

## Effective modulus of elasticity of steel sheet with square array of holes under three-point bending conditions

# Efektywny moduł sprężystości wzdłużnej blachy stalowej z perforacją prostą w warunkach trójpunktowego gięcia

DOI: 10.15199/62.2024.8.7

The effect of square array of holes on the effective modulus of elasticity (effective Young's modulus) of DC01 steel sheet subjected to three-point bending was studied. The hole diameter and pitch being twice its value were constant. The distribution of the elastic constant in the plane of perforated metal sheet was discussed on the background of the reference material, i.e. solid sheet (without perforation) of the same grade and thickness. The research considered different width of the perforated specimen to assess its impact on the value of determined parameter. The results were also analyzed taking into account the mass loss ratio  $W_m$ .

**Keywords:** effective modulus of elasticity (effective Young's modulus), perforated metal sheet, DC01 steel, three-point bending

Blachy perforowane należą do grupy materiałów inżynierskich o charakterystycznym zestawieniu właściwości mechanicznych i użytkowych. Można je kształtować w szerokim zakresie poprzez dobór surowca macierzystego oraz parametrów perforacji. Często, oprócz określonej sztywności i wytrzymałości, materiał konstrukcyjny musi wykazywać także odpowiednią funkcjonalność, która w przypadku blach perforowanych wynika m.in. z określonego ich prześwitu, umożliwiającego np. kontrolowany przepływ cieczy, gazów lub rozdrobnionych ciał stałych. Decyduje to o szerokim spektrum zastosowań tego tworzywa w przemyśle wydobywczym, energetycznym, rafine-

ryjnym, chemicznym i maszynowym. Warto wspomnieć, że blachy (płyty) perforowane mogą stanowić element konstrukcyjny wymienników ciepła<sup>1-3</sup>), wówczas istotna jest także ich wytrzymałość termiczna. Koncentrując się na charakterystyce mechanicznej omawianych materiałów, należy mieć na uwadze mnogość możliwych wariantów perforacji. W tym kontekście właściwe wydaje się przyjęcie pewnej metodyki wyznaczania ich wybranych parametrów sprężystych i wytrzymałościowych. Dla regularnych układów otworów można określić ich charakterystyczne kierunki, np. o najgęstszym upakowaniu oraz kierunku względem nich prostopadłe. Ponadto,

**Słowa kluczowe:** efektywny moduł sprężystości wzdłużnej (efektywny moduł Younga), blacha perforowana, stal DC01, trójpunktowe gięcie



Mgr inż. Marcin WIECZOREK (ORCID: 0000-0001-6236-2371) jest absolwentem AGH w Krakowie. Wyróżniony przez Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Metali Nieżelaznych (SITMN) w XX edycji konkursu o „Nagrodę SITMN dla Najlepszego Absolwenta Wydziału Metali Nieżelaznych AGH” w roku akademickim 2012/2013. W dorobku naukowym ma publikacje, referaty, projekty naukowo-badawcze, których tematyka związana jest z inżynierią materiałową, dyscypliną naukową ukończonych studiów doktoranckich. Doświadczenie przemysłowe zdobył podczas praktyk studenckich w Hucie Miedzi „Cedynia” w Orsku i w Fabryce Puszek Napojowych CANPACK SA w Brzesku oraz pracując jako technolog w Walcowni Metali „Dziedzice” SA. Specjalność – inżynieria materiałowa, technologia przetwórstwa metali nieżelaznych.



Em. prof. AGH dr hab. inż. Wacław R. MUZYKIEWICZ (ORCID: 0000-0003-2700-1137) zawodowo związany z AGH w Krakowie, z wyróżnieniem ukończył studia na Wydziale Metali Nieżelaznych tej uczelni. Przez trzy kadencje sprawował funkcję prodziekana, był członkiem Senatu AGH oraz członkiem Rady/Kolegium Wydziału. Zbudował Laboratorium Kształtowania Plastycznego Wyrobów Powłokowych, w dorobku naukowym ma monografię, ponad 110 publikacji, ok. 130 referatów, patent, ok. 80 projektów naukowo-badawczych i opracowań dla przemysłu. Wypromował ponad 130 absolwentów, wśród nich laureatów konkursu „Diamenty AGH” i „Nagrody SITMN dla Najlepszego Absolwenta Wydziału Metali Nieżelaznych”, której był animatorem. Laureat Nagrody Ministra i nagród Rektora, wyróżniony m.in. Medalem KEN i Złotym Krzyżem Zasługi, Honorową Odznaką Zasłużony dla Stowarzyszenia Wychowanków AGH, SITPH, SITMN, SITPMB i NOT (ostatnia Diamentowa Odznaka NOT, 2019 r.) oraz Statuetkami Hutnika w kat. Inżynierska Kreatywność i Sztuka Menedżerska (ostatnia Diamentowa, 2019 r.). W 2021 r. otrzymał tytuł Złotego Inżyniera *Przeglądu Technicznego* w kategorii Nauka. Członek Klubu Złotego Inżyniera. Specjalność – przetwórstwo metali, recykling i GOZ.

\* Adres do korespondencji:

Wydział Metali Nieżelaznych, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: marwiecz@agh.edu.pl

rozpatrując przeznaczenie konstrukcyjne blach perforowanych, często w postaci płaskiego arkusza lub w formie wykroju o określonym kształcie, zasadne jest posługiwanie się całkowitym przekrojem poprzecznym blachy (łącznie z pustkami). Stanowi to zarazem nawiązanie do koncepcji „równoważnej ciągłości”, zgodnie z którą materiał perforowany należy rozpatrywać jako równoważny materiał lity, lecz o odpowiednio zmodyfikowanych efektywnych właściwościach<sup>4,5</sup>).

