

mgr inż. Marek Szewczyk

ROZPRAWA DOKTORSKA

Analiza wpływu warunków smarowania
na opory tarcia i topografię powierzchni
blach stalowych głębokotłocznych
w procesie wytłaczania

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński
Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Sz wajka

Rzeszów, 2023

5.1.3.	Analiza wariancji wpływu parametrów procesu kształtowania blach na wartość współczynnika tarcia	78
5.2.	Topografia powierzchni	81
5.2.1.	Wpływ nacisku na zmianę podstawowych parametrów chropowatości blach	81
5.2.2.	Wpływ ciśnienia oleju na zmianę podstawowych parametrów chropowatości blach	95
5.2.3.	Analiza wariancji wpływu parametrów procesu kształtowania blach na wartość parametrów chropowatości powierzchni	105
6.	Zastosowanie sieci neuronowych do modelowania zjawiska tarcia	115
6.1.	Ogólne zasady tworzenia modelu neuronowego	115
6.2.	Budowa i analiza modelu neuronowego	117
6.2.1.	Perceptron wielowarstwowy	118
6.2.2.	Sieć o radialnych funkcjach bazowych.....	122
6.2.3.	Analiza danych przy użyciu najkorzystniejszego modelu neuronowego	125
7.	Dodatkowe badania przeprowadzone w celu zbadania możliwości stosowania sieci neuronowych w modelowaniu zjawisk tarcia	139
7.1.	Zmienne parametry wejściowe	139
7.2.	Badanie wpływu funkcji aktywacji neuronów na uzyskiwane wyniki	144
8.	Podsumowanie i wnioski końcowe.....	152
	Literatura.....	155
	Załączniki.....	168
	Streszczenie rozprawy doktorskiej.....	199
	Doctoral dissertation abstract.....	200

Wykaz symboli i oznaczeń

Symbole i oznaczenia

A_1	–	pole obszaru tarcia ($A_1 = \text{szerokość próbki} \cdot \text{wysokość przeciwpróbki}$)
A_2	–	pole powierzchni rowka doprowadzającego olej pod ciśnieniem (obszar nie biorący udziału w procesie tarcia)
A_{50}	–	wydłużenie
A_i	–	pole styku chropowatości
A_n	–	nominalna powierzchnia kontaktu
A_{nom}	–	pole powierzchni kontaktu próbki z przeciwpróbką ($A_{nom} = A_1 - A_2$)
A_r	–	rzeczywista powierzchnia styku
BL_{alfa}	–	obwód zamkniętych kieszeni olejowych
C_r	–	współczynnik zależny od rodzaju materiału, chropowatości powierzchni, typu obciążenia i warunków smarowania
E	–	moduł Younga
F_{gr}	–	graniczna wartość siły wymuszającej ruch
F_N	–	siła nacisku
F_s	–	powierzchnia warstwy ścinanej smaru
F_T	–	siła przeciągania pasa blachy
F_t	–	siła tarcia
g_0	–	grubość początkowa blachy
g_1	–	grubość końcowa blachy
H	–	liczby Herseya
h	–	grubość warstwy smaru
K	–	współczynnik umocnienia odkształceniowego
L	–	długość wzniosu nierówności
l	–	minimalna wartość zakresu danych po normalizacji
n	–	wykładnik krzywej umocnienia
$NIOP_t$	–	liczba odrębnych kieszeni olejowych
p	–	prawdopodobieństwo
p_1	–	ciśnienie smaru
p_n	–	nacisk nominalny
p_o	–	ciśnienie smarowania olejem
p_{sr}	–	średni nacisk na powierzchni styku

