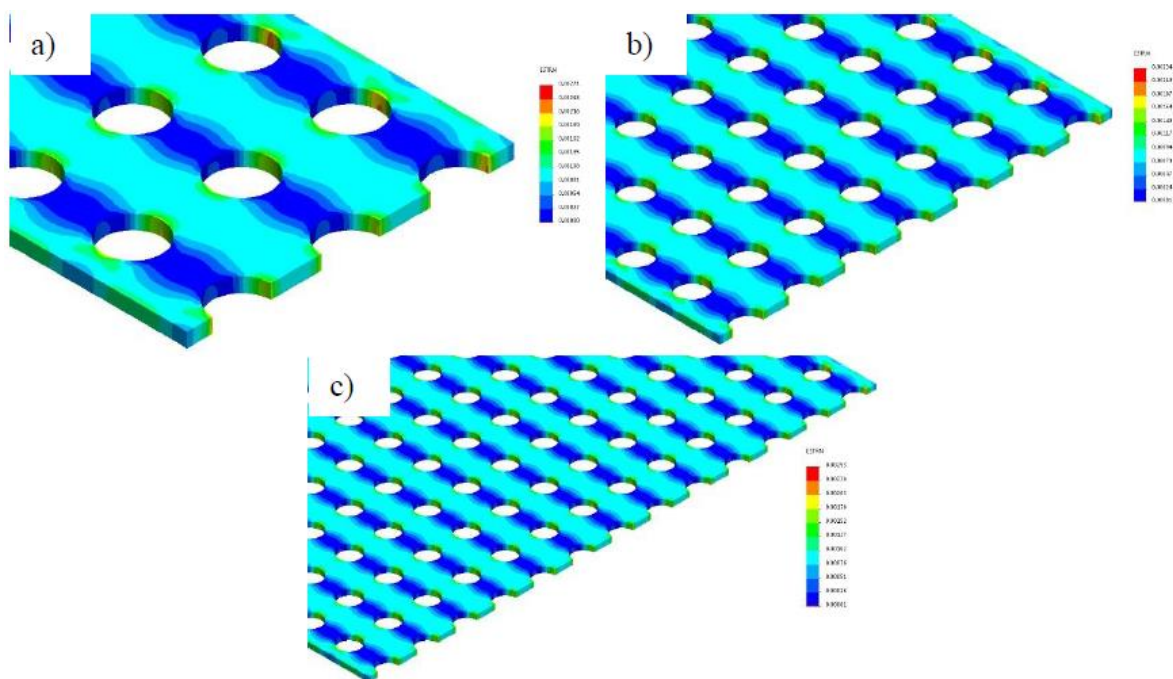


Rys. 6.86. Rozkład naprężeń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Po8s15 o boku:
a) 45 mm, b) 105 mm, c) 195 mm

Rozkłady odkształceń w rozpatrywanych blachach perforowanych odpowiadające naprężeniom zilustrowanym na rys. 6.85 i 6.86 przedstawiono na rys. 6.87 i 6.88.



Rys. 6.87. Rozkład odkształceń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Pk5s8 o boku:
a) 43 mm, b) 104 mm, c) 193 mm



Rys. 6.88. Rozkład odkształceń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Po8s15 o boku:
a) 45 mm, b) 105 mm, c) 195 mm

W przypadku perforacji Pk5s8 naprężenia niebezpieczne (powyżej granicy plastyczności) lokalizują się w narożach kwadratowych otworów (rys. 6.83), natomiast dla perforacji Po8s15 największa koncentracja naprężeń występuje przy krawędziach otworów okrągłych w miejscu najmniejszego przekroju poprzecznego blachy perforowanej (rys. 6.84). W obu rozważanych wariantach perforacji, obciążenie przenoszą głównie obszary zawarte pomiędzy rzędami otworów usytuowane równolegle względem kierunku działającej siły (inny jest jednak ich kształt). W tym względzie, obszary nieobciążone (lub o małych wartościach naprężenia i odkształcenia) blachy z otworami kwadratowymi przyjmują kształt zbliżony do prostokątnego mostka łączącego obciążone strefy materiału (rys. 6.85 i 6.87). Z kolei blacha z otworami okrągłymi charakteryzuje się zbliżonym do owalu (obciętego przy krawędziach otworów) kształtem obszarów nieobciążonych lub o małych wartościach naprężenia i odkształcenia (rys. 6.86 i 6.88).

Wartości wyznaczonych naprężeń maksymalnych i odkształceń maksymalnych w zależności od przyłożonego obciążenia i szerokości blachy z prostym układem otworów kwadratowych (Pk5s8) i okrągłych (Po8s15) zamieszczono odpowiednio w tabelach 6.4 i 6.5.

Tabela 6.4. Wartości obliczonego naprężenia oraz odkształcenia maksymalnego dla blachy perforowanej Pk5s8

Obciążenie, kN	Maksymalne naprężenia, MPa			Maksymalne odkształcenie		
	b = 48 mm	b = 104 mm	b = 193 mm	b = 48 mm	b = 104 mm	b = 193 mm
1	24,1	10,5	5,3	$25,7 \cdot 10^{-5}$	$11,2 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
2	48,1	21	10,5	$51,3 \cdot 10^{-5}$	$22,5 \cdot 10^{-5}$	$12,2 \cdot 10^{-5}$
4	96,3	42,1	21	$102,6 \cdot 10^{-5}$	$44,9 \cdot 10^{-5}$	$24,4 \cdot 10^{-5}$
8	192,6	84,2	42	$205,2 \cdot 10^{-5}$	$89,8 \cdot 10^{-5}$	$48,8 \cdot 10^{-5}$
16	-	168,4	84	-	$179,7 \cdot 10^{-5}$	$97,7 \cdot 10^{-5}$
20	-	210,5	-	-	$224,6 \cdot 10^{-5}$	-
32	-	-	168	-	-	$195,3 \cdot 10^{-5}$
35	-	-	184	-	-	$213,6 \cdot 10^{-5}$

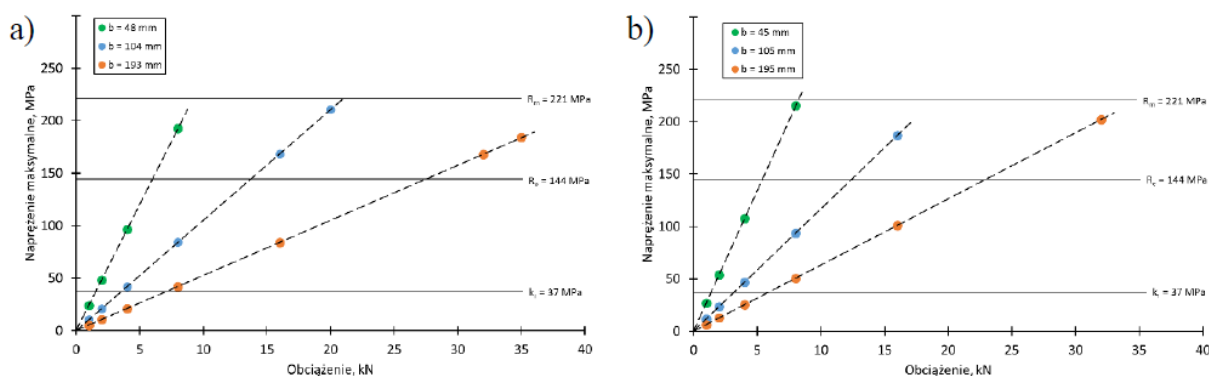
Tabela 6.5. Wartości obliczonego naprężenia oraz odkształcenia maksymalnego dla blachy perforowanej Po8s15

Obciążenie, kN	Maksymalne naprężenia, MPa			Maksymalne odkształcenie		
	b = 45 mm	b = 105 mm	b = 195 mm	b = 45 mm	b = 105 mm	b = 195 mm
1	26,9	11,7	6,3	$29,8 \cdot 10^{-5}$	$13,3 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
2	53,8	23,4	12,6	$59,6 \cdot 10^{-5}$	$26,6 \cdot 10^{-5}$	$14,3 \cdot 10^{-5}$
4	107,6	46,8	25,3	$119,1 \cdot 10^{-5}$	$53,2 \cdot 10^{-5}$	$28,6 \cdot 10^{-5}$
8	215,1	93,5	50,5	$238,3 \cdot 10^{-5}$	$106,3 \cdot 10^{-5}$	$57,2 \cdot 10^{-5}$
16	-	187,1	101,1	-	$212,6 \cdot 10^{-5}$	$114,4 \cdot 10^{-5}$
32	-	-	202,1	-	-	$228,7 \cdot 10^{-5}$

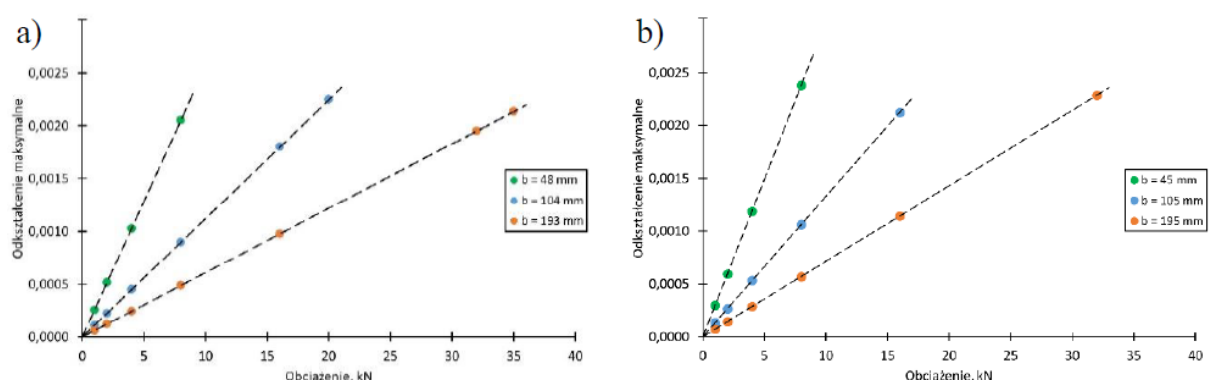
Na wykresach prezentujących wartości naprężeń maksymalnych (rys. 6.89) naniesiono dodatkowo linie odpowiadające granicy plastyczności stopu EN AW-5754 oraz naprężeniu dopuszczalnemu przy rozciąganiu k_r . Wartość dopuszczalnego naprężenia określono na podstawie wzoru:

$$k_r = \frac{\text{granica plastyczności}}{3,9} \quad (6.3)$$

dla materiałów plastycznych, ze współczynnikiem bezpieczeństwa 3,9 (z zakresu zalecanego dla stopów aluminium).



Rys. 6.89. Zmiana wartości naprężenia maksymalnego w blasze w zależności od obciążenia oraz szerokości blachy dla perforacji: a) Pk5s8, b) Po8s15



Rys. 6.90. Zmiana wartości odkształcenia maksymalnego w blasze w zależności od obciążenia oraz szerokości blachy dla perforacji: a) Pk5s8, b) Po8s15

Dla obydwu typów perforacji wraz ze wzrostem obciążenia wartość maksymalnego naprężenia wzrastała liniowo, przy czym tempo wzrostu (nachylenie linii aproksymacji do osi obciążenia) zależało od szerokości blachy (im blacha szersza tym wolniejszy przyrost maksymalnego naprężenia). Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku maksymalnego odkształcenia (rys. 6.90). Ponadto, dla danej wartości obciążenia, wzrost szerokości blachy perforowanej (Po8s15 i Pk5s8) skutkował mniejszym odkształceniem maksymalnym.

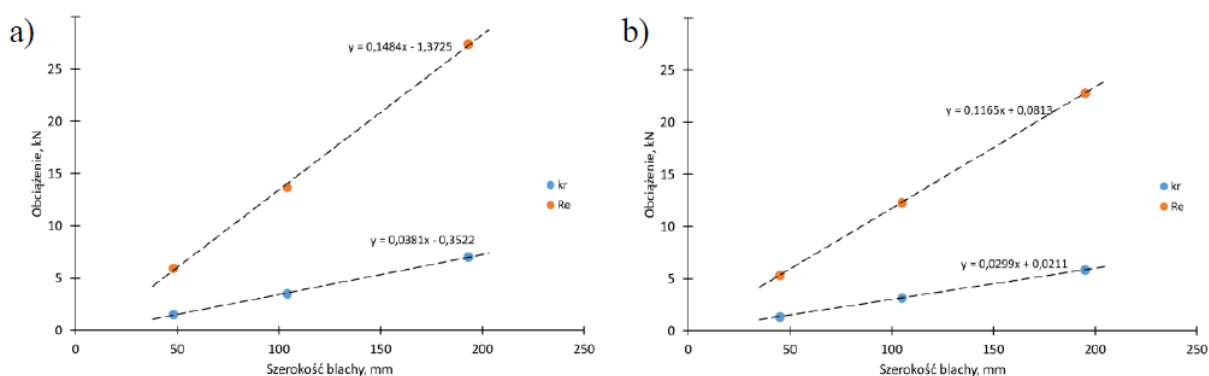
Na podstawie wykresów przedstawionych na rys. 6.89 wyznaczono wartości obciążenia granicznego, odpowiadające naprężeniom dopuszczalnym i niebezpiecznym (tab. 6.6 i 6.7). Pozwoliło to określić graniczne obciążenia (dla k_T i R_e) badanej blachy perforowanej (rys. 6.91).

Tabela 6.6. Wartości obciążeń granicznych dla blachy perforowanej Pk5s8

Szerokość blachy, mm	Obciążenie graniczne, kN	
	k_r	R_e
48	1,53	5,98
104	3,52	13,68
193	7,05	27,41

Tabela 6.7. Wartości obciążeń granicznych dla blachy perforowanej Po8s15

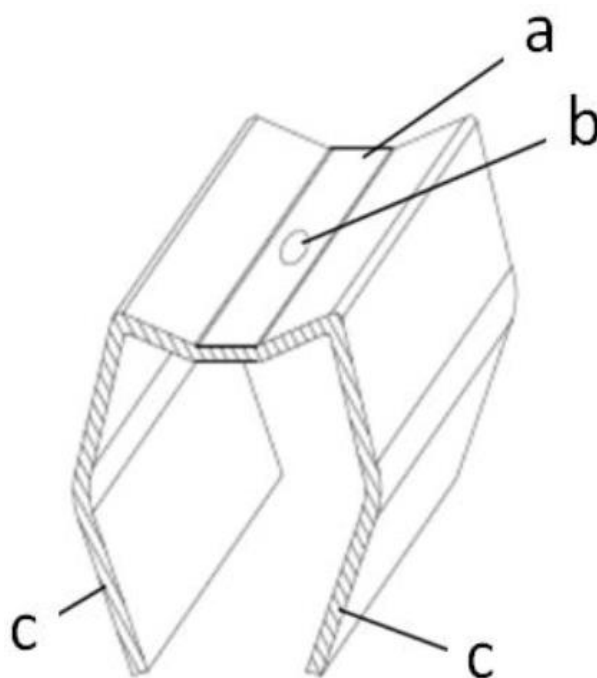
Szerokość blachy, mm	Obciążenie graniczne, kN	
	k_r	R_e
45	1,37	5,32
105	3,17	12,32
195	5,86	22,80

Rys. 6.91. Zmiana obciążenia granicznego (dla k_r i R_e) w zależności od szerokości blachy o otworach: a) kwadratowych Pk5s8, b) okrągłych Po8s15

Istotną część badań aplikacyjnych stanowiła symulacja numeryczna zachowania się elementu sprężystego napinającego blachę, poddanego dopuszczalnym dla blachy perforowanej obciążeniom, połączona z analizą jego konstrukcji.

Odpowiedni montaż tzw. zespołów powierzchniowych z blachą perforowaną, wymaga m.in. właściwego napięcia arkusza blachy pozwalającego na skuteczne zwiększenie jego sztywności i odporności na zniekształcenia. Stwarza to możliwość stosowania blach o grubości przyczyniającej się do redukcji kosztów wykonania, przy zachowaniu dostatecznej charakterystyki mechanicznej konstrukcji.

Element sprężynujący, w formie kształtowego profilu o przekroju poprzecznym zbliżonym do ceowego, służący do montażu blach perforowanych (spełniający funkcję napinającą) przedstawiono na rys. 6.92.



Rys. 6.92. Element do montażu blach perforowanych:
a - podstawa, b - otwór na śrubę napinającą, c – ramiona

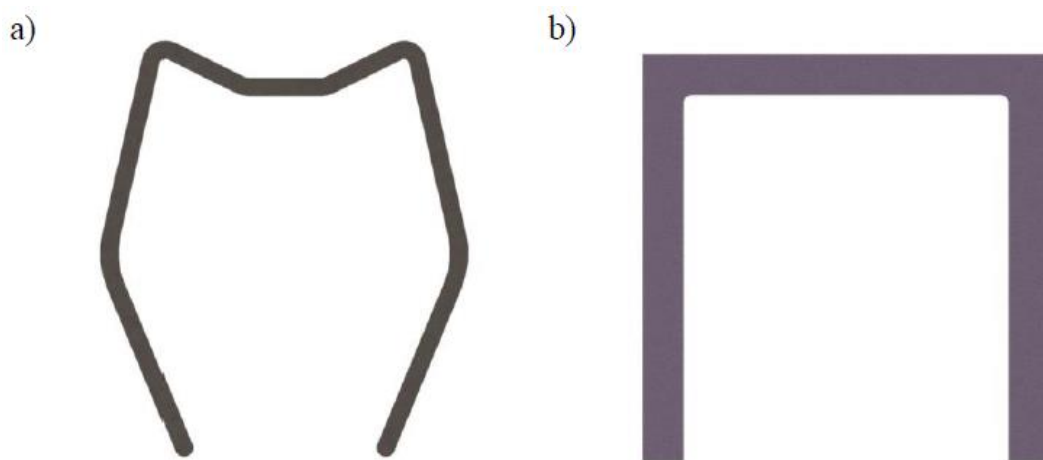
Ramiona elementu sprężynującego są skierowane łukowo do wewnątrz w ten sposób, iż po umieszczeniu w listwie montażowej, ciągną ku sobie (poprzez zagięcia) sąsiednie panele z blachy perforowanej. Podstawę omawianego detalu charakteryzuje wypukłość zwrócona do jego środka (w obszarze największej wypukłości znajduje się otwór na śrubę napinającą). Dokręcanie śruby sprawia, iż przestrzeń pomiędzy wypukłością podstawy elementu sprężynującego a podstawą listwy montażowej maleje. Powoduje to wzajemne zbliżanie się ramion elementu sprężystego, które wywierają nacisk na zagięcia sąsiednich paneli, co w efekcie zapewnia ich odpowiedni naciąg.

Przestrzenny model numeryczny elementu sprężynującego przedstawiono na rys. 6.93. Własności wytrzymałościowe materiału (stali nierdzewnej 1.4301) przyjęto z bazy wewnętrznej oprogramowania. Dla tego gatunku stali wartość granicy plastyczności wynosi 400 MPa, a wytrzymałości na rozciąganie 600 MPa.



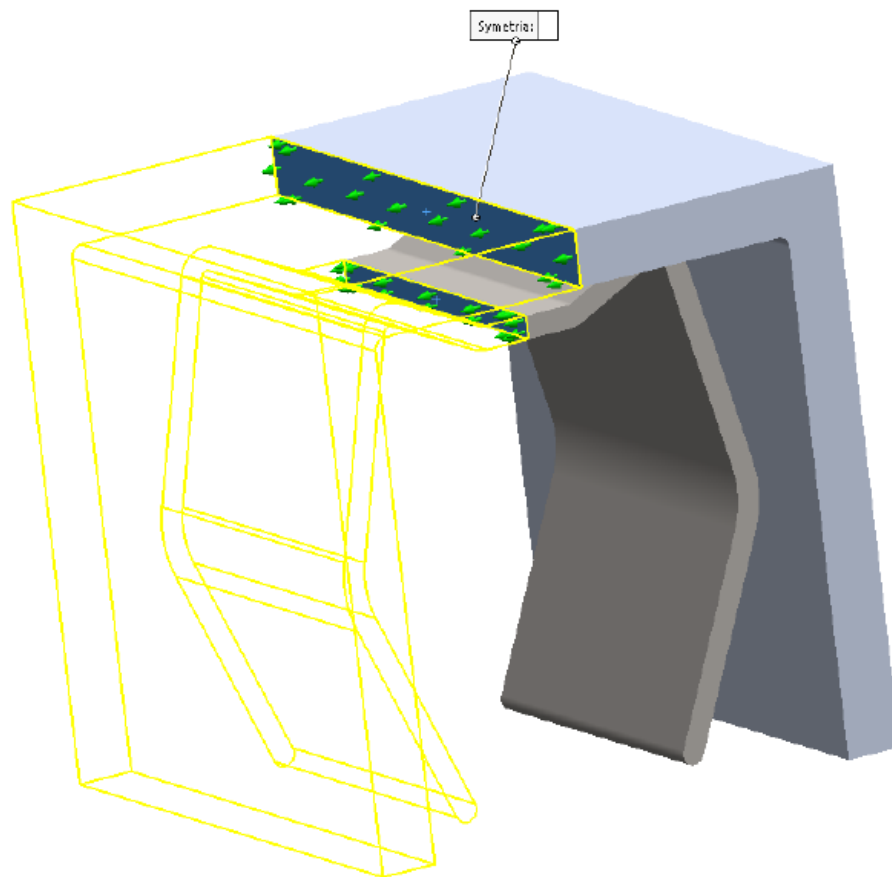
Rys. 6.93. Element sprężynujący (1/2) z naniesioną siatką elementów skończonych

W celu analizy zachowania elementu sprężynującego w warunkach zbliżonych do rzeczywistych do modelu dodano listwę montażową w postaci ceownika (rys. 6.94b).



Rys. 6.94. Elementy układu mocowania paneli: a) element sprężynujący, b) listwa montażowa

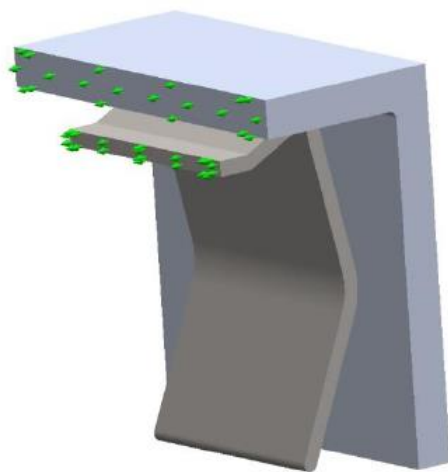
Całość przestrzennego modelu numerycznego układu montażowego (z zastosowaniem symetrii do obliczeń) zaprezentowano na rys. 6.95.