Szytywność blachy stalowej z prostym układem otworów cylindrycznych określono, posługując się efektywnym modulem sprężystości wzdłużnej, który wyznaczono w próbie trójpunktowego gięcia dla charakterystycznych kierunków (0, 45 i 90°) rozważanej perforacji. Nierzadko, poza odpowiednią sztywnością, istotna jest również mała masa danej konstrukcji, dlatego analizując właściwości sprężyste rozpatrywanych materiałów, warto uwzględnić wpływ ubytku masy spowodowany perforacją na ich zmianę (spadek).

## Część doświadczalna

### Materiały

Badania przeprowadzono na niskowęglowej, zimnowalcowanej blasze stalowej DC01 o grubości 1 mm. Stale o zawartości węgla 0,02–0,2% są wytwarzane w największej ilości. Charakteryzują się korzystną kombinacją wytrzymałości, ciągliwości i odporności na pękanie. Ich zaletą jest także dobra spawalność. Można je łączyć praktycznie wszystkimi stosowanymi powszechnie metodami<sup>9</sup>. Stal DC01 wykazuje dużą podatność do kształtowania plastycznego. Materiał ten jest często stosowany do produkcji blach perforowanych.

### Metodyka badań

Rozkład efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej w płaszczyźnie blachy perforowanej o prostym układzie otworów okrągłych (cylindrycznych) wyznaczono, rozpatrując charakterystyczne kierunki tej perforacji. Materiał referencyjny stanowiła blacha pełna tego samego gatunku i grubości. Analizę otrzymanych wyników przeprowadzono także z uwzględnieniem wskaźnika ubytku masy  $W_m$ .

Perforacja prosta blachy stalowej DC01 charakteryzowała się stałą średnicą otworu równą 2 mm oraz dwukrotnie większym skokiem o wartości 4 mm. Stąd prześwit  $P$  blachy perforowanej wynosił 19,625% zgodnie z formułą (1):

$$P = 0,785 \cdot \frac{d^2}{s^2} \cdot 100\% \quad (1)$$

w której  $P$  oznacza prześwit blachy,  $d$  średnicę otworu, mm, a  $s$  skok, mm.

Do charakterystycznych kierunków badanej perforacji należy zaliczyć te o najgęstszym upakowaniu otworów: 0° i 90° oraz kierunek diagonalny 45°. Wykazują one periodyczność co 90°. Blachę perforowaną z prostym układem otworów cylindrycznych (w płaszczyźnie blachy, okrągłych) oznaczono jako Po2s4, gdzie P oznacza układ prosty, o2 otwór okrągły o średnicy  $d=2$  mm, a s4 skok  $s$  równy 4 mm. Taki

sposób kodowania przyjęto w pracy<sup>7</sup>). Na rys. 1 przedstawiono schemat perforacji prostej z wyróżnionym jej elementarnym segmentem oraz charakterystycznymi kierunkami.

W celu wyznaczenia efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej badanego materiału w próbie trójpunktowego gięcia, z arkusza blachy pobrano próbki, których oś wzdłużna tworzyła z kierunkiem najgęstszego upakowania otworów kąt: 0, 45 i 90°, przy czym kierunek 0° był zgodny z kierunkiem walcowania (KW) (rys. 2). Wycięte paski blachy miały długość 200 mm, a ich szerokość bazowa

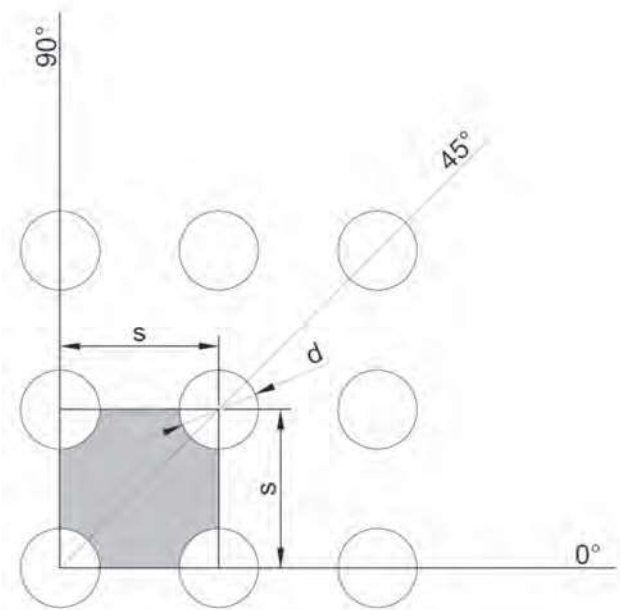


Fig. 1. Scheme of straight perforation (square array of holes)

Rys. 1. Schemat perforacji prostej (układ kwadratu)

