

Raport z Analizy Odporności na Przebicie Blach Zimnogiętych ze Stali S350GD

Bartosz Majchrzak

INFORMACJE

Opracowanie raportu na zlecenie:



Słowa kluczowe:

Blachy profilowane na zimno

Połączenia śrubowe

Badanie na przebicie

Nośność charakterystyczna na

Przebicie otworów okrągłych i owalnych

Badania eksperymentalne

Analiza MES

STRESZCZENIE

W niniejszym raporcie przedstawiono zaktualizowane wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych dotyczących odporności na przebicie (przeciąganie śruby przez otwór) połączeń śrubowych w blachach zimnogiętych ze stali S350GD+ZN. Badania przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy EN 1993-1-3, która wskazuje na konieczność doświadczalnego określania tej właściwości dla cienkich blach. Celem pracy było zbadanie wpływu grubości blachy (1,5 mm, 2,0 mm, 3,0 mm), geometrii otworu (okrągłe $\varnothing$ 9 mm, $\varnothing$ 13 mm; owalne 9x30 mm, 13x40 mm, 13x70 mm, 13x80 mm), typu łącznika (śruby M8 A2, M12 kl. 8.8) oraz rodzaju podkładki / nakrętki (zwykła, powiększona, rombowa) na nośność połączenia i mechanizm jego zniszczenia. Wyniki eksperymentalne, w tym wartości charakterystyczne siły przebicia, poddano analizie statystycznej zgodnie z EN 1990 Aneks D, wyznaczając wartości średnie (F_m) i charakterystyczne (F_k) (5% kwantyl) siły przebicia. Równolegle przeprowadzono analizy numeryczne metodą elementów skończonych (MES) w programie RFEM 6. Materiał blach oraz podkładek przyjęto jako izotropowo plastyczny. Dla ich modelowania zastosowano dwa typy wykresów materiałowych: model dwuliniowy liniowo-sprężysty z minimalnym nachyleniem w zakresie plastycznym dla zapewnienia stabilności numerycznej oraz model krzywoliniowy typu Ramberg-Osgood. Śruby zamodelowano jako materiał izotropowy o charakterystyce liniowo – sprężystej. Modele materiałowe blach i podkładek skalibrowano na podstawie rzeczywistych właściwości materiału z atestów hutniczych. Porównanie wyników numerycznych z eksperymentalnymi pozwoliło na ocenę dokładności obu modeli materiałowych. Badania wykazały istotny, ilościowo określony wzrost nośności na przebicie wraz ze wzrostem grubości blachy. Istotny wpływ na nośność miały również pozostałe analizowane parametry, takie jak geometria otworu i typ podkładki. Model materiałowy Ramberg-Osgood generalnie lepiej odwzorowywał zachowanie połączeń w analizach numerycznych, wykazując lepsze dopasowanie do wyników eksperymentalnych i pozwalając na uzyskanie wyższych wartości nośności w porównaniu do modelu dwuliniowego.

1. Wprowadzenie

Blachy zimnogięte zyskują coraz większe znaczenie we współczesnym budownictwie, zwłaszcza w konstrukcjach wsporczych pod moduły fotowoltaiczne, dzięki takim zaletom jak wysoki stosunek wytrzymałości do masy, łatwość prefabrykacji oraz możliwość formowania złożonych i zoptymalizowanych przekrojów. Kluczowym elementem zapewniającym niezawodność i trwałość tego typu konstrukcji jest odpowiednie projektowanie połączeń, w których dominującą rolę odgrywają połączenia śrubowe.

Ze względu na małą grubość elementów zimnogiętych, jednym z istotnych stanów granicznych nośności połączenia jest przebicie, definiowane jako przeciągnięcie śruby wraz z podkładką (lub samego łba bądź nakrętki) przez otwór w blasze. Norma EN 1993-1-3, dotycząca projektowania elementów cienkościennych, nie zawiera bezpośrednich wzorów do obliczania nośności na przebicie dla połączeń w blachach o grubości mniejszej lub równej 3 mm. Zamiast tego wskazuje na konieczność jej wyznaczania w drodze badań eksperymentalnych.

Stanowi to istotne uzasadnienie dla przeprowadzonych badań, których celem jest dokładna ocena nośności połączeń śrubowych w cienkościennych konstrukcjach zimnogiętych stosowanych w systemach PV.

Głównymi celami niniejszej pracy są:

- Doświadczalne wyznaczenie odporności na przebicie dla różnych konfiguracji połączeń śrubowych w blachach zimnogiętych wykonanych ze stali S350GD.
- Szczegółowa analiza wpływu grubości blachy, geometrii otworu, rodzaju i wymiarów podkładki na wartość siły przebijającej oraz na obserwowany mechanizm zniszczenia.
- Opracowanie, kalibracja i walidacja modeli numerycznych metodą elementów skończonych (MES).
- Porównanie dwóch modeli materiałowych dla blach i podkładek (dwuliniowego i Ramberg-Osgood) oraz modelu liniowo-sprężystego dla śrub, wykorzystujących rzeczywiste właściwości materiałowe stali S350GD z atestów hutniczych.
- Sformułowanie wniosków i wstępnych zaleceń dotyczących projektowania połączeń śrubowych w blachach zimnogiętych, narażonych na zniszczenie przez przebicie, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu grubości blachy.

Zakres pracy obejmuje charakterystykę materiału badawczego, opis dwunastu serii badań eksperymentalnych, prezentację i analizę statystyczną wyników, opis analiz numerycznych MES, porównanie wyników symulacji z eksperymentami oraz dyskusję wyników i wnioski końcowe.

2. Przegląd Literatury i Podstawy Teoretyczne

2.1. Definicja i Mechanizmy Przebicia w Połączeniach Śrubowych

Przebicie (ang. pull-through failure lub bolt pull-through), w kontekście połączeń śrubowych elementów cienkościennych, definiuje się jako mechanizm zniszczenia, w którym trzpień śruby wraz z podkładką (lub w przypadku braku podkładki – łeb śruby lub nakrętka) zostaje przeciągnięty przez otwór wykonany w blasze. Jest to forma zniszczenia inicjowana przez siłę rozciągającą działającą w osi śruby, prowadząca do lokalnego zniszczenia materiału blachy wokół otworu.

2.2. Parametry Wpływające na Odporność na Przebicie

Odporność połączenia na przebicie jest funkcją wielu parametrów geometrycznych i materiałowych. Do najważniejszych z nich należą:

- Rodzaj, wymiary i materiał blachy.
- Kształt i wymiary otworu.
- Typ, wielkość i klasa łącznika.
- Rodzaj, wymiary i materiał podkładki.
- Odległości krawędziowe i między otworami.

Literatura dotycząca otworów owalnych lub powiększonych koncentruje się głównie na analizie połączeń narażonych na siły ścinające oraz na ich nośności na docisk, szczególnie w kontekście połączeń poślizgowych lub ułatwień montażowych. Natomiast wpływ takich niestandardowych otworów na odporność na przebicie, gdy siła działa osiowo na śrubę jest znacznie słabiej udokumentowany. To sprawia, że badania nad otworami owalnymi w tym zakresie są szczególnie istotne. Zmniejszona powierzchnia styku oraz zmodyfikowany rozkład naprężeń wokół otworu owalnego w porównaniu do otworu okrągłego mogą istotnie wpłynąć na nośność na przebicie.

2.3. Sposoby Określania Nośności na Przebicie Zgodnie z Normami

- EN 1993-1-3:2006 "Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych formowanych na zimno" nie zawiera bezpośrednich wzorów do obliczania nośności na przebicie dla połączeń śrubowych w blachach o grubości $t \leq 3$ mm. Jak zaznaczono w Uwadze do Tablicy 8.4: „Odporność na przeciąganie (pull-through) należy określać na podstawie badań. Nie dotyczy śrub.” Oznacza to, że w przypadku cienkich blach, w zakresie objętym tą normą, projektant musi opierać się na wynikach badań doświadczalnych, a nie na gotowych zależnościach obliczeniowych.
- EN 1993-1-8:2005 "Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów" zawiera ogólne wytyczne dotyczące projektowania połączeń śrubowych. Choć norma ta skupia się przede wszystkim na elementach o większej grubości, niektóre zasady dotyczące geometrii połączeń oraz rozkładu sił mogą być przydatne przy analizie zachowania cienkościennych elementów.

2.4. Metody Analizy Wyników Badań Eksperymentalnych

Analiza wyników badań eksperymentalnych ma na celu nie tylko określenie wartości sił niszczących, ale także zrozumienie mechanizmów zniszczenia i ocenę niezawodności uzyskanych danych.

- Określanie wartości charakterystycznych nośności:

- Zgodnie z EN 1990 "Podstawy projektowania konstrukcji", Aneks D "Projektowanie wspomagane badaniami", wartości charakterystyczne właściwości materiałowych lub nośności elementów, uzyskiwane z ograniczonej liczby badań, powinny być wyznaczane metodami statystycznymi.
- Podstawą jest obliczenie średniej arytmetycznej ($\bar{m}_x$) oraz odchylenia standardowego (s_x) z wyników serii badań.
- Wartość charakterystyczną, odpowiadającą 5% kwantylowi rozkładu (co oznacza, że istnieje 5% prawdopodobieństwa uzyskania wartości niższej), oblicza się często przy założeniu rozkładu normalnego jako: $X_k = \bar{m}_x - k_n \cdot s_x$ lub, jeśli znany jest współczynnik zmienności $V_x = s_x / \bar{m}_x$, jako $X_k = \bar{m}_x (1 - k_n \cdot V_x)$.
- Współczynnik k_n zależy od liczby próbek (n) w serii oraz od tego, czy współczynnik zmienności V_x jest znany z wcześniejszych badań, czy też jest estymowany na podstawie bieżącej, małej próby. Tabela D.1 w EN 1990 Aneks D podaje wartości k_n dla różnych n i obu przypadków V_x . Dla małej liczby próbek (np. $n=4$ lub $n=5$, jak w niniejszych badaniach) i przy założeniu nieznanego V_x (co jest bardziej ostrożne i typowe dla badań o charakterze poznawczym), wartości k_n są stosunkowo wysokie, co prowadzi do bardziej konserwatywnej oceny wartości charakterystycznej.

3. Program Badań Eksperymentalnych

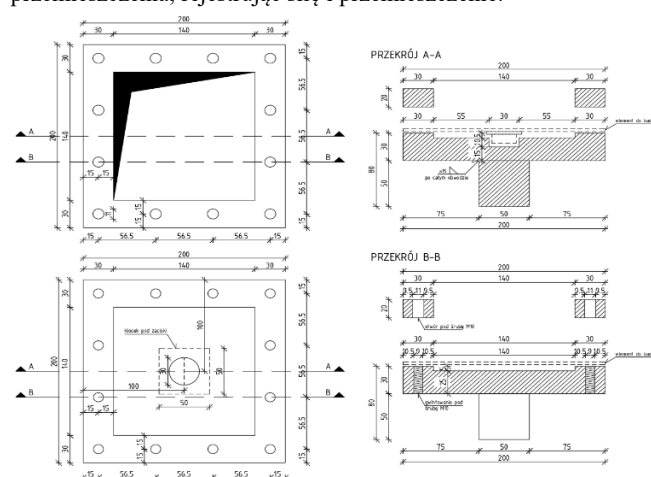
3.1. Materiał Badawczy

Na podstawie dostarczonych atestów określono następujące parametry materiałów:

- Blacha zimnocięta: Stal S350GD+ZN (ocynkowana) wg EN 10346, grubości 1,5 mm, 2,0 mm, 3,0 mm. Rzeczywiste właściwości mechaniczne (f_y , f_u) określono na podstawie atestów hutniczych wydanych przez ArcelorMittal:
- Dla $t=1,5$ mm (ArcelorMittal Liège): $f_y=361$ MPa, $f_u=465$ MPa.
- Dla $t=2,0$ mm (ArcelorMittal Gent): $f_y=372$ MPa, $f_u=482$ MPa.
- Dla $t=3,0$ mm (ArcelorMittal Bremen): $f_y \approx 378-384$ MPa, $f_u \approx 465-470$ MPa.
- Łączniki (Śruby): M8 A2 oraz M12 kl. 8.8 TZN.
- Podkładki: zwykła $\varnothing 16 \times 1,5$ A2, powiększona $\varnothing 24 \times 2$ A2, powiększona $\varnothing 36 \times 3$ TZN.
- Nakrętka: Rombowa $4 \times 15 \times 58$ S350GD+ZN.

3.2. Stanowisko Badawcze i Metodyka

Badania przeprowadzono na maszynie Zwick Roell Z250. Próbkę mocowano w specjalnie zaprojektowanym uchwycie, zapewniając osiowe przyłożenie siły. Testy prowadzono w trybie kontroli przemieszczenia, rejestrując siłę i przemieszczenie.



Rys. 3.1 Geometria uchwytu mocującego próbki do badań.

3.3. Konfiguracje Próbek

Program badawczy obejmował dwanaście różnych serii (konfiguracji) próbek, zaprojektowanych w celu zbadania wpływu kluczowych parametrów na odporność na przebicie. Dla każdej serii wykonano od 4 do 5 identycznych próbek, co jest liczbą niewielką z punktu widzenia pełnej analizy statystycznej według EN 1990 Aneks D, szczególnie przy założeniu nieznanego współczynnika zmienności, co skutkuje wyższymi wartościami współczynnika k_n i bardziej konserwatywną oceną nośności charakterystyczne.

Tabela 3.1 Zestawienie konfiguracji badanych próbek.

Nr serii	Grubość blachy [mm]	Kształt i wymiary otworu [mm]	Śruba	Podkładka/Nakrętka	Liczba próbek n
1	1,5	owalny 13x80	M8 A2	rombowa 4x15x58, S350	5
2	1,5	okrągły $\varnothing 9$	M8 A2	zwykła 1,5x16, A2	5
3	1,5	owalny 9x30	M8 A2	powiększona 2x24, A2	5
4	2,0	owalny 13x40	M12 kl.8.8	Powiększona 3x36, TZN	5
5	2,0	owalny 13x70	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5
6	3,0	owalny 13x40	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5
7	3,0	owalny 13x70	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5
8	1,5	owalny 13x40	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5
9	1,5	owalny 13x70	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5
10	1,5	okrągły $\varnothing 13$	M12 kl.8.8	brak	5
11	2,0	okrągły $\varnothing 13$	M12 kl.8.8	brak	5
12	3,0	okrągły $\varnothing 13$	M12 kl.8.8	brak	5

4. Analiza i Interpretacja Wyników Badań Eksperymentalnych

4.1. Prezentacja Wyników

Wyniki badań eksperymentalnych dla wszystkich dwunastu serii zostały przedstawione w formie wykresów siła–przemieszczenie. Dla każdej serii, na wykresach (Załącznik nr 1) naniesiono krzywe zarejestrowane dla poszczególnych próbek (P1-P12), obliczoną średnią arytmetyczną siłę przebicia (F_m), wartość charakterystyczną siły przebicia (F_k) oraz dla celów porównawczych, krzywe uzyskane z symulacji numerycznych MES dla modelu dwuliniowego i modelu Ramberga-Osgooda. Dodatkowo na wykresach zaznaczono linie odpowiadające 1%, 2,5% oraz 5% odkształceń plastycznych obliczonych w modelu MES. Fotografie przedstawiające zniszczone próbki zamieszczono w Załączniku nr 3.

4.2. Analiza Statystyczna Wyników

W celu obiektywnej oceny nośności na przebicie, wyniki badań poddano analizie statystycznej zgodnie z wytycznymi zawartymi w EN 1990 Aneks D.

Dla każdej serii badawczej obliczono:

- Średnią arytmetyczną siłę przebicia (F_m).
- Odchylenie standardowe siły przebicia (s_F).
- Wartość charakterystyczną siły przebicia (F_k), odpowiadającą 5% kwantylowi, przy założeniu nieznanego współczynnika

zmienności V_x (co jest uzasadnione małą liczbą próbek w seriach).

Wartość charakterystyczną obliczono ze wzoru: $F_k = F_m - k_n \cdot s_F$ gdzie współczynnik k_n przyjęto z Tablicy D.1 normy EN 1990. Dla wszystkich dwunastu serii wykonano po 5 próbek ($n=5$), zatem współczynnik k_n wynosi 2,33.

Dla każdej serii przygotowano 5 identycznych próbek. Jest to mała liczba z perspektywy pełnej analizy statystycznej według EN 1990 Aneks D, szczególnie przy nieznanym współczynniku zmienności. Skutkuje to koniecznością przyjęcia wyższych wartości współczynnika k_n i co za tym idzie, bardziej konserwatywnym oszacowaniem nośności charakterystycznej.

Średnia arytmetyczna (F_m) reprezentuje najbardziej prawdopodobną wartość nośności. Natomiast wartość charakterystyczna (F_k), stosowana do celów projektowych, jest ostrożnym oszacowaniem uwzględniającym zmienność wyników, ograniczoną liczbę danych i zapewniającym wymagany poziom niezawodności. Zestawienie obliczonych wartości F_m , s_F oraz F_k dla wszystkich dwunastu serii przedstawiono w Załączniku nr 2.

4.3. Wpływ Grubości Blachy na Siłę Przebicia

Analizę wpływu grubości blachy na siłę przebicia przeprowadzono porównując wyniki dla serii o tej samej geometrii otworu i typie podkładki, ale różniących się grubością blachy (1,5 mm, 2,0 mm, 3,0 mm).