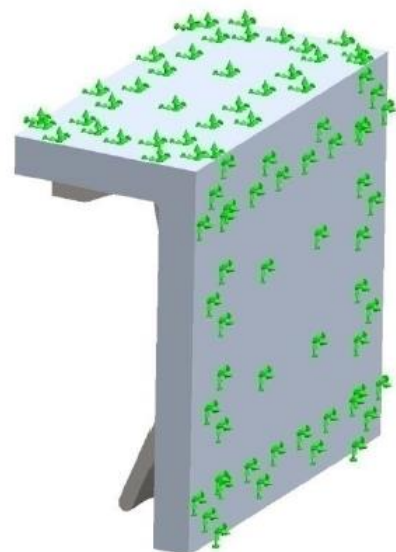
Rys. 6.95. Przestrzenny model numeryczny analizowanego układu montażowego z zastosowaniem symetrii

Sposób umocowania i obciążenia rozpatrywanego układu przedstawiono odpowiednio na rys. 6.96 i 6.97.

a)



b)

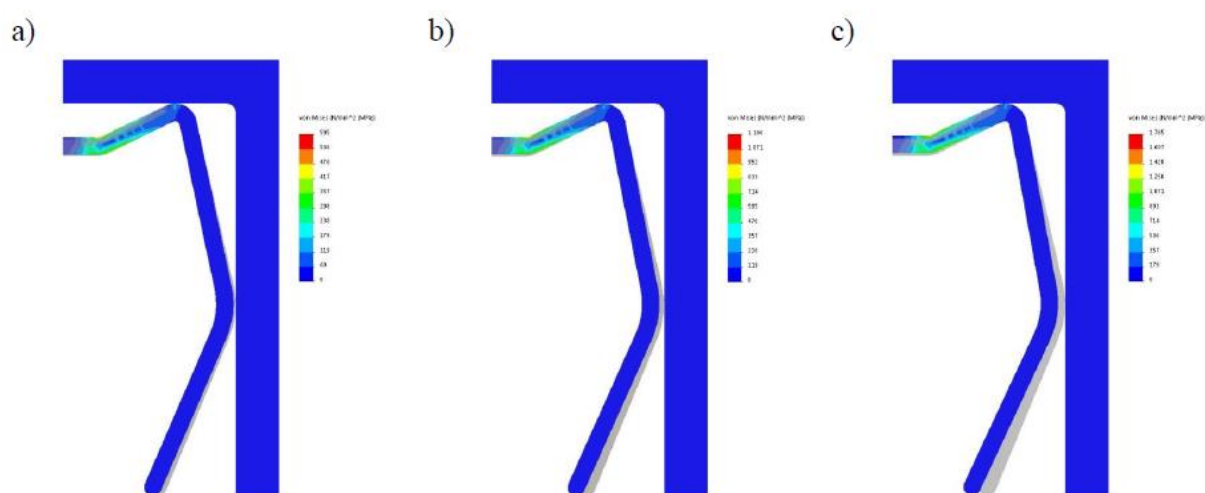


Rys. 6.96. Umocowania zastosowane w modelu: a) symetria, b) nieruchoma geometria

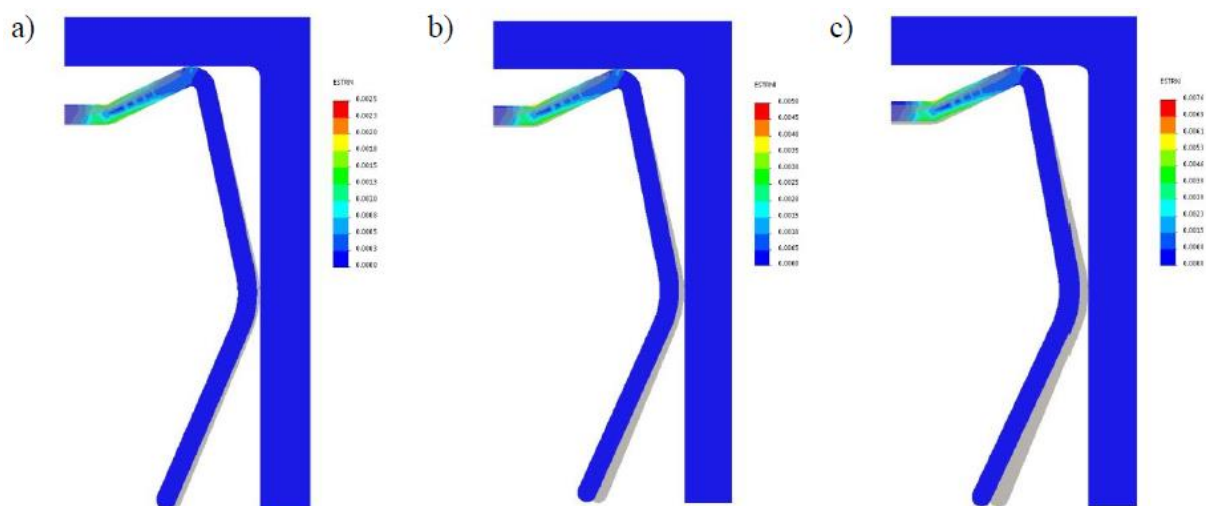


Rys. 6.97. Obciążenie zastosowane w modelu elementu sprężystego

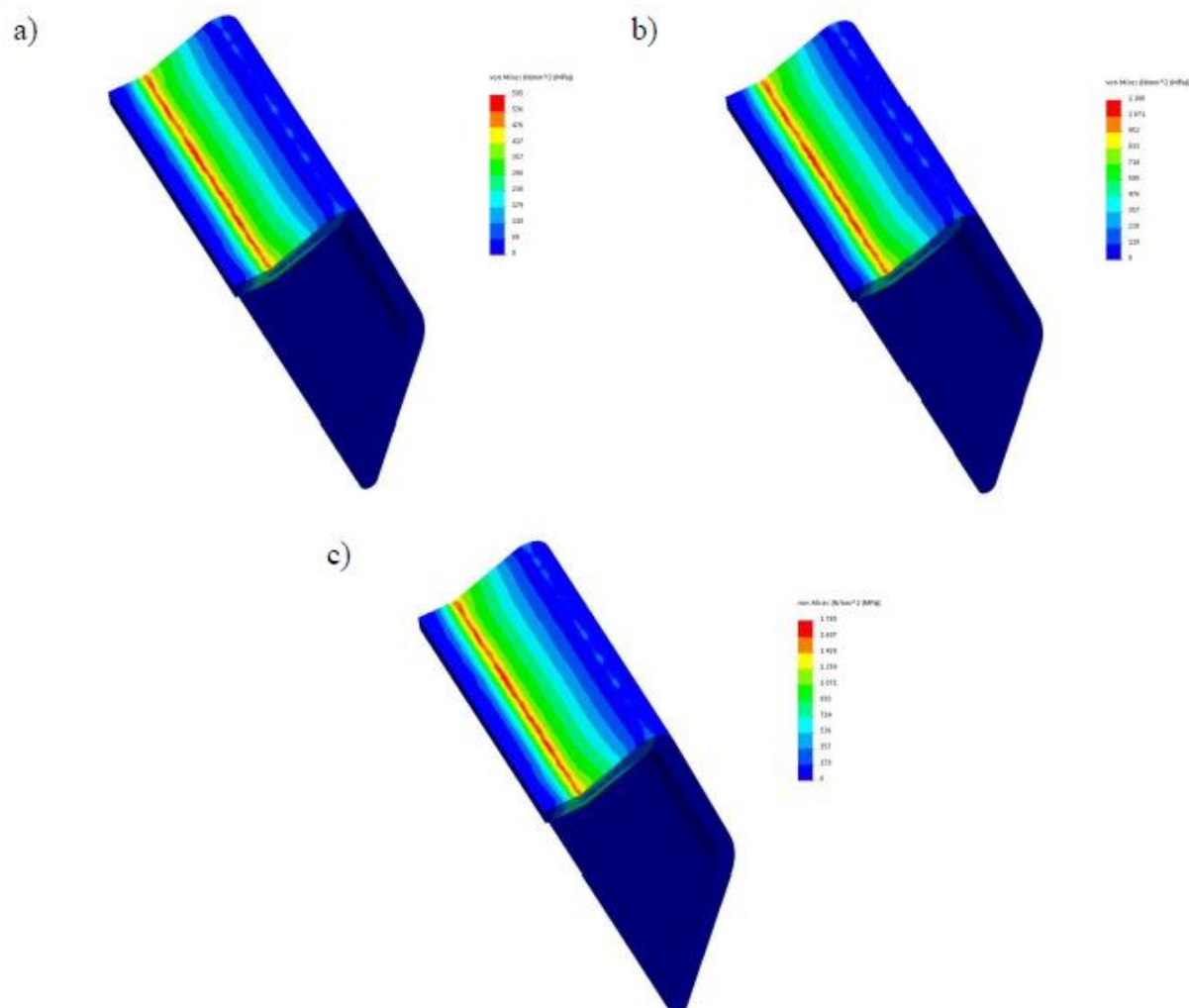
Element sprężynujący obciążano w ten sposób, aby uzyskać przemieszczenie jego podstawy w kierunku listwy mocującej. Zwrot i kierunek obciążenia ilustrują zielone strzałki na rys. 6.97. Wyniki obliczeń numerycznych w postaci rozkładów naprężeń i odkształceń zaprezentowano na rys. 6.98 – 6.101.



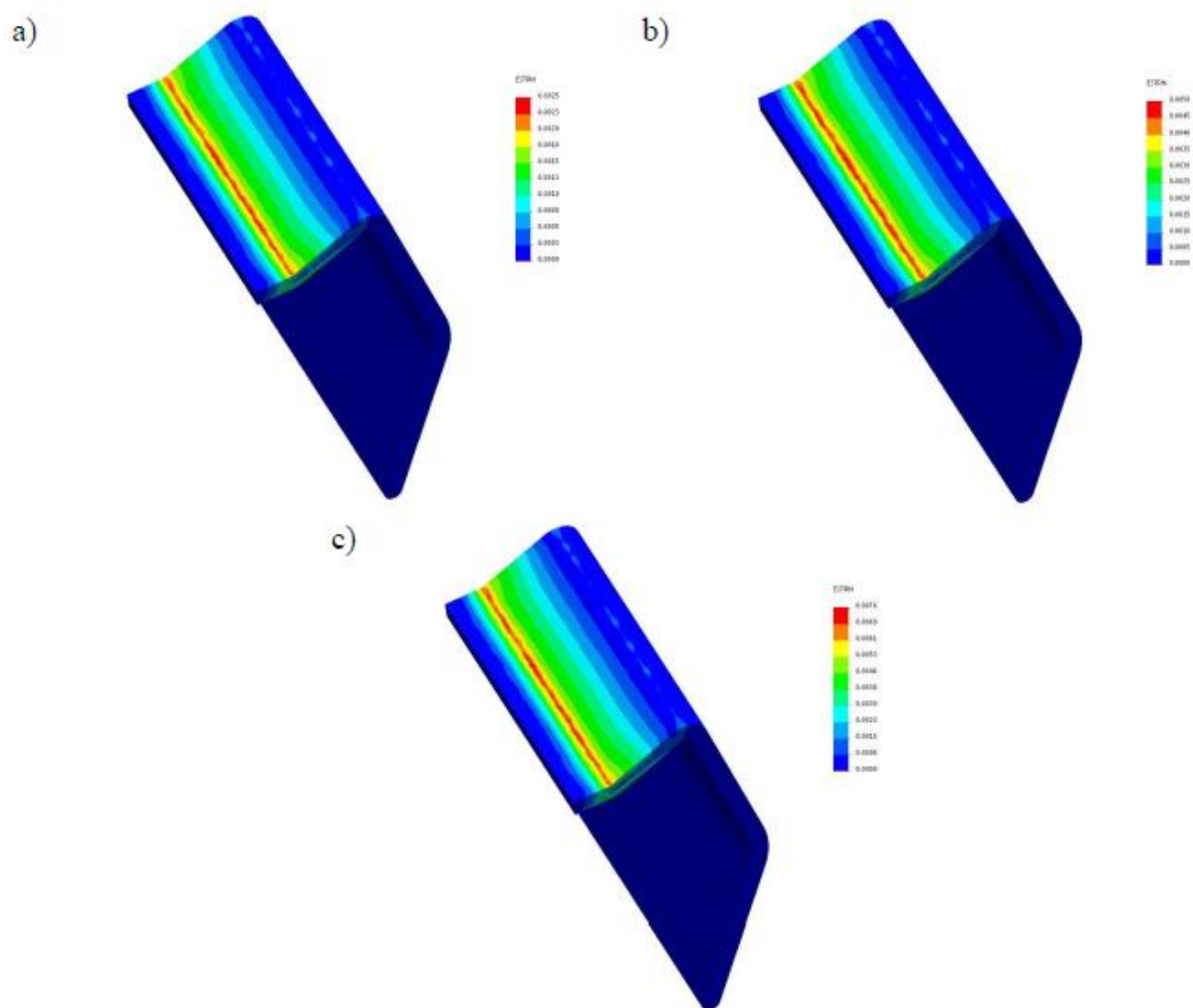
Rys. 6.98. Rozkład naprężeń w elemencie sprężystym wraz z uwidocznionym przemieszczeniem ramion w kierunku jego środka



Rys. 6.99. Rozkład odkształceń w elemencie sprężystym wraz z uwidocznionym przemieszczeniem ramion w kierunku jego środka

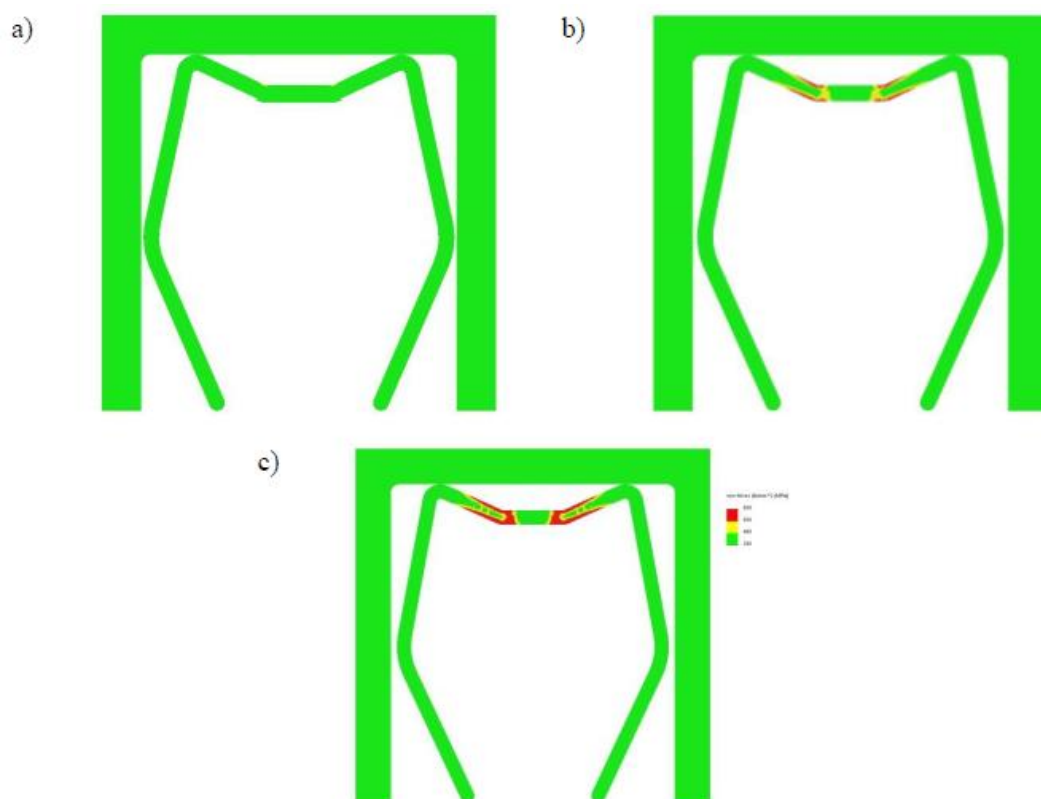


Rys. 6.100. Rozkład naprężeń na powierzchni elementu sprężystego od zewnętrznej strony podstawy:
a) przemieszczenie 0,1 mm, b) przemieszczenie 0,2 mm, c) przemieszczenie 0,3 mm



Rys. 6.101. Rozkład odkształceń na powierzchni elementu sprężystego od zewnętrznej strony podstawy: a) przemieszczenie 0,1 mm, b) przemieszczenie 0,2 mm, c) przemieszczenie 0,3 mm

Na rys. 6.102 przedstawiono rozkład naprężeń w elemencie sprężynującym w skali umożliwiającej identyfikację obszarów, w których naprężenia przekraczają granicę plastyczności (kolor żółty i czerwony). W tabeli 6.8 zamieszczono wartość przesunięcia ramion elementu sprężynującego pod wpływem zadanego przemieszczenia podstawy i wartość siły z jaką analizowany element będzie działał na listwę montażową.

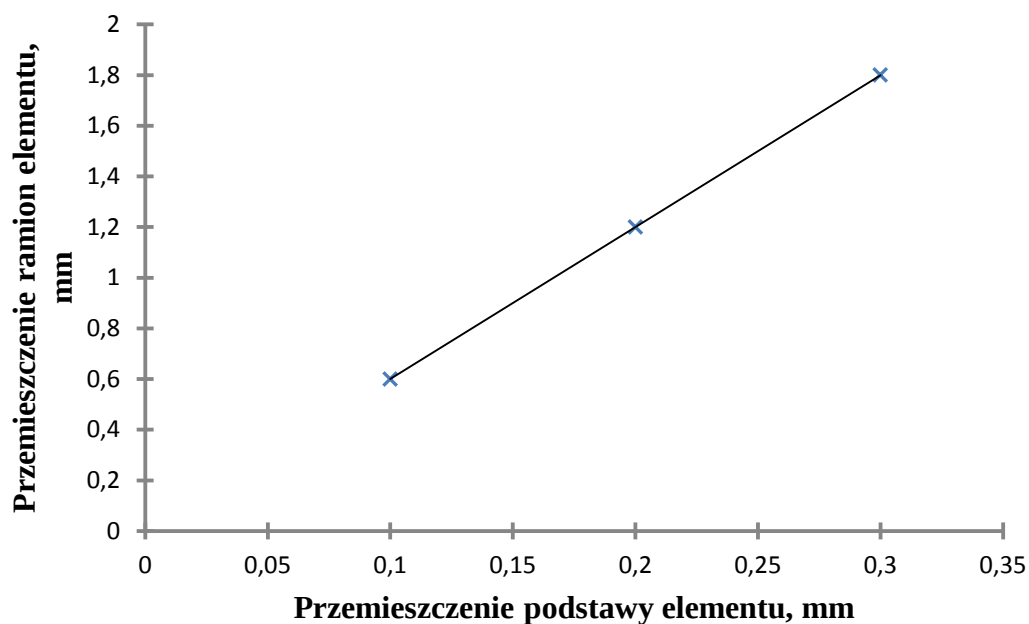


Rys. 6.102. Rozkład naprężeń na przekroju elementu sprężynującego: a) przemieszczenie 0,1 mm, b) przemieszczenie 0,2 mm, c) przemieszczenie 0,3 mm

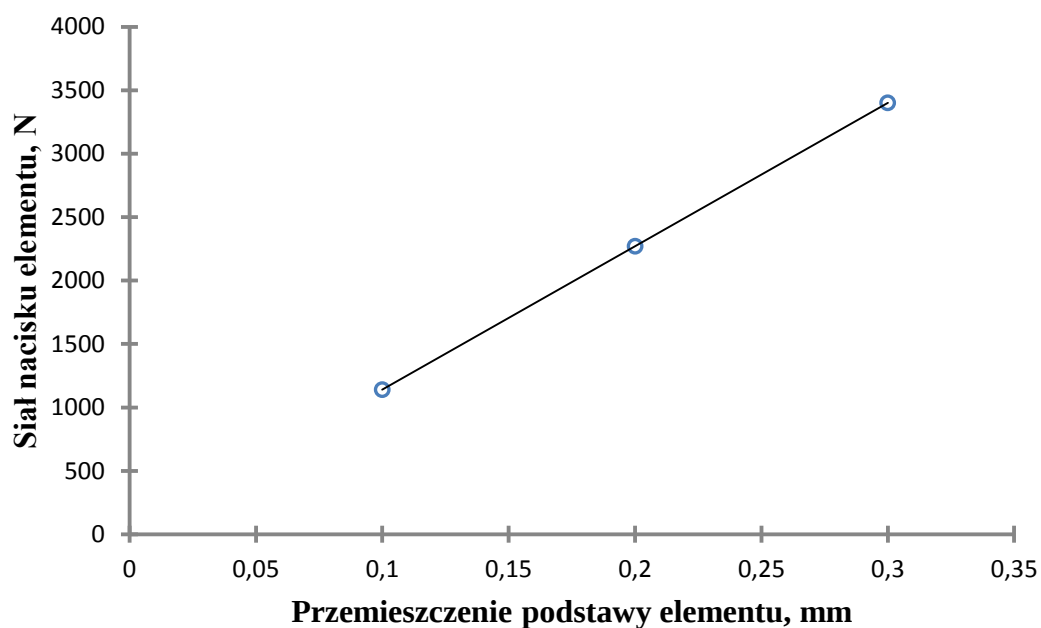
Tabela 6.8. Przesunięcie ramion elementu sprężynującego

Przemieszczenie podstawy [mm]	Przemieszczenie ramion [mm]	Siła nacisku elementu sprężynującego na listwę mocującą [N]
0,1	0,6	1140
0,2	1,2	2270
0,3	1,8	3400

Na podstawie wyników z tabeli 6.8 sporządzono wykresy (rys. 6.103 i 6.104) przedstawiające zależności przemieszczenia ramion elementu sprężynującego i sił nacisku tego elementu na listwę montażową.

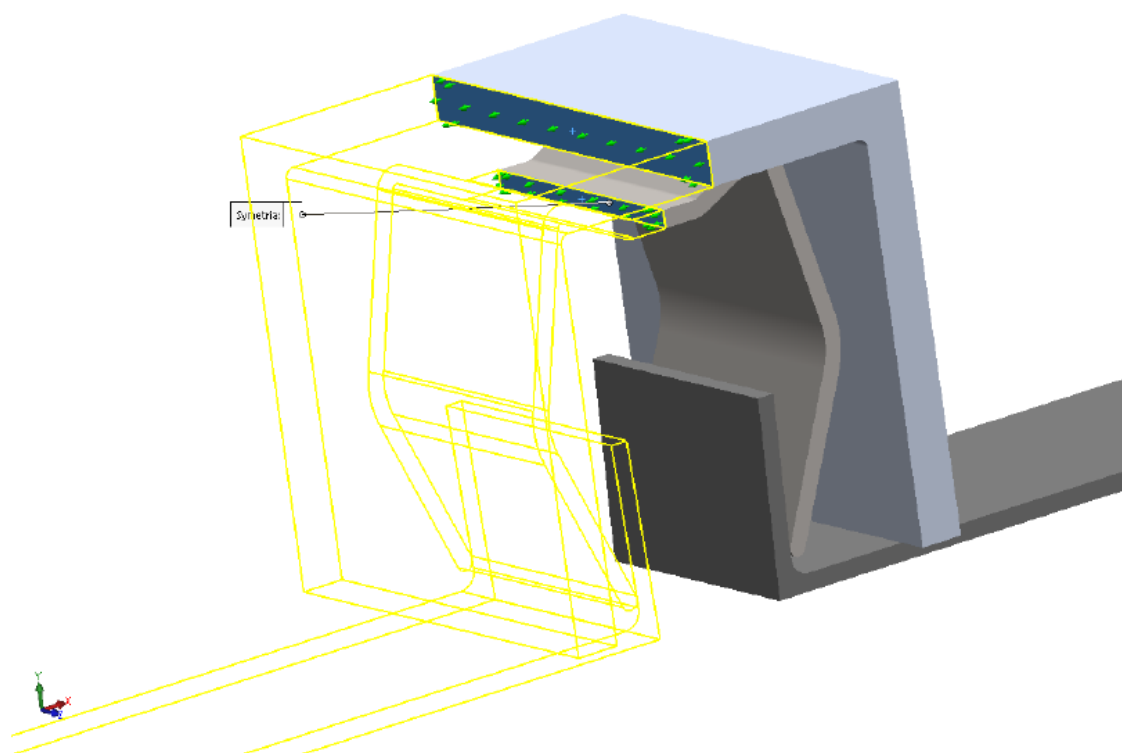


Rys. 6.103. Przemieszczenie ramion elementu sprężynującego w zależności od zadanego przemieszczenia podstawy



Rys. 6.104. Siła nacisku elementu sprężynującego na listwę mocującą w zależności od zadanego przemieszczenia podstawy

Kolejny etap badań obejmował analizę statyczną współpracy układu mocującego z paskiem blachy ze stopu EN AW-5754. Kształt, wymiary, sposoby umocowań i przyłożenia obciążeń pozostały bez zmian. Dołączony do modelu odpowiednio ukształtowany pasek blachy miał długość 500 mm, szerokość 30 mm i grubość 2 mm. 1‰ odkształcenia blachy wymaga jej naciągnięcia do 0,5 mm. Zbudowany model przedstawiono na rys. 6.105 i 6.106.