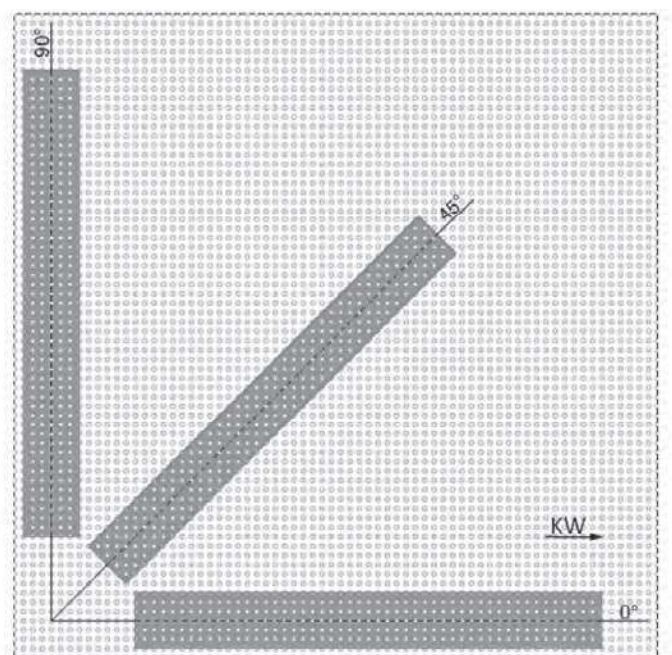


Fig. 2. Scheme of perforated metal sheet (Po2s4) with marked directions for cutting specimens

Rys. 2. Schemat arkusza blachy perforowanej (Po2s4) z zaznaczonymi kierunkami wycięcia próbek

wynosiła 24 mm dla kierunku 0° i 90° oraz 22,63 mm dla orientacji 45°. Ustalenie jednakowej szerokości było niemożliwe ze względu na przyjętą zasadę, że oś wzdłużna oraz krawędzie boczne próbek przechodziły przez środki cylindrycznych otworów. Badania efektywnego modułu Younga wykonano także na odpowiednio szerszych (1,5- i 2-krotnie) paskach blachy perforowanej (rys. 3), aby ocenić, czy może mieć to wpływ na wartość rozważanej stałej sprężystej. Rozpatrywano całkowity przekrój poprzeczny blachy (łącznie z otworami), co jest zasadne, zwłaszcza mając na uwadze aspekt praktyczny związany z zastosowaniem blach perforowanych.

Trójpunktowe gięcie wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566 (o maksymalnym nacisku 10 kN) za pomocą odpowiednio przystosowanego do niej narzędzia (rys. 4) o konstrukcji umożliwiającej przeprowadzenie prób zgodnie z ustalonymi parametrami<sup>8, 9</sup>. Średnica podpór i trzpienia wynosiła 15 mm, a szerokość 60 mm. Z kolei rozstaw podpór był równy 100 mm (rys. 5).

W procesie gięcia nacisk na badany element następował poprzez ruch trzpienia w kierunku równo oddalonych od niego podpór. W przypadku prób wstępnych, gdzie dochodziło do uplastycznienia materiału (rys. 6a), zadana była strzałka ugięcia równa 25 mm i prędkość posuwu stempla, która wynosiła 0,1 mm/s, natomiast siła stanowiła wartość wynikową. Było to niezbędne, aby określić zakres bezpiecznego obciążenia odpowiadającego odkształceniom sprężystym. Ustalona na tej podstawie (maksymalna) siła nacisku trzpienia wynosiła 10 N dla bazowej szerokości próbek, z kolei dla pozostałych rozpatrywanych szerokości wartość siły była proporcjonalnie większa, czyli 1,5- i 2-krotnie, zatem wynosiła odpowiednio 15 i 20 N. Celem przeprowadzonych prób gięcia w obszarze sprężystym (rys. 6b) było określenie liniowej zależności strzałki ugięcia  $S$  od siły nacisku trzpienia  $F$ . Każda z takich prób obejmowała 6 cykli pomiarowych, przy czym 1 cykl to faza obciążania i odciążania. Podczas gięcia trzpień wywierał nacisk na „górną” lub „dolną” powierzchnię blachy, gdzie na każdą ze stron przypadały po dwie próby.

Efektywny moduł sprężystości wzdłużnej wyznaczono, korzystając z formuły (2):

$$S = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (2)$$

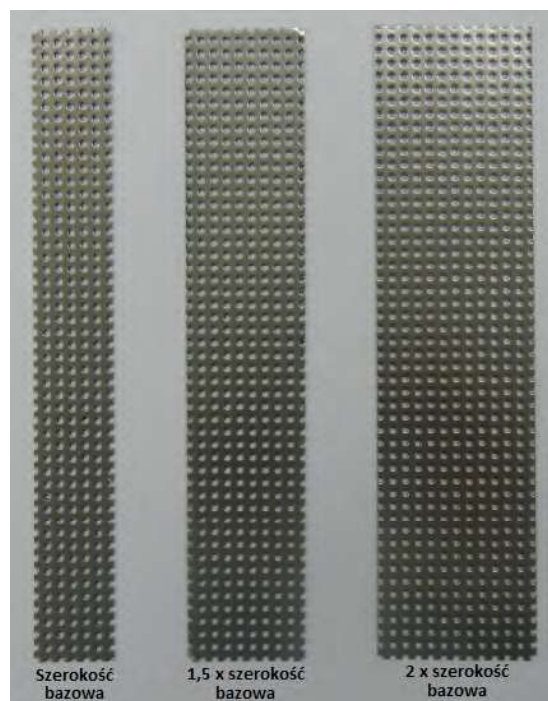


Fig. 3. Example of set of perforated metal sheets specimens (Po2s4) made of DC01 steel with different width