4.3.1. Otwory owalne 13x40 mm z podkładką powiększoną 3x36 TZN (śruba M12 kl. 8.8)

Porównano Serię 8 ($t=1,5$ mm), Serię 4 ($t=2,0$ mm) oraz Serię 6 ($t=3,0$ mm):

- Seria 8 ($t=1,5$ mm): $F_m=16,99$ kN, $F_k=13,60$ kN.
- Seria 4 ($t=2,0$ mm): $F_m=23,66$ kN, $F_k=17,90$ kN.
- Seria 6 ($t=3,0$ mm): $F_m=32,97$ kN, $F_k=26,00$ kN.

Obserwuje się istotny wzrost nośności wraz ze wzrostem grubości blachy. Zwiększenie grubości z 1,5 mm do 2,0 mm skutkuje wzrostem F_m o ok. 39,3% i F_k o ok. 31,6%. Dalsze zwiększenie grubości z 2,0 mm do 3,0 mm prowadzi do wzrostu F_m o ok. 39,4% i F_k o ok. 45,3%.

4.3.2. Otwory owalne 13x70 mm z podkładką powiększoną 3x36 TZN (śruba M12 kl. 8.8)

Porównano Serię 9 ($t=1,5$ mm), Serię 5 ($t=2,0$ mm) oraz Serię 7 ($t=3,0$ mm):

- Seria 9 ($t=1,5$ mm): $F_m=14,21$ kN, $F_k=10,30$ kN.
- Seria 5 ($t=2,0$ mm): $F_m=18,19$ kN, $F_k=11,35$ kN.
- Seria 7 ($t=3,0$ mm): $F_m=27,61$ kN, $F_k=22,60$ kN.

W tym przypadku również widoczny jest znaczący wzrost nośności. Zwiększenie grubości z 1,5 mm do 2,0 mm powoduje wzrost F_m o ok. 28,0% i F_k o ok. 10,2%. Zwiększenie grubości z 2,0 mm do 3,0 mm skutkuje wzrostem F_m o ok. 51,8% i F_k o ok. 99,1%.

4.3.3. Otwory okrągłe $\varnothing 13$ mm bez podkładki (śruba M12 kl. 8.8)

Porównano Serię 10 ($t=1,5$ mm), Serię 11 ($t=2,0$ mm) oraz Serię 12 ($t=3,0$ mm):

- Seria 10 ($t=1,5$ mm): $F_m=13,00$ kN, $F_k=12,83$ kN.
- Seria 11 ($t=2,0$ mm): $F_m=18,39$ kN, $F_k=17,14$ kN.
- Seria 12 ($t=3,0$ mm): $F_m=30,70$ kN, $F_k=29,88$ kN.

Dla połączeń bez podkładki z otworem okrągłym $\varnothing 13$ mm i śrubą M12, zwiększenie grubości blachy z 1,5 mm do 2,0 mm skutkuje wzrostem F_m o ok. 41,5% i F_k o ok. 33,6%. Dalsze zwiększenie grubości z 2,0 mm do 3,0 mm prowadzi do wzrostu F_m o ok. 66,9% i F_k o ok. 74,3%.

4.4. Wpływ Geometrii Otworu na Siłę Przebicia

Analiza wpływu geometrii otworu jest bardziej złożona ze względu na jednoczesne zmiany innych parametrów (typ śruby, rodzaj podkładki). Poniżej przedstawiono wybrane porównania dla poszczególnych grubości blach.2.

4.4.1. Porównanie dla blachy $t=1,5$ mm

Otwór okrągły $\varnothing 9$ mm vs. owalny 9×30 mm (śruba M8 A2):

- Seria 2 (okrągły $\varnothing 9$ mm, podkładka zwykła $1,5 \times 16$ A2): $F_m = 11,72$ kN, $F_k = 10,54$ kN.
- Seria 3 (owalny 9×30 mm, podkładka powiększona 2×24 A2): $F_m = 8,10$ kN, $F_k = 7,18$ kN.

Wyniki wykazały, że Seria 3 (otwór owalny) charakteryzuje się niższą nośnością (o ok. 31% F_m i 32% F_k) w porównaniu do Serii 2 (otwór okrągły), mimo zastosowania powiększonej podkładki w Serii 3. Wydłużenie otworu przy tej samej szerokości miało niekorzystny wpływ.

4.4.2. Porównanie dla blachy $t=1,5$ mm

Porównanie dla blachy $t=2,0$ mm (śruba M12 kl. 8.8):

- Seria 4 (13×40 mm): $F_m = 23,66$ kN, $F_k = 17,90$ kN.
- Seria 5 (13×70 mm): $F_m = 18,19$ kN, $F_k = 11,35$ kN.

Dłuższy otwór owalny (13×70 mm) skutkuje niższą nośnością (F_m niższa o ok. 23,1%, F_k niższa o ok. 36,6%) w porównaniu do krótszego otworu (13×40 mm) przy tej samej szerokości i podkładce.

Otwór owalny (np. 13×40 mm, z podkładką) vs. okrągły $\varnothing 13$ mm (bez podkładki):

- Seria 4 (owalny 13×40 mm, podkł. powiększ.): $F_m = 23,66$ kN, $F_k = 17,90$ kN.
- Seria 11 (okrągły $\varnothing 13$ mm, bez podkł.): $F_m = 18,39$ kN, $F_k = 17,14$ kN.

Połączenie z otworem okrągłym bez podkładki (Seria 11) wykazuje niższą średnią nośność (F_m niższa o ok. 22,3%) niż połączenie z otworem owalnym 13×40 mm, ale z dużą podkładką (Seria 4). Wartości charakterystyczne są jednak zbliżone (F_k niższa tylko o ok. 4,2%), co może wynikać z mniejszego rozrzutu wyników dla Serii 1.

4.4.3. Porównanie dla blachy $t=3,0$ mm (śruba M12 kl. 8.8)

Otwór owalny 13×40 mm vs. owalny 13×70 mm (oba z podkładką powiększoną 3×36 TZN):

- Seria 6 (13×40 mm): $F_m = 32,97$ kN, $F_k = 26,00$ kN.
- Seria 7 (13×70 mm): $F_m = 27,61$ kN, $F_k = 22,60$ kN.

Podobnie jak dla $t=2,0$ mm, dłuższy otwór owalny (13×70 mm) prowadzi do niższej nośności (F_m niższa o ok. 16,3%, F_k niższa o ok. 13,1%) w porównaniu do krótszego (13×40 mm).

Otwór owalny (np. 13×40 mm, z podkładką) vs. okrągły $\varnothing 13$ mm (bez podkładki):

- Seria 6 (owalny 13×40 mm, podkł. powiększ.): $F_m = 32,97$ kN, $F_k = 26,00$ kN.
- Seria 12 (okrągły $\varnothing 13$ mm, bez podkł.): $F_m = 30,70$ kN, $F_k = 29,88$ kN.

Połączenie z otworem okrągłym $\varnothing 13$ mm bez podkładki (Seria 12) ma nieznacznie niższą średnią nośność (F_m niższa o ok. 6,9%) niż połączenie z otworem owalnym 13×40 mm z podkładką (Seria 6). Co ciekawe, wartość charakterystyczna F_k dla Serii 12 jest wyższa o ok. 14,9% niż dla Serii 6, co wynika z bardzo małego rozrzutu wyników dla Serii 12 ($sF=0,35$ kN) w porównaniu do Serii 6 ($sF=3,00$ kN).

4.5. Wpływ Rodzaju i Obecności Podkładki na Siłę Przebicia

4.5.1. Porównanie wpływu braku podkładki (śruba M12 kl. 8.8, otwór okrągły $\varnothing 13$ mm)

Serie 10, 11, 12 badano bez podkładek, gdzie łeb śruby M12 opierał się bezpośrednio na blasze.

- Dla $t=1,5$ mm (Seria 10): $F_m=13,00$ kN, $F_k=12,83$ kN.
- Dla $t=2,0$ mm (Seria 11): $F_m=18,39$ kN, $F_k=17,14$ kN.
- Dla $t=3,0$ mm (Seria 12): $F_m=30,70$ kN, $F_k=29,88$ kN.

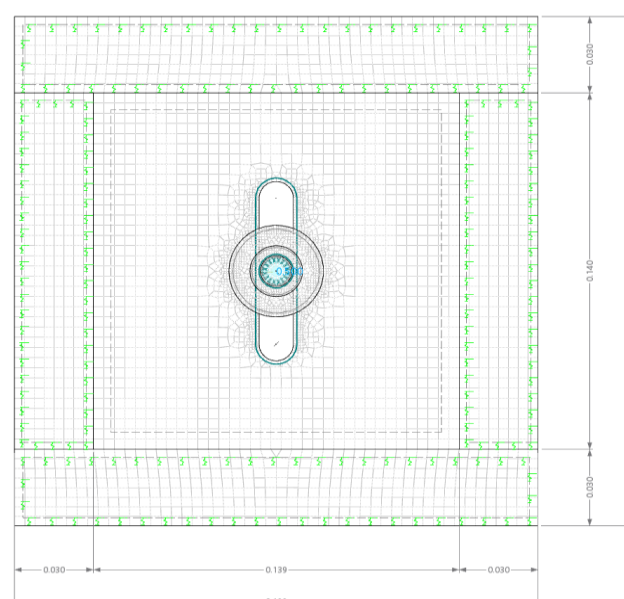
Porównując np. Serię 11 ($t=2,0$ mm, $\varnothing 13$ mm, bez podkł.) z Serią 4 ($t=2,0$ mm, owalny 13×40 , podkł. powiększ. 3×36), gdzie $F_m = 23,66$ kN, widać, że zastosowanie dużej podkładki w Serii 4 znacząco zwiększyło średnią nośność (o ok. 28,7%) w porównaniu do sytuacji bez podkładki, nawet przy otworze owalnym. Podobnie dla $t=3,0$ mm, porównując Serię 12 (bez podkł., $F_m=30,70$ kN) z Serią 6 (owalny 13×40 , podkł. powiększ., $F_m=32,97$ kN), zastosowanie podkładki dało niewielki wzrost średniej nośności (o ok. 7,4%), ale należy pamiętać o różnicy w kształcie otworu.

5. Modelowanie Numeryczne MES w Programie RFEM 6

5.1. Opis Modelu MES

Analizy numeryczne zjawiska przebicia przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania RFEM 6, bazującego na metodzie elementów skończonych (MES). Dla wszystkich dwunastu serii badawczych zastosowano spójne podejście do modelowania poszczególnych komponentów połączenia. Blachy oraz podkładki (w seriach, gdzie występowały) modelowano przy użyciu elementów powłokowych, natomiast śruby (zarówno trzpień, jak i łeb) reprezentowano przez elementy prętowe oraz elementy powłokowe dla łba w celu lepszego odwzorowania powierzchni kontaktu Geometria modeli MES dokładnie odwzorowywała wymiary próbek badawczych z poszczególnych serii, w tym zróżnicowane kształty i wymiary otworów (okrągłe, owalne).

Warunki brzegowe oraz sposób przyłożenia obciążenia w modelach numerycznych zostały zdefiniowane tak, aby jak najwierniej symulować warunki panujące podczas badań eksperymentalnych. Zastosowano sprężyste podparcia dla blachy, a osiowe obciążenie rozciągające przykładano do śruby.



Rys. 5.1 Siatka elementów skończonych dla próbki Serii 5.

Kluczowym aspektem modelowania było zdefiniowanie interakcji kontaktowych pomiędzy poszczególnymi elementami: blachą a podkładką (lub łbem śruby w przypadku braku podkładki), podkładką a łbem śruby oraz trzpieniem śruby a krawędzią otworu

w blasze. Zastosowano odpowiednie nieliniowości kontaktu, uwzględniające tarcie i możliwość separacji powierzchni.

Siatka elementów skończonych została odpowiednio zagęszczona w strefach krytycznych, tj. wokół otworu w blasze oraz w obszarze kontaktu z podkładką i śrubą, w celu uzyskania dokładnych wyników dotyczących koncentracji naprężeń i odkształceń.

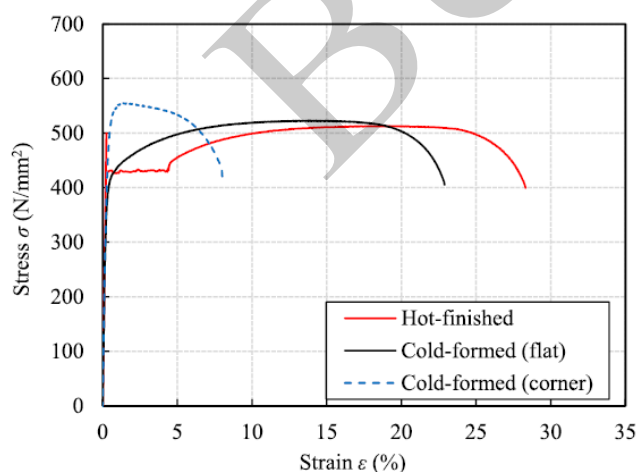
5.2. Modele Materiałowe

Dokładne odwzorowanie właściwości materiałowych stali S350GD, z której wykonano badane blachy, miało kluczowe znaczenie dla wiarygodności wyników analiz numerycznych.

W ramach pracy rozważono trzy modele konstytutywne materiału. Dla dwóch z nich parametry zostały skalibrowane na podstawie rzeczywistych właściwości mechanicznych stali, określonych w atestach hutniczych:

- Model dwuliniowy z poziomą półką plastyczną (Bilinear with horizontal plastic plateau) – uproszczony model, w którym materiał zachowuje się liniowo-sprężyste aż do osiągnięcia granicy plastyczności (f_y), po czym następuje idealnie plastyczne płynięcie przy stałym naprężeniu. W celu zapewnienia stabilności obliczeniowej, w programie RFEM wprowadzono niewielkie nachylenie półki plastycznej (moduł umocnienia $E_p = E/100000$). Model definiują dwa główne parametry: moduł Younga (E) oraz granica plastyczności (f_y) uzyskana z atestu.
- Krzywoliniowy model Ramberga-Osgooda – bardziej zaawansowany model opisujący nieliniowe zachowanie stali, z płynnym przejściem od stanu sprężystego do plastycznego oraz uwzględnieniem umocnienia po przekroczeniu granicy plastyczności. Model ten opiera się na module Younga (E), umownej granicy plastyczności f_y oraz parametrze krzywizny n oraz m .

Zjawisko przebiecia jest z natury procesem, w którym dochodzi do dużych lokalnych odkształceń plastycznych i potencjalnie do rozerwania materiału. Model dwuliniowy z poziomą półką plastyczną może niedoszacować nośności, jeśli umocnienie materiału odgrywa znaczącą rolę. Jak wskazują źródła, obróbka na zimno (np. wykrawanie otworów, bądź gięcie) może podnieść lokalnie granicę plastyczności i wytrzymałość.



Rys. 5.2 Typowe krzywe naprężenia-odkształcenia dla materiałów stalowych gorąco walcowanych i formowanych na zimno. Źródło: Structures Volume 68, October 2024, 107192.

Model Ramberg-Osgood jest w stanie lepiej uchwycić to zjawisko, jak również łagodne przejście w zakres plastyczny, co powinno prowadzić do dokładniejszego odwzorowania zachowania połączenia aż do momentu zniszczenia.

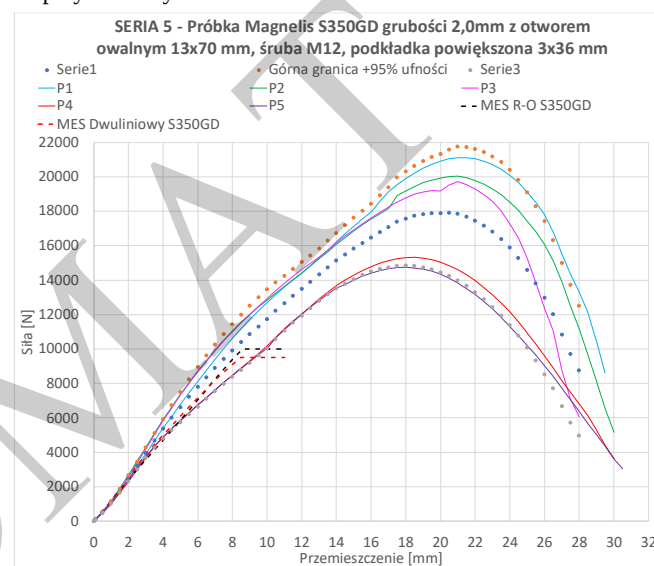
Dokument prEN 1993-1-14 zaleca stosowanie dwustopniowego modelu Ramberga-Osgooda w przypadku stali formowanej na zimno.

5.3. Odniesienie do Normy EN 1993-1-14

Przy opracowywaniu i walidacji modeli numerycznych MES kierowano się zasadami zawartymi w projekcie normy prEN 1993-1-14 "Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-14: Projektowanie wspomagane analizą z wykorzystaniem elementów skończonych". Norma ta dostarcza wytycznych dotyczących m.in. modelowania materiału, analizy nieliniowej, weryfikacji modeli oraz interpretacji wyników w kontekście stanów granicznych nośności i użyteczności.

6. Korelacja Wyników Numerycznych z Eksperymentalnymi

Podstawowym krokiem walidacji modeli numerycznych było porównanie uzyskanych z nich wyników z wynikami badań eksperymentalnych.



Rys. 6.1 Krzywa naprężenie-odkształcenie próby eksperymentalnej dla Serii 4 z naniesionymi krzywymi z modelu numerycznego.