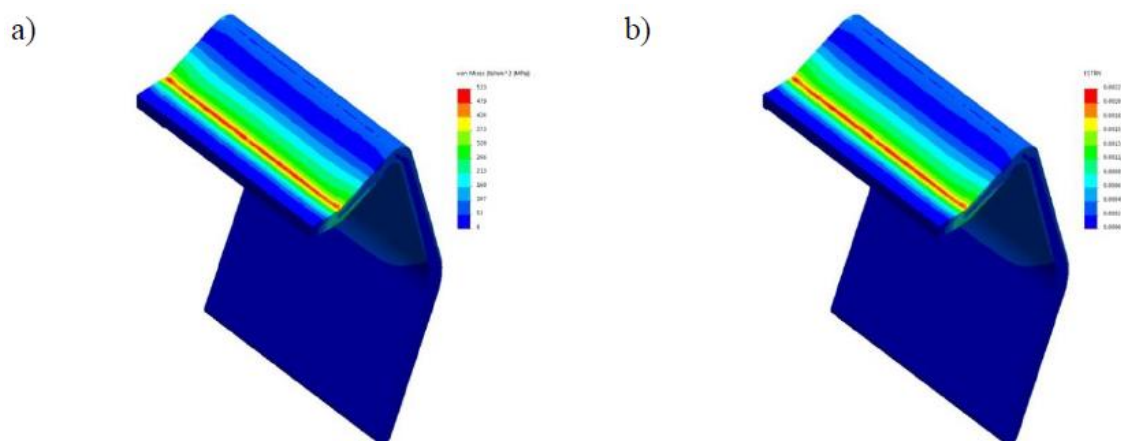


Rys. 6.105. Przestrzenny model numeryczny układu mocującego pasek blachy z zastosowaniem symetrii



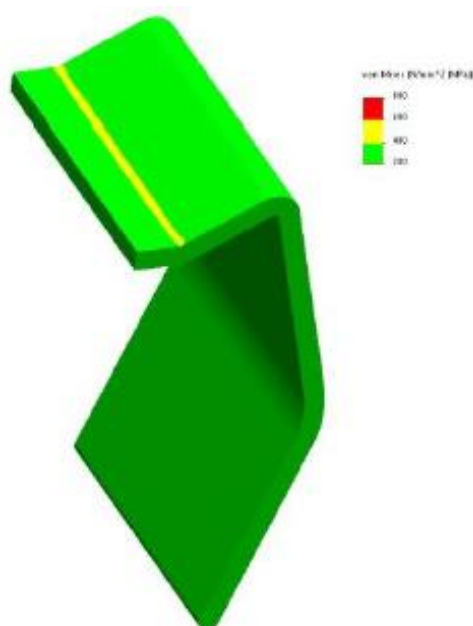
Rys. 6.106. Przestrzenny model numeryczny układu mocującego pasek blachy z zastosowaniem symetrii (widok ogólny)

W obliczeniach przyjęto przemieszczenia podstawy od 0,01 mm do 0,08 mm. Wyniki symulacji dla podstawy przemieszczonej o 0,08 mm zaprezentowano na rys. 6.107 i 6.108.



Rys. 6.107. Rozkład naprężeń (a) i rozkład odkształceń (b) na powierzchni i na przekroju elementu sprężynującego przy przemieszczeniu podstawy 0,08 mm

Wizualizacja wyników z zastosowaniem innej skali naprężeń (rys. 6.108) wykazała przekroczenie granicy plastyczności przyjętego do symulacji materiału tylko na zewnętrznej powierzchni podstawy (kolor żółty).

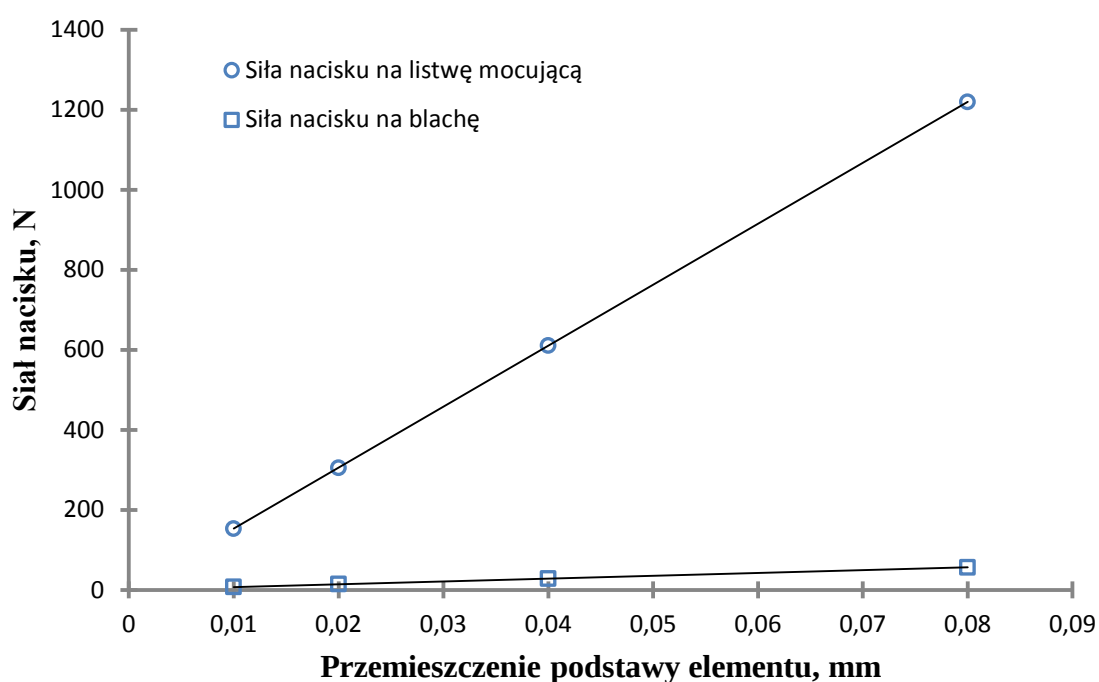


Rys. 6.108. Rozkład naprężeń na powierzchni i na przekroju elementu sprężynującego przy przemieszczeniu podstawy 0,08 mm w skali umożliwiającej identyfikację obszarów z niebezpiecznymi naprężeniami

Uzyskane na podstawie przeprowadzonych symulacji wyniki zestawiono w tabeli 6.9. Ich graficzną interpretację przedstawiono na rys. 6.109.

Tabela 6.9. Siła nacisku ramion elementu sprężynującego

Przesunięcie podstawy [mm]	Siła nacisku elementu sprężynującego na listwę mocującą [N]	Siła nacisku elementu sprężynującego na zgięcie blachy [N]
0,01	153	7,1
0,02	305	14,1
0,04	611	28,2
0,08	1220	56,5



Rys. 6.109. Siły nacisku ramion elementu sprężynującego na listwę mocującą i brzegi (zagięcia) blachy

Należy stwierdzić, iż analiza przemieszczeń ramion elementu sprężynującego wykazała możliwość przełożenia ruchu podstawy na ruch ramion, wystarczający do napięcia blachy. Przesunięcie podstawy elementu o 0,3 mm w kierunku podstawy listwy montażowej skutkowało przemieszczeniem jego nieobciążonych ramion aż o 1,8 mm. Wystąpiły przy tym niebezpieczne koncentracje naprężeń w podstawie elementu. Jednakże wydłużenie blachy w zakresie sprężystym nie wymaga tak dużego ruchu ramion (w rozważanym przypadku wystarczy 0,5 mm). Stąd, w analizach układu z ramionami elementu sprężynującego oddziaływanymi na blachę, przyjęto przesunięcie podstawy elementu maksymalnie o 0,08 mm. Obserwowane rozkłady naprężeń w elemencie wykazały w tym przypadku tylko nieznaczne przekroczenie granicy plastyczności. Przyczyną koncentracji naprężeń był zbyt mały promień zaokrąglenia, przyjęty w konstrukcji podstawy elementu sprężynującego

(napinającego). Niskie okazały się także siły nacisku ramion elementu na blachę. Zastosowanie elementu napinającego powoduje jednak, że panele są sztywniejsze, co umożliwia zredukowanie grubości blachy i tym samym obniżenie wymaganych sił napinających.

7. Podsumowanie i wnioski

Blachy perforowane stanowią ważną grupę materiałów inżynierskich, między innymi z uwagi na wszechstronność ich zastosowań. Decyduje o tym specyfika tych materiałów, wynikająca z charakterystycznego połączenia własności mechanicznych i użytkowych. Z tego powodu blacha perforowana jest często nie tylko właściwym i korzystnym, ale nawet koniecznym rozwiązaniem w danej konstrukcji. Ponadto, w pozostałych przypadkach może stanowić także alternatywę w stosunku do innym materiałów. Niemniej jednak, aby w pełni wykorzystać możliwości aplikacyjne tego nietypowego tworzywa, należy najpierw rozpoznać zespół jego cech, istotnych ze względu na warunki eksploatacji. Niemal nieograniczona ilość wariantów perforacji sprawia, iż dokładne wyznaczenie kompletnej charakterystyki mechanicznej dla każdej kombinacji parametrów związanych z perforacją (prześwit, kształt, wielkość i profil otworów) jest wręcz niemożliwe, zwłaszcza dla perforacji o nieregularnym i losowym rozmieszczeniu różnych otworów. Jednakże, stanowi to zarazem podstawę do projektowania materiałów perforowanych o odmiennych własnościach, które można dodatkowo modyfikować poprzez dobór materiału macierzystego. Tym samym, za pomocą odpowiedniej perforacji, niełatwe co prawda, ale możliwe jest niejako sterowanie nie tylko wartością danego parametru, ale także jego rozkładem w płaszczyźnie blachy. W ten sposób anizotropię jej własności można redukować lub jeszcze pogłębiać.

W niniejszej pracy zasadnicza część badań dotyczyła rozpoznania wybranych własności blachy perforowanej z prostym i heksagonalnym (mijanym 60°) układem otworów okrągłych (cylindrycznych) przy zachowaniu identycznych parametrów perforacji, takich jak: wielkość otworu (średnica 2 mm) oraz skok (stanowiący dwukrotność średnicy otworu). Wymienione rodzaje regularnych wzorów perforacji mają duże znaczenie aplikacyjne i stanowią podstawowy asortyment omawianych materiałów. Badania eksperymentalne i numeryczne wykazały, iż w warunkach jednoosiowego rozciągania perforacja prosta cechuje się silniejszą anizotropią własności sprężystych i wytrzymałościowych w porównaniu do perforacji heksagonalnej, która zachowuje pod tym względem dość wysoką jednorodność. W przypadku prostego układu perforacji rozważane parametry są wyższe w kierunkach najgęstszego upakowania otworów 0° i 90° , natomiast kierunek pośredni (diagonalny) 45° odznacza się wyraźnie niższymi wartościami tych charakterystyk. Zarówno dla blachy stalowej DC01 jak i ze stopu aluminium EN AW-5754 otrzymano mocno zbliżony stosunek modułów Younga E^*/E blachy perforowanej i pełnej, co świadczy o niemal identycznym wpływie rozpatrywanych perforacji na własności sprężyste blachy. Można zatem stwierdzić, iż

uzyskane wartości E^*/E dla prostego i heksagonalnego układu otworów mogą posłużyć do wyznaczenia efektywnego modułu Younga dowolnej blachy z takimi samymi parametrami perforacji, wykonanej z materiału o znanym module sprężystości wzdłużnej. Nieco większe zróżnicowanie analogicznych stosunków wartości odnotowano w przypadku własności wytrzymałościowych, zwłaszcza granicy plastyczności ($R_{p0,2}^*/R_e$ i $R_{p0,2}^*/R_{p0,2}$). Średni spadek modułu Younga w wyniku perforacji prostej dla blachy stalowej wyniósł 44%, a dla blachy ze stopu aluminium 42%, natomiast perforacja heksagonalna spowodowała obniżenie wartości średniej tego parametru o 52% (DC01) i 48% (EN AW-5754). Analiza numeryczna wykazała dużą zgodność z tymi wynikami. Widać zatem, iż w przypadku obu materiałów większy spadek rozważanej stałej sprężystej wystąpił dla układu heksagonalnego, przy czym należy dodać, iż ten rodzaj perforacji (przy danej średnicy otworu i ustalonym skoku) charakteryzuje się wyższą wartością prześwitu (w badanym przypadku o ok. 3%). Posłużenie się zaproponowanym jako funkcja prześwitu wskaźnikiem ubytku masy W_m , który odpowiednio kompensuje wartości efektywnego modułu Younga, pozwala na bezpośrednie porównanie różnych perforacji danej blachy. Większy spadek tak wyznaczonych własności sprężystych (średnich dla blachy) nadal występuje dla heksagonalnego układu otworów (odpowiednio 38% – blacha stalowa i 32% – blacha ze stopu aluminium) niż dla perforacji w układzie prostym (odpowiednio 30% – blacha stalowa i 28% – blacha ze stopu aluminium). Generalnie, podobną prawidłowość obserwuje się w przypadku własności wytrzymałościowych – większy spadek granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie powoduje perforacja heksagonalna.

Badania sztywności rozpatrywanych blach perforowanych wykazały, iż nieco inaczej zachowuje się tego typu tworzywo w zależności od schematu obciążenia. Generalnie, wyższe wartości efektywnego modułu Younga dla danego materiału otrzymano w próbie trójpunktowego gięcia niż w przypadku jednoosiowego rozciągania. Ponadto, w przypadku gięcia zaobserwowano dość jednorodny rozkład własności sprężystych obu perforacji. Szczególnie zwraca uwagę prosty układ otworów, dla którego w próbie jednoosiowego rozciągania efektywny moduł Younga w kierunku diagonalnym 45° był wyraźnie niższy, natomiast w warunkach trójpunktowego gięcia dla wszystkich rozważanych kierunków tej perforacji 0° , 45° i 90° analizowany parametr sytuował się na zbliżonym poziomie.

Kolejny segment badań dotyczył oceny wpływu prześwitu, średnicy otworu, szerokości perforowanej próbki i usytuowania jej krawędzi bocznych na efektywny moduł Younga blachy z prostym układem otworów. Stwierdzono m.in. iż różna wielkość otworów okrągłych przy tej samej wielkości prześwitu w jednakowym stopniu wpływa na obniżenie własności

sprężystych blachy. Natomiast, wraz ze wzrostem prześwitu zmniejsza się izotropia ich rozkładu w płaszczyźnie perforowanego arkusza. Wyniki doświadczalne i numeryczne pozwoliły na opracowanie formuły, umożliwiającej wyznaczenie stosunku E^*/E dla określonego prześwitu (do maksymalnej teoretycznej wartości $P = 78,5\%$).

Wykazano, iż szerokość próbki blachy perforowanej ma niewielki wpływ na wyznaczane parametry, zwłaszcza gdy zachowana jest periodyczność danego układu perforacji. Wraz ze wzrostem szerokości paska blachy, maleje wpływ usytuowania jego krawędzi bocznej na dokładność wyznaczanego efektywnego modułu Younga. Natomiast usytuowanie linii wyznaczających bazę pomiarową nie ma praktycznie żadnego znaczenia.

Badania aplikacyjne zamieszczone w końcowym fragmencie opracowania, oprócz aspektu poznawczego, związanego m.in. z charakterystyką rozkładu naprężeń i odkształceń w blasze ze stopu aluminium EN AW-5754 z otworami okrągłymi i kwadratowymi w prostym układzie perforacji, stanowią niejako potwierdzenie słuszności wyboru podjętej w pracy problematyki, istotnej także w wymiarze praktycznym.

W konkluzji przedstawionego podsumowania przeprowadzonych badań eksperymentalnych i numerycznych wybranych własności blach perforowanych, istotnych zwłaszcza w kontekście konstrukcyjnego przeznaczenia tych materiałów, można sformułować następujące wnioski:

1. Rozkład własności mechanicznych blachy perforowanej jest w dużym stopniu determinowany przez cechy siatki otworów (geometryczne cechy perforacji).
2. Rozpatrywane układy perforacji – prosty i heksagonalny (mijany 60°) z otworami okrągłymi – powodują różny spadek własności sprężystych i wytrzymałościowych. Perforacja prosta w mniejszym stopniu osłabia materiał lity, natomiast perforacja heksagonalna zapewnia bardziej jednorodny rozkład analizowanych parametrów w płaszczyźnie blachy.
3. Blacha perforowana otworami okrągłymi w układzie prostym cechuje się bardziej jednorodnym rozkładem efektywnego modułu Younga w warunkach trójpunktowego gięcia w porównaniu do jednoosiowego rozciągania. W przypadku blachy z perforacją heksagonalną, ze względu na większą symetrię układu otworów, schemat obciążenia nie ma takiego znaczenia.
4. Na przykładzie blachy z perforacją prostą stwierdzono, że różna wielkość otworów okrągłych, przy tym samym prześwicie, w jednakowym stopniu obniża własności

sprężyste blachy. Ze wzrostem prześwitu zaś zwiększa się niejednorodność rozkładu efektywnego modułu Younga w płaszczyźnie arkusza.

5. Wpływ szerokości próbki blachy perforowanej na wartość efektywnego modułu Younga, z praktycznego punktu widzenia, jest niewielki, zwłaszcza przy zachowaniu periodyczności układu perforacji. Wartość odchyłki wyznaczanego efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej, wynikającej z niedokładności usytuowania krawędzi bocznej próbki, można zmniejszyć stosując paski blachy o większej szerokości.
6. Poprzez odpowiedni dobór parametrów perforacji oraz surowca można projektować w pewnym sensie nowe materiały o różnych własnościach i w określonym stopniu sterować jednorodnością ich rozkładu.
7. Przeprowadzone badania upoważniają do stwierdzenia, że wpływ schematu obciążenia na zachowanie sprężyste blachy perforowanej może być różny w zależności od rozpatrywanego kierunku w jej płaszczyźnie, w stopniu zależnym od rodzaju perforacji. Potwierdzają to rozkłady naprężeń i odkształceń badanych blach perforowanych poddanych analizowanym schematom obciążenia w zakresie sprężystym.
8. Zdefiniowany wskaźnik ubytku masy W_m pozwala na trafniejszą ocenę wpływu różnej perforacji na własności blachy perforowanej, wykonanej z blachy pełnej tego samego gatunku i grubości. Im wyższa wartość danego parametru, wyznaczona z uwzględnieniem tego wskaźnika, tym blacha perforowana efektywniej przenosi obciążenie.

Literatura

- [1] Dobrzański L. A.: *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2006
- [2] Blicharski M.: *Inżynieria materiałowa*. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2012
- [3] Kaczorowski M., Krzyńska A.: *Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008
- [4] Głowacka M., Zieliński A.: *Podstawy materiałoznawstwa*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2014
- [5] Ashby M., Shercliff H., Cebon D.: *Materials: engineering, science, processing and design*. Elsevier: Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2007
- [6] Donald R. Askeland, Pradeep P. Phule: *The Science and engineering of materials*. Thomson Brooks/Cole, cop., Pacific Grove, 2003
- [7] Ashby M. F.: *Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998
- [8] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S.: *Kompozyty*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
- [9] Durr U.: *Laser Drilling in Industrial Use*. Laser Technik Journal, Vol. 5, 3, May 2008, 57-59
- [10] Słania J., Krawczyk R., Cieśla D.: *Charakterystyka cięcia termicznego*. Przegląd spawalnictwa, Vol. 87, 7, 2015
- [11] Skoczypiec S., Machno M.: *Charakterystyka wybranych elektrochemicznych metod obróbki otworów o przekroju kołowym*. Mechanik nr 10/2015
- [12] Sosinowski Ł.: *Elektroerozyjne drążenie otworów o małych średnicach w materiałach o dużej przewodności cieplnej*. Mechanik 12/2015
- [13] Ramulu M., Posinasetti P., Hashish M.: *Analysis of the abrasive waterjet drilling process*. WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, August 21-23, 2005
- [14] DIN 24041:2021-06. *Perforated plates - Dimensions*
- [15] Muzykiewicz W., Łach A.: *Analiza wpływu techniki perforacji blach na jakość i właściwości wyrobu*. Obróbka Plastyczna Metali, t. XVIII, nr 3, 2007, 13-21
- [16] Muzykiewicz W., Łach A.: *Analiza możliwości wykonania gęstych perforacji blach niekonwencjonalnymi technikami wysokoenergetycznymi*. Obróbka Plastyczna Metali, t. XVIII, nr 1, 2007, 13-21

- [17] Wnęk Z.: *Nowy trend - blachy perforowane*. STAL Metale & Nowe Technologie, 6, 2006, 8-11
- [18] Wnęk Z.: *STAL Przewodnik inżyniera*. Wyd. ELAMED, Katowice 2010
- [19] DIN 791:1967-03. *Expanded metal*
- [20] Blanco J. M., Buruaga A., Cuadrado J., Zapico A.: *Assessment of the influence of facade location and orientation in indoor environment of double-skin building envelopes with perforated metal sheets*. Building and Environment, Vol. 163, 2019
- [21] Srisamranrungruang T., Hiyama K.: *Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated façade (DSPF)*. Energy & Buildings, Vol. 210, 2020
- [22] Zapico A., Egiluz Z., Garcia Frometa Y., Cuadrado J.: *Mechanical characterization of double-skin perforated-sheet facades*. Journal of Building Engineering, Vol. 56, 2022
- [23] Mironovs V., Tatarinov A., Gorbacova S.: *Expanding Application of Perforated Metal Materials in Construction and Architecture*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 251, 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017), 27-29 September 2017, Riga, Latvia
- [24] Lisicins M., Mironovs V., Boiko I.: *Building Constructions Made of Perforated Metallic Materials*. Proceedings of 4th International Scientific Conference "Civil Engineering' 13" Part I, Vol. 4, 53-59 2013, Jelgava, Latvia University of Agriculture
- [25] Weerakoon A., Richards P., McClew I., Deans J.: *Use of Perforated Metal Sheets as Solar Collectors for Building Space Heating*. EcoLibrium, August 2004, 24-28
- [26] Zheng W., Zhang H., You S., Fu Y.: *Experimental Investigation of the Transpired Solar Air Collectors and Metal Corrugated Packing Solar Air Collectors*. Energies, Vol. 10, 3, 2017, 302 (1-12)
- [27] Wang X., Lei B., Bi H., Yu T.: *A simplified method for evaluating thermal performance of unglazed transpired solar collectors under steady state*. Applied Thermal Engineering, Vol. 117, 2017, 185-192
- [28] Gao M., Wang D., Liu Y., Wang Y., Zhou Y.: *A study on thermal performance of a novel glazed transpired solar collector with perforating corrugated plate*. Journal of Cleaner Production, Vol. 257, 2020
- [29] Gao M., Fan J., Furbo S., Xiang Y.: *Energy and exergy analysis of a glazed solar preheating collector wall with non-uniform perforated corrugated plate*. Renewable Energy, Vol. 196, 2022, 1048–1063