Rys. 3. Przykładowy zestaw próbek blachy perforowanej (Po2s4) ze stali DC01 o różnej szerokości

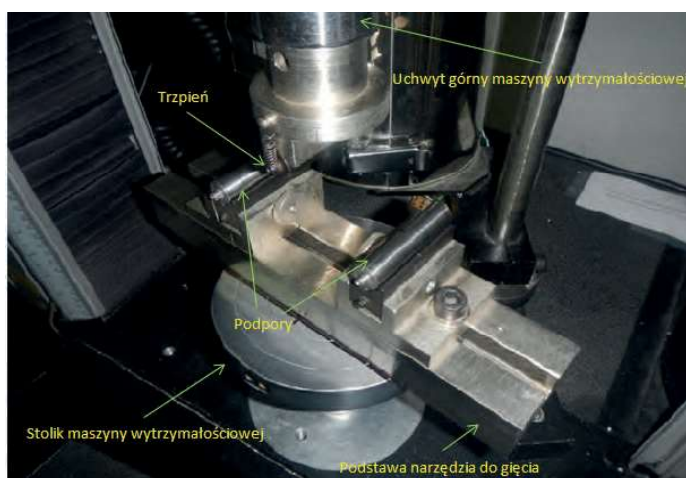


Fig. 4. Three-point bending apparatus

Rys. 4. Narzędzie do trójpunktowego gięcia

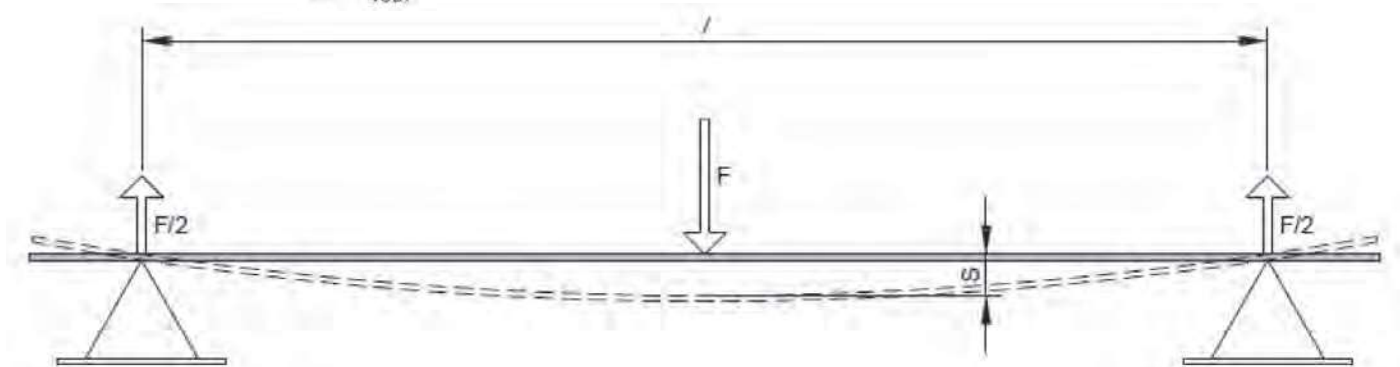


Fig. 5. Scheme of three-point bending ( $l$  – span length between supports,  $S$  – deflection,  $F$  – concentrated force)

Rys. 5. Schemat trójpunktowego gięcia ( $l$  – rozstaw podpór,  $S$  – strzałka ugięcia,  $F$  – siła skupiona)

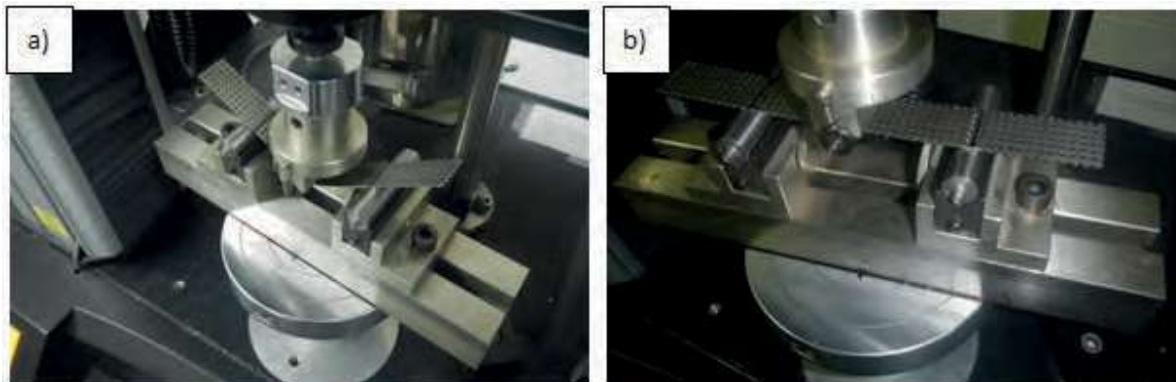


Fig. 6. Three-point bending of perforated metal sheet strip (Po2s4) for 0° direction in the range of deformation: a) plastic and b) elastic  
Rys. 6. Trójpunktowe gięcie paska blachy perforowanej (Po2s4) dla kierunku 0° w zakresie odkształcenia: a) plastycznego i b) sprężystego

w której  $S$  oznacza strzałkę ugięcia, mm,  $F$  siłę skupioną, N,  $l$  rozstaw podpór, mm,  $E$  moduł Younga, MPa, a  $I$  moment bezwładności, mm<sup>4</sup>. Wartość modułu dla poszczególnych kierunków (0, 45 i 90°) obliczono jako średnią arytmetyczną z 4 prób.