Porównanie to obejmowało:

- Krzywe siła-przesunięcie – zestawienie krzywych uzyskanych z symulacji MES (dla obu modeli materiałowych) z krzywymi średnimi z badań eksperymentalnych dla poszczególnych serii. Wykresy te przedstawiono w Załączniku nr 1.
- Siły maksymalne (nośności na przebiecie) – porównanie wartości sił maksymalnych $F_{max,FEA}$ z wartościami średnimi $F_{m,exp}$.
- Mechanizmy zniszczenia – jakościowa ocena, czy modele MES są w stanie odwzorować obserwowane w eksperymentach formy zniszczenia (na podstawie analizy odkształceń i naprężeń w modelu oraz porównania z fotografiami zniszczonych próbek z Załącznika nr 3).

Na podstawie analizy wykresów siła-przesunięcie uzyskanych w badaniach laboratoryjnych oraz wyników symulacji numerycznych (Załącznik nr 1) można stwierdzić, że oba zastosowane modele materiałowe dla blach i podkładek (dwuliniowy i Ramberg-Osgood) generalnie poprawnie odwzorowują zakres nośności badanych próbek. Jednakże, lepszą zgodność z wynikami eksperymentalnymi, szczególnie w zakresie sztywności początkowej, nieliniowego zachowania przed osiągnięciem siły maksymalnej oraz samej wartości siły maksymalnej, wykazuje model R-O. Model ten, dzięki dokładniejszemu odwzorowaniu krzywej umocnienia materiału formowanego na zimno, pozwala na uzyskanie bardziej realistycznych wyników, zwłaszcza w zakresie dużych odkształceń plastycznych poprzedzających zniszczenie. Model dwuliniowy,

z uwagi na swoją uproszczoną charakterystykę, często prowadził do nieznacznego zaniżenia przewidywanej nośności w porównaniu do wyników eksperymentalnych i modelu R-O.

7. Wnioski Końcowe i Rekomendacje

7.1. Podsumowanie Kluczowych Ustaleń

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analiz numerycznych dotyczących odporności na przebicie połączeń śrubowych w blachach zimnogiętych ze stali S350GD, sformułowano następujące kluczowe ustalenia:

- **Wpływ grubości blachy:** Potwierdzono istotny, pozytywny wpływ grubości blachy w stosunku do wielkości otworu na nośność na przebicie. Dla wszystkich analizowanych geometrii otworów (owalne 13x40 mm i 13x70 mm z podkładką powiększoną oraz okrągłe Ø13 mm bez podkładki) zaobserwowano znaczący wzrost zarówno średniej (F_m), jak i charakterystycznej (F_k) siły przebicia wraz ze wzrostem grubości blachy z 1,5 mm przez 2,0 mm do 3,0 mm (porównanie Serii 8, 4, 6; Serii 9, 5, 7; oraz Serii 10, 11, 12).
- **Wpływ geometrii otworu:** Geometria otworu ma znaczący wpływ na nośność. Generalnie, otwory owalne, szczególnie o większej długości w stosunku do szerokości, wykazywały tendencję do niższych nośności w porównaniu do otworów okrągłych o zbliżonej szerokości lub połączeń z lepiej dopasowanymi podkładkami (np. porównanie Serii 2 i 3; Serii 8 i 9; Serii 4 i 5; Serii 6 i 7). Wpływ ten jest jednak silnie powiązany z typem i rozmiarem zastosowanej podkładki oraz średnicą śruby.
- **Wpływ podkładki/nakrętki:** Rodzaj, wymiary i sama obecność podkładki odgrywają kluczową rolę. Stosowanie podkładek, zwłaszcza powiększonych, generalnie prowadzi do zwiększenia nośności poprzez lepszą redystrybucję naprężeń i zwiększenie powierzchni oddziaływania na blachę (porównanie Serii 1, 2, 3; Serii 4-9 vs Serie 10-12). Połączenia bez podkładek (Serie 10-12) wykazały, że łeb śruby M12 jest w stanie przenieść znaczne siły, jednak nośności te były generalnie niższe lub porównywalne (w zależności od grubości blachy i rozrzutu wyników) z konfiguracjami z podkładkami i otworami owalnym. Badania potwierdzają, że należy zawsze dążyć do stosowania podkładek w szczególności dla blach o grubości mniejszej niż 3,0 mm.
- **Zgodność modeli MES:** Potwierdzono dobrą ogólną zgodność wyników modeli numerycznych z wynikami badań laboratoryjnych, co wskazuje na duży potencjał tej metody w projektowaniu węzłów o złożonej geometrii.
- **Dokładność modeli materiałowych:** Numeryczne analizy MES, wykorzystujące krzywoliniowy model materiałowy Ramberga-Osgooda skalibrowany na podstawie rzeczywistych danych, lepiej odwzorowywały zarówno krzywe siła-przemieszczenie, jak i wartości maksymalnej nośności w porównaniu do uproszczonego modelu dwuliniowego z poziomą półką plastyczną – szczególnie w zakresie dużych odkształceń plastycznych. Model Ramberga-Osgooda generalnie pozwalał na uzyskanie wyższych (i bliższych eksperymentalnym) wartości nośności.

7.2. Wnioski Dotyczące Odporności na Przebicie Badanych Próbek

Jednym z nadrzędnych wniosków jest potwierdzenie stanowiska normy EN 1993-1-3, że odporność na przebicie jest silnie zależna od konkretnej konfiguracji połączenia. Przeprowadzone badania

wyraźnie demonstrują tę wrażliwość, co podkreśla znaczenie indywidualnej oceny dla niestandardowych lub krytycznych zastosowań.

7.3. Rekomendacje Projektowe

Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następujące wstępne rekomendacje projektowe dla połączeń śrubowych w blachach zimnogiętych, narażonych na przebicie (z zastrzeżeniem ograniczonego zakresu badań):

- Należy zawsze dążyć do stosowania podkładek, szczególnie w przypadku otworów owalnych lub powiększonych, oraz gdy stosowane są cieńsze blachy. Podkładki powinny mieć możliwie dużą powierzchnię i odpowiednią grubość (sztywność), aby efektywnie rozkładać obciążenie i zwiększać nośność na przebicie. Porównanie wyników np. Serii 4 (z podkładką) i Serii 11 (bez podkładki) dla blachy 2mm i śruby M12 wskazuje na korzyści płynące z zastosowania podkładki, nawet jeśli otwór jest owalny.
- Analiza numeryczna, po odpowiedniej kalibracji i walidacji (np. z wykorzystaniem modelu Ramberga-Osgooda), stanowi cenne narzędzie wspomagające identyfikację najbardziej korzystnych konfiguracji otwór-podkładka oraz ocenę nośności połączeń, dla których brakuje danych eksperymentalnych. Umożliwia ona porównanie skuteczności różnych typów podkładek.
- Zdecydowanie zaleca się przeprowadzanie weryfikacji eksperymentalnej odporności na przebicie dla konfiguracji połączeń nieobjętych wcześniejszymi badaniami lub odbiegających od typowych rozwiązań, zgodnie z duchem normy EN 1993-1-3, szczególnie dla krytycznych elementów konstrukcyjnych.
- Przy projektowaniu połączeń z otworami okrągłymi bez podkładek (jak w Seriach 10-12), należy zwrócić uwagę na stosunkowo niewielki rozrzut wyników, co może prowadzić do korzystniejszych wartości charakterystycznych, jednakże sama nośność może być niższa niż w przypadku zastosowania odpowiedniej podkładki.

7.4. Propozycje Dalszych Badań

W celu pełniejszego zrozumienia zjawiska przebicia w połączeniach śrubowych blach zimnogiętych oraz rozszerzenia bazy danych do opracowywania bardziej precyzyjnych zaleceń projektowych, proponuje się następujące kierunki dalszych badań:

- Rozszerzenie programu badawczego o dodatkowe grubości blach, inne kształty i wymiary otworów (np. otwory okrągłe o większych średnicach, inne proporcje otworów owalnych), różne typy i klasy wytrzymałościowe śrub oraz inne rodzaje i materiały podkładek.
- Analiza wpływu odległości krawędziowych i międzyosiowych otworów na nośność i mechanizm zniszczenia przez przebicie, szczególnie dla grup śrub.
- Zbadanie wpływu obciążeń cyklicznych lub zmęczeniowych na odporność na przebicie, co jest istotne w konstrukcjach narażonych na tego typu oddziaływanie.
- Badania odporności na przebicie w rzeczywistych elementach konstrukcyjnych (np. w połączeniach płatwi z krokwią), a nie tylko na wyizolowanych próbkach, w celu uwzględnienia rzeczywistych warunków brzegowych i interakcji między elementami.
- Dokładniejsze zbadanie współczynnika tarcia między współpracującymi powierzchniami (blacha-podkładka, podkładka-łeb śruby) i jego wpływu na wyniki analiz MES oraz rzeczywistą nośność.

- Opracowanie i walidacja uproszczonych modeli analitycznych do szacowania nośności na przebiecie dla typowych konfiguracji, bazujących na zgromadzonych danych eksperymentalnych i numerycznych.

Oświadczenie o autorstwie

Bartosz Majchrzak- Pisanie – oryginalny projekt, Wizualizacja, Walidacja, Oprogramowanie, Metodologia, Badanie, Analiza formalna, Gromadzenie danych, Nadzór.

Oświadczenie o konflikcie interesów

Autor oświadcza, że nie występują żadne znane mu konflikty interesów – zarówno finansowe, jak i osobiste – które mogłyby wpłynąć na treść i wyniki przedstawione w niniejszym raporcie.

Podziękowania

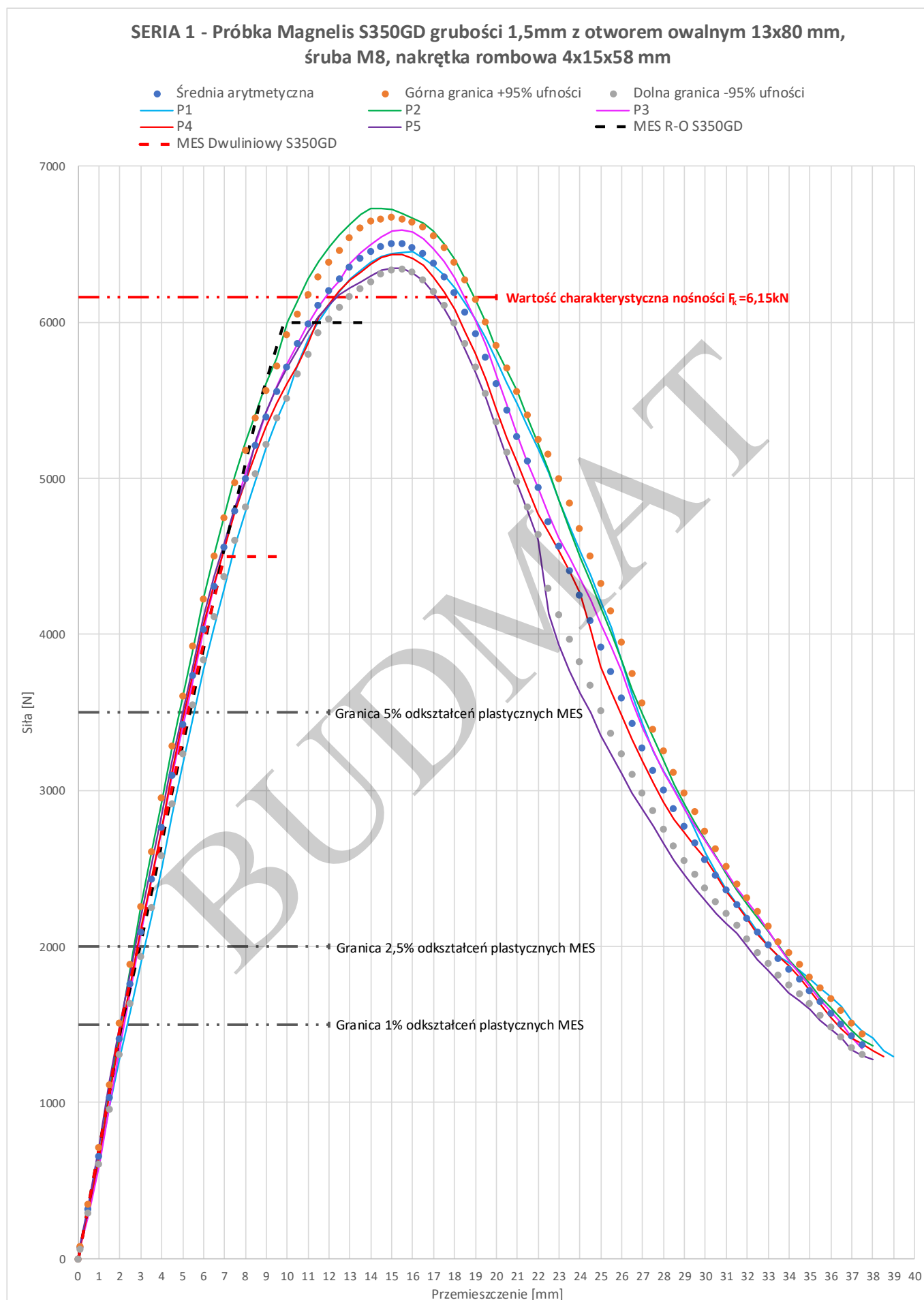
Autor składa serdeczne podziękowania firmie BUDMAT Bogdan Więcek za dostarczenie materiałów do badań oraz za udostępnienie laboratorium badawczego, co umożliwiło przeprowadzenie prób wytrzymałościowych.