- [30] Shetty S. P., Paineni A., Kande M., Madhwesh N., Yagnesh Sharma N.: *Experimental investigations on a cross flow solar air heater having perforated circular absorber plate for thermal performance augmentation*. Solar Energy, Vol. 197, 2020, 254–265
- [31] Pop O. G., Berville Ch.: *Mathematical Modelling of Unglazed Transpired Solar Collectors*. 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT, 14 – 15 October, 2021, Bucharest, Romania
- [32] Bizzy I., Sipahutar R., Puspitasari D., Sofijan A., Fajri M. A.: *The cooling effect of polycrystalline type PV panels using perforated aluminium plates*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 909, 2020, 012005
- [33] Sofijan A., Nawawi Z., Suprpto B. Y., Bizzy I., Sipahutar R.: *Passive cooling using perforated aluminium plate to improve efficiency on monocrystalline of 100 Wp photovoltaic*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 909, 2020, 012006
- [34] Bizzy I., Mustafriзал L.: *PV Panel Cooler to Enhance Output Performance Using Perforated Aluminium Plate*. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1198, 4, 2019
- [35] Mundhe V. M., Deore E. R.: *Design and analysis of perforated muffler in automobile exhaust system*. International Journal of Multidisciplinary Research and Development, Vol. 2, 7, July 2015, 182-187
- [36] Jones M. G., Tracy M. B., Watson W. R., Parrott T. L.: *Effects of liner geometry on acoustic impedance*. 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit, 17–19 June 2002, Breckenridge, Colorado
- [37] Eldredge J. D., Bodony D. J., Shoeybi M.: *Numerical Investigation of the Acoustic Behavior of a Multi-perforated Liner*. 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference), 21–23 May 2007, Rome, Italy
- [38] Azimi M., Ommi F., Alashti N. J.: *Using Acoustic Liner for Fan Noise Reduction in Modern Turbofan Engines*. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 15, 1, 2014, 97–101
- [39] Ma X. Q., Su Z. T.: *Development of acoustic liner in aero engine: A review*. Science China Technological Sciences, Vol. 63, 12, 2020, 2491–2504
- [40] Huang Z., Xiong Y. B., Liu Y. Q., Jiang P. X., Zhu Y. H.: *Experimental investigation of full-coverage effusion cooling through perforated flat plates*. Applied Thermal Engineering, Vol. 76, 2015, 76–85

- [41] Guan D., Zhao D.: *Numerical investigation on the porosity effect of a bias-flow perforated liner on attenuating self-excited thermoacoustic oscillations*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 149, 4, 2021
- [42] Wang W., Yan Y., Zhou Y., Cui J.: *Review of Advanced Effusive Cooling for Gas Turbine Blades*. Energies, Vol. 15, 22, 2022
- [43] Isoldi L. A., Real M. V., Vaz J., Correia A. L. G., Santos E. D., Rocha L. A. O.: *Numerical Analysis of Perforated Thin Plates Subjected to Tension or Buckling*. International Conference on Offshore and Marine Technology: Science and Innovation, 22 - 24 March 2012, Rio Grande, Brazil
- [44] PN – EN 10079:2009. *Terminologia wyrobów stalowych*
- [45] Gardner K. A.: *Heat-Exchanger Tube-Sheet Design*. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 70, 1948, 377–385
- [46] Gardner K. A.: *Heat-Exchanger Tube-Sheet Design-2, Fixed Tube Sheets*. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 74, 1952, 159–166
- [47] Gardner K. A.: *Heat-Exchanger Tube-Sheet Design-3. U-Tube and Bayonet-Tube Sheets*. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 27, 1, 1960, 25–33
- [48] Malkin I.: *Notes on a Theoretical Basis for Design of Tube Sheets of Triangular Layout*. Trans. ASME, Vol. 74, 1952, 387–396
- [49] Horvay G.: *The Plane-Stress Problem of Perforated Plates*. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 74, 1952, 355–360
- [50] Miller K. A. G.: *The Design of Tube Plates in Heat-Exchangers*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 167, 1b, 1953, 215–231
- [51] Horvay G.: *Thermal Stresses in Perforated Plates*. Proceedings of the First U. S. National Congress of Applied Mechanics, 1951
- [52] Duncan J. P.: *The Structural Efficiency of Tube-plates for Heat-Exchangers*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 169, 1, 1955, 789–810
- [53] Salerno V. L., Mahoney J. B.: *A Review, Comparison and Modification of Present Deflection Theory for Flat Perforated Plates*. Welding Research Council Bulletin, No. 52, July 1959
- [54] Sampson R. C.: *Photoelastic Frozen Stress Study of the Effective Elastic Constants of Perforated Materials, A Progress Report*. WAPD-DLE - 319, May, 1959; available from Office of Technical Service, Department of Commerce, Washington 25, D. C.

- [55] Sampson R. C.: *Photoelastic Analysis of Stresses in Perforated Material Subjected to Tension or Bending*. Bettis Technical Review, WAPD-BT-18. April, 1960; available from Office of Technical Services, Department of Commerce, Washington 25, D. C.
- [56] Leven M. M.: *Preliminary Report on Deflection of Tube Sheets*. WARD-DLE-320, May, 1959; available from Office of Technical Services, Department of Commerce, Washington 25, D.C.
- [57] Leven M. M.: *Photoelastic Determination of Stresses in Tube Sheets and Comparison With Calculated Values*. Bettis Technical Review. WAPD-BT-18, April, 1960; available from Office of Technical Services, Department of Commerce, Washington 25, D.C.
- [58] Bailey R., Hicks R.: *Behavior of Perforated Plates Under Plane Stress*. Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 2, 2, 1960, 143–161
- [59] Koiter W. T.: *Stress Distribution in an Infinite Elastic Sheet with a Doubly-Periodic Set of Equal Holes*. University of Wisconsin Press, 1960, 191–213
- [60] Mahoney J. B., Salerno V. L., Goldberg J. E.: *Analysis of Perforated Circular Plates Containing a Rectangular Array of Holes*. Welding Research Council Bulletin, 80, 1962
- [61] O'Donnell W. J.: *The Effects of the Tubes on Stresses and Deflection in Tubes*. Bettis Technical Review, WAPD BT 21, Nov. 1960
- [62] O'Donnell W. J., Langer B. F.: *Design of Perforated Plates*. Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, 84, 3, 1962, 307–320
- [63] Duncan J. P., Upfold R. W.: *Equivalent Elastic Properties of Perforated Bars and Plates*. Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 5, 1, 1963, 53–65
- [64] Nuno H., Fujie T., Ohkuma K.: *Experimental Study on the Elastic Properties of Perforated Plates With Circular Holes in Square Pattern*. Mitsubishi Atomic Power Industries, Report No. 74, March 1964
- [65] Hulbert L. E., Niedenfuhr F. W.: *Accurate Calculation of Stress Distributions on Multihole Plates*. ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 87, 1965, 331–336
- [66] Goldberg J. E., Jabbour K. N.: *Stress and Displacement in Perforated Plates*. Nuclear Structural Engineering, Vol. 2, 4, 1965, 360–381
- [67] Harrop J., Abdul-Wahab H. M. S.: *An Experimental Study of the Rigidity of Perforated Plates*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 4, 5, 1966, 480–489
- [68] Harrop J., Abdul-Karim R. M.: *Stress and Deflections in Circular Plates with Square Pitch Perforations*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 6, 5, 1967, 431–439

- [69] Meijers P.: *Doubly-Periodic Stress Distribution in Perforated Plates*. PhD thesis, University of Technology of Delft, Holland, 1967
- [70] Meijers P.: *Plates With Doubly-Periodic Pattern of Circular Holes Loaded in Plane Stress or in Bending*. Proceedings of the 1st International Conference on Pressure Vessel Technology, Part 1, Design and Analysis, Delft, ASME, New York, 1969, 551–570
- [71] Meijers P.: *Refined Theory for Bending and Torsion of Perforated Plates*. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 108, 4, 1986, 423–429
- [72] Le Fort P.: *Bending of Perforated Plates with Square Penetration Pattern*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 12, 1, 1970, 122–134
- [73] Needleman A.: *Void Growth in an Elastic-Plastic Medium*. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 39, 4, 1972, 964–970
- [74] O'Donnell W. J.: *A Study of Perforated Plates With Square Penetration Patterns*. Welding Research Council Bulletin, No. 124, Sept. 1967
- [75] O'Donnell W. J.: *Further Theoretical Treatment of Perforated Plates With Square Penetration Patterns*. Welding Research Council Bulletin No. 151, June 1970
- [76] Slot T., O'Donnell W.J.: *Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates With Square and Triangular Penetration Patterns*. Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Vol. 93, 4, 1971, 935–942
- [77] O'Donnell, "Effective Elastic Constants for the Bending of Thin Perforated Plates With Triangular and Square Penetration Patterns". Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Vol. 95, 1, 1973, 121–128
- [78] Porowski J., O'Donnell W. J.: *Elastic Design Methods for Perforated Plates*. Journal of Engineering for Power, Trans. ASME, Vol. 100, 2, 1978, 356–362
- [79] O'Donnell W.J., Porowski.: *Yield Surfaces for Perforated Materials*. Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 40, 1, 1973, 263–270
- [80] Porowski J., O'Donnell W. J.: *Effective Plastic Constants for Perforated Materials*. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 96, 3, 1974, 234–241
- [81] Porowski J., O'Donnell W. J.: *Plastic Strength of Perforated Plates With Square Penetration Patterns*. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 97, 3, 1975, 146–154
- [82] Cantemir D., Bertini L., Beghini M., Barbieri L., Spadaccini F.: *A finite element procedure for prediction of tube hole distortion due to welding of large perforated plates*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 84, 7, 2007, 460–468

- [83] Behseta K., Mackenzie D., Hamilton R.: *Plastic load evaluation for a fixed tube sheet heat exchanger subject to proportional loading*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 92, 2012, 11–18
- [84] Chudzik A.: *Analiza stanu naprężeń w dnie sitowym wymiennika ciepła*. Przegląd Mechaniczny, Vol. 9, 2006, 45–48
- [85] Achtelik H., Gasiak G., Grzelak J.: *Strength tests of axially symmetric perforated plates for chemical reactors: Part 1 – The simulation of stress state*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, 4, 2008, 248–256
- [86] Achtelik H., Gasiak G., Grzelak J.: *Strength tests of axially symmetric perforated plates for chemical reactors: Part 2 – Experiments*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, 4, 2008, 257–264
- [87] Ledwoń W., Achtelik H.: *Experimental Analysis of the State of Stress of the Axisymmetric Perforated Plates Loaded With Hydrostatic Pressure*. Proceedings of the 13th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer International Publishing AG, 2017, 331–341
- [88] Jones D. P.: *Finite Element Analysis of Perforated Plates Containing Triangular Penetration Patterns of 5 and 10 Percent Ligament Efficiency*. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 97, 3, 1975, 199–205
- [89] Porowski J. S., O'Donnell W. J.: *Plastic Strain Concentrations in Ligaments*. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 99, 2, 1977, 328–336
- [90] Winnicki L., Kwieciński M., Kleiber M.: *Numerical Limit Analysis of Perforated Plates*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, 3, 1977, 553–561
- [91] Sawczuk A., O'Donnell W. J., Porowski J.: *Plastic analysis of perforated plates for orthotropic yield criteria*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 17, 6, 1975, 411–417
- [92] Litewka A., Rogalska E.: *Plastic Flow of the Perforated Materials with Square Penetration Pattern*. Structural mechanics in reactor technology. Transactions. Vol. L 12/9, 1979, 1–8
- [93] Litewka A.: *Experimental Study of the Effective Yield Surfaces of Perforated Materials*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 57, 2, 1980, 417–425
- [94] Litewka A., Sawczuk A.: *A Yield Criterion for Perforated Sheets*. Ingenieur-Archiv, Vol. 50, 6, 1981, 393–400

- [95] Litewka A., Rogalska E.: *Stan naprężenia przy niesymetrycznym rozciąganiu osiowym materiałów perforowanych*. Mechanika teoretyczna i stosowana, Vol. 19, 2, 1981, 285–299
- [96] Litewka A., Sawczuk A.: *On a Continuum Approach to Plastic Anisotropy of Perforated Materials*. Mechanical Behavior of Anisotropic Solids. Proceeding of the Euromech Colloquium 115 Villard-de-Lans, 1982, 803–817
- [97] Kichko R. D., Badlani M., Spaniel F., O'Donnell W. J., Porowski J. S.: *Plastic Strain Concentrations in Perforated Structures Subjected to Alternating Loads*. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 104, 3, 1982, 161–167
- [98] König M.: *Yield surfaces for perforated plates*. Engineering Computations, Vol. 5, 3, 1988, 224–230
- [99] Rogalska E., Kąkol W., Guerlement G., Lamblin D.: *Limit Load Analysis of Perforated Disk With Square Penetration Pattern*. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol 119, 1, 1997, 122–126
- [100] Nakayama Y., Kodama A., Nagaki S., Abe T.: *FEM Analysis on Elastic-Plastic Deformation of Perforated Sheets*. Metals and Materials, Vol. 4, 3, 1998, 319–321
- [101] Wolf D. Reinhardt: *Yield Criteria for Elastic-Plastic Design of Tubesheets With Triangular Penetration Pattern*. Journal of Pressure Vessel Technology, Trans. ASME, Vol. 123, 1, 2001, 118–123
- [102] Bhattacharya A., Venkat Raj V.: *Yield Criterion for Thin Perforated Plates With Square Penetration Pattern*. Journal of Pressure Vessel Technology. Trans. ASME, Vol. 126, 2, 2004, 169–178
- [103] Bhatthacharya A., Venkat Raj V.: *Yield surfaces for perforated plates with square array of holes*. Nuclear Engineering and Design, Vol. 231, 3, 2004, 219–233
- [104] Chen F. K.: *Analysis of plastic deformation for sheet metals with circular perforations*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 37, 1 – 4, 1993, 175–188
- [105] Lee Y. C., Chen F. K.: *Yield criterion for a perforated sheet with a uniform triangular pattern of round holes and a low ligament ratio*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 103, 3, 2000, 353–361
- [106] Baik C. S., Oh K. H., Lee D. N.: *Analysis of the deformation of a perforated sheet under uniaxial tension*. Journal of Material Processing Technology, Vol. 58, 2 – 3, 1996, 139–144
- [107] Baik S. C., Oh K. H. Lee D. N.: *Forming Limit Diagram of Perforated Sheet*. Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 33, 8, 1995, 1201–1207

- [108] Baik S. C., Han H. N., Lee S. H., Oh K. H., Lee D. N.: *Plastic Behaviour of Perforated Sheets Under Biaxial Stress State*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 39, 7, 1997, 781–793
- [109] Chen F. K., Lee Y. C.: *Plastic Deformation of a Perforated Sheet With Non-Uniform Circular Holes Along the Thickness Direction*. Journal of Engineering Materials and Technology. Trans. ASME, Vol. 125, 1, 2003, 75–80
- [110] Baik S. C., Han H. N., Lee S. H., Oh K. H., Lee D. N.: *Plastic behaviour of perforated sheets with slot-type holes under biaxial stress state*. International Journal of Mechanical Sciences, 42, 3, 2000, 523–536
- [111] Park Soo-Kil, Kim J., Chang Yu-Chul, Kang Beom-Soo.: *Analysis of the deformation of a perforated sheet under thermal and tension load using finite element method*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, 1 – 3, 2001, 761–765
- [112] van Rens B. J. E., Brekelmans W. A. M., Baijens F. P. T.: *Homogenization of the elastoplastic behavior of perforated plates*. Computers and Structures, Vol. 69, 4, 1998, 537–545
- [113] Takizawa H., Furuta S.: *Material Modeling of Perforated Sheet Metals with Different Hole Arrangements by Homogenization Method*. Materials Transactions, Vol. 64, 1, 2023, 233–241
- [114] Takizawa H., Sakai T.: *Analysis of Anisotropic Plastic Properties of Perforated Sheet Metal Using Homogenization Method*. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 60, 704, 2019, 262–267
- [115] Khatam H., Pindera M. J.: *Plastic deformation modes in perforated sheets and their relation to yield and limit surfaces*. International Journal of Plasticity, Vol. 27, 10, 2011, 1537–1559
- [116] Duan. X., Weck A., Wilkinson D. S., Metzger D. R.: *Failure Modes of Perforated Material under Finite Deformation*. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, Vol 130, 4, 2008
- [117] Wang L.: *Predict the Plastic Deformation of Perforated Sheet Metals using Image-based Finite Element Modeling*. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2012, 2021
- [118] Roberts T. M., Azizian Z. G.: *Strength of Perforated Plates Subjected to In-Plane Loading*. Thin-Walled Structures, Vol. 2, 2, 1984, 153–164
- [119] Narayanan R., Chow F. Y.: *Ultimate Capacity of Uniaxially Compressed Perforated Plates*. Thin-Walled Structures, Vol 2, 3, 1984, 241–264

- [120] Narayanan R., Chow F. Y.: *Strength of Biaxially Compressed Perforated Plates*. 7th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri (USA), November 13–14, 1984
- [121] Shanmugan N. E., Thevendran V., Tan Y. H.: *Design formula for axially compressed perforated plates*. Thin-Walled Structures, Vol. 34, 1, 1999, 1–20
- [122] Paik J. K.: *Ultimate strength of steel plates with a single circular hole under axial compressive loading along short edges*. Ships and Offshore Structures, Vol. 2, 4, 2007, 355–360
- [123] Paik J. K.: *Ultimate strength of perforated steel plates under edge shear loading*. Thin-Walled Structures, Vol. 45, 3, 2007, 301–306
- [124] Paik J. K.: *Ultimate strength of perforated steel plates under combined biaxial compression and edge shear loads*. Thin-Walled Structures, Vol. 46, 2, 2008, 207–213
- [125] Wang G., Sun H., Peng H., Uemori R.: *Buckling and ultimate strength of plates with openings*. Ships and Offshore Structures, Vol. 4, 1, 2009, 43–53
- [126] Khaled M. El-Sawy, Aly S. Nazmy, Mahommad I. Martini: *Elasto-plastic buckling of perforated plates under uniaxial compression*. Thin-Walled Structures, Vol. 42, 8, 2004, 1083–1101
- [127] Khaled M. El-Sawy, Mahomed I. Martini: *Stability of biaxially loaded square plates with single central holes*. Ships and Offshore Structures, Vol. 5, 4, 2010, 283–293
- [128] Shariati M., Dadrasi A.: *Numerical and Experimental Investigation of Loading Band on Buckling of Perforated Rectangular Steel Plates*. Research Journal of Recent Sciences, Vol. 1, 10, 2012, 63–71
- [129] Benguediab S., Kettaf Fatima Z.: *Buckling of Rectangular Plates with Different Central Holes*. Mechanics and Mechanical Engineering, Vol. 21, 4, 2017, 885–895
- [130] Komur Aydin M.: *Elasto-plastic buckling analysis for perforated steel plates subject to uniform compression*. Mechanics Research Communications, Vol. 38, 2, 2011, 117–122
- [131] Kumar M. S., Alagusundaramoorthy P., Sundaravadivelu R.: *Ultimate Strength of Square Plate with Rectangular Opening Under Axial Compression*. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, Vol. 4, 1, 2007, 15–26
- [132] Helbig D., Real M. V., Correia A. L. G., Santos E. D., Isoldi L. A.: *Constructal Design of Perforated Steel Plates Subject to Linear Elastic and Nonlinear Elasto-Plastic Buckling*. Proceedings of the XXXIV Iberian Latin – American Congress on Computational Methods in Engineering, Pirenópolis, Brazil, November 10–13, 2013

- [133] Lorenzini G., Helbig D., Real M. V., Santos E. D., Isoldi L., A., Rocha L. A. O.: *Computational Modeling and Constructal Design Method Applied to the Mechanical Behavior Improvement of Thin Perforated Steel Plates Subject to Buckling*. Journal of Engineering Thermophysics, Vol 25, 2, 2016, 197–215
- [134] Silva C. C. C., Helbig D., Cunha M. L., Santos E. D., Rocha L. A. O., Real M. V., Isoldi M. A.: *Numerical buckling analysis of thin steel plates with centered hexagonal perforation through constructal design method*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 41, 309, 2019, 1–18
- [135] Helbig D., Silva C. C. C., Real M. V., Santos L. D., Isoldi L. A., Rocha L. A. O.: *Study About Buckling Phenomenon in Perforated Thin Steel Plates Employing Computational Modeling and Constructal Design Method*. Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 13, 10, 2016, 1912–1936
- [136] Cheng B., Zhao J.: *Strengthening of perforated plates under uniaxial compression. Buckling Analysis*. Thin-Walled Structures, Vol. 48, 12, 2010, 905–914
- [137] Seifi R., Chahardoli S., Attar A., A.: *Axial buckling of perforated plates reinforced with strips and middle tubes*. Mechanics Research Communications, Vol. 85, 2017, 21–32
- [138] Jeong-Hyeon Kim, Jun-Hwan Jeon, Joo-Shin Park, Hyang-Duk Seo, Hyung-Joon Ahn, Jae-Myung Lee: *Effect of reinforcement on buckling and ultimate strength of perforated plates*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 92, 2015, 194–205
- [139] Loughlan J., Hussain N.: *The Post-buckled Failure of Steel Plate Shear Webs With Centrally Located Circular Cut-outs*. Structures, Vol. 8, 2, 2016, 252–263
- [140] Loughlan J., Hussain N.: *The post-buckled failure of steel thin plate shear webs with stiffened centrally located cut-outs*. Thin-Walled Structures, Vol. 128, 2018, 80–91
- [141] Mohtaram Y. F., Kahnamouei J. T., Shariati M., Behjat B.: *Experimental and numerical investigation of buckling in rectangular steel plates with groove-shaped cutouts*. Journal of Zhejiang University Science A, Vol. 13, 6, 2012, 469–480
- [142] Pellegrino C., Maiorana E., Modena C.: *Linear and non-linear behaviour of steel plates with circular and rectangular holes under shear loading*. Thin-Walled Structures, Vol. 47, 6–7, 2009, 607–616
- [143] Maiorana E., Pellegrino C., Modena C.: *Non-linear analysis of perforated steel plates subjected to localised symmetrical load*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, 4, 2009, 959–964
- [144] Yettram A., L., Brown J.: *The Elastic Stability of Square Perforated Plates*. Computers & Structures, Vol. 21, 6, 1985, 1267–1272

- [145] Yettram A., L., Brown C. J.: *The Elastic Stability of Square Perforated Plates Under Bi-axial Loading*. Computers & Structures, Vol. 22, 4, 1986, 589–594
- [146] Brown C. J., Yettram A., L.: *The Elastic Stability of Square Perforated Plates Under Combinations of Bending, Shear and Direct Load*. Thin-Walled Structures, Vol. 4, 3, 1986, 239–246
- [147] Brown C. J., Yettram A., L., Burnett M.: *Stability of Plates with Rectangular Holes*. Journal of Structural Engineering, Vol. 113, 5, 1987, 1111–1116
- [148] Brown C. J.: *Elastic Buckling of Perforated Plates Subjected to Concentrated Loads*. Computers & Structures, Vol. 36, 6, 1990, 1103–1109
- [149] Shakerley T. M., Brown C. J.: *Elastic Buckling of Plates With Eccentrically Positioned Rectangular Perforations*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 38, 8–9, 1996, 825 – 838
- [150] Khaled M. El-Sawy, Mahomed I. Martini: *Elastic stability of bi-axially loaded rectangular plates with a single circular hole*. Thin-Walled Structures, Vol. 45, 1, 2007, 122–133
- [151] Khaled M. El-Sawy, Aly S. Nazmy: *Effect of aspect ratio on the elastic buckling of uniaxially loaded plates with eccentric holes*. Thin-Walled Structures, Vol. 39, 12, 2001, 983–998
- [152] Maiorana E., Pellegrino C., Modena C.: *Elastic stability of plates with circular and rectangular holes subjected to axial compression and bending moment*. Thin-Walled Structures, Vol. 47, 3, 2009, 241–255
- [153] Maiorana E., Pellegrino C., Modena C.: *Linear buckling analysis of perforated plates subjected to localized symmetrical load*. Engineering Structures, Vol. 30, 11, 2008, 3151–3158
- [154] Komur M. A., Sonmez M.: *Elastic buckling of rectangular plates under linearly varying in-plane normal load with a circular cutout*. Mechanics Research Communications, Vol. 35, 6, 2008, 361–371
- [155] Komur M. A., Sonmez M.: *Elastic buckling behavior of rectangular plates with holes subjected to partial edge loading*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 112, 2015, 54–60
- [156] Rocha L. A. O., Isoldi L. A., Real M. V., Santos E. D., Correla A. L. G, Lorenzini G., Biserni C.: *Constructal design applied to the elastic buckling of thin plates with holes*. Central European Journal of Engineering, Vol. 3, 3, 2013, 475–483