Dla paska blachy o prostokątnym przekroju poprzecznym formuła (2) przyjmuje postać (3):

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

w której  $b$  i  $g$  oznaczają odpowiednio szerokość i grubość paska blachy, mm.

Zatem moduł Younga wyraża wzór (4):

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

Średnią wartość efektywnego modułu Younga w płaszczyźnie blachy określono wg ogólnej zależności (5)<sup>10</sup>:

$$E_{sr}^* = \frac{E_0^* + 2E_{45}^* + E_{90}^*}{4} \quad (5)$$

w której  $E^*$  oznacza efektywny moduł Younga, a indeksy dolne przy symbolach po prawej stronie równania oznaczają poszczególne kierunki w płaszczyźnie blachy.

## Wyniki badań

Na rys. 7 przedstawiono przykładowe krzywe trójpunktowego gięcia stalowej blachy perforowanej (Po2s4) reprezentujące zależność siły od strzałki ugięcia, na podstawie których ustalono wartości obciążenia dla zakresu liniowo-sprężystego. Na rys. 8 przedstawiono przykładowe proste takiej zależności w obszarze sprężystym. Określony na ich podstawie współczynnik kierunkowy posłużył do wyznaczenia efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej badanego materiału. Nachylenie prostych wskazuje na podobną wartość analizowanej stałej sprężystej dla rozpatrywanych kierunków. Przykładowe zależności pokazane na rys. 7 i 8 otrzymano dla bazowej szerokości próbek blachy perforowanej.

Wartości efektywnego modułu Younga stalowej blachy z perforacją prostą uzyskane w procesie trój-

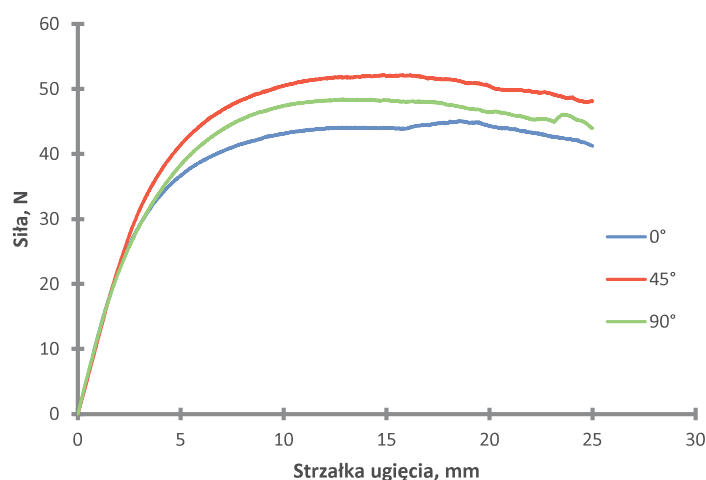


Fig. 7. Examples of force - deflection curves obtained in three-point bending test of perforated steel sheet (Po2s4) in the plastic range

Rys. 7. Przykładowe krzywe zależności siły od strzałki ugięcia otrzymane w próbie trójpunktowego gięcia stalowej blachy perforowanej (Po2s4) w zakresie plastycznym

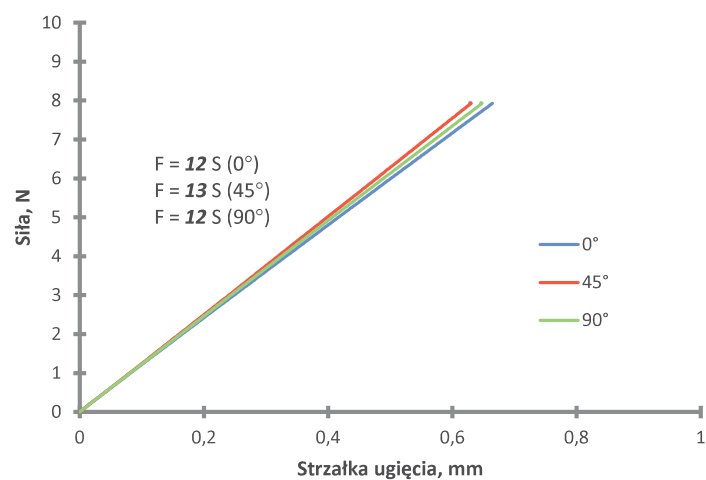


Fig. 8. Examples of force - deflection lines determined in three-point-bending test of perforated steel sheet (Po2s4) in the elastic range

Rys. 8. Przykładowe proste zależności siły od strzałki ugięcia wyznaczone w próbie trójpunktowego gięcia stalowej blachy perforowanej (Po2s4) w zakresie sprężystym

Table 1. Effective Young's modulus of perforated steel sheet (Po2s4)

Tabela 1. Efektywny moduł Younga stalowej blachy perforowanej (Po2s4)