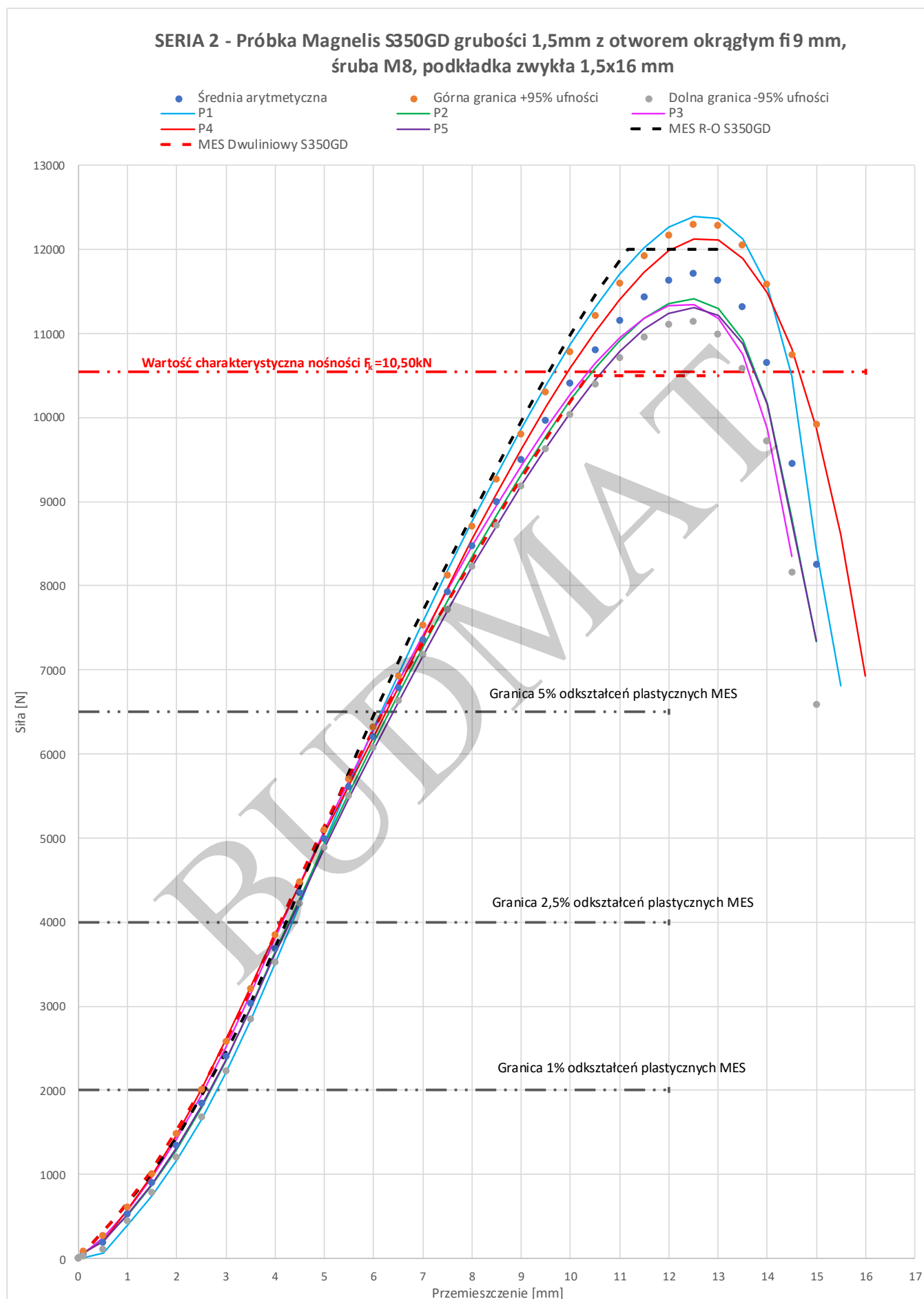
BUDMAT

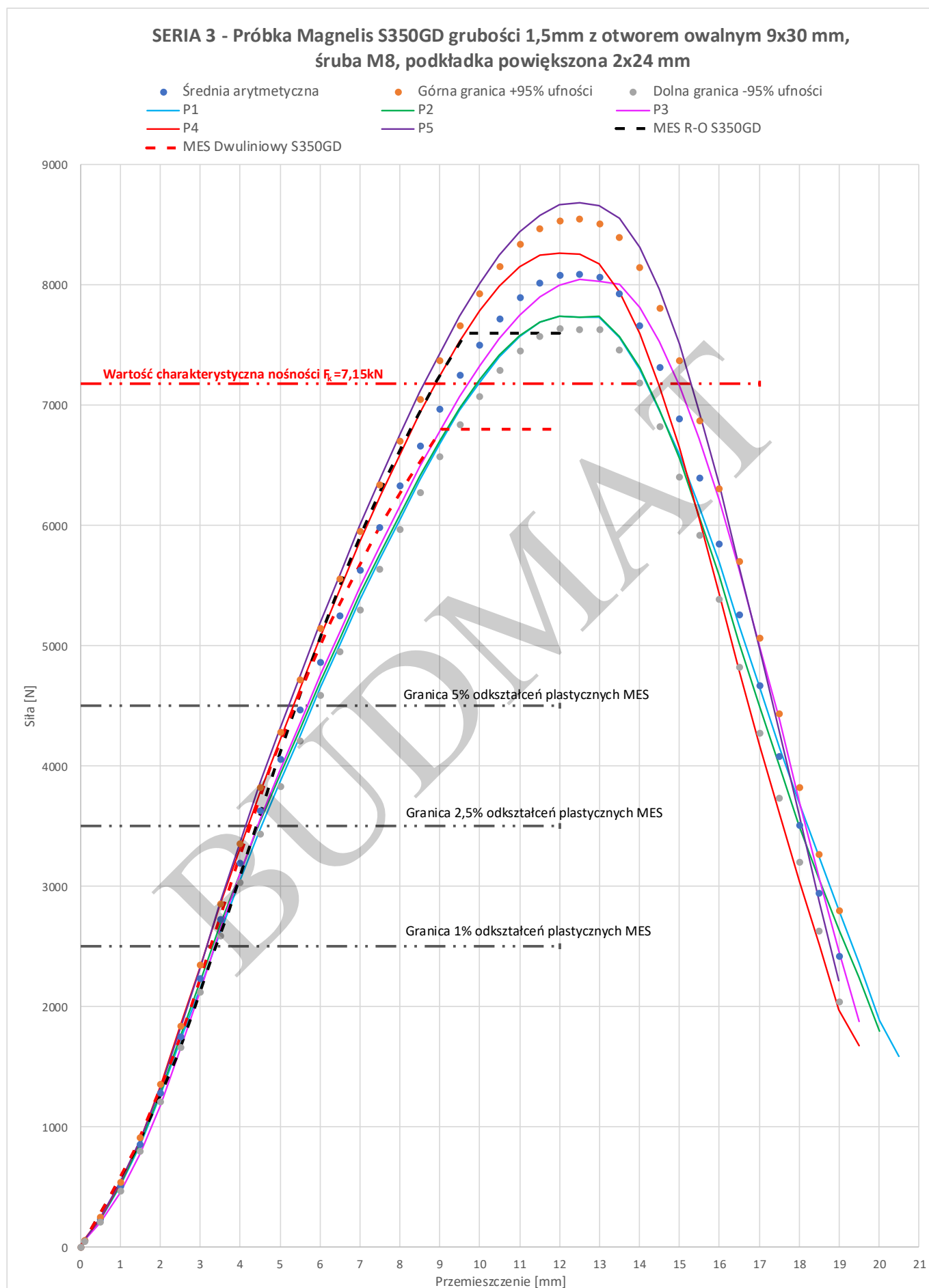
ZAŁĄCZNIK NR 1

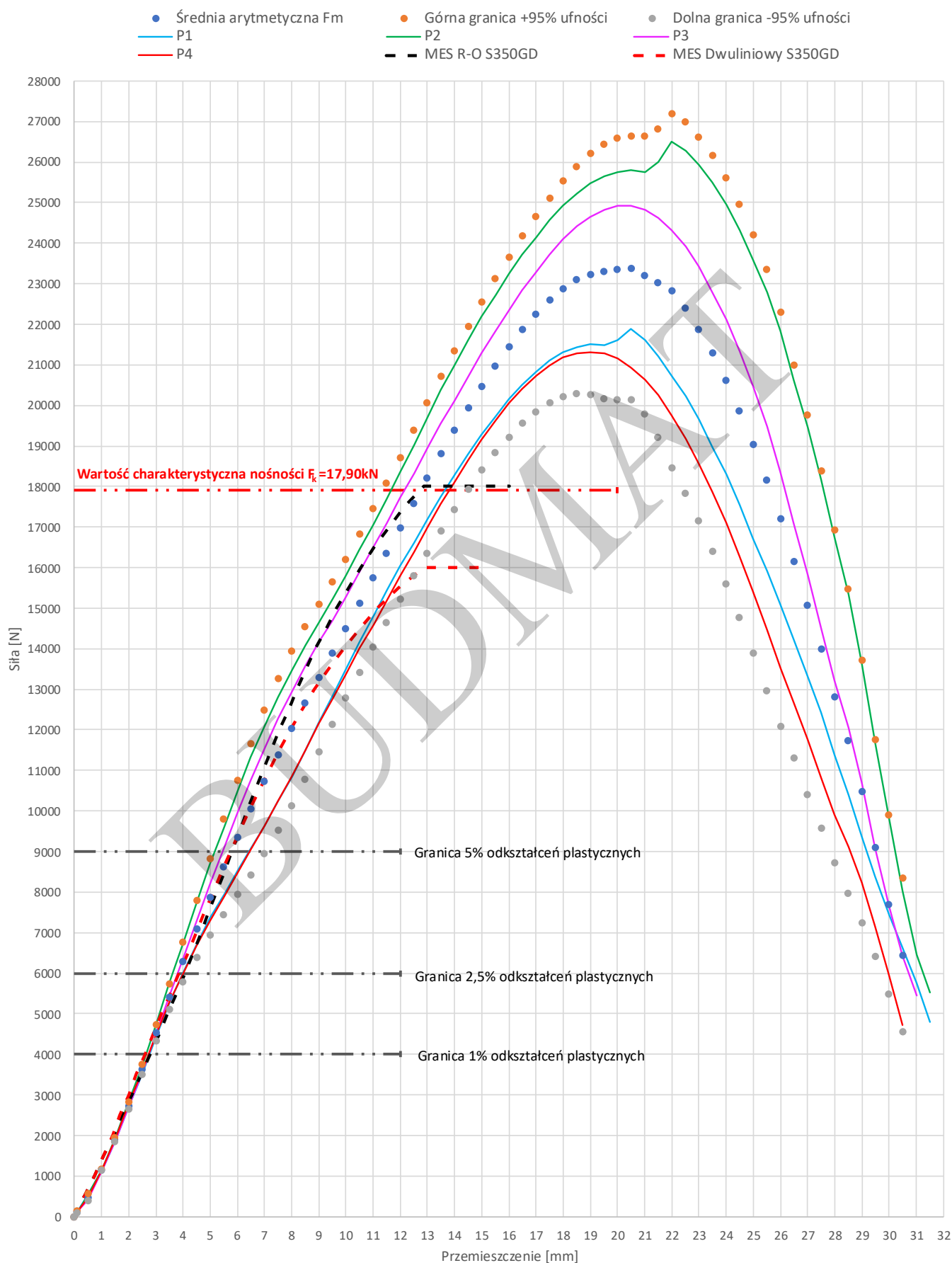
Wykresy nośności próbek na przeciąganie śruby przez blachę.

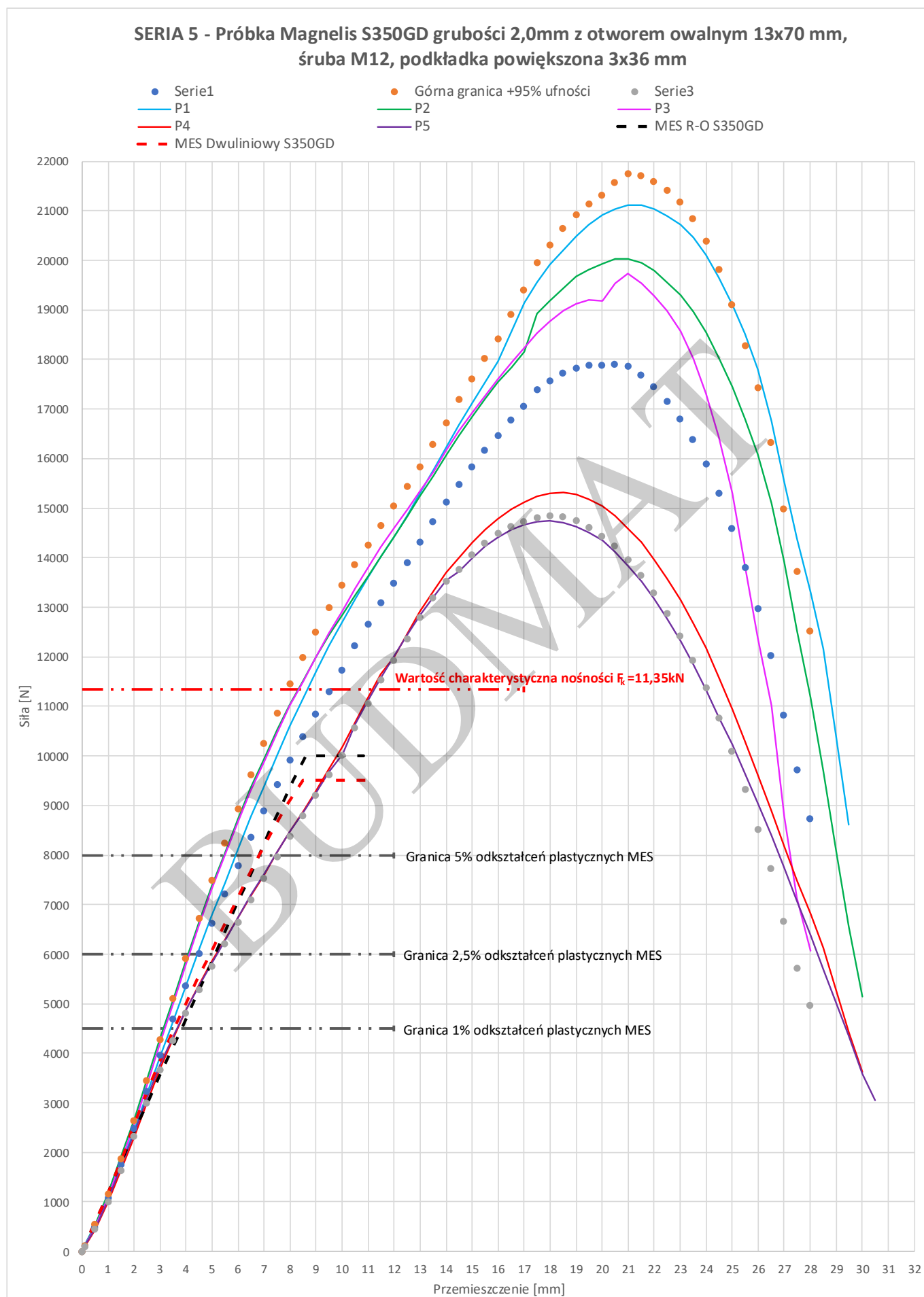
BUDMAT



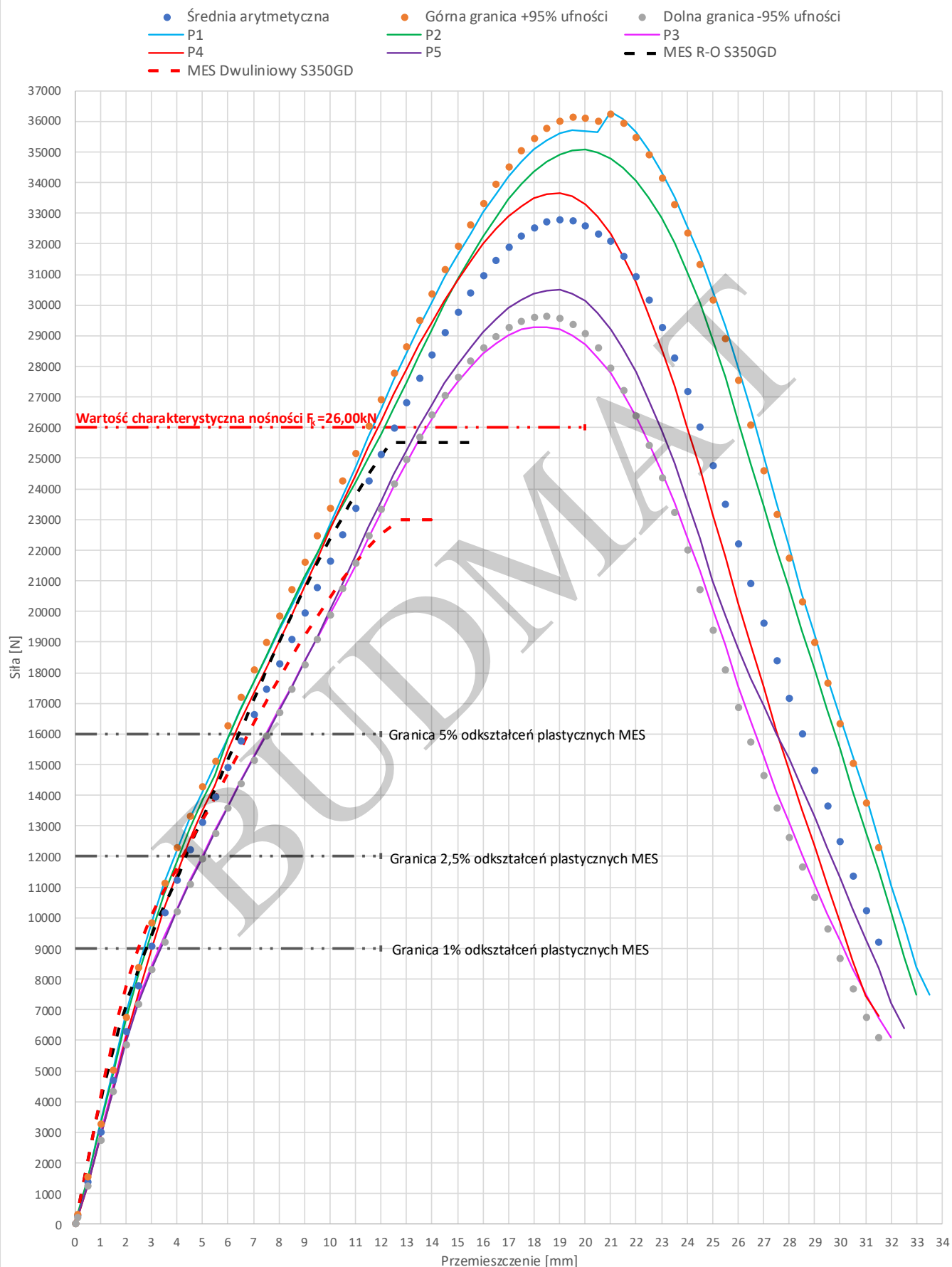




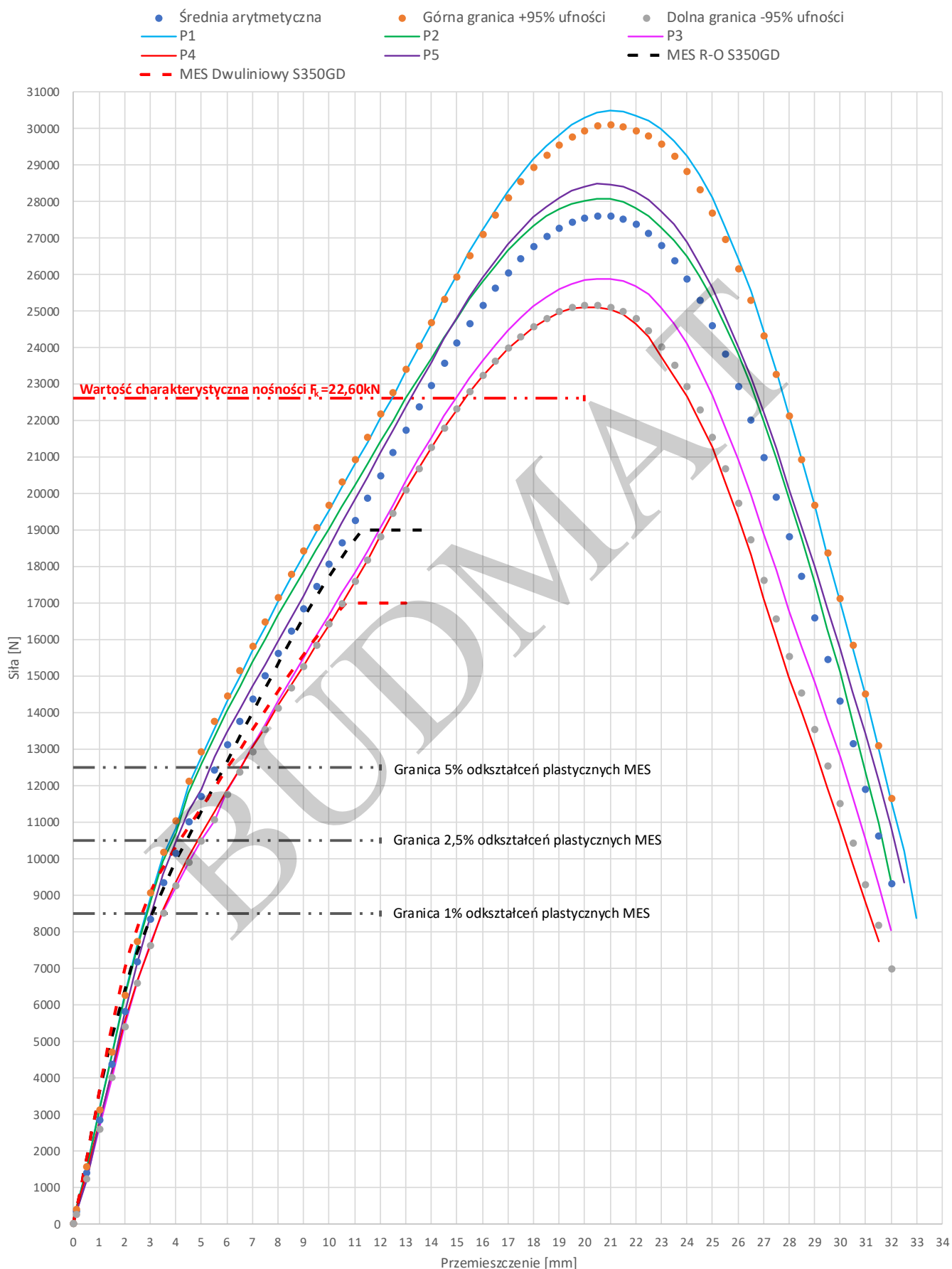
**SERIA 4 - Próbką Magnelis S350GD grubości 2,0mm z otworem owalnym 13x40 mm,
śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm**