- [157] Jana P.: *Optimal design of uniaxially compressed perforated rectangular plate for maximum buckling load*. Thin-Walled Structures, Vol. 103, 2016, 225–230
- [158] Kim U. N., Choe I. H., Paik J. K.: *Buckling and ultimate strength of perforated plate panels subject to axial compression: experimental and numerical investigations with design formulations*. Ships and Offshore Structures, Vol. 4, 4, 2009, 337–361
- [159] Qasim H. Bader Al-Amar, Mohammed S. Hassan Al-Araji: *Buckling of Perforated and Unperforated Stiffened Plate*. Journal of Babylon University/Engineering Sciences, Vol. 25, 2, 2017, 451–463
- [160] Moen C. D., Schafer B. W.: *Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending*. Thin-Walled Structures, Vol. 47, 12, 2009, 1597–1607
- [161] Degtyarev V. V., Degtyareva N. V.: *Elastic stability of uniformly compressed plates perforated in triangular patterns*. Thin-Walled Structures, Vol. 52, 2012, 165–173
- [162] Silva-Campillo A., Suarez-Bermejo J. C., Herreros-Sierra M. A.: *An experimental and numerical investigation on buckling strength assessment of perforated plates under combined in-plane loads*. Ocean Engineering, Vol. 259, 2022
- [163] Brook P.A., Edwards A. C., Gardiner J., Leheup E. R., Moon J. R.: *Finite Element Analysis of the Elastic Properties of Materials Containing Circular Holes*. Powder Metallurgy Int., 14–4, 1982, 183–186
- [164] Forskitt M., Brook P.A., Moon J. R.: *The Effects of Non-Circular Holes on the Elastic Properties of Materials*. Powder Metallurgy Int., 19–3, 1987, 19–22
- [165] Forskitt M., Moon J. R., Brook P. A.: *Elastic properties of plates perforated by elliptical holes*. Applied Mathematical Modelling, Vol. 15, 4, 1991, 182–190
- [166] Forskitt M., Moon J. R., Brook P. A.: *Elastic properties of plates perforated by cusp-shaped holes*. Applied Mathematical Modelling, Vol. 15, 4, 1991, 191–199
- [167] Webb D. C., Kormi K., Al-Hassani S. T. S.: *Use of FEM in performance assessment of perforated plates subjected to general loading conditions*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 64, 2, 1995, 137–152
- [168] Cepkauskas M. M., Yang J.: *Equivalent properties for perforated plates – an analytical approach*. 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Beijing (China), 7-12 August 2005
- [169] Meguid S. A., Kalamkarov A. L., Yao J., Zougas A.: *Analytical, Numerical and Experimental Studies of Effective Elastic Properties of Periodically Perforated Materials*. Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME, Vol. 118, 1, 1996, 43–48

- [170] Jae-Hoon Kang: *Exact solution of stresses, strains and displacements of a perforated rectangular plate by a central circular hole subjected to a linearly varying in-plane normal stresses on two opposite edges*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 84, 2014, 18–24
- [171] Mallikarjun B., Dinesh P., Parashivamurthy K. I.: *Finite Element Analysis of Elastic Stresses Around Holes in Plate Subjected to Uniform Tensile Loading*. Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 2, 4, 2012, 136–142
- [172] Pawar P., Ballav R., Kumar A.: *Finite Element Method Analysis of Rectangular Plate With Circular Hole Using Ansys*. International Journal of Chemical Sciences, Vol. 14, 4, 2016, 2787–2798
- [173] Umesh Balaso Andh, Sachin M. Chavan, Kulkarni S. G., Sagar N Khurd: *Stress analysis of perforated plates under uniaxial compression using FEA and photoelasticity*. International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 3, 11, 2016, 239–244
- [174] Umesh Balaso Andh, Chavan S. M., Kulakrni S. G.: *Stress analysis of perforated plates under uniaxial compression using experimentation and finite element analysis*. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 7, 2, 2017, 431–437
- [175] Saracoglu M., Albayrak U.: *Linear static analysis of perforated plates with round and staggered holes under their self-weights*. Research on Engineering Structures & Materials, Vol. 2, 1, 2016, 39–47
- [176] Varadharajan S., Utzig L., Duddeck F.: *Multi-scale modeling and simulation of effective properties of perforated sheets with periodic patterns*. Meccanica, Vol. 57, 2022, 707–722
- [177] Malek S., Gibson L.: *Effective elastic properties of periodic heksagonal honeycombs*. Mechanics of Materials, Vol. 91, 2015, 226–240
- [178] Song K., Yin D., Yang H., Schiavone P.: *Interaction effects on heat conduction and thermal stress in an infinite elastic plane with two circular holes*. Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 42, 2, 2021, 223–234
- [179] Juma C., Namgung I.: *Assessment of Equivalent Elastic Modulus of Perforated Spherical Plates*. Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, Vol. 15, 1, 2019, 8–17

- [180] Juma C., Namgung I.: *FEM Estimation and Comparison of Material Properties of Thin Spherical Perforated Plate and Thin Perforated Flat Plate*. International Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 12, 9, 2019, 1567–1574
- [181] Öchsner A., Winter W., Kuhn G.: *Elastic-plastic Behaviour of Perforated Aluminium under Tension and Compression*. Technische Mechanik, Vol. 21, 2, 2001, 101 – 108
- [182] Khatam H., Chen L., Pindera M. J.: *Elastic and Plastic Response of Perforated Metal Sheets With Different Porosity Architectures*. Journal of Engineering Materials and Technology. Trans. ASME, Vol. 131, 3, 2009, 1–14
- [183] Igari T., Tokiyoshi T., Mizokami Y.: *Prediction of Macroscopic and Local Stress-Strain Behavior of Perforated Plates under Primary and Secondary Creep Conditions*. JSME International Journal, Series A, Vol. 44, 2, 2001, 237–245
- [184] Vimal M. N., Pridhar T., Viswanathan P., Subramanian R.: *Design and Structural Analysis of Perforated Sheet Metals*. International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, Vol. 4, 3, 2013, 416–421
- [185] Chang-Li Yu, Joo-Sung Lee: *Ultimate strength of simply supported plate with opening under uniaxial compression*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 4, 4, 2012, 423–436
- [186] Chauhan V., Deepak: *Finite Element Analysis of Perforated Steel Plate during Compression*. International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology, Vol. 3, 2, 2013, 167–176
- [187] Sujith Kumar C., Walame M. V.: *Sensitivity Analysis of Perforated Plates using Design of Experiments for Weight Optimization*. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 5, 5, 2016, 732–736
- [188] Deshmukh P. V.: *Comparison of Deflection and Moments Between Plate with Square and Circular Perforations*. International Research Journal of Engineering and Technology, Vol 3, 7, 2016, 2169–2174
- [189] Saad-Eldeen S., Garbatov Y., Guedes Soares C.: *Experimental strength analysis of steel plates with large circular opening accounting for corrosion degradation and cracks subjected to compressive load along the short edges*. Marine Structures, Vol. 48, 2016, 52–67
- [190] Saad-Eldeen S., Garbatov Y., Guedes Soares C.: *Experimental strength assessment of thin steel plates with central elongated circular opening*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 118, 2016, 135–144

- [191] Saad-Eldeen S., Garbatov Y., Guedes Soares C.: *Experimental investigation on the residual strength of thin steel plates with a central elliptic opening and locked cracks*. Ocean Engineering, Vol. 115, 2016, 19–29
- [192] Nagaki S., Ohsita K., Hayashida T.: *Elastic-Plastic Deformation of Perforated Sheets with Randomly Distributed Holes*. Key Engineering Materials, Vols. 340–341, 2007, 241–246
- [193] Sayed A. M.: *Numerical Analysis of the Perforated Steel Sheets Under Uni-Axial Tensile Force*. Metals, Vol. 9, 6, 2019
- [194] Karakaya C.: *Numerical investigation on perforated sheet metals under tension loading*. Open Chemistry, Vol. 20, 1, 2022, 244–253
- [195] Chen W., Dai S., Zheng B.: *ARIMA-FEM Method with Prediction Function to Solve the Stress-Strain of Perforated Elastic Metal Plates*. Metals, 12, 2, 2022
- [196] Sivakumaran K. S., Chen B.: *Shear Capacity of Steel Plates with a Square Opening*. International Review of Civil Engineering, Vol. 5, 4, 2014, 135–141
- [197] Jia S., Raiser G. F., Povirk G. L.: *Modeling the effects of hole distribution in perforated aluminum sheets I: representative unit cells*. International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, 9, 2002, 2517–2532
- [198] Jia S., Povirk G. L.: *Modelling the effects of hole distribution in perforated aluminum sheets II: minimum strength failure paths*. International Journal of Solids and Structures, Vol. 39, 9, 2002, 2533–2545
- [199] Nagaki S., Nakayama Y., Abe T.: *Relation between damage due to circular holes and local deformation of perforated sheets*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 40, 2–3, 1998, 215–226
- [200] Wang Y., Zhao H., Ma H., Zhang Y.: *Fracture Mechanism and Residual Strength on Aluminum Alloy Perforated Sheets*. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, Vol. 74, 10, 2022, 3763–3774
- [201] Gordon J. L., Jones D. P., Banas D., Hutula D. N.: *A Collapse Surface for a Perforated Plate With an Equilateral Triangular Array of Penetrations*. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, 2, 2002, 201–206
- [202] Ledwoń W., Achtełik H.: *Experimental Analysis of the State of Stress of the Axisymmetric Perforated Plates Loaded With Hydrostatic Pressure*. Proceedings of the 13th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering, 2016, 331–341]

- [203] Konieczny M., Achtelek H., Gasiak G.: Research of maximum stresses zones in circular perforated plates made of S235JR steel loaded with concentrated force. *Inżynieria materiałowa*, Vol. 40, 2, 2019, 53–60]
- [204] Konieczny M. M., Achtelek H., Gasiak G.: *Finite Element Analysis (FEA) and experimental stress analysis in circular perforated plates loaded with concentrated force*. *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 14, 51, 2020, 164–173]
- [205] Konieczny M., Achtelek H., Gasiak G.: *Location of stress concentration zones in a two-layer axially symmetrical perforated plate with force applied normally to its surface*. *Engineering Structures*, Vol. 226, 2021]
- [206] Atanasiu C., Sorohan St.: *Displacements and stresses in bending circular perforated plate*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 147, 2016]
- [207] Saracoglu M. H., Uslu F., Albayrak U.: *Investigation of hole shape effect on static analysis of perforated plates with staggered holes*. *International Journal of Engineering and Innovative Research*, Vol. 3, 2, 2021, 133–144]
- [208] Gasiak G., Ledwoń W.: Analiza numeryczna stanu naprężenia i ugięcia płyt perforowanych obciążonych siłą skupioną. *Górnictwo odkrywkowe* 55 (4–5), 2014, 250–253]
- [209] Babulal K. S., Vimalkannan I., Pradeep A., Muthukumar P.: *SCF on Isotropic Rectangular Plate With Central Circular Hole Using Finite Element Analysis*. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Vol. 3, 5, 2015, 114–117
- [210] Woo J., Na W. B.: *Effect of Cutout Orientation on Stress Concentration of Perforated Plates with Various Cutouts and Bluntness*. *International Journal of Ocean System Engineering*, Vol.1, 2, 2011, 95–101
- [211] Jafari M., Ardalani E.: *Stress concentration in finite metallic plates with regular holes*. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 106, 2016, 220–230
- [212] Watsar S. D., Bharule A.: *Stress Analysis of Finite Plate with Special Shaped Cutout*. *International Journal of Scientific Engineering and Research*, Vol. 3, 4, 2015, 145–150
- [213] Zhuang L., Su B., Lin M., Liao Y., Peng Y., Zhou Y., Luo D.: *Influence of the Property of Hole on Stress Concentration Factor for Isotropic Plates*. 10th International Conference on Composite Science and Technology, 2015
- [214] Bakhshandeh K., Rajabi I., Rahimi F.: *Investigation of Stress Concentration Factor for Finite-Width Orthotropic Rectangular Plates with a Circular Opening Using Three-*

- Dimensional Finite Element Model*. Journal of Mechanical Engineering, Vol. 54, 2, 2008, 140–147
- [215] Troyani N., Gomes C., Sterlacci G.: *Theoretical Stress Concentration Factors for Short Rectangular Plates With Centered Circular Holes*. Journal of Mechanical Design, Vol. 124, 1, 2002, 126–128
- [216] Zheng Yang, Chang-Boo Kim, Chongdu Cho, Hyeon Gyu Beom: *The concentration of stress and strain in finite thickness elastic plate containing a circular hole*. International Journal of Solids and Structures, Vol. 45, 3 – 4, 2008, 713–731
- [217] Stanley P., Starr A. G.: *Stress concentrations at an oblique hole in a thick plate*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 35, 2, 2000, 143–147
- [218] Stanley P., Day B. V.: *Photoelastic Investigation of Stresses at an Oblique Hole in an Thick Flat Plate Under Uniform Uniaxial Tension*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 25, 3, 1990, 157–175
- [219] Wankar A., Mishra H.: *Topology optimization of rectangular plate having central circular hole & provision of auxiliary holes to reduce SCF*. International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 3, 6, 2016, 1084–1087
- [220] Nagpal S.: *Optimization of Rectangular Plate with Central Square Hole Subjected to In-Plane Static Loading for Mitigation of SCF*. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 1, 6, 2012, 1–8
- [221] Mirji P.: *Optimization of Rectangular Plate With Two Holes Subjected to In-Plane Static Loading*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 4, 6, 2013, 1470–1473
- [222] Bhatthacharya A., Venkat Raj V.: *Peak stress multipliers for thin perforated plates with square arrays of circular holes*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, 6, 2003, 379–388
- [223] Patil R. D., Kumar B.: *Stress Analysis of Perforated Tube Sheet Used for Pressure Vessel having Square Pitch Hole Pattern*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, 1, 2015, 18889–18906
- [224] Cirello A., Furguele F., Maletta C., Pasta A.: *Numerical simulations and experimental measurements of the stress intensity factor in perforated plates*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, 15, 2008, 4383–4393
- [225] Ukadgaonker V. G., Agnihotri N. A.: *Interaction effect of number of circular holes in a circular plate*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 4, 1997, 123–128

- [226] Porowski J. S., O'Donnell W. J., Tanaka T., Badlani M.: *Stress and Strain Concentrations in Perforated Structures Under Steady Creep Conditions*. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 102, 4, 1980, 419–429
- [227] Vaz M. A., Cyrino J. C. R., Silva G. G.: *Three-Dimensional Stress Concentration Factor in Finite Width Plates with a Circular Hole*. World Journal of Mechanics, Vol. 3, 3, 2013, 153–159
- [228] Masrol S. R., Siswanto W. A.: *Stress Concentration Analysis of Plate with Circular Hole: Elasticity Theory and Finite Element Comparison*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 465–466, 2014, 1385–1389
- [229] Wang W., Zeng X., Ding J.: *Effect of Surface Stress on the Deformation around a Nanosized Elliptical Hole: a Finite Element Study*. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Civil and Environmental Engineering, Vol. 4, 10, 2010
- [230] Thorawat P. J., Marne R. A.: *Stress Analysis of a Perforated Plate through Experimental and Computational Methods*. International Engineering Research Journal, Special Issue 2, 2015, 1145–1149
- [231] Lai J., Schijve J.: *The stress intensity factor and stress concentration for a finite plate with a single crack emanating from a hole*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, 4, 1990, 619–630
- [232] Schijve J., Lai J.: *A finite width plate with a single crack at the edge of a central hole. The K-value of the crack and σ_{peak} at the other side of the hole*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, 5, 1990, 805–812
- [233] Ukadgaonker V. G., Kale P. A.: *Finite Element Stress Analysis of Tubesheets Perforated by Circular Holes in Square Pitch Pattern*. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 120, 1, 1998, 12–16
- [234] Torshizian M. R.: *Stress Intensity Factor at the Hole-Edge Crack Tips in a Finite Plate*. Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, Vol. 10, 2, 2017, 13–20
- [235] Mashiel A. O., Laftah R. M., Khalaf H. I.: *Study the effect of perforation type for plate with central crack on the stress intensity factor using the XFEM*. Basrah Journal for Engineering Sciences, Vol. 21, 1, 2021, 27–37

- [236] Muzykiewicz W., Świątkowski K., Domagała P.: *Formability of Perforated Sheet Metal*. Proc. Of the First Australasian Congress on Applied Mechanics ACAM'96, Melbourne (Australia), Vol. 2, 1996, 907–912
- [237] Muzykiewicz W., Świątkowski K., Leśniewski M.: *Kształtowanie ażurowych wyrobów powłokowych*. Mat. Konf. „Projekty badawcze z zakresu przeróbki plastycznej, metaloznawstwa i technologii spiekowych”, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Szklarska Poręba, 1997, 101–109
- [238] Muzykiewicz W.: *Własności blach perforowanych*. Materiały XII Konferencji Sprawozdawczej Komitetu Metalurgii PAN „METALURGIA '98”, Krynica, 1998, 353–358
- [239] Muzykiewicz W.: *Przeróbka plastyczna blach perforowanych*. Obróbka Plastyczna Metali, t. IX, 4, 1998, 27–36
- [240] Muzykiewicz W. *Properties of perforated sheet metal*. Proc. of the 6th Int. Conf. TECHNOLOGY '99, Bratislava (Slovakia), Vol. I, 1999, 376–380
- [241] Muzykiewicz W.: *Spatial formation of perforated sheet metal*. In B. Shirvani, M. Geiger, H.J.J. Kals & U.P. Singh (eds), Proc. of the 8th Int. Conf. on Sheet Metal – SheMet 2000, Birmingham (UK), 2000, 185–194
- [242] Muzykiewicz W.: *Non-uniformity of plastic deformation of perforated sheet metal*. Proc. of the 8th Int. Conf. on Metal Forming – Metal Forming 2000, Edited by M. Pietrzyk, J. Kusiak, J. Majta, P. Hartley & I. Pillinger, Wydawnictwo: BALKEMA/Rotterdam/Brookfield, Kraków (Poland), 2000, 397–404
- [243] Muzykiewicz W.: *Makroskopowa niejednorodność odkształcenia plastycznego blach perforowanych*. Polska Metalurgia w latach 1998–2002, Tom I, Komitet Metalurgii PAN, Wyd. Nauk. AKAPIT, Kraków, 2002, 373–379
- [244] Frąckowiak S., Drenger T., Gądek T., Nowacki Ł.: *Kształtowanie obrotowe wyrobów z blachy perforowanej*. Obróbka Plastyczna Metali, t. XXIII, 2, 2012, 91–100 (pol. i ang.)
- [245] Muzykiewicz W.: *Odkształcalność blach perforowanych*. Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, Kraków 2013
- [246] Wang J., Li L., Jiang H., Zhang Z., Zhang S.: *Incremental sheet punching on the base of sinusoidal tool path*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 89, 2017, 3527–3534

- [247] Li L., Wang J., Zhang S.: *Numerical simulation for deformation characteristics and fracture prediction of perforated sheet in incremental sheet punching*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 110, 2020, 1415–1427
- [248] Iseki H., Murota T., Kato K., Hayashi S.: *On the Forming Limit Diagram of Perforated Sheet Metals under Biaxial Tension*. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, Vol. 55, 512, 1989, 994–999
- [249] Muzykiewicz W., Rękas A.: *Doświadczalne określanie odkształcalności granicznej blach perforowanych*. Polska Metalurgia w latach 2002–2006, Komitet Metalurgii PAN, Wyd. Nauk. AKAPIT, Kraków, 2006, 541–546
- [250] Chiba R., Nakamura R., Suga Y.: *Forming-limit strains of perforated steel sheets under biaxial stress state*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 233, 11, 2019, 2401–2415
- [251] Chiba R., Takeuchi H., Nakamura R.: *Forming-limit prediction of perforated aluminium sheets with square holes*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 50, 6, 2015, 391–404
- [252] Venkatachalam G., Narayanan S., Sathiya Narayanan C.: *Prediction of Limiting Strains for Square Pattern – Square Hole Perforated Commercial Pure Aluminium Sheets*. Advanced Materials Research, Vol. 548, 2012, 382–386
- [253] Venkatachalam G., Narayanan S., Sathiyarayanan C.: *A Finite Element Method Based Formability Analysis of Triangular Pattern of Square Hole Perforated Commercial Pure Aluminium Sheets*. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, Vol. 7, 3, 2012, 209–213
- [254] Venkatachalam G., Narayanan S., Patel Nilay S., Nishant Prabhakar, Sathiya Narayanan: *Influence of hole shape and pattern on the prediction of limiting strain for perforated commercial pure aluminium sheets*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 232, 2012, 961–965
- [255] Venkatachalam G., Patel Nilay S., Debidutta Mishra, Suresh Singh, Yashwant Choudhary, Narayanan S.: *Determination of Forming Limit Diagram for Perforated Aluminium 1050A Sheets*. International journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, Vol. 13, 1, 2013, 37–39
- [256] Venkatachalam G., Kumar V., Narayanan S.: *Finite Element Analysis of Forming Limits for Stretch Forming of Perforated Aluminium Sheet Metals*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 8, 8, 2013, 652–655

- [257] Kovalan Sandiyappan, Venkatachalam Gopalan, Arun Tom Mathew: *Perforated Aluminium Sheet Forming Simulation Using Pamstamp*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 15, 1, 2017, 35–41
- [258] Elangovan K, Narayanan C. Sathiya, Narayanasamy R.: *Modelling of forming limit diagram of perforated commercial pure aluminium sheets using artificial neural network*. Computational Materials Science, Vol. 47, 4, 2010, 1072–1078
- [259] Elangovan K., Sathiya C., Narayanan.: *Application of Taguchi approach on investigation of formability for perforated Al 8011 sheets*. International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 2, 5, 2010, 300–309
- [260] Venkatachalam G., Nishanth J., Mukesh M., Pavan Kumar D. S.: *Investigations on Influence of Geometric Parameters in Drawing of Perforated Sheet Metals*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 852, 2016, 229–235
- [261] Venkatachalam G., Nishanth J., Mukesh M., Pavan Kumar D. S.: *Study of Forming Behaviour of Square Hole Mild Steel Perforated Sheet Metal*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 852, 2016, 218–228
- [262] Sehhat M. H., Mahdianikhotbesara A., Hadad M.: *Formability Investigation for Perforated Steel Sheets*. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 15, 2, 2022, 175–186
- [263] Tang H., Wen T., Zhou Y., You J., Ma D.: *Study on the wrinkling behavior of perforated metallic plates using uniaxial tensile tests*. Thin-Walled Structures, Vol. 167, 2021
- [264] Zhu J., Bettaieb M. B., Abed-Meraim F.: *Numerical investigation of necking in perforated sheets using the periodic homogenization approach*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 166, 2020
- [265] Farsi M. A., Arezoo B.: *Bending Force and Spring-Back in V-Die-Bending of Perforated Sheet-Metal Components*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, Vol. 33, 1, 2011, 45–51
- [266] Farsi M. A., Arezoo B.: *Experimental study of high-strength low-alloy sheet metal components with holes on the bending surfaces*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 223, 4, 2009, 387–394
- [267] Nasrollahi V., Arezoo B.: *Prediction of springback in sheet metal components with holes on the bending area, using experiments, finite element and neural networks*. Materials and Design, Vol. 36, 2012, 331–336