Kierunek osi próbki względem KW	Efektywny moduł Younga $E^*$ , GPa		
	Szerokość próbki (Po2s4), mm		
	bazowa	1,5 × bazowa	2 × bazowa
0°	133	122	121
45°	134	141	131
90°	125	127	130
Wartość średnia	132	133	128

punktowego gięcia przeprowadzonego dla różnej szerokości próbek zamieszczono w tabeli 1, a zilustrowano na rys. 9. Obserwowano mocno zbliżone wartości rozważanego parametru, niezależnie od szerokości paska blachy wykorzystanego w badaniach. Na ich podstawie można sądzić, że wpływ szerokości perforowanej próbki na otrzymaną wartość efektywnego modułu Younga jest praktycznie bez znaczenia. Należy jednak dodać, że w tym przypadku zachowana została periodyczność perforacji, tzn. dla każdej rozważanej szerokości krawędź boczna próbki przechodziła przez środki otworów.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że sztywność stalowej blachy perforowanej (Po2s4) jest podobna dla rozważanych kierunków w jej płaszczyźnie. W tym kontekście warto odnieść się do pracy<sup>11)</sup>, w której badano właściwości mechaniczne blachy z tego samego gatunku stali i dla tej samej perforacji, rozpatrując jednoosiowe rozciąganie (rys. 10). Można zauważyć, że wartości modułu Younga wyznaczone w warunkach jednoosiowego rozciągania oraz trójpunktowego gięcia nieco się różnią. Dla kierunków o najgęstszym upakowaniu otworów (0 i 90°) różnica ta jest raczej niewielka (poniżej 10%), natomiast jest ona bardziej dostrzegalna dla kierunku diagonalnego 45° (16%). To powoduje, że rozkład modułu sprężystości wzdłużnej w płaszczyźnie blachy perforowanej (Po2s4) jest bardziej jednorodny w schemacie obciążenia, jaki odpowiada trójpunktowemu gięciu. W wyniku perforacji prostej sztywność blachy stalowej uległa zmniejszeniu, o czym świadczy 38-proc. spadek (w przypadku gięcia) średniej wartości analizowanej stałej sprężystej blachy perforowanej w stosunku do macierzystej blachy pełnej.

Konstrukcyjne przeznaczenie blach perforowanych wymaga odpowiedniej charakterystyki mechanicznej tych materiałów. Mając na uwadze mnogość i wszechstronność ich zastosowań,

często w postaci płaskiego arkusza, jednym z kluczowych aspektów pozostaje nie tylko zbadanie odpowiedzi sprężystej tego typu tworzywa na obciążenia zewnętrzne, ale także właściwe określenie wpływu ubytku masy blachy spowodowanego perforacją na jej sztywność. W tym przypadku można posłużyć się wskaźnikiem ubytku masy  $W_m$  odpowiednio zdefiniowanym w pracy<sup>11)</sup>. Stanowi on stosunek masy blachy perforowanej  $m_p$  do masy blachy pełnej  $m$ , opisany zależnością (6):

$$W_m = \frac{m_p}{m} \quad (6)$$

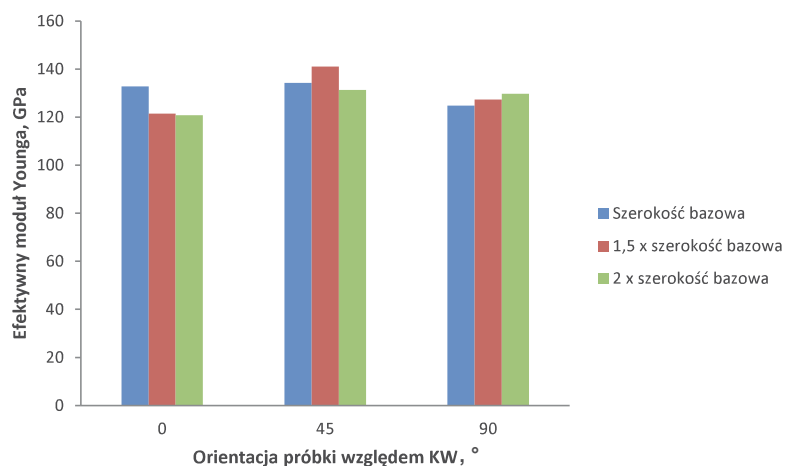


Fig. 9. Effective modulus of elasticity of perforated steel sheet (Po2s4) determined using specimens of different width

Rys. 9. Efektywny moduł sprężystości wzdłużnej stalowej blachy perforowanej (Po2s4) wyznaczone za pomocą próbek o różnej szerokości

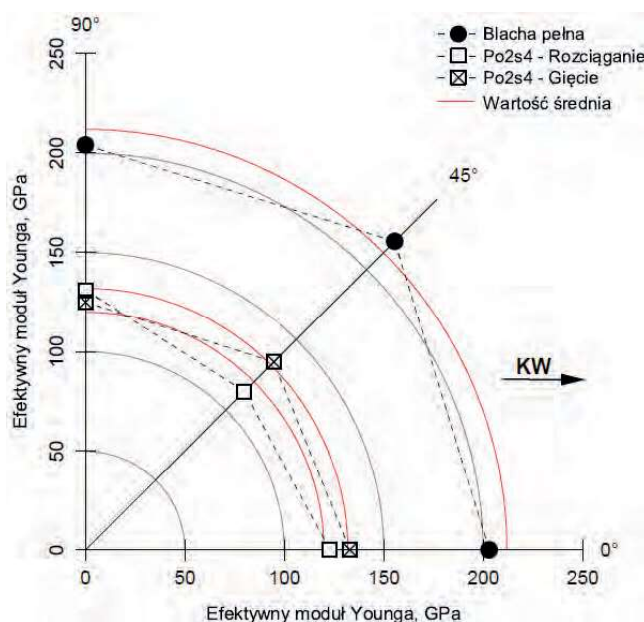


Fig. 10. Distribution of effective Young's modulus of perforated (Po2s4) steel sheet on the background of analogous parameter of solid sheet (bending - values obtained for basic widths of the specimens, stretching - values taken from article<sup>11)</sup>, also for solid sheet)