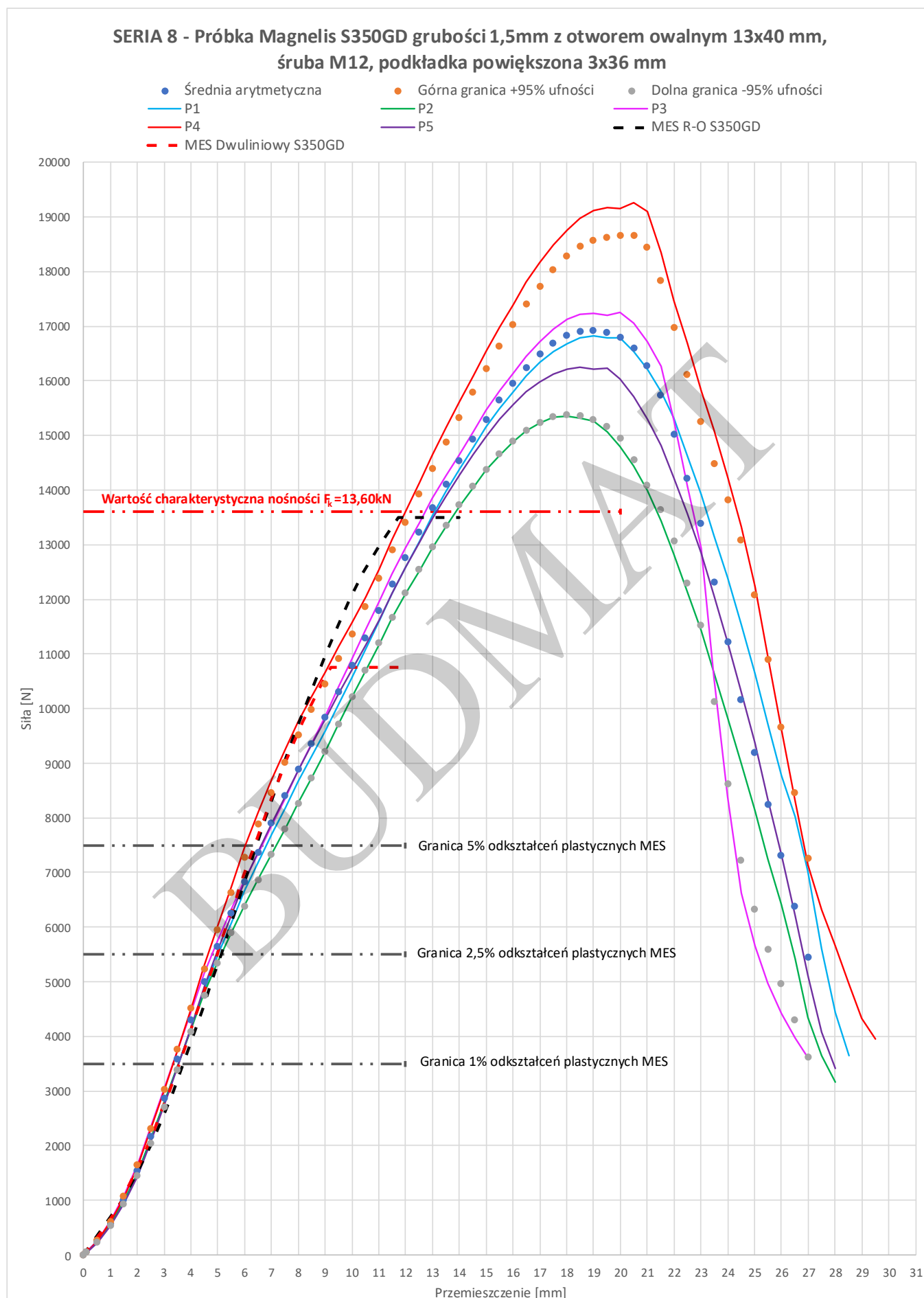


**SERIA 6 - Próbką Magnelis S350GD grubości 3,0mm z otworem owalnym 13x40 mm,
śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm**

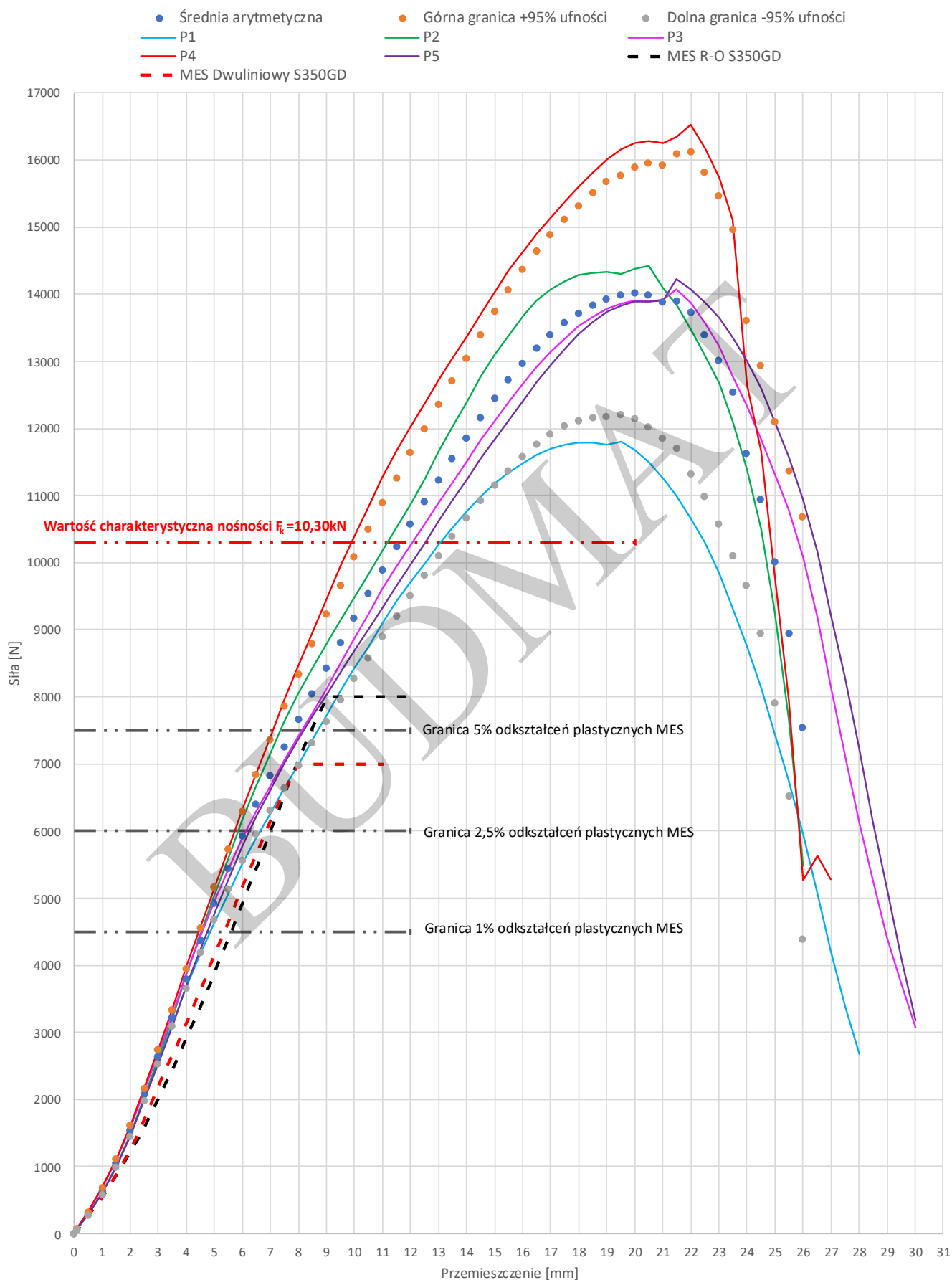


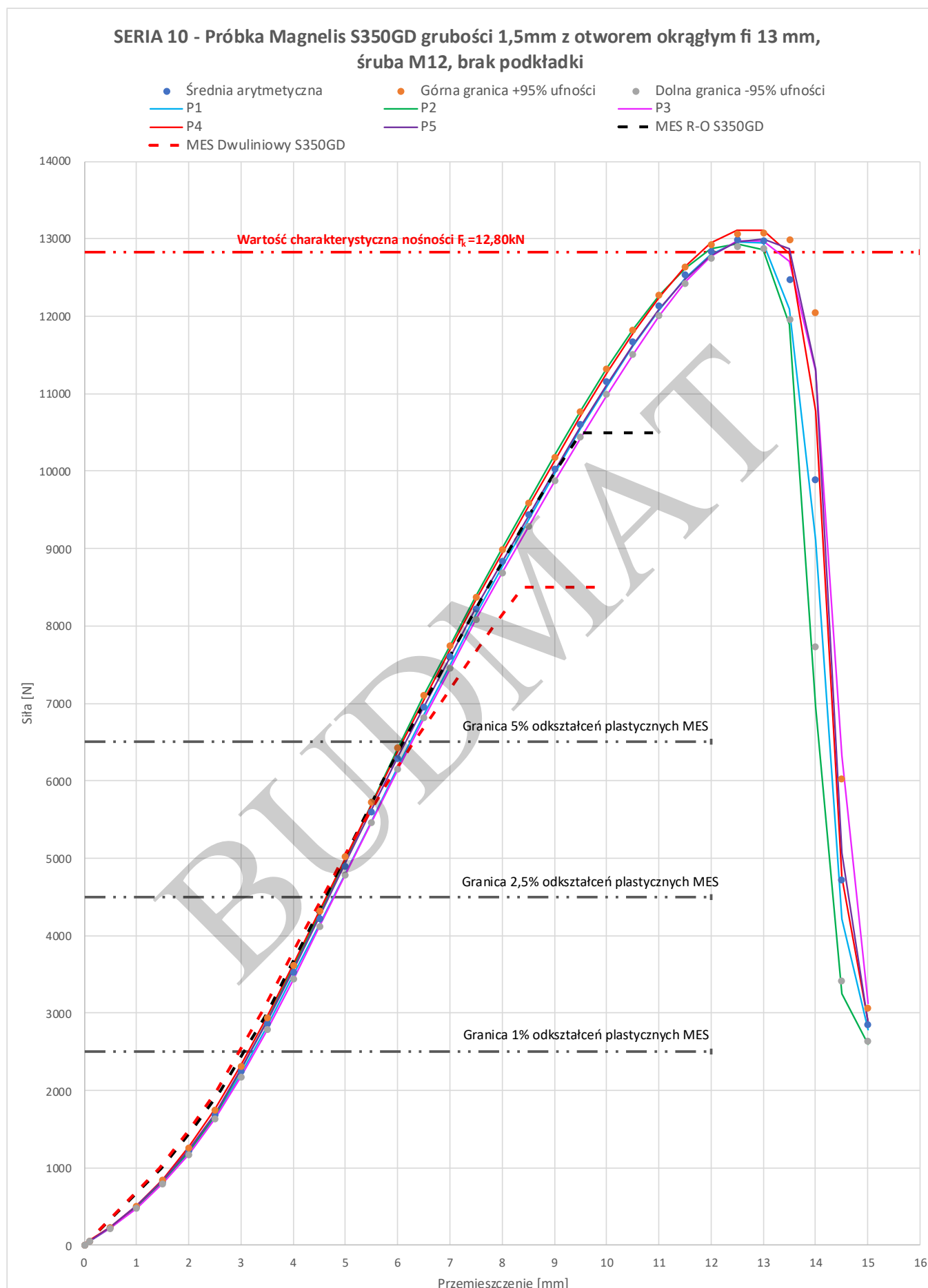
**SERIA 7 - Próbką Magnelis S350GD grubości 3,0mm z otworem owalnym 13x70 mm,
śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm**