- [268] Venkatachalam G., Narayanan S., Sathiya Narayanan C.: *Influence of Hole Size, Hole Shape and Hole Pattern on Spring-Back Effect in Perforated Sheet Metals using FEM*. International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 4, 6, 2012, 2636–2640
- [269] Venkatachalam G., Patel Nilay S., Neil P. M., Prafull Agarwal, Narayanan S.: *Influence of Perforations on Flexural Strength of Aluminium 8090 Alloy Sheets*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 8, 4, 2013, 277–279
- [270] Burgemeister K. A., Hansen C. H.: *Calculating Resonance Frequencies of Perforated Panels*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 196, 4, 1996, 387–399
- [271] Soler A. I., Hill W. S.: *Effective Bending Properties for Stress Analysis of Rectangular Tubesheets*. Journal of Engineering for Power, Vol. 99, 3, 1977, 365–370
- [272] Myung Jo Jhung, Jong Chull Jo: *Equivalent Material Properties of Perforated Plate With Triangular or Square Penetration Pattern for Dynamic Analysis*. Nuclear Engineering and Technology, Vol. 38, 7, 2006, 689–696
- [273] Myung Jo Jhung, Kyeong Hoon Jeong: *Free Vibration Analysis of Perforated Plate With Square Penetration Pattern Using Equivalent Material Properties*. Nuclear Engineering and Technology, Vol. 47, 4, 2015, 500–511
- [274] Zhang W., Taylor P. H., Darton R. C.: *Simple estimation of effective elastic constants for thin plates with regular perforations and an application to the vibration of distillation column trays*. Journal of Strain Analysis, Vol. 52, 1, 2017, 57–66
- [275] W. C. Wang, K. H. Lai: *Hybrid Determination of Equivalent Characteristics of Perforated Plates*. Society for Experimental Mechanics, Vol. 43, 2, 2003, 163–172
- [276] Oumar R. Barry, Emadeddin Y. Tanbour: *Resonant frequencies of perforated plates with rectangular slots*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 232, 7, 2016, 1247–1254
- [277] Pang Y., Jia Q., Yang L.: *Research on Dynamic Stress Concentration Factor Around the Hole Under Primary Wave*. 24th International Congress on Sound and Vibration, 23–27 July 2017, London
- [278] Deepak C. Patil., Gawade S. S., Mali Kiran D.: *Dynamic Response Analysis of Rectangular Perforated Plates With Varying Size of Circular Perforation Holes*. 14th International Congress on Sound & Vibration, Cairns (Australia), 9-12 July 2007
- [279] Kalita K., Haldar S.: *Free vibration analysis of rectangular plates with central cutout*. Cogent Engineering, Vol. 3, 1, 2016, 1–12

- [280] Mirji P.: *Modal Analysis of a Square Plate with Different Shape Cut Out*. International Journal of Trend in Scientific Research and Development, Vol. 3, 3, 2019, 456–461
- [281] Kaap D. L., Sprague M. A., Engelstad R. L.: *A Finite Element Benchmark for the Dynamic Analysis of Perforated Plates with a Square Penetration Pattern*. Fusion Technology Institute University of Wisconsin, Madison, 1997
- [282] Mali K. D., Singru P. M.: *An analytical model to determine fundamental frequency of rectangular plate having rectangular array of circular perforations*. Journal of Vibroengineering, Vol. 15, 2, 2013, 588–596
- [283] Hino R., Nakamura M., Ishida Y., Yoshida F.: *Deformation Behavior and Formability of Sheet Metal Laminate Consisting of Perforated Core Sheet and Thin Skin Sheets*. Key Engineering Materials, Vols. 535 – 536, 2013, 254–257
- [284] Kuczek Ł., Muzykiewicz W., Mroczkowski M., Wiktorowicz J.: *Influence of Perforation on the Inner Layer on the Properties of Three-Layer Welded Materials*. Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 64, 3, 2019, 991–996
- [285] Lisicins M., Mironovs V., Boiko I., Lapkovskis V.: *Sandwich wall constructions made of perforated metallic materials*. Agronomy Research, Vol. 13, 3, 2015, 662–670
- [286] Kooistra G. W., Wadley Haydn N. G.: *Lattice truss structures from expanded metal sheet*. Materials and Design, Vol. 28, 2, 2007, 507–514
- [287] Kooistra G. W., Deshpande V. S., Wadley Haydn N. G.: *Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium*. Acta Materialia, Vol. 52, 14, 2004, 4229–4237
- [288] Mohr D.: *On the role of shear strength in sandwich sheet forming*. International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, 5–6, 2005, 1491–1512
- [289] Al-Zahid A. A., Alwash N. A.: *Experimental Investigation of Two-Way Concrete Slabs Reinforced by Perforated Steel Plates Under Concentrated Load*. Engineering Transactions Vol. 70, 1, 2022, 67–75
- [290] Li. Ch., Li G., Zheng L., Liu X., Li S., Wang X., Solevova V. Y., Dalerjon H., Fan Z., Qin P.: *Study on the Mechanical Properties of Perforated Steel Plate Reinforced Concrete*. Materials, Vol. 15, 19, 2022
- [291] Repka J., Vlach T., Hajek P.: *Ultra-thin Concrete Slabs with Perforated Metal Base*. AIP Conference Proceedings, Vol. 2210, 020027, 2020
- [292] Alikhani A., Nedoushan R. J., Dastan T., Yu W. R.: *Mechanical properties of glass-reinforced composite/perforated metal sheet hybrids*. Functional Composites and Structures, Vol. 2, 3, 2020

- [293] Sharma K., Kumar D.: *Nonlinear stability and failure analysis of perforated FGM plate*. Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 54, 10, 2016, 665–675
- [294] Sharma K., Kumar D.: *Elastoplastic analysis of FGM plate with a central cutout of various shapes under thermomechanical loading*. Journal of Thermal Stresses, Vol. 40, 11, 2017, 1417–1441
- [295] Sharma K., Kumar D.: *Nonlinear stability Analysis of Perforated FGM Plate under Thermal Load*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 25, 2, 2018, 100–114
- [296] Nie G. J., Zhong Z., Batra R. C.: *Material tailoring for reducing stress concentration factor at a circular hole in a functionally graded material (FGM) panel*. Composite Structures, Vol. 25, 2018, 49–57
- [297] Zhong S., Zhang J., Jin G., Ye T., Song X.: *Thermal bending and vibration of FGM plates with various cutouts and complex shapes using isogeometric method*. Composite Structures, Vol. 260, 2021
- [298] Chaudhary S. K., Kar V. R., Shukla K., K.: *Geometrically nonlinear large deflection analysis of heated functionally graded composite panels with single and multiple perforations*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 1–18
- [299] Chaudhary S. K., Kar V. R., Shukla K. K.: *Flexural Behavior of Perforated Functionally Graded Composite Panels under Complex Loading Conditions: Higher-Order Finite-Element Approach*. Journal of Aerospace Engineering, Vol. 34, 6, 2021
- [300] Chaudhary S. K., Kar V. R., Shukla K. K.: *Free Vibration Behavior of Laminated Composite Panel with Center Circular Cutout*. AIP Conference Proceedings, Vol. 2341, 1, 2021
- [301] Li X., Wu Q., Kang L., Liu B.: *Design of Multiple Parallel-Arranged Perforated Panel Absorbers for Low Frequency Sound Absorption*. Materials, Vol. 12, 13, 2019
- [302] Borelli D., Schenone C.: *On the acoustic transparency of perforated metal plates facing a porous fibrous material*. Noise Mapping, Vol. 8, 1, 2021, 185–203
- [303] Carbajo J., Fang N. X., Nam S. H.: *Recent Advances on Perforated Panels for Sound Absorption Applications*. Proceedings, IX International Conference IcETRAN, Novi Pazar, Serbia, 6–9 June 2022
- [304] Allam S., Guo Y., Abom M.: *Acoustical Study of Micro- Perforated Plates for Vehicle Applications*. SAE 2009 Noise and Vibration Conference and Exhibition

- [305] Wang Ch., Huang L.: *On the acoustic properties of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers with different cavity depths*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 130, 1, 2011, 208–218
- [306] Bravo T., Maury C., Pinhede C.: *Vibroacoustic properties of thin micro-perforated panel absorbers*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 132, 2, 2012
- [307] Hua X., Herrin D. W., Jackson P.: *Enhancing the Performance of Microperforated Panel Absorbers by Designing Custom Backings*. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, Vol. 6, 2, 2013, 1269–1275
- [308] Qian Y. J., Kong D. Y., Liu S. M., Sun S. M., Zhao Z.: *Investigation on micro-perforated panel absorber with ultra-micro perforations*. Applied Acoustics, Vol. 74, 7, 2013, 931–935
- [309] Mosa A. I., Putra A., Ramlan R., Esraa A. A.: *Micro-Perforated Panel Absorber Arrangement Technique: A Review*. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, Vol. 10, 7, 2018, 371–381
- [310] Falsafi I., Ohadi A.: *Optimisation of Multistep Cavity Configuration to Extend Absorption Bandwidth of Micro Perforated Panel Absorber*. Archives of Acoustics, Vol. 43, 2, 2018, 187–195
- [311] Jafar N. A., Ooi L., Mazlan A. Z. A., Seng K. H. C., Tan J. M.: *The Evaluation of Deviation in Sound Absorption Coefficient for Micro-perforated Panel*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 815, 2020
- [312] Floss S., Czwielong F., Becker S., Kaltenbacher M.: *Micro-perforated panels for noise reduction*. Elektrotechnik & Informationstechnik, Vol. 138, 3, 2021, 171–178
- [313] Cobo P.: *Modelling of Microperforated Panel Absorbers with Circular and Slit Hole Geometries*. Acoustics, Vol. 3, 4, 2021, 665–678
- [314] Yang W., Choy Y., Li Y.: *Acoustical performance of a wavy micro-perforated panel absorber*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 185, 2023
- [315] Othmani Ch., Hentati T., Taktak M., Elnady T., Fakhfakh T., Haddar M.: *Effect of Liner Characteristics on the Acoustic Performance of Duct Systems*. Archives of Acoustics, Vol. 40, 1, 2015, 117–127
- [316] Dhief R., Makni A., Taktak M., Chaabane M., Haddar M.: *Investigation of the Effects of Acoustic Liner Variation and Geometry Discontinuities on the Acoustic Performance of Lined Ducts*. Archives of Acoustics, Vol. 45, 1, 2020, 49–66

- [317] Naderzadeh M., Monazzam M. R., Nassiri P., Fard S. M. B.: *Application of perforated sheets to improve the efficiency of reactive profiled noise barriers*. Applied Acoustics, Vol. 72, 6, 2011, 393–398
- [318] Scarpato A., Ducruix S., Schuller T.: *A comparison of the damping properties of perforated plates backed by a cavity operating at low and high Strouhal numbers*. Comptes Rendus Mecanique, Vol. 341, 1–2, 2013, 161–170
- [319] Billard R., Tissot G., Gabard G., Versaevel M.: *Numerical simulations of perforated plate liners: Analysis of the visco-thermal dissipation mechanisms*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 149, 16, 2021
- [320] Matsumoto H., Igarashi S., Umino M.: *Noise increase phenomenon of the air flow through a perforated metal plate*. Transactions of the JSME, Vol. 85, 873, 2019
- [321] Yamaguchi K., Matsumoto H.: *Investigation of the Opening Condition for the Prominent Frequency Noise by the Air Flow through a Perforated Metal Plate*. The Japan Society of Japan Engineers, The Proceedings of the Dynamics & Design Conference, 13–17 September 2021
- [322] Yamaguchi K., Matsumoto H.: *Elucidation of the Mechanism of Prominent Frequency Noise by the Air Flow through a Perforated Metal Plate*. The Japan Society of Mechanical Engineers, The Proceedings of the Dynamics & Design Conference, 1–4 September 2020
- [323] Gan G., Riffat S. B.: *Pressure Loss Characteristics of Orifice and Perforated Plates*. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 14, 2, 1997, 160–165
- [324] Golovastov S., Mikushkin A., Mikushkina A., Zhilin Y.: *Interaction of weak shock waves with perforated metal plates*. Experiments in Fluids, Vol. 63, 97, 2022
- [325] Shahzad H., Hickel S., Modesti D.: *Permeability and Turbulence Over Perforated Plates*. Flow, Turbulence and Combustion, Vol. 109, 4, 2022, 1241–1254
- [326] Zierep J., Bohning R., Doerffer P.: *Experimental and Analytical Analysis of Perforated Plate Aerodynamics*. Journal of Thermal Science, Vol. 12, 3, 2003, 193–197
- [327] Liu R., Ting D. S. K.: *Turbulent Flow Downstream of a Perforated Plate: Sharp-Edged Orifice Versus Finite-Thickness Holes*. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 129, 2007, 1164–1171
- [328] Cuhandaroglu B., Akansu Y. E., Turhal A. O.: *An experimental study on the effects of uniform injection through one perforated surface of a square cylinder on some aerodynamic parameters*. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 31, 8, 2007, 909–915

- [329] Benes M., Eichler P., Fucik R., Hrdlicka J., Klinkovsky J., Kolar M., Smejkal T., Skopec P., Solovsky J., Strachota P., Straka R., Zak A.: *Experimental and numerical investigation of air flow through the distributor plate in a laboratory-scale model of a bubbling fluidized bed boiler*. Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 39, 2022, 943–958
- [330] Doerffer P. P., Bohning R.: *Modelling of perforated plate aerodynamics performance*. Aerospace Science and Technology, Vol. 4, 8, 2000, 525–534
- [331] Szwaba R., Ochrymiuk T., Lewandowski T., Czerwińska J.: *Experimental Investigation of Microscale Effects in Perforated Plate Aerodynamics*. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 135, 12, 2013
- [332] Grzelak J., Szwaba R.: *Influence of Holes Manufacture Technology on Perforated Plate Aerodynamics*. Materials, Vol. 14, 21, 2021
- [333] Popie V., Piot E., Simon F.: *Impedance eduction of perforated plates at low Strouhal numbers and high bias flow Mach number*. 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 22 – 26 June 2015, Dalllas, TX, USA
- [334] Roberts T. M., Sabouri-Ghomi S.: *Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels*. Thin-Walled Structures, Vol. 14, 2, 1992, 139–151
- [335] Valizadeh H., Sheidaii M., Showkati H.: *Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 70, 2012, 308–316
- [336] Formisano A., Sheidaii M. R., Ahmadii H. M., Fabbrocino F.: *Numerical calibration of experimental tests on perforated steel plate shear walls: influence of the tightening torque in the plate frame members bolted connections*. AIP Conference Proceedings, Vol. 1978, 1, 2018
- [337] Chan R., Albermani F., Kitipornchai S.: *Stiffness and Strength of Perforated Steel Plate Shear Wall*. Procedia Engineering, Vol. 14, 2011, 675–679
- [338] Bhowmick A.K.: *Seismic behavior of steel plate shear walls with centrally placed circular perforations*. Thin-Walled Structures, Vol. 75, 2014, 30–42
- [339] Purba R., Bruneau M.: *Finite-Element Investigation and Design Recommendations for Perforated Steel Plate Shear Walls*. Journal of Structural Engineering, Vol. 135, 11, 2009
- [340] Bhowmick A. K., Grondin G. Y., Driver R. G.: *Nonlinear seismic analysis of perforated steel plate shear walls*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 94, 2014, 103–113

- [341] Naraki N., Mahini M. R., Fiouz A. R., Cocchetti G.: *On optimum perforation layout in low-rise steel plate shear walls*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 29, 26, 2022, 4923–4933
- [342] Mansouri M., Vetr M. G., Javaheri Tafti M. R.: *On the design of perforated steel shear walls, an experimental and numerical study*. Sadhana, Vol. 46, 3, 2021
- [343] Hassani F., Javanbakht Z.: *Effect of geometrical variations on the failure mechanisms of perforated steel plate shear walls – a parametric study towards a new design*. Thin-Walled Structures, Vol. 159, 2021
- [344] Vian D., Bruneau M., tsai K. C., Lin Y. C.: *Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation*. Journal of Structural Engineering, Vol. 135, 3, 2009, 211–220
- [345] Vian D., Bruneau M., Purba R.: *Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. II: Analysis and Design Recommendations*. Journal of Structural Engineering, Vol. 135, 3, 2009, 221–228
- [346] Formisano A., Lombardi L., Mazzolani F.M.: *Perforated metal shear panels as bracing devices of seismic-resistant structures*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 126, 2016, 37–49
- [347] Alavi E., Nateghi F.: *Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation*. Journal of Constructional Steel Research, Vol.89, 2013, 9–20
- [348] Farahbakhshtooli A., Bhowmick A. K.: *Nonlinear seismic analysis of perforated steel plate shear walls using a macro-model*. Thin-Walled Structures, Vol. 166, 2021
- [349] Bahrebar M., Lim J. B. P., Clifton G. Ch., Zirakian T., Shahmohammadi A., Hajsadeghi M.: *Perforated steel plate shear walls with curved corrugated webs under cyclic loading*. Structures, Vol. 24, 2020, 600–609
- [350] Bahrebar M., Kabir M. Z., Zirakian T., Hajsadeghi M., Lim J. B. P.: *Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 122, 2016, 584–594
- [351] Yingjiang Z., Renjun Y., Hongxu W.: *Experimental and numerical investigations on plate girders with perforated web under axial compression and bending moment*. Thin-Walled Structures, 97, 2015, 199–206
- [352] Al-Mazini M. A.: *Effect of Web Opening on the Ultimate Capacity of Steel Plate Girders under Two Points Load*. Engineering and Technology Journal, Vol. 34, 1, 2016, 165–177

- [353] Salih U. M., Mohammed A. H., Kareem M. Z., Abdullah K. S.: *Finite Element Investigation of the Ultimate Capacity of Hollow-Flange Steel Girders with Web Openings*. Diyala Journal of Engineering Sciences, Vol. 15, 2, 2022, 19–30
- [354] Yatim M. Y. M., Esa A., Lau Y. L., Agus M. A. P. A., Sazali N. F. N.: *Finite element investigation of thin-webbed plate girders with inclined stiffeners*. Proceedings of International Structural Engineering and Construction, Vol. 2, 1, 2015, 457–462
- [355] Shanmugam N. E., Lian V. T., Thevendran V.: *Finite element modelling of plate girders with web openings*. Thin-Walled Structures, Vol. 40, 5, 2002, 443–464
- [356] Rodriguez F., S. Vellasco P. C. G., Lima L. R. O., Andrade S. A. L.: *Finite Element Modelling of Steel Beams with Web Openings*. Engineering, Vol. 6, 13, 2014, 886–913
- [357] Hamoodi May J., Abdul Gabar M. S.: *Behavior of Steel Plate Girders with Web Openings Loaded in Shear*. Engineering and Technology Journal, Vol.31, 15, 2013, 2982–2986
- [358] Bahrami A., Najarnasab M.: *Ultimate Behaviour of Perforated Steel Plate Girders Subjected to Shear Loading*. The Open Construction and Building Technology Journal, Vol.14, 1, 2020, 70–83
- [359] Azmi M. R., Yatim M. Y. M., Wan Badaruzzaman W. H., Ahmad I. K.: *Tests on Plate Girders Containing Web Openings and Inclined Stiffeners*. International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 12, 6, 2017, 1075–1083
- [360] Narayanan R., Rockey K. C.: *Ultimate load capacity of plate girders with webs containing circular cut-outs*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 71, 3, 1981, 845–862
- [361] Stępnia W., Habaj W., Podgórzak P.: *Pancerze perforowane*. Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 5, 1, 2014, 59–70
- [362] Burian W., Marcisz J., Starczewski L.: *Oslony antyudarowe na bazie perforowanych blach ze stali bainitycznej o strukturze nanokrystalicznej*. Problemy Techniki Uzbrojenia, Vol. 44, 136, 2015, 105–123
- [363] Burian W., Marcisz J., Starczewski L., Wnuk M.: *Probabilistyczny model optymalizacji układów perforacji blach z wysokowytrzymałych stali do zastosowań w systemach osłon antyudarowych*. Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 8, 1, 2017, 71–88
- [364] Burian W., Żochowski P., Gmitrzuk M., Marcisz J., Starczewski L., Juszczak B., Magier M.: *Protection effectiveness of perforated plates made of high strength steel*. International Journal of Impact Engineering, Vol. 126, 2019, 27–39

- [365] Balos S., Grabulov V., Sidjanin L., Pantic M., Radisavljevic I.: *Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application*. Materials and Design, Vol. 31, 6, 2010, 2916–2924
- [366] Mishra B., Ramakrishna B., Jena P. K., Siva Kumar K., Madhu V., Gupta N. K.: *Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic impact*. Materials and Design, Vol. 43, 2013, 17–24
- [367] Radislavljevic I., Balos S., Nikacevic M., Sidjanin L.: *Optimization of geometrical characteristics of perforated plates*. Materials and Design, Vol. 49, 2013, 81–89
- [368] Balos S., Howard D., Brezulianu A., Labus Zlatanovic D.: *Perforated Plate for Ballistic Protection – A Review*. Metals, Vol. 11, 4, 2021
- [369] Cui T., Quin Q., Yan W., Wang T., Zhang J.: *Ballistic Resistance of Novel Amorphous-Alloy-Reinforced Perforated Armor*. Acta Mechanica Solida Sinica, Vol. 34, 1, 2021, 12–26
- [370] Tian Ch., Li Z., Dong Y.: *Ballistic performance of hybrid structure with perforated panel*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 218, 2022
- [371] Osweiller F.: *Evolution and Synthesis of the Effective Elastic Constants Concept for the Design of Tubesheets*. Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 111, 1989, 209–217
- [372] Targowski R., Lamblin D., Guerlement G.: *Non linear analysis of perforated circular plates with square penetration patterns*. F - Pressure Components, Design Technologies, and Research for Regulatory Needs. F04 - Tube Sheet and Perforated Plate. SMiRT 12, Stuttgart, Germany, August 15–20 , 1993
- [373] Ukadgaonker V. G., Kale P. A., Agnihotri N. A., Shanmuga Babu R.: *Review of analysis of tube sheets*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 67, 3, 1996, 279–297
- [374] Dharmin P., Khushbu P., Chetan J.: *A Review on Stress Analysis of an Infinite Plate with Cut-outs*. International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 2, 11, 2012
- [375] Watsar Satish D., Bharule A.: *Stress Analysis of Thin Plate with Special Shaped Cutout: A Review*. International Journal of Scientific Engineering and Research, Vol. 3, 1, 2015
- [376] Slot T.: *Orthotropic analysis of a thick perforated plate with pressure on one side*. F - Structural Analysis of Reactor Core and Coolant Circuit Structures. F6 - Structural Analysis of Heat Exchangers. SMiRT 2, Berlin, Germany, September 10–14, 1973

- [377] Igari T., Tokiyoshi T., Mizokami Y.: *Description of inelastic behavior of perforated plates based on effective stress concept*. IUTAM Symposium on Creep in Structures (Nagoa, Japan, 3–7 April 2000). The Proceedings of the Symposium, edited by S. Murakami and N. Ohno. Kluwer Academy Publishers
- [378] Vigdergauz S.: *The effective properties of a perforated elastic plate. Numerical optimization by genetic algorithm*. International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, 48–49, 2001, 8593–8616
- [379] Kasahara N., Kawasaki N., Wakai T., Takasho H.: *A general determination method of non-linear equivalent material properties for perforated plates*. 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19). F - Design Methods and Rules for Components. F02 - Design Issues for Special Components. Toronto, Canada, August 12–17, 2007
- [380] Schultz T.J.: *Acoustical Uses for Perforated Metals: Principles and Applications*. Industrial Perforators Association, Inc. 1986
- [381] *Designers, Specifiers And Buyers Handbook For Perforated Metals*. A publication of the Industrial Perforators Association (praca zbiorowa), 1993
- [382] *The Formability of Perforated Metals, Part II: Stainless Steel and Aluminium*. A publication of the Industrial Perforators Association (praca pod kierownictwem R. H. Wagonera)
- [383] Ciszewski A., Radomski T., Szummer A.: *Materialoznawstwo*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009
- [384] PN-EN ISO 6892-1:2009, *Metale – Próba rozciągania – Część I: Metoda badania w temperaturze pokojowej* (zastępująca PN-EN 10002-1:2004)
- [385] PN-EN ISO 7438:2006, *Metale – Próba zginania* (zastępująca PN-EN ISO 7438:2005)
- [386] Shapiro E.: *Bend Testing* w Kuhn H., Medlin D. (red.): ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. ASM International, Ohio, 2000, 172–184
- [387] Wieczorek M., Muzykiewicz W., Mroczkowski M., Pałka P., Kuczek Ł.: *Wpływ prostego układu perforacji z otworami cylindrycznymi na własności mechaniczne niskowęglowej blachy stalowej do kształtowania na zimno*. 41 Studencka Konferencja Naukowa – Innowacje w inżynierii produkcji, technologii materiałów i bezpieczeństwie. Seria: Materiały Konferencyjne nr 10, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Częstochowa 1 czerwca 2017. Praca zbiorowa pod redakcją naukową dr inż. Ewy Staniewskiej.