Rys. 10. Rozkład efektywnego modułu Younga stalowej blachy perforowanej (Po2s4) na tle analogicznego parametru blachy pełnej (gięcie - wartości otrzymane dla bazowej szerokości próbek, rozciąganie - wartości zaczerpnięte z pracy<sup>11)</sup>, także dla blachy pełnej)

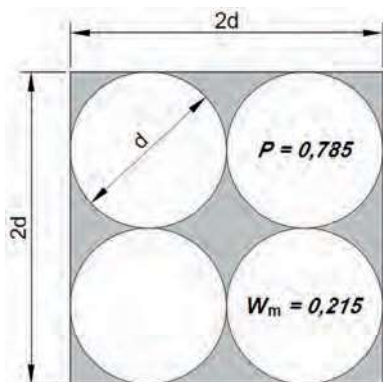


Fig. 11. Maximum theoretical open area for straight perforation with round holes  
Rys. 11. Maksymalny teoretyczny prześwit dla perforacji prostej o otworach okrągłych

Zakładając, że blacha pełna i perforowana są z tego samego materiału (ta sama gęstość) i mają jednakową grubość, wskaźnik masy  $W_m$  można wyrazić jako funkcję prześwitu  $P$  zależnością (7):

$$W_m = 1 - P \quad (7)$$

Wywód prowadzący od ogólnej definicji (6) do zależności (7) przedstawiono w pracy<sup>11)</sup>. Generalnie wskaźnik masy zawiera się w przedziale:  $0 < W_m < 1$ . Należy jednak dodać, że w zależności od układu czy kształtu otworów różna może być maksymalna teoretyczna wartość wskaźnika masy  $W_m$ . Dla rozważanego prostego układu perforacji o otworach okrągłych (cylindrycznych) maksymalny teoretyczny prześwit wynosi 78,5% (0,785), zatem minimalny teoretyczny wskaźnik masy  $W_m$  jest równy 0,215 (rys. 11). Z kolei, jak wynika z równania (7), maksymalną wartość wskaźnik masy  $W_m$  przyjmuje dla blachy pełnej ( $P = 0$ ) i wynosi 1. W praktyce maksymalny prześwit blachy z prostym układem otworów okrągłych musi być mniejszy niż wartość teoretyczna 78,5%, aby zachować spójność materiału.

Dla badanej blachy perforowanej (Po2s4) z wystarczającą dokładnością można przyjąć, że wskaźnik masy  $W_m$  wynosi 0,77. Poprzez odniesienie efektywnego modułu Younga do tego wskaźnika za pomocą stosunku  $E^*/W_m$  uwzględniono ubytek masy blachy spowodowany perforacją. Wyznaczone w ten sposób wartości pozwalają trafniej ocenić wpływ danej perforacji na wybrane właściwości blachy perforowanej. W przypadku blach z różną perforacją, lecz z tego samego materiału i tej samej grubości, uwzględniając wskaźnik masy  $W_m$ , można określić która blacha perforowana efektywniej przenosi obciążenia zewnętrzne. W tabeli 2 zamieszczono wartości efektywnego modułu Younga z uwzględnieniem wskaźnika masy  $W_m$ . Aдекватnie do wartości prześwitu, „wzrosły” wartości efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej (rys. 12). Oczywiście charakter rozkładu analizowanej stałej sprężystej w płaszczyźnie blachy perforowanej pozostał niezmienny.

Table 2. Effective Young's modulus of perforated steel sheet (Po2s4) accounting for mass loss ratio  $W_m$

Tabela 2. Efektywny moduł Younga stalowej blachy perforowanej (Po2s4) z uwzględnieniem wskaźnika masy  $W_m$

Kierunek osi próbki względem KW	Efektywny moduł Younga $E^*/W_m$ , GPa		
	Szerokość próbki (Po2s4), mm		
	bazowa	1,5 × bazowa	2 × bazowa
0°	165	152	151
45°	167	175	163
90°	156	158	162
Wartość średnia	164	165	159