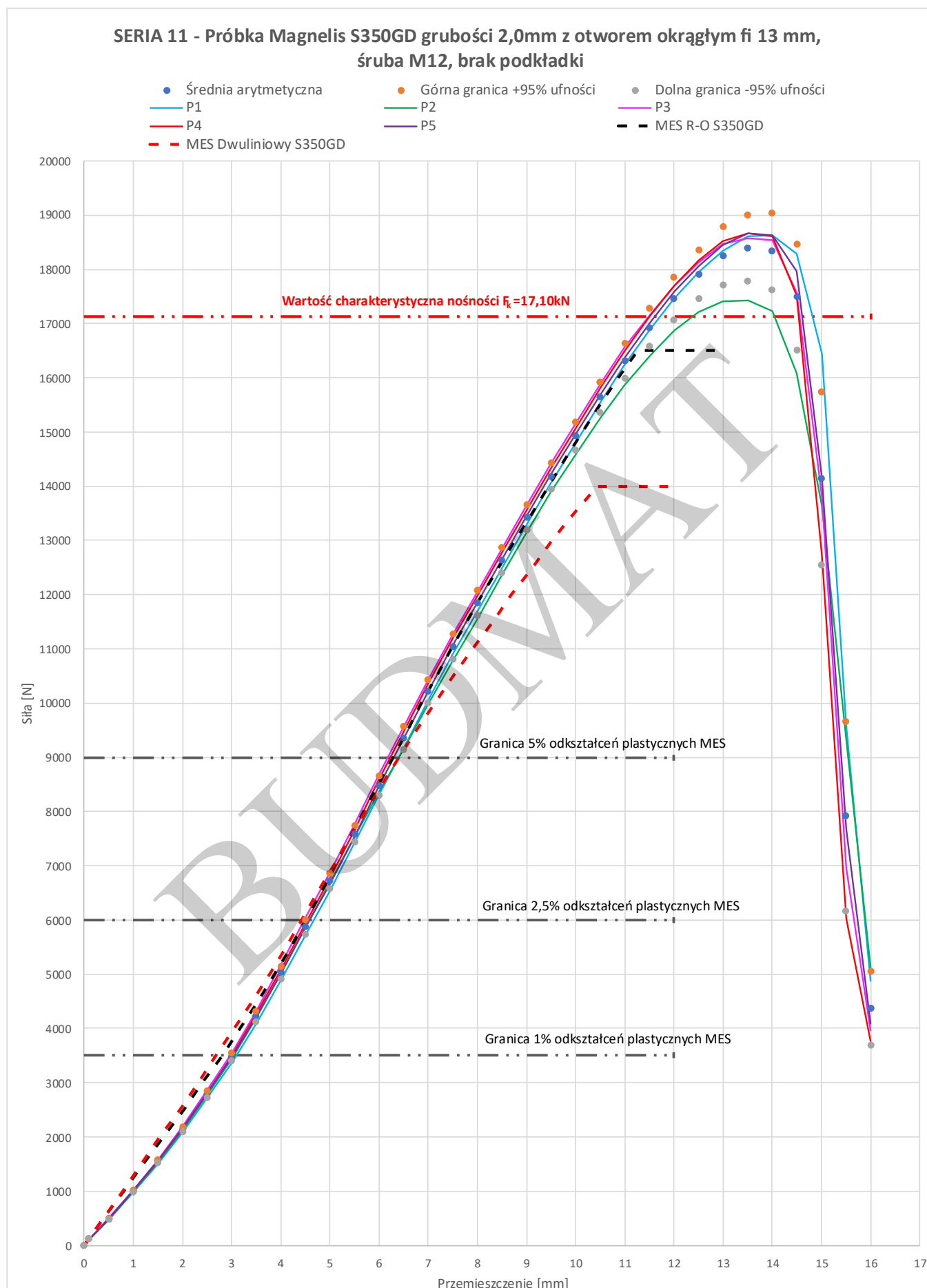


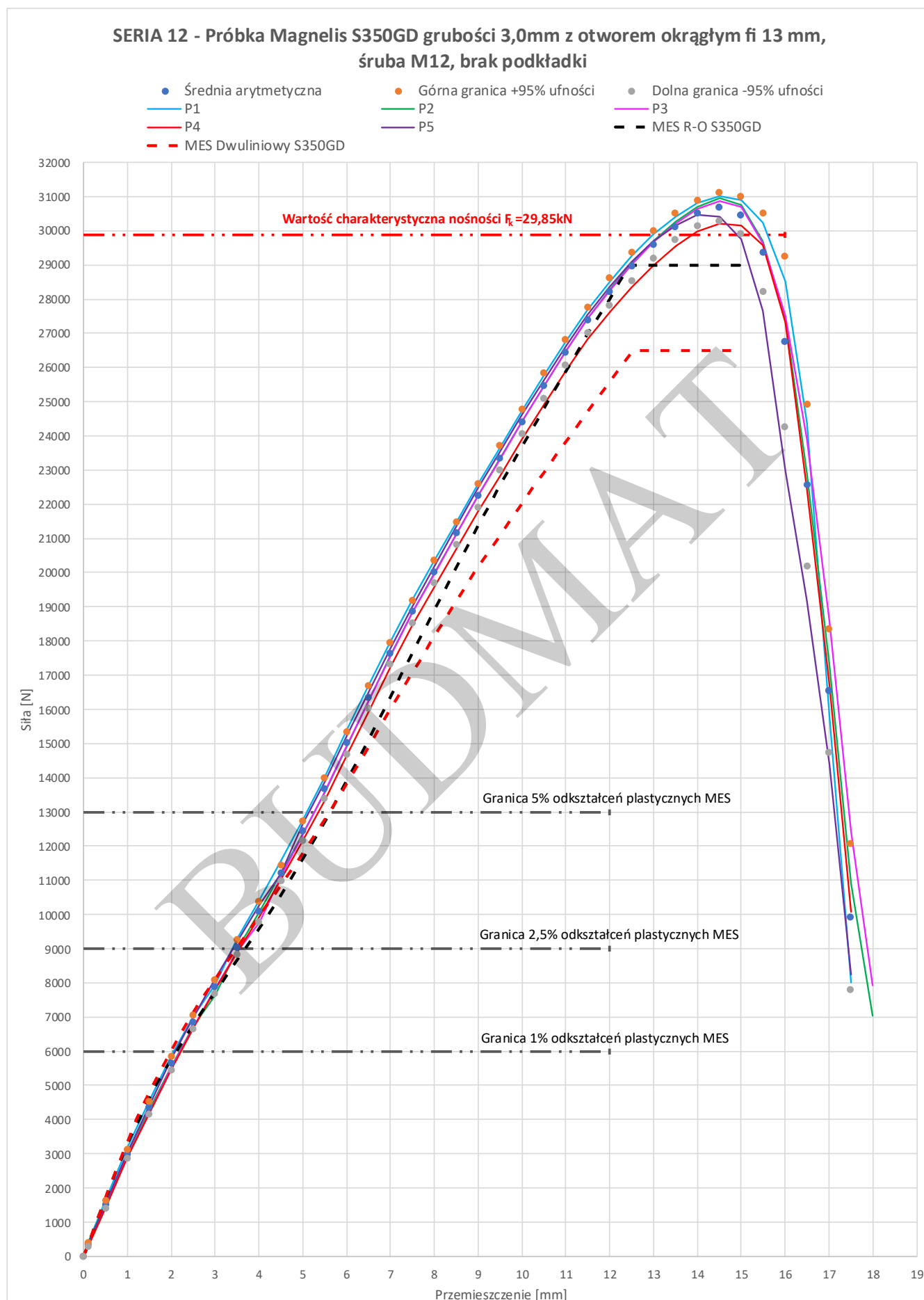


**SERIA 9 - Próbką Magnelis S350GD grubości 1,5mm z otworem owalnym 13x70 mm,
śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm**









ZAŁĄCZNIK NR 2

1. Analiza Statystyczna Wyników

Poniższa tabela przedstawia zestawienie wyników badań eksperymentalnych oraz przeprowadzonej analizy statystycznej dla wszystkich dwunastu serii badawczych. Dla każdej serii obliczono średnią arytmetyczną siłę przebicia (F_m), odchylenie standardowe (s_F) oraz charakterystyczną siłę przebicia (F_k). Wartość charakterystyczna F_k została obliczona jako 5% kwantyl, zgodnie z EN 1990 Aneks D, przy użyciu wzoru $F_k = F_m - k_n \cdot s_F$. Dla wszystkich serii, przy liczbie próbek $n=5$, przyjęto współczynnik $k_n=2,33$ (dla nieznanego współczynnika zmienności V_x , zgodnie z Tablicą D.1 w EN 1990).

Tabela 1.1 Wyniki badań eksperymentalnych i analiza statystyczna.

Nr serii	Grubość blachy [mm]	Kształt i wymiary otworu [mm]	Śruba	Podkładka / Nakrętka	Liczba próbek n	Średnia siła przebicia F_m [kN]	Odchylenie standardowe s_F [kN]	Współczynnik k_n	Charakterystyczna siła przebicia F_k [kN]
1	1,5	owalny 13x80	M8 A2	rombowa 4x15x58, S350	5	6,51	0,15	2,33	6,15
2	1,5	okrągły Ø 9	M8 A2	zwykła 1,5x16, A2	5	11,72	0,50	2,33	10,54
3	1,5	owalny 9x30	M8 A2	powiększona 2x24, A2	5	8,10	0,39	2,33	7,18
4	2,0	owalny 13x40	M12 kl.8.8	Powiększona 3x36, TZN	5	23,66	2,47	2,33	17,90
5	2,0	owalny 13x70	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5	18,19	2,94	2,33	11,35
6	3,0	owalny 13x40	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5	32,97	3,00	2,33	26,00
7	3,0	owalny 13x70	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5	27,61	2,15	2,33	22,60
8	1,5	owalny 13x40	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5	16,99	1,45	2,33	13,60
9	1,5	owalny 13x70	M12 kl.8.8	powiększona 3x36, TZN	5	14,21	1,68	2,33	10,30
10	1,5	okrągły Ø 13	M12 kl.8.8	brak	5	13,00	0,07	2,33	12,83
11	2,0	okrągły Ø 13	M12 kl.8.8	brak	5	18,39	0,54	2,33	17,14
12	3,0	okrągły Ø 13	M12 kl.8.8	brak	5	30,70	0,35	2,33	29,88

2. Analiza i Interpretacja Wyników Badań Eksperymentalnych

2.1. Wpływ Grubości Blachy na Siłę Przebicia

Analiza wpływu grubości blachy na siłę przebicia została przeprowadzona poprzez porównanie wyników dla serii z otworami owalnymi o tych samych wymiarach nominalnych, wykonanych w blachach o grubości 1,5 mm, 2,0 mm i 3,0 mm, przy zastosowaniu tej samej śruby M12 klasy 8.8 i tej samej podkładki powiększonej 3x36 TZN.

- Dla otworu owalnego 13x40 mm:
 - Seria 8 ($t=1,5$ mm): $F_m=16,99$ kN, $F_k=13,60$ kN.
 - Seria 4 ($t=2,0$ mm): $F_m=23,66$ kN, $F_k=17,90$ kN.
 - Seria 6 ($t=3,0$ mm): $F_m=32,97$ kN, $F_k=26,00$ kN.

Obserwuje się istotny wzrost średniej siły przebicia o około 39% (F_m) oraz charakterystycznej siły przebicia o około 31% (F_k) przy zwiększeniu grubości blachy z 1,5 mm do 2,0 mm. Wzrost nośności przy zwiększeniu grubości z 2,0 mm do 3,0 mm wynosi ok. 39% dla F_m oraz ok. 45% dla F_k .

- Dla otworu owalnego 13x70 mm:
 - Seria 9 ($t=1,5$ mm): $F_m=14,21$ kN, $F_k=10,30$ kN.
 - Seria 5 ($t=2,0$ mm): $F_m=18,19$ kN, $F_k=11,35$ kN.
 - Seria 7 ($t=3,0$ mm): $F_m=27,61$ kN, $F_k=22,60$ kN.

W tym przypadku również obserwuje się znaczący wzrost średniej siły przebicia (F_m) o około 28% i charakterystycznej siły przebicia (F_k) o ok. 10% przy zwiększeniu grubości z 1,5 mm do 2,0 mm. Przy zwiększeniu grubości blachy z 2,0 mm na 3,0 mm, wzrost F_m wynosi ok. 52%, a F_k o ok. 99%.

- Dla otworu okrągłego $\varnothing$ 13 mm bez podkładki:
 - Seria 10 ($t=1,5$ mm): $F_m=13,00$ kN, $F_k=12,83$ kN.
 - Seria 11 ($t=2,0$ mm): $F_m=18,39$ kN, $F_k=17,14$ kN.
 - Seria 12 ($t=3,0$ mm): $F_m=30,70$ kN, $F_k=29,88$ kN.

Zwiększenie grubości z 1,5 mm do 2,0 mm skutkuje wzrostem F_m o około 42% i F_k o ok. 34%. Dalsze zwiększenie grubości z 2,0 mm do 3,0 mm prowadzi do wzrostu F_m o ok. 67% i F_k o ok. 74%

Dane te jednoznacznie wskazują, że zwiększenie grubości blachy prowadzi do istotnego wzrostu nośności na przebicie. Wzrost ten jest znaczący zarówno dla wartości średnich, jak i, co ważniejsze z punktu widzenia projektowania, dla wartości charakterystycznych.

2.2. Podsumowanie

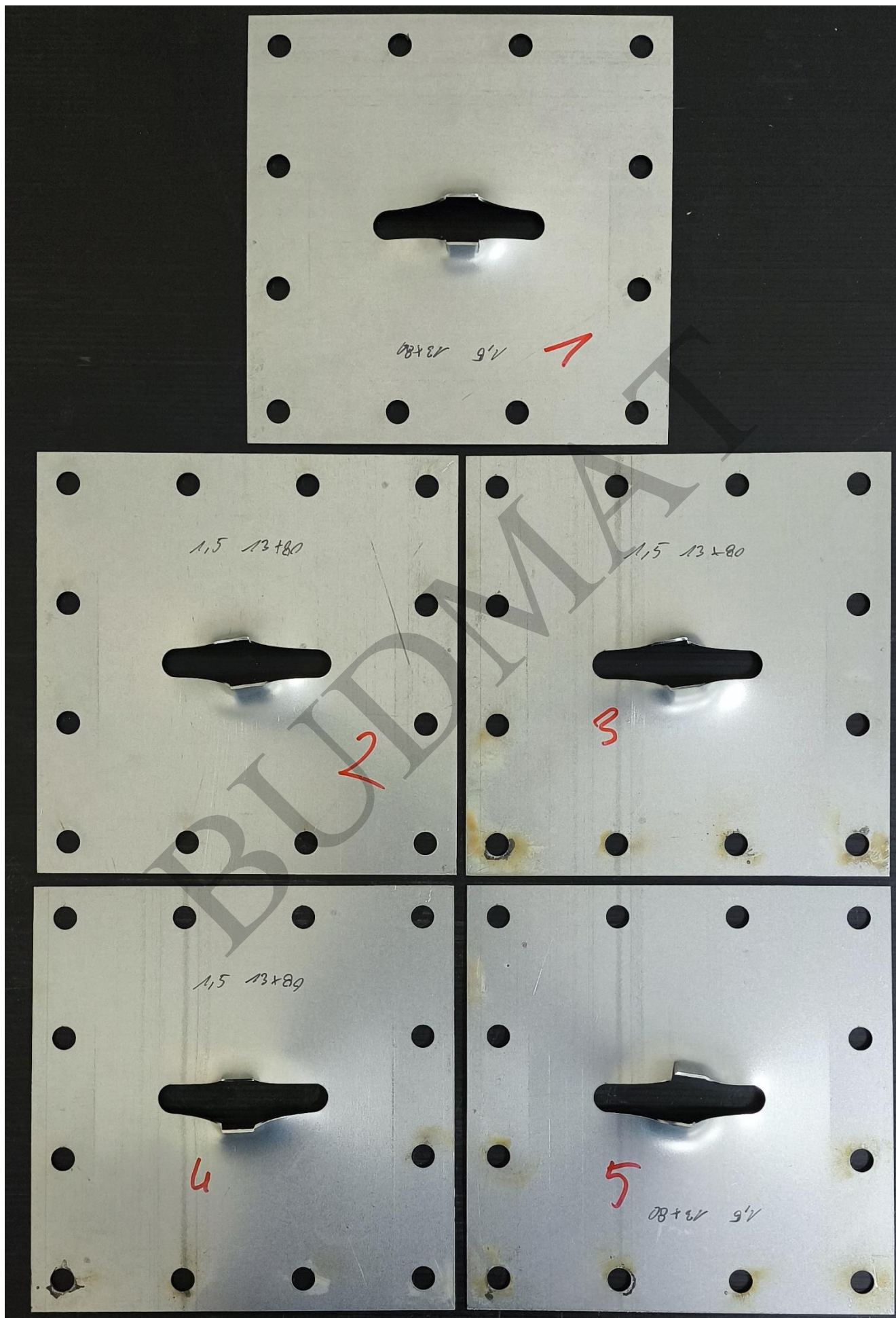
Podsumowując, geometria otworu ma istotny wpływ na nośność połączenia na przebicie. Otwory owalne, szczególnie te o większej długości w stosunku do szerokości, generalnie wykazują niższe nośności niż otwory okrągłe o porównywalnej szerokości, lub otwory owalne o mniejszym wydłużeniu, przy zastosowaniu tych samych podkładek. Porównania są jednak złożone, gdy zmienia się również obecność lub typ podkładki, gdyż podkładka odgrywa kluczową rolę w redystrybucji naprężeń

ZAŁĄCZNIK NR 3

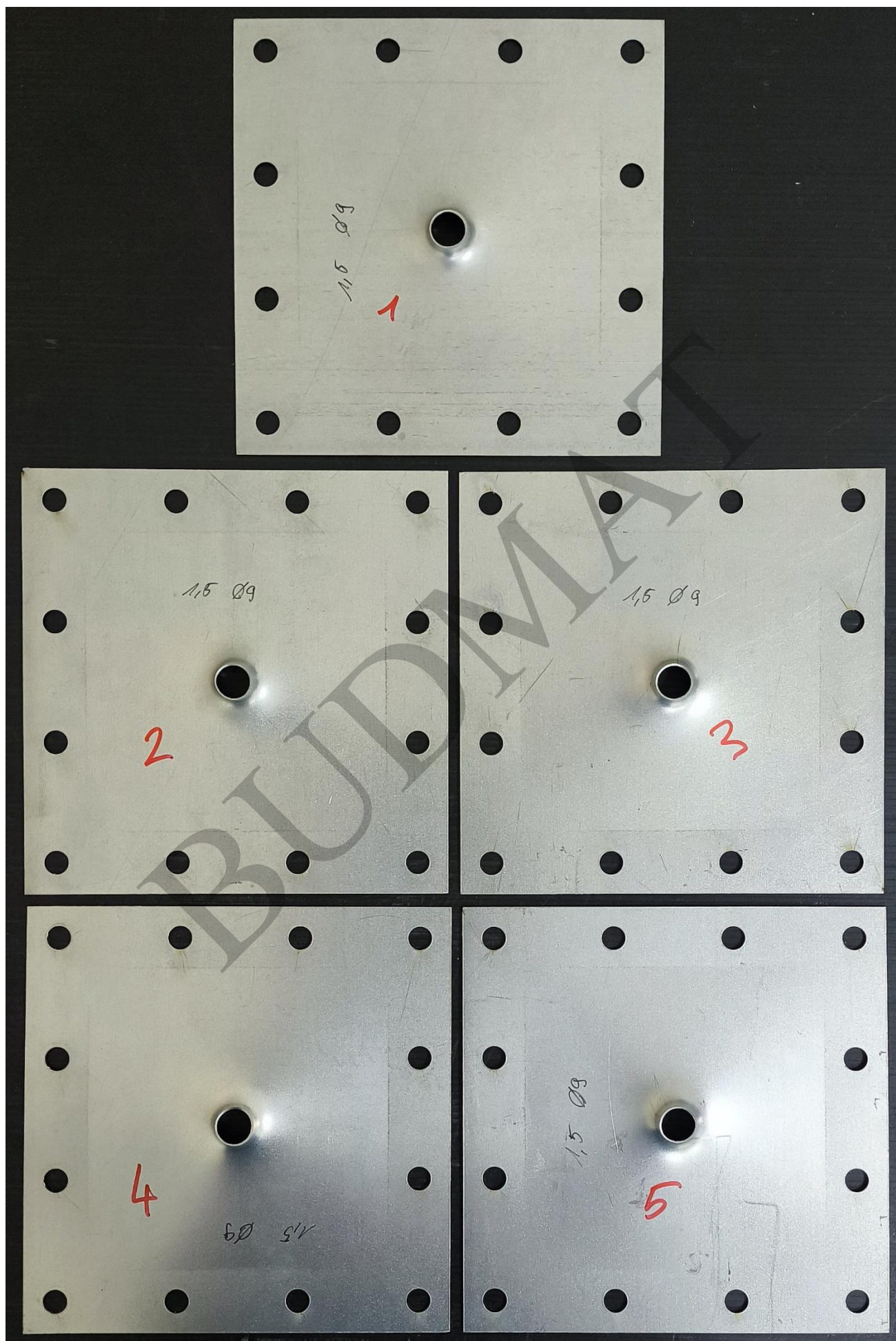
Fotografie zniszczonych próbek.