- [388] Wieczorek M., Muzykiewicz W., Mroczkowski M., Kuczek Ł., Pałka P.: *Badania modułu sprężystości wzdłużnej blachy stalowej DC01 z prostym układem otworów cylindrycznych*. X Seminarium Naukowe ZINTEGROWANE STUDIA PODSTAW DEFORMACJI PLASTYCZNEJ METALI PLASTMET' 2016, Łańcut 22-25.11.2016, Mat. Konf., 119–120
- [389] Wieczorek M., Muzykiewicz W., Mroczkowski M., Kuczek Ł., Pałka P.: *Efektywny moduł sprężystości wzdłużnej blachy stalowej DC01 z heksagonalnym układem otworów cylindrycznych*. XII Konferencja Naukowa ODKSZTAŁCALNOŚĆ METALI I STOPÓW OMIS' 2017, Łańcut 21-24.11.2017, Mat. Konf., 68–69
- [390] Hill H. N., Barker R. S.: *Effect of Open Circular Holes on Tensile Strength and Elongation of Sheet Specimens of Some Aluminum Alloys*. National Advisory Committee For Aeronautics, October 1949, Washington. Technical Note 1974
- [391] Barker R.S.: *Effect of Open Circular Holes on Tensile Strength and Elongation of Sheet Specimens of a Magnesium Alloy*. National Advisory Committee for Aeronautics, June 1952, Washington. Technical Note 2716
- [392] Gronostajski Z., ..., Muzykiewicz W., ... i in.: *Recent development trends in metal forming*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 19, 3, 2019, 898–941
- [393] Muzykiewicz W., Wieczorek M., Mroczkowski M., Pałka P., Kuczek Ł.: *Moduł sprężystości wzdłużnej blachy stalowej z perforacją prostą*. Obróbka Plastyczna Metali, Vol. XXVII, nr 4, 2016, 283–300
- [394] Wieczorek M., Muzykiewicz W.: *Badania właściwości sprężystych i wytrzymałościowych blachy stalowej z perforacją heksagonalną*. Inżynieria Materiałowa, Zeszyt 1, 2023, 12–19
- [395] Astarita A., Liberini M., Velotti C., Sinagra C., Squillace A.: *Experimental study of the Portevin-Le Chatelier effect in AA 5754 sheets: Influence of the different rolling routes*. AIP Conference Proceedings, Vol. 1769, 1, 2016
- [396] Yilmaz A.: *The Portevin-Le Chatelier effect: a review of experimental findings*. Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 12, 6, 2011
- [397] Muzykiewicz W., Hanarz R.: *Doświadczalna ilustracja wpływu prędkości odkształcenia na przebieg i wyniki rozciągania*. Rudy i Metale Nieżelazne, R. 57, 12, 2012, 834–838
- [398] Kuczek Ł., Muzykiewicz W., Wieczorek M., Mroczkowski M., Pałka P., Zięba D.: *Efektywny moduł sprężystości wzdłużnej blachy aluminiowej z prostym układem otworów cylindrycznych*. XI Konferencja Naukowa ZINTEGROWANE STUDIA

PODSTAW DEFORMACJI PLASTYCZNEJ METALI PLASTEMET' 2018, Łańcut
27-30.11.2018, Mat. Konf., 49–50

- [399] Kuczek Ł., Muzykiewicz W., Mroczkowski M., Wieczorek M.: *Analiza wpływu wybranych parametrów geometrycznych blachy perforowanej z różnych materiałów na efektywny moduł Younga*. XIII Konferencja Naukowa ODKSZTAŁCALNOŚĆ METALI I STOPÓW OMIS' 2019, Łańcut 19-22.11.2019, Mat. Konf., 36-37
- [400] Muzykiewicz W., Kuczek Ł., Mroczkowski M., Wieczorek M.: *Numeryczna analiza wpływu układu otworów na efektywny moduł Younga blachy perforowanej*. XII Konferencja Naukowa ODKSZTAŁCALNOŚĆ METALI I STOPÓW OMIS' 2017, Łańcut 21-24.11.2017, Mat. Konf., 43–44
- [401] Praca n-b pod kier. W. Muzykiewicza: *Badania numeryczne reakcji blachy perforowanej o założonej konstrukcji i z ustalonego materiału na przyłożone obciążenie w zakresie sprężystym*. Zlec. – Firma P.H.U. ESTAL, AGH WMN, Kraków 2017 (raport z wykonania badań – niepublikowany, 34 s.)
- [402] Patent polski PL 420269 A1: *Surface assembly with perforated sheet metal*. Wynalazca: Kupiec Krzysztof F.P.H.U ESTAL. Zgłoszony: 23.01.2017

Netografia

- [N1] https://www.perfopol.pl/pl/Blachy_perforowane__informacje
- [N2] <https://www.mevaco.pl/productinformation/perforated-sheets.html>
- [N3] http://www.perforacja.eu/?p=p_1&sName=blachy-perforowane
- [N4] http://blacha-perforowana.pl/getFile.php?q=AF_PIM_2008_EN.pdf
- [N5] https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Services/01_brochures/TRUMPF-punching-at-a-glance-brochure-EN.pdf
- [N6] <https://www.schiavetti.it/wp-content/uploads/CatalogoTecnico.pdf>
- [N7] <https://www.mate.com/pl/literature/reducing-sheet-distortion-solution-bulletin/>
- [N8] https://www.fergusonperf.com/wp-content/uploads/2016/07/article_metal-forming-perforated-metals.pdf
- [N9] http://www.rmig.com/files/RMIG/PDF/PL/RM_stockcat_PL_109_print.pdf
- [N10] https://www.sst-ebeam.com/images/download-center/englisch/sst_broschueren/brochure_ebopuls_en.pdf
- [N11] <http://www.stal-expert-polska.pl/blachy-perforowane/476-otwory-w-ksztacie-koniczynki>
- [N12] <http://www.stal-expert-polska.pl/blachy-perforowane/477-otwory-w-ksztacie-jodeki>
- [N13] <https://www.graepel.com/perforated-sheets-of-metal>
- [N14] <https://www.perforated-sheet.com/holepattern/decorative-perforated-sheet.html>
- [N15] http://www.rmig.com/files/RMIG/PDF/PL/RMIG_Industrial%20Solutions_119A_PL.pdf
- [N16] <https://www.perfopol.pl/upload/katalog2019-01www.pdf>
- [N17] http://blacha-perforowana.pl/getFile.php?q=AF_ConiPerf_2011_PL_low.pdf
- [N18] http://www.rmig.com/files/RMIG/PDF/PL/RM_Pattern_204_PLprint.pdf
- [N19] <http://rmig.com/pl/produkty/rmig+perforacja#1>
- [N20] https://www.perfopol.pl/pl/Blachy_perforowane
- [N21] <https://www.metalmesh.com.au/perforated-metal-sheet/perforated-metal-processing-screens/>
- [N22] <http://permet.pl/blacha-perforowana/blacha-perforowana-oczka-okragle/>
- [N23] <http://permet.pl/blacha-perforowana/blacha-perforowana-oczka-kwadratowe/>
- [N24] https://www.nepean.com/files/mastermesh_-_perforated_metal_products.pdf
- [N25] <https://www.fergusonperf.com/quality-driver/>
- [N26] <https://www.perforated-metal.net/>

- [N27] <https://www.hendrickcorp.com/perforated/resources/downloads/>
- [N28] <https://cdn.thomasnet.com/ccp/10066044/203243.pdf>
- [N29] <https://www.okutanikanaami.co.jp/wp/wp-content/uploads/2020/05/Super-Punching-new-brochure.pdf>
- [N30] https://www.perfopol.pl/pl/Blachy_perforowane
- [N31] <http://rmig.com/pl/informacja+techniczna/surowce>
- [N32] <https://www.mevaco.pl/productinformation/material.html>
- [N33] <http://www.perforated-metal.biz/home/products/detail/clsid/3/id/7.html>
- [N34] <https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/>
- [N35] <https://www.remalyvmfg.com/custom-perforated-sheets-panels/>
- [N36] <https://www.accurateperforating.com/capabilities/perforated-metal-materials>
- [N37] <http://www.accuratealloys.com/perforated-metals.html>
- [N38] <https://www.fielden.co.nz/media/1140/fielden-perf-catalogue.pdf>
- [N39] <https://www.schiavetti.it/wp-content/uploads/CatalogoMateriePrime.pdf>
- [N40] https://www.perfolinea.eu/storage/app/media/Catalogues%20for%20download/EN/PL_catalogue_EN_2015_complete.pdf
- [N41] <http://rmig.com/pl/informacja+techniczna/surowce/stal+czarna/klasyfikacje+i+gatunki>
- [N42] <https://amir-metal.com/z-czego-tworzymy-blache-perforowana/>
- [N43] <http://rmig.com/pl/informacja+techniczna/surowce/stal+nierdzewna+i+tytan>
- [N44] <https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/perforated-stainless-steel/>
- [N45] <https://www.marcospecialtysteel.com/resources-library/material-grades/stainless-steel/>
- [N46] <https://www.perforated-sheet.com/perforationmaterial/perforated-stainless-steel-sheet.html>
- [N47] <https://www.cromostal.pl/blachy-perforowane.html>
- [N48] <https://wyroby-stalowe.pl/oferta/sita-blachy-stopnie-perforowane/>
- [N49] <https://erstal.pl/produkty-trudnoscieralne/>
- [N50] <https://www.stal-hurt.com/oferta/sita/>
- [N51] <https://www.himetal.com.sg/perforated-sheet/>
- [N52] <https://viridispace.com/pl/stal-corten/>
- [N53] <http://www.korten.pl/>,
- [N54] <https://cortena.pl/stal-corten/>

- [N55] <http://www.perforatedcorten.com/available-perforated-corten-flat-sheets.html>
- [N56] <https://www.mevaco.pl/productinformation/material/aluminium.html>
- [N57] <https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/perforated-aluminum/>
- [N58] <https://www.perforated-sheet.com/perforationmaterial/perforated-aluminum-sheet.html>
- [N59] <http://rmig.com/pl/produkty/nie+tylko+perforacja/anodowanie/materia%C5%82y+do+anodowania>
- [N60] <http://www.rmig.com/pl/produkty/nie+tylko+perforacja/anodowanie/kolorowe+anodowanie>
- [N61] <https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/perforated-metal-copper-brass-and-zinc-levels/>
- [N62] <http://rmig.com/pl/informacja+techniczna/surowce/inne+materia%C5%82y>
- [N63] <https://www.marcospecialtysteel.com/resources-library/material-grades/nickel-alloys/>
- [N64] <https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/perforated-inconel-and-monel/>
- [N65] <https://www.accurateperforating.com/capabilities/perforated-metal-materials/perforated-nickel-alloys>
- [N66] <https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/perforated-metal-titanium-titanium-alloys/>
- [N67] <http://www.silesiasa.pl/blacha-cynkowo-tytanowa-silesiazinc>
- [N68] <https://www.rheinzink.pl/produkty/material-i-powierzchnie/blacha-tytan-cynk>
- [N69] <https://www.okutanikanaami.co.jp/en/metal/plastic-perforated-plates.html>
- [N70] <http://rmig.com/pl/informacja+techniczna/surowce/inne+materiały>
- [N71] <https://www.fergusonperf.com/the-perforating-process/material-information/composite-materials/>
- [N72] <https://www.perfolinea.eu/expanded-metal-diamond-holes>
- [N73] http://www.sigamet.pl/Oferta/Siatki_ci%C4%99to-ci%C4%85gnione/
- [N74] <https://www.euoperf.it/en/expanded-metal-sheets.php>
- [N75] <https://www.dexmet.com/ultimate-guide-to-expanded-metals>
- [N76] <https://gratingpacific.com/wp-content/uploads/2020/09/Grating-Pacific-Perforated-Expanded-Metal-Catalog.pdf>
- [N77] <https://www.metals-inc.com/expanded-metal/>

- [N78] <https://www accuratescreen.ca/products/expanded-metal/>
- [N79] <http://www accuratealloys.com/expanded-metal.html>
- [N80] <https://www.marcospecialtysteel.com/product-categories/expanded-metal/>
- [N81] https://assets.mcnichols.com/content/dam/mcnichols/catalogs/2020_MCN-MASCAT.pdf
- [N82] http://az276020.vo.msecnd.net/valmontproduction/webforge-documents/expanded-metal.pdf?sfvrsn=19bb0793_4
- [N83] <http://permet.pl/siatka-cieto-ciagniona/>
- [N84] <https://www.industrialmetalsupply.com/Products/expanded-sheet>
- [N85] https://www.primesteels.com/portfolio_item/expanded-metal-mesh/
- [N86] <https://www.fhbrundle.co.uk/files/pdf/co1/cats/Mesh-06.pdf>
- [N87] <http://www.stal-expert-polska.pl/siatki-i-sita/518-siatki-cito-cignione>
- [N88] <https://www.e-invest.pl/siatki-cieto-ciagnione-108.html>
- [N89] http://rmig.com/files/RMIG/PDF/PL/RMIG_Expanded_Metal_PL.pdf
- [N90] https://www.perfopol.pl/pl/Siatki_cietociagnione
- [N91] <https://www.mevaco.pl/productinformation/expanded-metals.html>
- [N92] <http://rmig.com/pl/produkty/rmig+siatka+ci%c4%99to-ci%c4%85gniona>
- [N93] <http://www.genhard.com/expanded-metal.html>
- [N94] https://gratingpacific.com/product-category/expanded_metals/
- [N95] <http://niltech.pl/produkt/siatki-cieto-ciagnione/>
- [N96] http://newmetals.com/?page_id=254
- [N97] <https://www.amronarchitectural.co.uk/>
- [N98] https://www.nepean.com/files/mastermesh_-_expanded_metal_products.pdf
- [N99] <https://www.marcospecialtysteel.com/content/uploads/2017/01/Perforated-Handbook-for-designers-min.pdf>
- [N100] http://www.rmig.com/files/RMIG/PDF/PL/RM_Tailor_Made_inspiration_PL_A.pdf
- [N101] <http://www.siatki-sita.pl/88/blacha-perforowana.html>
- [N102] <https://www.europerf.org/>
- [N103] <https://www.fielden.co.nz/products/construction-components>
- [N104] <https://www.perforated-metals.com/>
- [N105] <https://www.kaempfharris.com/industry-news/everything-you-need-to-know-about-perforated-sheet-metal>
- [N106] <https://euro-inwest.pl/oferta/blachy-perforowane/>
- [N107] http://www.dfperforatedsheets.com/fileadmin/dfgb_2009/medien/download/df/

Dillinger_Fabrik_gelochter_Bleche_GmbH_englisch.pdf

- [N108] <http://www.kentemesh.com/Products.asp?BigClassID=2&SmallClassID=4>
- [N109] <https://www.ametco.com/products/perforated/>
- [N110] <http://locker.com.au/blog/portfolio/perforated/>
- [N111] <https://www.perfopol.pl/pl/Architektura>
- [N112] <https://www.arrowmetal.com.au/project/342-bay-street-brighton-le-sands/>
- [N113] <https://www.hendrickcorp.com/architectural/products/arch-architectural-sun-control/>
- [N114] <http://www.jmj.lv/en/metala/perforated-metal-sheets>
- [N115] <https://www.accurateperforating.com/applications/fill-panels>
- [N116] <http://permet.pl/blacha-perforowana/>
- [N117] <http://rmig.com/pl/bran%C5%BCa/budynki+i+wn%C4%99trza/balustrady>
- [N118] <https://www.ruukki.com/pol/building-envelopes/produkty/okladziny-elewacyjne/perforacja-podswietlenie>
- [N119] <https://pomametals.com/best-perforated-metal-uses-in-architecture/>
- [N120] <https://www.cadischnmda.com/products/perftec/>
- [N121] <https://www.hendrickcorp.com/architectural/products/perforated-imaging/>
- [N122] <https://www.accurateperforating.com/galleries/industrial/facade>
- [N123] <http://locker.com.au/blog/portfolio/pic-perf/>
- [N124] <http://www.perftech.com.au/>
- [N125] <http://www.erdle.com/architectural-perforated-metal-cladding-facade/>
- [N126] <http://www.actionsheetmetal.com/portfolio>
- [N127] <https://www.hendrickcorp.com/architectural/products/arch-metal-signage/>
- [N128] <http://www.rmig.com/pl/city+emotion/zainspiruj+sie/projekty/sukiennice,+g%C5%82og%C3%B3w?doc=1749&page=3&url=/pl/city+emotion/zainspiruj+sie/product&sort=product&product1=true&product2=true&product3=true&product4=true>
- [N129] <https://www.perforated-sheet.com/perforatedsheetapplication/perforated-kinetic-facade.html>
- [N130] <https://livesound.pl/tutoriale/4971-akustyka-wnetrz.-ustroje-dzwiekochlonne-perforowane>
- [N131] <https://kineticsnoise.com/interiors/knp.html>
- [N132] https://www.acousticalsurfaces.com/acousti_metal/acoustimetal.htm
- [N133] <https://www.perforatedsheets.co.uk/perforated-metal-use/>
- [N134] <http://sitodrut.com.pl/blachy-perforowane/>

- [N135] [https://perfom.rs/proizvodi/proizvodi-za-arhitekturu/perforirani-i-laserski-seceni-paneli/#iLightbox\[gallery_image_1\]/2](https://perfom.rs/proizvodi/proizvodi-za-arhitekturu/perforirani-i-laserski-seceni-paneli/#iLightbox[gallery_image_1]/2)
- [N136] <https://www.accurateperforating.com/applications/screening>
- [N137] <http://www.sigamet.pl/Galeria/?p=3>
- [N138] [https://perfom.rs/proizvodi/delovi-i-komponente/perforirane-maske/#iLightbox\[gallery_image_1\]/8](https://perfom.rs/proizvodi/delovi-i-komponente/perforirane-maske/#iLightbox[gallery_image_1]/8)
- [N139] http://rmig.com/files/RMIG/PDF/PL/RMIG_City_Emotion_Applications_813_PL.pdf
- [N140] <https://andpolkonin.pl/blachy-perforowane/>
- [N141] <https://www.blachy-perforowane.com.pl/meble.php>
- [N142] <http://www.perforacja.eu/?sLang=pl>
- [N143] <https://aloch.pl/blachy-perforowane/>
- [N144] [https://perfom.rs/proizvodi/proizvodi-za-arhitekturu/perforirane-ograde/#iLightbox\[gallery_image_2\]/6](https://perfom.rs/proizvodi/proizvodi-za-arhitekturu/perforirane-ograde/#iLightbox[gallery_image_2]/6)
- [N145] <https://www.accurateperforating.com/applications/furnishings>
- [N146] <https://www.ricperforatersandmeshes.com/perforated-metal-sheets.html>
- [N147] <https://www.directmetals.com/products/perforated-metal/square-perforated-metal/>
- [N148] <https://www.directmetals.com/products/architectural-metal/>
- [N149] <https://www.accurateperforating.com/galleries/industrial/partitions>
- [N150] <http://www.mika-stal.pl/index.php?lang=..&ct=1&mod=ShowMenu&a=select&id=39>
- [N151] <http://blacha-perforowana.pl/applications/energetia.html>
- [N152] <https://www.secespol.com/produkty/wymienniki-ciepla/plaszczowo-rurowe.html>
- [N153] http://www.izotechnik.com/4_produkty/22_wymienniki_ciepla
- [N154] https://www.rafi.ro/fisiere_produce/Catalog_Prezentare_Getinge_HS_33-en.pdf
- [N155] <http://blacha-perforowana.pl/applications/drevotriska.html>
- [N156] <https://www.huber.com.pl/pl/produkty/kraty-sita-i-sita-geste.html>
- [N157] <https://www.perfopol.pl/pl/Petrochemia>
- [N158] <http://rmig.com/pl/bran%C5%BCa/przetw%C3%B3rstwo+przemys%C5%82owe/przemys%C5%82+petrochemiczny>
- [N159] <https://www.sitono.pl/oferta/zastosowanie-sit/>
- [N160] <https://www.polnet.pl/pl/czyszczenie-i-sortowanie-ziarna/linie-dokladnego-czyszczenia-nasion/czyszczalnie-dokladnego-czyszczenia/wialnia-sitowa>
- [N161] <https://www.zebiec.pl/pozostale-produkty/produkcja-metalowa/sita-i-siatki-z-blach/>

- [N162] <https://siatkifiltracyjne.com.pl/smartblog/5/Blacha-perforowana.html>
- [N163] <https://www.metalmesh.com.au/wordpress/wp-content/uploads/2018/08/180828-Metal-Mesh-Brochure-email.pdf>
- [N164] http://perfom.perfom.rs/pdf/plehovi_tepsije_za_pekare_eng.pdf
- [N165] <http://rmig.com/pl/produkty/rmig+sita+dla+cukrowni/rmig+produkty+dla+cukrowni/rmig+sita+pras+wys%c5%82odkowych>
- [N166] <http://www.parmarmetal.com/perforated-type-cable-tray.php>
- [N167] <https://tilleygroup.co.nz/tilleygroup-products/electrical-cable-trays/>
- [N168] <https://www.shreeganesheperforatedinds.com/perforated-cable-tray.html#perforated-cable-tray>
- [N169] <http://rmig.com/pl/bran%c5%bca/agd>
- [N170] <https://www.e-invest.pl/blachy-perforowane.html>
- [N171] <https://www.marcospecialtysteel.com/content/uploads/2016/07/Marco-General-Lines-Catalog-FINAL-2015-for-web-1.pdf>
- [N172] https://rapidperf.com.au/wp-content/uploads/2020/11/RP_Product_Catalogue_Web.pdf
- [N173] <http://metbud.net/produkty/>
- [N174] [https://perfom.rs/proizvodi/perforirana-sita-i-filteri/#iLightbox\[gallery_image_1\]/12](https://perfom.rs/proizvodi/perforirana-sita-i-filteri/#iLightbox[gallery_image_1]/12)
- [N175] <https://www.accurateperforating.com/applications/filtration>
- [N176] <http://www.designlineperforatedmetals.co.nz/speciality-perforated-metal.html>
- [N177] <https://www.accurateperforating.com/galleries/industrial/food-tray>
- [N178] <http://www.sigamet.pl/Galeria/?p=1>
- [N179] <https://www.euoperf.it/en/electronics.php>
- [N180] [https://perfom.rs/proizvodi/delovi-i-komponente/perforirane-maske/#iLightbox\[gallery_image_1\]/0](https://perfom.rs/proizvodi/delovi-i-komponente/perforirane-maske/#iLightbox[gallery_image_1]/0)
- [N181] <https://www.accurateperforating.com/galleries/industrial/electronic-enclosure>
- [N182] <https://www.secespol.com/realizacje-7/przemysl-energetyczny-3297.html>
- [N183] <https://usdieselparts.com/i-13468724-4-stainless-perforated-muffler-universal-diesel.html>
- [N184] <https://www.marcospecialtysteel.com/product-categories/perforated-metal/round-holes/#table>
- [N185] <https://constructalia.arcelormittal.com/pl/projekty/hiszpania/park-archeologiczny-el-molinete-w-kartaginie>

- [N186] <http://cdn23.pb.smcloud.net/t/files/5f/55/9a/857e731937/ruukki-zimnowalcowane-stale-przeznaczone-do-formowania.pdf>
- [N187] <https://www.kronosedm.pl/aluminium-pa11-aw-5754>
- [N188] http://impressmetal.pl/blachy_5754.php
- [N189] <http://admetal.pl/produkt/aluminium/blachyplyty/blachyplyty-walcowane/en-aw-5754/>
- [N190] <http://www.empo.com.tr/aluminyum-levha/en-aw-5754.html?lang=en>

Komentarz: Z uwagi na dość liczną netografię zrezygnowano z przypisywania do każdej wymienionej pozycji tematu treści do jakiej nawiązuje. Pełny adres cytowanych stron internetowych jednoznacznie odnosi się do źródła, z którego korzystano. Wszystkie przywołane w netografii źródła skompletowano i zweryfikowano do 30.01.2021.