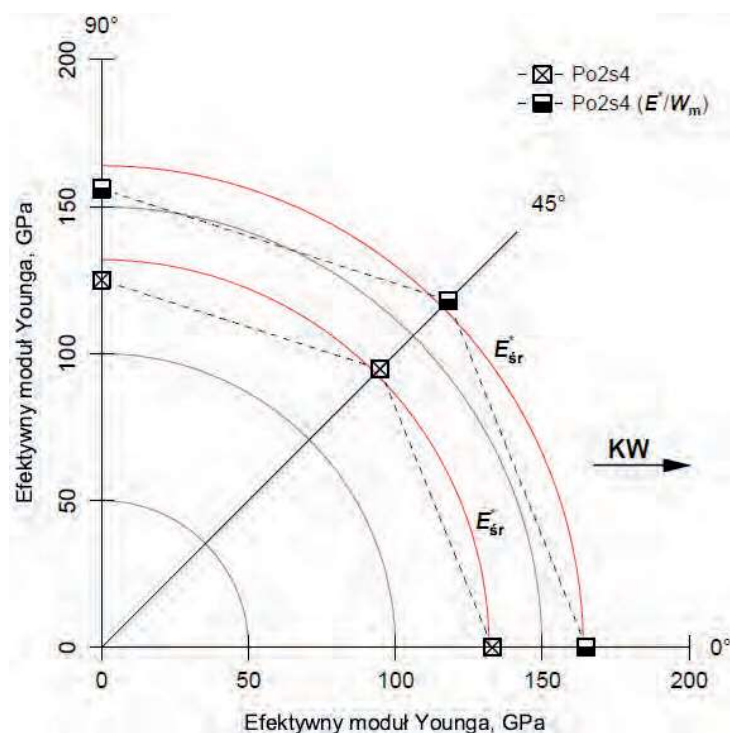


Fig. 12. Distribution of effective Young's modulus of perforated steel sheet (Po2s4) accounting for mass loss ratio  $W_m$

Rys. 12. Rozkład efektywnego modułu Younga stalowej blachy perforowanej (Po2s4) z uwzględnieniem wskaźnika ubytku masy  $W_m$

## Podsumowanie

Specyficzne właściwości blach perforowanych są determinowane rodzajem surowca macierzystego oraz geometrycznymi cechami siatki otworów. Korzystna charakterystyka mechaniczna w połączeniu z funkcjonalnością tych materiałów decyduje o ich wszechstronnym zastosowaniu. Poprzez właściwy dobór parametrów perforacji można zapewnić kontrolowany przepływ różnych substancji przez strukturę blachy perforowanej, co ma duże znaczenie np. w przemyśle wydobywczym, energetycznym i chemicznym. W wielu konstrukcjach, oprócz odpowiedniej sztywności i wytrzymałości, wymagana jest

także obniżona masa materiału. Dlatego dokonując analizy wybranych właściwości blachy perforowanej pod kątem jej przeznaczenia konstrukcyjnego, warto uwzględnić wpływ ubytku masy w wyniku perforacji na zmianę (obniżenie) określonych parametrów.

W pracy wyznaczono wartości efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej w płaszczyźnie stalowej blachy z prostym układem otworów cylindrycznych, rozpatrując charakterystyczne kierunki tej perforacji (0, 45 i 90°). Sztywność badanego materiału określono w próbie trójpunktowego gięcia, co dobrze odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacyjne blachy perforowanej, stosowanej często w postaci płaskiego arkusza (płyty). Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że rozkład efektywnego modułu Younga w płaszczyźnie blachy perforowanej (Po2s4) jest dość jednorodny. Nieco bardziej anizotropowy rozkład analizowanej stałej sprężystej uzyskano we wcześniejszej pracy dla tego samego materiału w warunkach jednoosiowego rozciągania, gdzie wartość tego parametru w kierunku diagonalnym 45° była zauważalnie niższa (o ok. 16%).

Badania efektywnego modułu Younga przeprowadzone na próbkach blachy perforowanej o różnej szerokości, przy zachowaniu periodyczności perforacji, nie wykazały istotnego wpływu tego parametru na otrzymane wyniki. Rozważano także wpływ ubytku masy blachy spowodowany perforacją na obniżenie jej sztywności. W tym celu

posłużono się wskaźnikiem masy  $W_m$ , który pozwala przeanalizować wybrane właściwości blachy perforowanej, uwzględniając jej obniżoną masę w stosunku do macierzystej blachy pełnej. Ponadto wskaźnik ten umożliwia porównanie blach z różną perforacją, zakładając ten sam rodzaj materiału bazowego oraz ich jednakową grubość, pod kątem efektywności ich reakcji na zadane obciążenie zewnętrzne.

*Praca została zrealizowana w ramach subwencji nr 16.16.180.006.*

*Otrzymano: 27-06-2024*

#### LITERATURA

- [1] A. Chudzik, *Przegl. Mech.* 2006, **9**, 45.
- [2] H. Achtelik, G. Gasiak, J. Grzelak, *Int. J. Pres. Ves. Pip.* 2008, **85**, nr 4, 248.
- [3] H. Achtelik, G. Gasiak, J. Grzelak, *Int. J. Pres. Ves. Pip.* 2008, **85**, nr 4, 257.
- [4] N. Kasahara, N. Kawasaki, T. Wakai, H. Takasho, *Mat. 19<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Toronto, August 12–17, 2007.
- [5] C. Juma, I. Namgung, *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2019, **9**, nr 12, 1567.
- [6] M. Blicharski, *Inżynieria materiałowa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2012.
- [7] W. Muzykiewicz, *Odształcalność blach perforowanych*, Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków 2013.
- [8] PN-EN ISO 7438:2006, *Metale. Próba zginania*.
- [9] E. Shapiro, [w:] *ASM handbook* (red. H. Kuhn, D. Medlin), t. 8, ASM International, Ohio 2000, 172.
- [10] W. Muzykiewicz, A. Rękas, G. Kosmowski, *Rudy Metale* 2006, **51**, nr 7, 422.
- [11] W. Muzykiewicz, M. Wieczorek, M. Mroczkowski, P. Pałka, Ł. Kuczek, *Obróbka Plastyczna Metali* 2016, **27**, nr 4, 283.

**Zapraszamy na nasz profil  
na portalu LinkedIn**

<https://www.linkedin.com/company/przemysl-chemiczny/>