BUDMAT

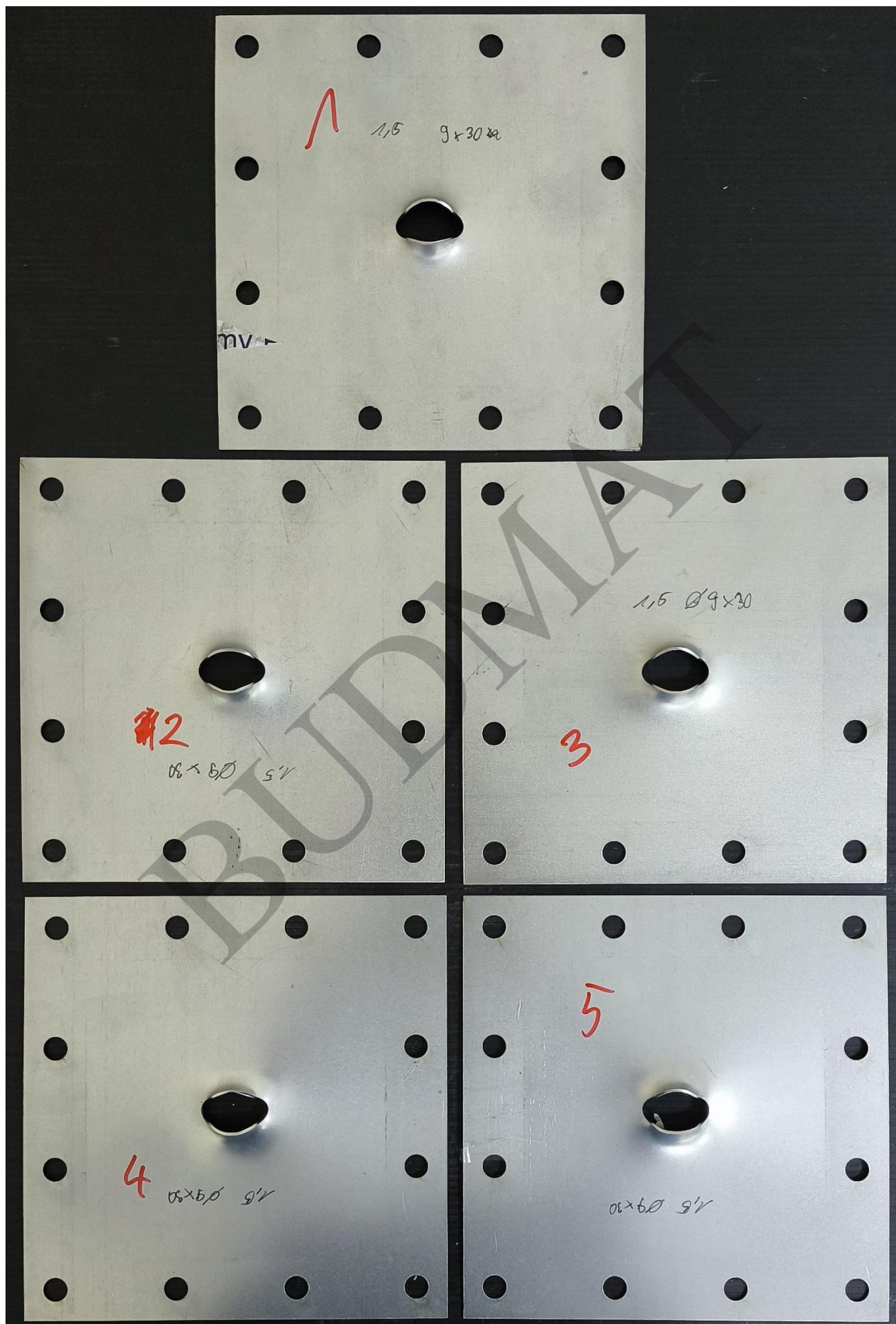
SERIA 1 - Próbka Magnelis S350GD grubości 1,5mm z otworem owalnym 13x80 mm, śruba M8, podkładka rombowa 4x15x58 mm.



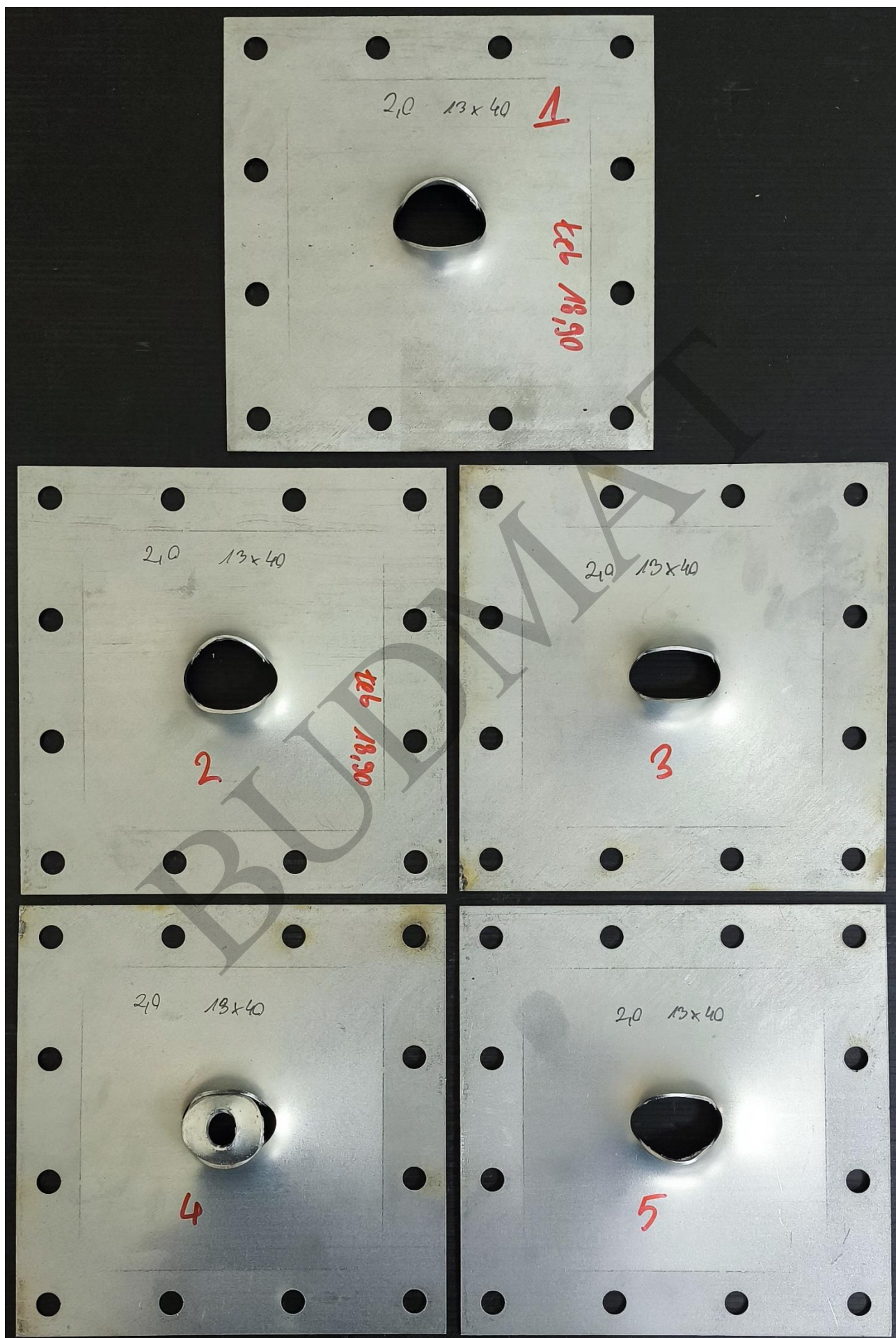
SERIA 2 - Próbka Magnelis S350GD grubości 1,5mm z otworem okrągłym $\phi 9$ mm, śruba M8, podkładka zwykła 1,5x16 mm.



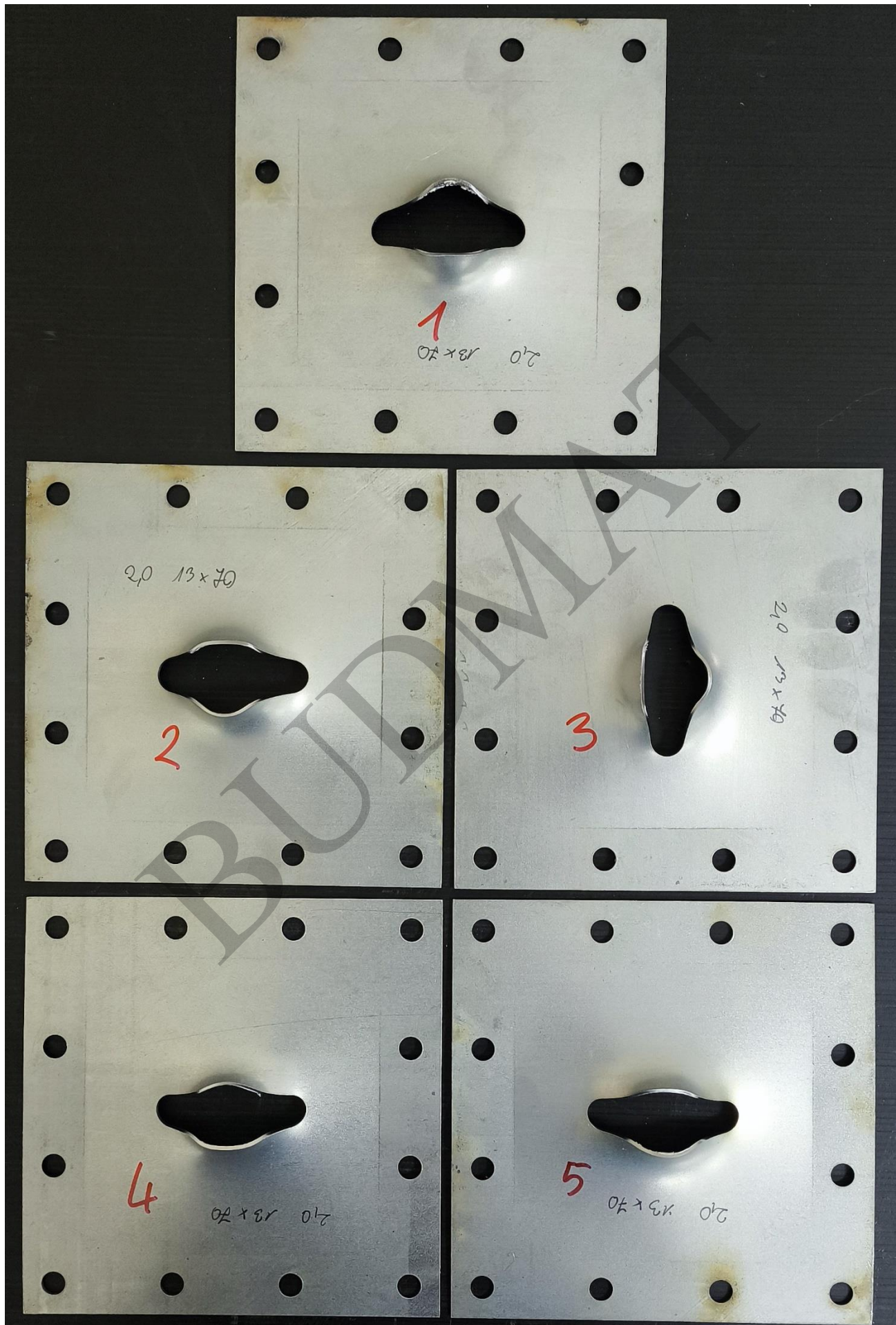
SERIA 3 - Próbką Magnelis S350GD grubości 1,5mm z otworem owalnym 9x30 mm, śruba M8, podkładka powiększona 2x24 mm.



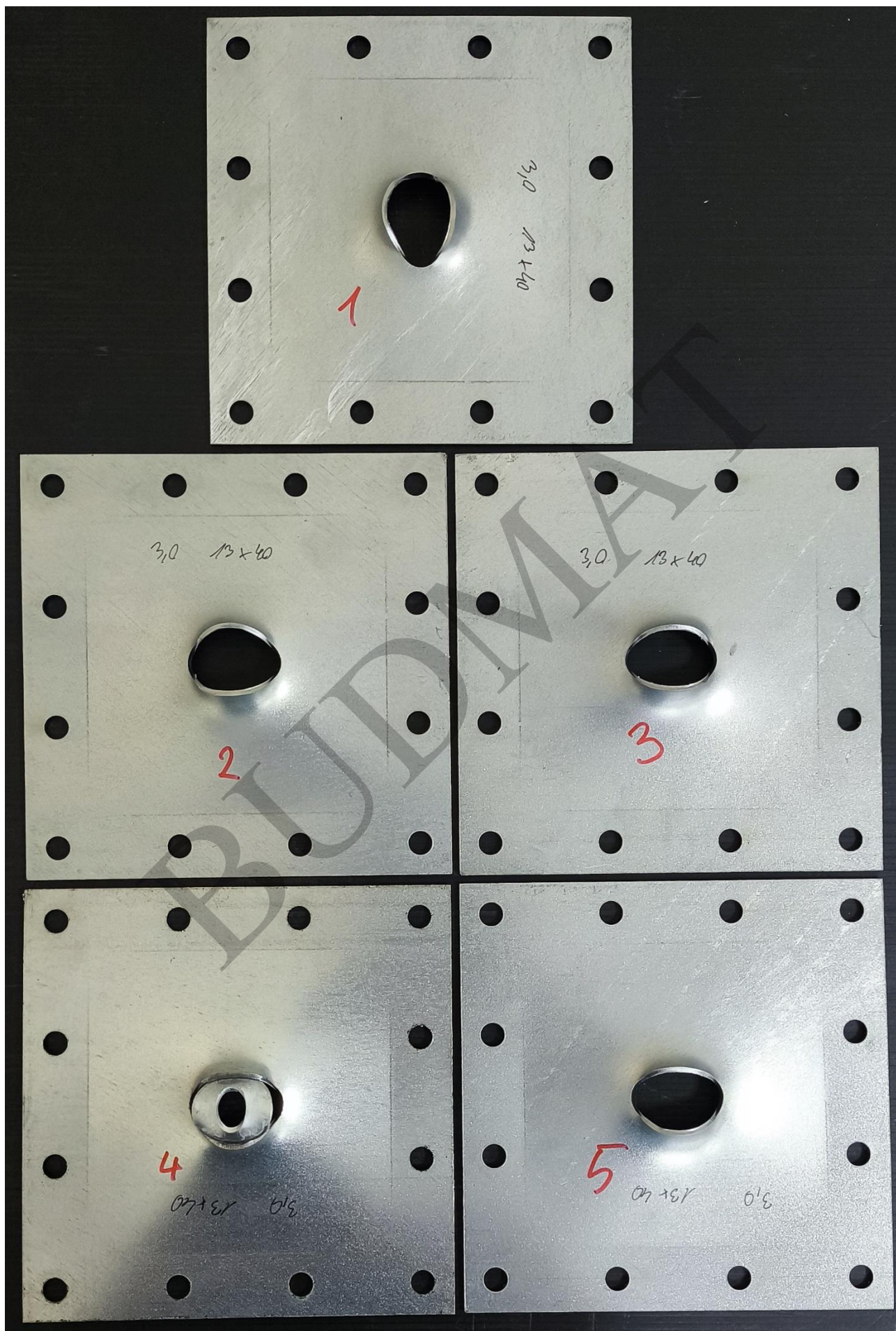
SERIA 4 - Próbka Magnelis S350GD grubości 2,0mm z otworem owalnym 13x40 mm, śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm.



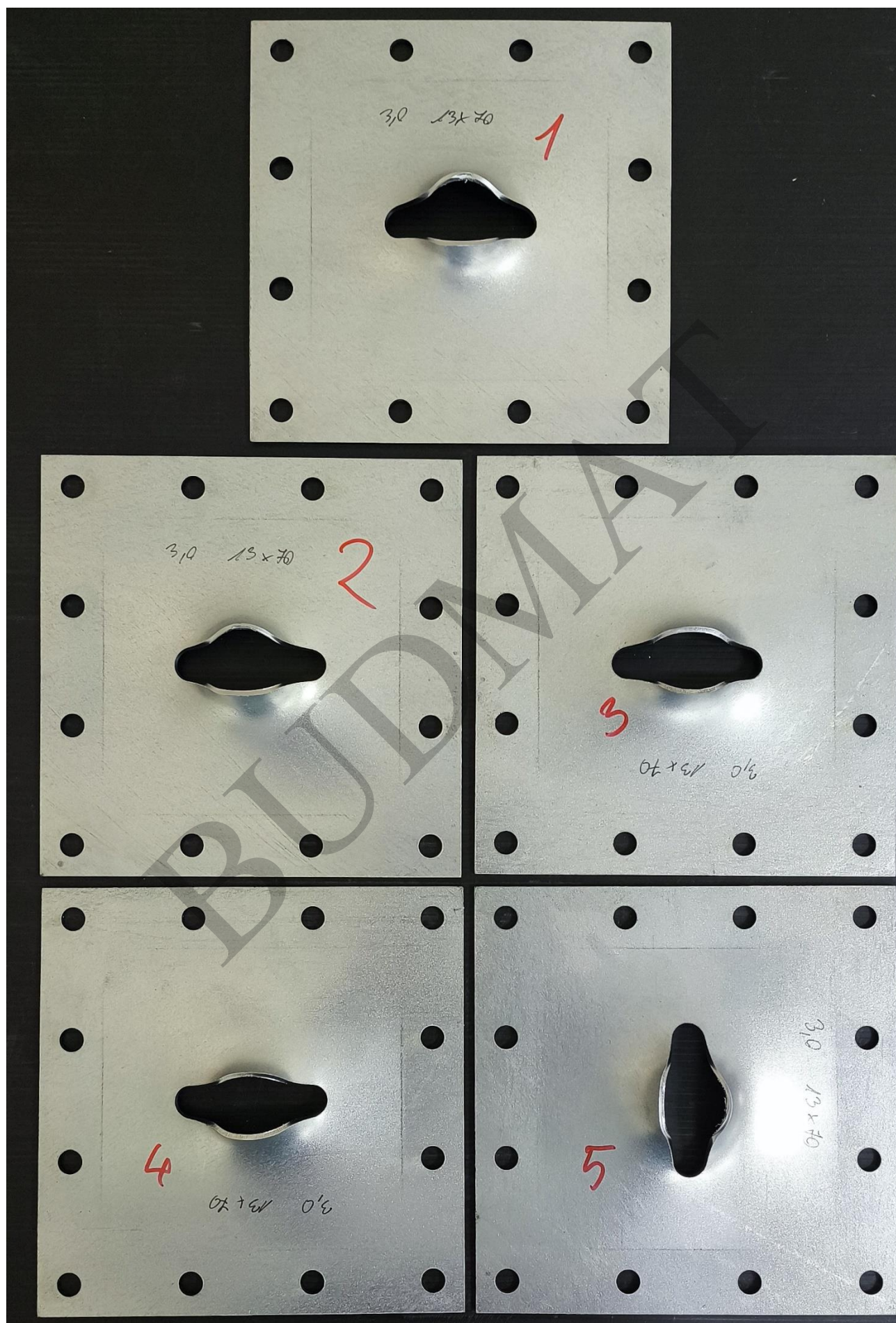
SERIA 5 - Próbką Magnelis S350GD grubości 2,0mm z otworem owalnym 13x70 mm, śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm.