Spis rysunków

Rys. 1.1. Klasyfikacja materiałów inżynierskich, uwzględniająca budowę wewnętrzną i rodzaj wiązań międzyatomowych	13
Rys. 1.2. Schemat ilustrujący podział materiałów inżynierskich ze względu na ich zastosowanie ujmujący blachę perforowaną jako materiał o złożonych własnościach ..	14
Rys. 2.1. Perforacja blachy na prasie: a) szeroko perforującej, b) sekcijnej, c) z automatyczną zmianą narzędzia	17
Rys. 2.2. Podstawowe kształty otworów perforacji w płaszczyźnie blachy.....	19
Rys. 2.3. Wybrane (typowe) kształty otworów perforacji ozdobnej: a) koniczynka, b) jodełka, c) kluczyk	20
Rys. 2.4. Przykłady perforacji dekoracyjnej (<i>DHP – Decorative Hole Pattern</i>)	21
Rys. 2.5. Różne rodzaje perforacji specjalnej: a) heksagonalna, b) noskowa (łuskowa), c) Perfocon, d) perforacja z wydłużonymi przetłoczonymi otworami, e) perforacja z wydłużonymi przetłoczonymi otworami „zębki” , f) miseczkowa, g) miseczkowa z otworem odwadniającym, h) daszkowa, i) tarkowa, j) mostkowa (szczelinowo-mostkowa), k) ConiPerf trójkątna, l) ConiPerf szczelinowa.....	22
Rys. 2.6. Profile otworów wierconych: a) podwójnie cylindryczny, b) cylindryczny, c) pogłębiony, d) stożkowo-cylindryczny, e) stożkowy z dodatkowym profilem	24
Rys. 2.7. Profile otworów frezowanych: a) trapezowy, b) paraboliczny, c) paraboliczny z dodatkowym profilem.....	24
Rys. 2.8. Układy otworów okrągłych: a) prosty (Rg), b) mijany 60° (Rv), c) mijany 45° (Rd).....	25
Rys. 2.9. Układy otworów kwadratowych: a) prosty (Qg), mijany (Qv), c) diagonalny/mijany 45° (Qd).....	25
Rys. 2.10. Blacha perforowana wykonana ze stali corten A606-4 (S355J2W).....	28
Rys. 2.11. Różnie barwione w procesie anodowania perforowane blachy aluminiowe	29
Rys. 2.12. Wymiary typowego oczka siatki cięto-ciągnionej	30
Rys. 2.13. Siatka cięto-ciągniona: a) standardowa, b) spłaszczona	31
Rys. 2.14. Blachy perforowane w budownictwie i architekturze	34
Rys. 2.15. Perforacja artystyczna	34
Rys. 2.16. Aranżacja wewnątrz	35
Rys. 2.17. Blacha perforowana w zabudowie przestrzeni	36
Rys. 2.18. Przykłady różnych zastosowań blach perforowanych.....	38

Rys. 2.19. Park archeologiczny El Molinete w Kartaginie (Hiszpania), chroniony przezroczystym dachem wykonanym m.in. z blachy perforowanej	39
Rys. 3.1. Koncepcja równoważnej ciągłości stosowana do opisu własności materiałów perforowanych.....	41
Rys. 3.2. Teoretyczna i eksperymentalna powierzchnia plastyczności materiału perforowanego dla różnego współczynnika wiązań μ oraz wybranej orientacji obciążenia α względem kierunku najgęstszego upakowania otworów perforacji prostej	46
Rys. 3.3. Wpływ smukłości na względne krytyczne naprężenie podczas wyboczenia blachy o długości boku a i grubości t dla różnej średnicy otworu d w warunkach jednoosiowego ściskania	50
Rys. 3.4. Wpływ smukłości na względne krytyczne naprężenie podczas wyboczenia blachy o długości boku a i grubości t dla różnej średnicy otworu d w warunkach dwuosowego równomiernego ściskania	50
Rys. 3.5. Pole naprężeń wokół otworów perforacji prostej wyznaczone metodą elastooptyczną	67
Rys. 3.6. Płynięcie kołnierza i lokalizacja pęknięcia podczas wytłaczania ażurowych wyrobów powłokowych z blachy perforowanej otworami w układzie heksagonalnym (a) i prostym (b).....	70
Rys. 3.7. Przykłady kompozytów przekładkowych zawierających rdzeń z odpowiednio ukształtowanej blachy perforowanej	76
Rys. 3.8. Proces wytwarzania wewnętrznej warstwy kompozytu z blachy perforowanej	77
Rys. 3.9. Przykład konstrukcji SPSW (Steel Plate Shear Walls)	81
Rys. 5.1. Schemat perforacji prostej z zaznaczonymi charakterystycznymi kierunkami.....	86
Rys. 5.2. Schemat perforacji heksagonalnej (trójkątnej równobocznej) z zaznaczonymi charakterystycznymi kierunkami (linia ciągła)	87
Rys. 5.3. Pomiar wydłużenia w zakresie sprężystym na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566, przy użyciu ekstensometru dwuosowego.....	88
Rys. 5.4. Zależność odkształcenia od przyłożonego naprężenia w zakresie liniowosprężystym.....	89
Rys. 5.5. Sposób mocowania ekstensometru na próbkach blachy perforowanej	89
Rys. 5.6. Przykładowe zestawy stalowych próbek: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji.....	90

Rys. 5.7. Przykładowe zestawy próbek ze stopu aluminium EN AW-5754: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji.....	91
Rys. 5.8. Statyczna próba rozciągania	92
Rys. 5.9. Narzędzie do trójpunktowego gięcia zamocowane w maszynie wytrzymałościowej	93
Rys. 5.10. Schemat trójpunktowego gięcia (<i>l</i> - rozstaw podpór, <i>S</i> - strzałka ugięcia, <i>F</i> - siła skupiona)	95
Rys. 5.11. Przykładowa zależność siły od strzałki ugięcia dla blachy pełnej i perforowanej poddanej trójpunktowemu gięciu.....	95
Rys. 5.12. Przykładowy zestaw próbek blachy DC01 z perforacją prostą (Po2s4) dla kierunku 0° (KW) o różnej szerokości (z lewej) oraz pasek stalowej blachy perforowanej (Po2s4, 0°) odpowiednio usytuowany na podporach urządzenia do zginania (z prawej)	96
Rys. 5.13. Podział na elementy skończone na przykładzie blachy z perforacją prostą (Po2s4, 0°) dla jednoosiowego rozciągania	99
Rys. 5.14. Podział na elementy skończone zastosowany dla trójpunktowego gięcia na przykładzie blachy z perforacją heksagonalną (Ho2s4, 0°)	99
Rys. 5.15. Przykładowa zależność naprężenie – odkształcenie (wzdłużne) dla blachy DC01 z prostym układem perforacji (Po2s4, 0°) wyznaczona za pomocą badań numerycznych	100
Rys. 5.16. Różne sposoby symulacji obciążenia zewnętrznego przyłożonego do stalowej blachy perforowanej (Po2s4, 45°) w próbie jednoosiowego rozciągania	102
Rys. 5.17. Rozkład naprężeń w blasze DC01 z prostym układem perforacji (45°), otrzymany poprzez bezpośrednie przyłożenie siły rozciągającej do próbki	102
Rys. 5.18. Rozkład naprężeń w blasze DC01 z prostym układem perforacji (45°), uzyskany w wyniku jednoosiowego rozciągania z zastosowaniem sztywnego elementu pośredniego	103
Rys. 5.19. Przykładowa zależność siła – strzałka ugięcia dla blachy DC01 z heksagonalnym układem perforacji (Ho2s4, 0°), otrzymana na podstawie badań numerycznych	104
Rys. 5.20. Schemat symulacji trójpunktowego gięcia na przykładzie blachy z perforacją heksagonalną (Ho2s4, 0°).....	104
Rys. 5.21. Umocowanie próbki z blachy perforowanej (Ho2s4, 0°).....	105

Rys. 6.1. Rozkład modułu Younga blachy stalowej DC01 i ze stopu aluminium EN AW-5754 bez perforacji.....	108
Rys. 6.2. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \varepsilon$ w zakresie sprężystym blachy DC01 z perforacją prostą	109
Rys. 6.3. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \varepsilon$ w zakresie sprężystym blachy EN AW-5754 z perforacją prostą.....	110
Rys. 6.4. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z prostym układem perforacji.....	111
Rys. 6.5. Rozkład efektywnego modułu Younga dla blachy DC01 i EN AW-5754 z prostym układem perforacji (symulacja numeryczna)	112
Rys. 6.6. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \varepsilon$ w zakresie sprężystym blachy DC01 z perforacją heksagonalną	113
Rys. 6.7. Przykładowe charakterystyki $\sigma - \varepsilon$ w zakresie sprężystym blachy EN AW-5754 z perforacją heksagonalną.....	113
Rys. 6.8. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji.....	114
Rys. 6.9. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji (symulacja numeryczna)	115
Rys. 6.10. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy DC01 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej.....	116
Rys. 6.11. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej.....	116
Rys. 6.12. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy DC01 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej (symulacja numeryczna)....	117
Rys. 6.13. Stosunek efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną względem modułu Younga blachy pełnej (symulacja numeryczna)	118
Rys. 6.14. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną z uwzględnieniem wskaźnika masy.....	119
Rys. 6.15. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną z uwzględnieniem wskaźnika masy (symulacja numeryczna)	120
Rys. 6.16. Zestawienie krzywych rozciągania blachy DC01 pełnej oraz z perforacją prostą (Po2s4) i heksagonalną (Ho2s4).....	121

Rys. 6.17. Zestawienie krzywych rozciągania blachy EN AW-5754 pełnej oraz z perforacją prostą (Po2s4) i heksagonalną (Ho2s4).....	122
Rys. 6.18. Rozciągnięte próbki blachy stalowej DC01: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji.....	123
Rys. 6.19. Rozciągnięte próbki blachy ze stopu aluminium EN AW-5754: a) z perforacją prostą (Po2s4), b) z perforacją heksagonalną (Ho2s4), c) bez perforacji	123
Rys. 6.20. Zestawienie krzywych rozciągania blachy EN AW-5754 pełnej i z perforacją prostą (Po2s4).....	124
Rys. 6.21. Zestawienie krzywych rozciągania blachy EN AW-5754 pełnej i z perforacją heksagonalną (Ho2s4)	124
Rys. 6.22. Zestawienie krzywych rozciągania blachy pełnej EN AW-5754 i blachy DC01 z perforacją prostą (Po2s4) i heksagonalną (Ho2s4)	125
Rys. 6.23. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 bez perforacji	126
Rys. 6.24. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą	128
Rys. 6.25. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją heksagonalną	129
Rys. 6.26. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy DC01 z perforacją prostą i heksagonalną w stosunku do blachy pełnej.....	130
Rys. 6.27. Rozkład własności wytrzymałościowych blachy EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną w stosunku do blachy pełnej.....	131
Rys. 6.28. Rozkłady własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą z uwzględnieniem wskaźnika masy.....	132
Rys. 6.29. Rozkłady własności wytrzymałościowych blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją heksagonalną z uwzględnieniem wskaźnika masy.....	132
Rys. 6.30. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia.....	133
Rys. 6.31. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia.....	134
Rys. 6.32. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia.....	134

Rys. 6.33. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia	135
Rys. 6.34. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna)	136
Rys. 6.35. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy DC01 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna)	136
Rys. 6.36. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z prostym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna)	137
Rys. 6.37. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy EN AW-5754 z heksagonalnym układem perforacji, uzyskany dla trójpunktowego gięcia (symulacja numeryczna).....	137
Rys. 6.38. Wartość stosunku E_g^*/E_r^* dla blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną	138
Rys. 6.39. Wartość stosunku E_g^*/E_r^* dla blachy DC01 i EN AW-5754 z perforacją prostą i heksagonalną (symulacja numeryczna).....	138
Rys. 6.40. Rozkład efektywnego modułu Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla różnych wartości prześwitu (średnica otworu 2 mm i 10 mm)	140
Rys. 6.41. Spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku perforacji dla średnicy otworu 2 mm	141
Rys. 6.42. Spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku perforacji dla średnicy otworu 10 mm	141
Rys. 6.43. Efektywny moduł Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla średnicy otworu 2 mm z uwzględnieniem wskaźnika masy W_m	142
Rys. 6.44. Efektywny moduł Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla średnicy otworu 10 mm z uwzględnieniem wskaźnika masy W_m	143
Rys. 6.45. Wpływ prześwitu na wartość E^*/E dla perforacji prostej o średnicy otworu 2 mm	144
Rys. 6.46. Wpływ prześwitu na wartość E^*/E dla perforacji prostej o średnicy otworu 10 mm	144
Rys. 6.47. Maksymalny teoretyczny prześwit perforacji prostej z otworami cylindrycznymi	145
Rys. 6.48. Krzywa przedstawiająca wpływ prześwitu na wartość E^*/E , wyznaczona dla perforacji prostej ze średnicą otworu 2 mm i 10 mm	145

Rys. 6.49. Charakterystyka wytrzymałościowa blachy perforowanej EN AW-1050A z prostym układem otworów cylindrycznych dla różnej wartości prześwitu	146
Rys. 6.50. Wyznaczony eksperymentalnie rozkład efektywnego modułu Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla różnych wartości prześwitu (średnica otworu 2 mm)	147
Rys. 6.51. Spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku perforacji dla średnicy otworu 2 mm (wyniki eksperymentalne)	147
Rys. 6.52. Efektywny moduł Younga blachy perforowanej EN AW-1050A dla średnicy otworu 2 mm z uwzględnieniem wskaźnika masy W_m (wyniki eksperymentalne)	148
Rys. 6.53. Wpływ prześwitu na wartość E^*/E dla blachy EN AW-1050A z perforacją prostą o średnicy otworu 2 mm (wyniki eksperymentalne)	149
Rys. 6.54. Zestawienie wyników symulacji numerycznej i badań eksperymentalnych dotyczących wpływu prześwitu na spadek modułu Younga blachy EN AW-1050A w wyniku prostego układu perforacji	149
Rys. 6.55. Usytuowanie krawędzi bocznej dla orientacji 0° (KW) perforacji Po2s4: a) przez środki otworów, b) stycznie do krawędzi otworów, c) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości).....	151
Rys. 6.56. Usytuowanie krawędzi bocznej dla orientacji 45° perforacji Po2s4: a) przez środki otworów, b) stycznie do krawędzi otworów, c) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości).....	151
Rys. 6.57. Efektywny moduł Younga dla różnej szerokości i usytuowania linii cięcia blachy z perforacją prostą (orientacja 0°)	152
Rys. 6.58. Efektywny moduł Younga dla różnej szerokości i usytuowania linii cięcia blachy z perforacją prostą (orientacja 45°)	152
Rys. 6.59. Względna odchyłka efektywnego modułu Younga w zależności od szerokości próbki blachy z perforacją prostą dla kierunku 0°	153
Rys. 6.60. Względna odchyłka efektywnego modułu Younga w zależności od szerokości próbki blachy z perforacją prostą dla kierunku 45°	154
Rys. 6.61. Linia bazy pomiarowej dla orientacji 0° (KW) perforacji Po2s4: a) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości), b) przez środki otworów, c) stycznie do krawędzi otworów	154

Rys. 6.62. Linia bazy pomiarowej dla orientacji 45° perforacji Po2s4: a) pomiędzy otworami (w jednakowej odległości), b) przez środki 5 otworów, c) przez środki 4 otworów	154
Rys. 6.63. Wartości efektywnego modułu Younga blachy z perforacją prostą dla orientacji 0° i 45° w zależności od usytuowania linii bazy pomiarowej próbki.....	155
Rys. 6.64. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 0°	156
Rys. 6.65. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 45°	157
Rys. 6.66. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 0°	158
Rys. 6.67. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 30°.....	159
Rys. 6.68. Rozkład naprężeń i odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 45°	160
Rys. 6.69. Symulacja numeryczna trójpunktowego gięcia dla przykładowej blachy Po2s4 ze stali DC01	161
Rys. 6.70. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 0°.....	162
Rys. 6.71. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 0°	162
Rys. 6.72. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 45°.....	163
Rys. 6.73. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Po2s4 dla kierunku 45°	163
Rys. 6.74. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 0°	164
Rys. 6.75. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 0°	164
Rys. 6.76. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 30°	165
Rys. 6.77. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 30°	165
Rys. 6.78. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 45°	166
Rys. 6.79. Rozkład odkształceń w blasze perforowanej Ho2s4 dla kierunku 45°	166
Rys. 6.80. Miejsce przyłożenia mocowania	168
Rys. 6.81. Miejsce przyłożenia: a) obciążenia b) symetrii	168
Rys. 6.82. Przykładowa siatka elementów skończonych	169
Rys. 6.83. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Pk5s8 o szerokości: a) 48 mm (8 kN), b) 104 mm (20 kN), c) 193 mm (35 kN)	169

Rys. 6.84. Rozkład naprężeń w blasze perforowanej Po8s15 o szerokości:	
a) 45 mm (8 kN), b) 105 mm (16 kN), c) 195 mm (32 kN)	170
Rys. 6.85. Rozkład naprężeń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Pk5s8	
o boku: a) 48 mm, b) 104 mm, c) 193 mm.....	170
Rys. 6.86. Rozkład naprężeń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Po8s15	
o boku: a) 45 mm, b) 105 mm, c) 195 mm.....	171
Rys. 6.87. Rozkład odkształceń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Pk5s8	
o boku: a) 43 mm, b) 104 mm, c) 193 mm.....	171
Rys. 6.88. Rozkład odkształceń w skali indywidualnej dla blach perforowanych Po8s15	
o boku: a) 45 mm, b) 105 mm, c) 195 mm.....	172
Rys. 6.89. Zmiana wartości naprężenia maksymalnego w blasze w zależności	
od obciążenia oraz szerokości blachy dla perforacji: a) Pk5s8, b) Po8s15	174
Rys. 6.90. Zmiana wartości odkształcenia maksymalnego w blasze w zależności	
od obciążenia oraz szerokości blachy dla perforacji: a) Pk5s8, b) Po8s15	174
Rys. 6.91. Zmiana obciążenia granicznego (dla k_r i R_e) w zależności od szerokości	
blachy o otworach: a) kwadratowych Pk5s8 , b) okrągłych Po8s15	175
Rys. 6.92. Element do montażu blach perforowanych:	
a - podstawa, b - otwór na śrubę napinającą, c – ramiona.....	176
Rys. 6.93. Element sprężynujący (1/2) z naniesioną siatką elementów skończonych	177
Rys. 6.94. Elementy układu mocowania paneli: a) element sprężynujący,	
b) listwa montażowa.....	177
Rys. 6.95. Przestrzenny model numeryczny analizowanego układu montażowego	
z zastosowaniem symetrii.....	178
Rys. 6.96. Umocowania zastosowane w modelu: a) symetria, b) nieruchoma geometria	178
Rys. 6.97. Obciążenie zastosowane w modelu elementu sprężystego	179
Rys. 6.98. Rozkład naprężeń w elemencie sprężystym wraz z uwidocznionym	
przemieszczeniem ramion w kierunku jego środka	179
Rys. 6.99. Rozkład odkształceń w elemencie sprężystym wraz z uwidocznionym	
przemieszczeniem ramion w kierunku jego środka	180
Rys. 6.100. Rozkład naprężeń na powierzchni elementu sprężystego od zewnętrznej	
strony podstawy: a) przemieszczenie 0,1 mm, b) przemieszczenie 0,2 mm,	
c) przemieszczenie 0,3 mm	180

Rys. 6.101. Rozkład odkształceń na powierzchni elementu sprężystego od zewnętrznej strony podstawy: a) przemieszczenie 0,1 mm, b) przemieszczenie 0,2 mm, c) przemieszczenie 0,3 mm	181
Rys. 6.102. Rozkład naprężeń na przekroju elementu sprężynującego: a) przemieszczenie 0,1 mm, b) przemieszczenie 0,2 mm, c) przemieszczenie 0,3 mm	182
Rys. 6.103. Przesunięcie ramion elementu sprężynującego w zależności od zadanego przemieszczenia podstawy	183
Rys. 6.104. Siła nacisku elementu sprężynującego na listwę mocującą w zależności od zadanego przemieszczenia podstawy	183
Rys. 6.105. Przestrzenny model numeryczny układu mocującego pasek blachy z zastosowaniem symetrii.....	184
Rys. 6.106. Przestrzenny model numeryczny układu mocującego pasek blachy z zastosowaniem symetrii (widok ogólny)	184
Rys. 6.107. Rozkład naprężeń (a) i rozkład odkształceń (b) na powierzchni i na przekroju elementu sprężynującego przy przemieszczeniu podstawy 0,08 mm	185
Rys. 6.108. Rozkład naprężeń na powierzchni i na przekroju elementu sprężynującego przy przemieszczeniu podstawy 0,08 mm w skali umożliwiającej identyfikację obszarów z niebezpiecznymi naprężeniami	185
Rys. 6.109. Siły nacisku ramion elementu sprężynującego na listwę mocującą i brzegi (zagięcia) blachy.....	186

Spis tabel

Tabela 2.1. Wzory do obliczania wielkości prześwitu dla typowych perforacji	27
Tabela 5.1. Własności mechaniczne blachy stalowej DC01 bez perforacji	85
Tabela 5.2. Własności mechaniczne blachy ze stopu aluminium EN AW-5754 bez perforacji	85
Tabela 5.3. Parametry siatki dla jednoosiowego rozciągania	97
Tabela 5.4. Parametry siatki dla trójpunktowego gięcia (szerokość bazowa)	98
Tabela 5.5. Parametry siatki dla trójpunktowego gięcia (próbka – 1,5 x szerokość bazowa) ..	98
Tabela 5.6. Parametry siatki dla trójpunktowego gięcia (próbka – 2 x szerokość bazowa)	98
Tabela 6.1. Parametry perforacji prostej	139
Tabela 6.2. Własności blachy pełnej, wykonanej z materiału EN AW-5754 w stanie umocnienia H22	167
Tabela 6.3. Parametry analizy numerycznej blach perforowanych	168
Tabela 6.4. Wartości obliczonego naprężenia oraz odkształcenia maksymalnego dla blachy perforowanej Pk5s8	173
Tabela 6.5. Wartości obliczonego naprężenia oraz odkształcenia maksymalnego dla blachy perforowanej Po8s15	173
Tabela 6.6. Wartości obciążeń granicznych dla blachy perforowanej Pk5s8	175
Tabela 6.7. Wartości obciążeń granicznych dla blachy perforowanej Po8s15	175
Tabela 6.8. Przesunięcie ramion elementu sprężynującego	182
Tabela 6.9. Siła nacisku ramion elementu sprężynującego	186