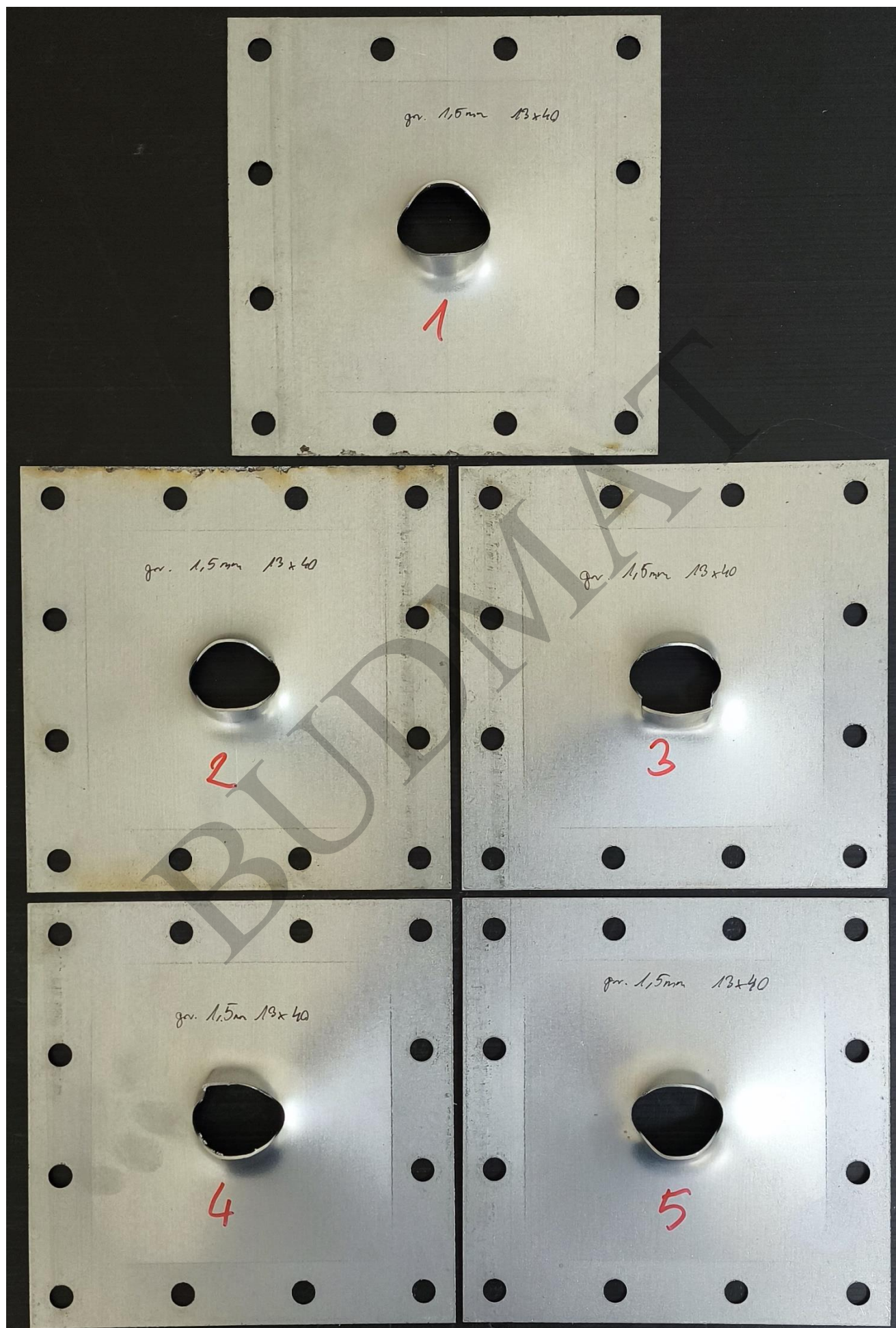
SERIA 6 - Próbką Magnelis S350GD grubości 3,0mm z otworem owalnym 13x40 mm, śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm.



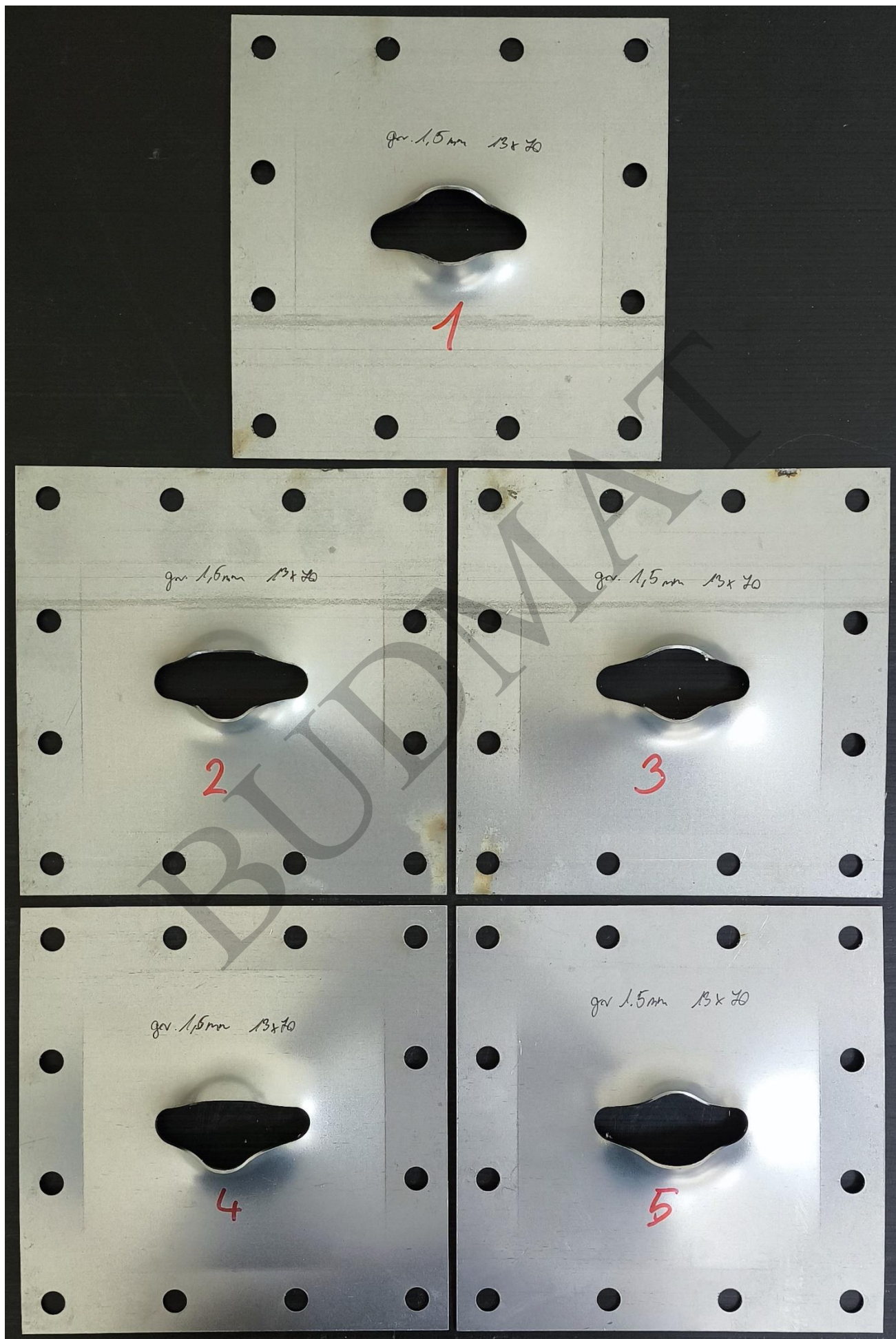
SERIA 7 - - Próbka Magnelis S350GD grubości 3,0mm z otworem owalnym 13x70 mm, śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm.



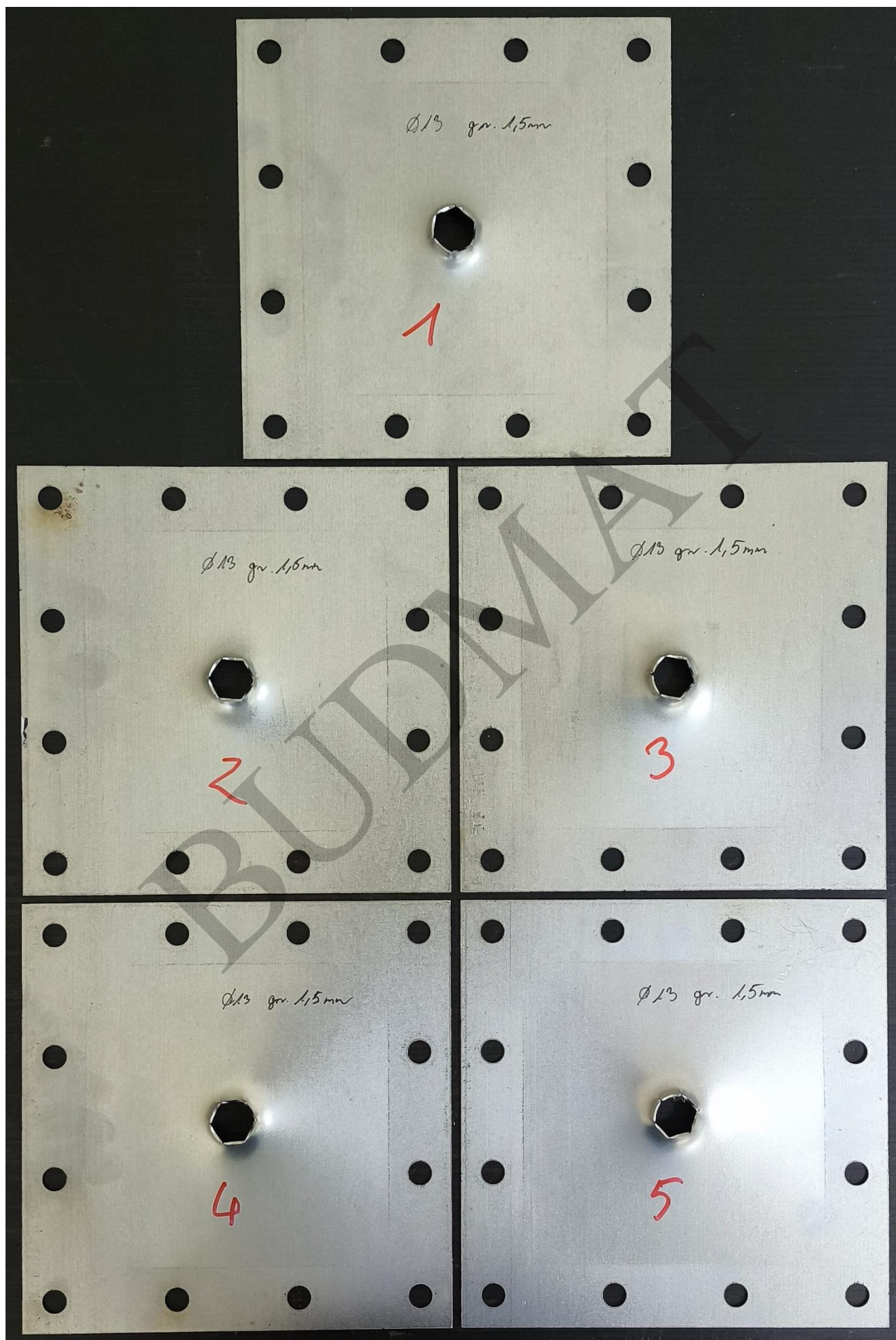
SERIA 8 - Próbka Magnelis S350GD grubości 1,5mm z otworem owalnym 13x40 mm, śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm.



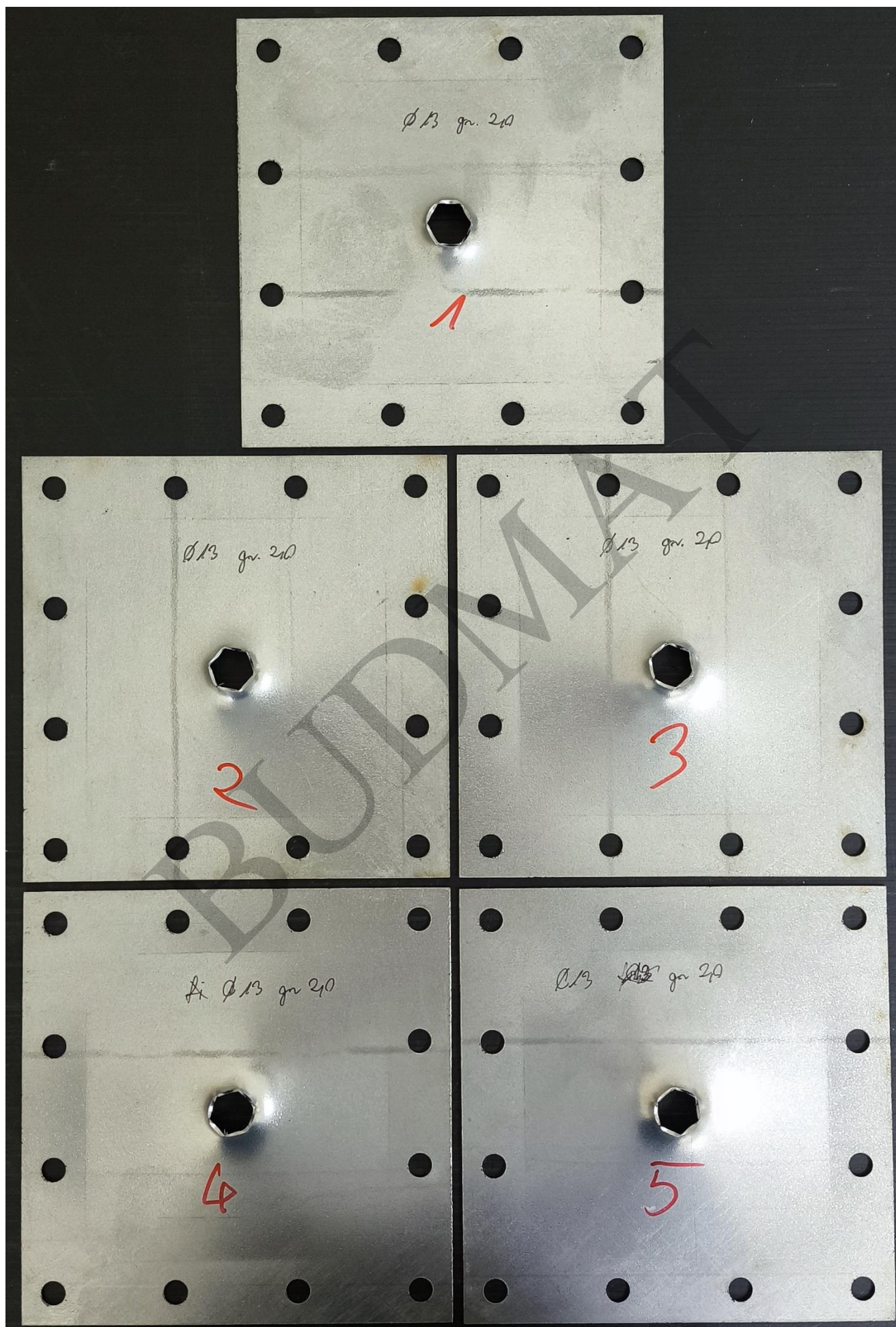
SERIA 9 - Próbką Magnelis S350GD grubości 1,5mm z otworem owalnym 13x70 mm, śruba M12, podkładka powiększona 3x36 mm.



SERIA 10 - Próbką Magnelis S350GD grubości 1,5mm z otworem okrągłym $\phi 13$ mm, śruba M12, brak podkładki.



SERIA 11 - Próbką Magnelis S350GD grubości 2,0mm z otworem okrągłym fi 13 mm, śruba M12, brak podkładki.



SERIA 12 - Próbką Magnelis S350GD grubości 3,0mm z otworem okrągłym fi 13 mm, śruba M12, brak podkładki.