Q	–	bezwymiarowy współczynnik
R	–	promień zaokrąglenia walcowej powierzchni kontaktu
R_a	–	średnie arytmetyczne odchylenie profilu
R_m	–	wytrzymałość na rozciąganie
$R_{p0,2}$	–	umowna granica plastyczności
S_a	–	średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia
S_{ku}	–	współczynnik skupienia rozkładu wysokości topografii
S_p	–	maksymalna wysokość szczytu chropowatości powierzchni
S_q	–	średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia
S_{sk}	–	współczynnik skośności rozkładu wysokości topografii powierzchni
S_v	–	maksymalna głębokość doliny chropowatości powierzchni
S_z	–	maksymalna wysokość chropowatości powierzchni ($S_z = S_p + S_v$)
T_k	–	wartość siły tarcia kinetycznego
T_{max}	–	maksymalna wartość siły tarcia
u	–	maksymalna wartość zakresu danych po normalizacji
v	–	prędkość poślizgu
v_{sr}	–	średnia prędkość przemieszczania blachy względem narzędzia
WC	–	wskaźnik Wihlborga – Crafoorda
x	–	wartość oryginalna przed normalizacją
x'	–	wartość znormalizowana, należąca do zbioru $x' = \langle l; u \rangle$
x_{max}	–	maksymalna wartość dla serii analizowanych danych
x_{min}	–	minimalna wartość dla serii analizowanych danych
α	–	pole powierzchni styku
α_1	–	kąt powierzchni kontaktu
α_2	–	kąt łuku walcowej powierzchni kontaktu
ε_r	–	wydłużenie rzeczywiste
η	–	lepkość dynamiczna smaru
μ	–	współczynnik tarcia
μ_o	–	współczynnik tarcia wyznaczony w warunkach smarowania ciśnieniowego
μ_{o0}	–	współczynnik tarcia wyznaczony w warunkach smarowania bezciśnieniowego ($p_o = 0$ MPa)
σ_r	–	naprężenia rzeczywiste

Wprowadzenie

Proces wytlaczania jest jednà z metod kształtowania blach, która umożliwia wykonywanie cienkościennych elementów o nawet skomplikowanym kształcie. Występujące w procesie wytlaczania tarcie jest zjawiskiem złożonym, na które wpływają właściwości mechaniczne oraz topografia powierzchni materiału obrabianego i narzędzia, parametry procesu oraz mechanizm kontaktu blachy i narzędzia kształtującego. Ze względu na występujące w procesie duże naciski powierzchniowe oraz tarcie pomiędzy narzędziem i obrabianym materiałem, w procesie wytlaczania często zachodzą zjawiska tribologiczne polegające na bruzdowaniu i spłaszczaniu nierówności powierzchni blachy.

Przeprowadzony przegląd literatury z zakresu wpływu parametrów procesu wytlaczania potwierdza, że mają one bardzo duży wpływ zarówno na jakość gotowego wyrobu, jak również na opory tarcia występujące w tym procesie.

Proces wytlaczania blach jest procesem złożonym, w wyniku którego na powierzchni wytłoczki występują obszary różniące się między sobą mechanizmem występującego tarcia, prędkością przemieszczania oraz wartością naprężeń i odkształceń. Z tego względu badania zjawisk towarzyszących procesowi wytlaczania odbywają się za pomocą testów tribologicznych, które odpowiadają rzeczywistym warunkom panującym w wybranym obszarze wytłoczki.

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu warunków smarowania na opory tarcia i topografię powierzchni blach stalowych głębokotłocznych w procesie wytlaczania. W tym celu z wykorzystaniem specjalnie opracowanego testera do wyznaczania wartości współczynnika tarcia, zwłaszcza blach, w warunkach smarowania ciśnieniowego postanowiono przeprowadzić badania polegające na ciągnięciu pasa blachy, symulując tym samym zjawiska tarcia występujące pomiędzy powierzchnią dociskacza i blachy. Umożliwi to lepsze poznanie wpływu poszczególnych parametrów procesu wytlaczania, pozwalając tym samym na dokładniejsze sterowanie procesem wytlaczania oraz przewidywanie oporów tarcia i jakości powierzchni gotowego wyrobu.

W pierwszym rozdziale zatytułowanym „Przegląd literatury” przedstawiono aktualny stan wiedzy związanej ze zjawiskiem tarcia w procesie kształtowania blach. W ramach tego rozdziału opisano aspekty tribologiczne, mechanizmy tarcia, sposoby wyznaczania wartości współczynnika tarcia oraz sposoby i rolę smarowania w procesach kształtowania blach. Po wskazaniu i opisanu stanu wiedzy dotyczącego tematu badań, w rozdziale drugim zdefiniowano cel, tezę i zakres pracy.

Kolejne rozdziały opisują część eksperymentalną pracy, którą rozpoczęto od charakterystyki materiału badanego w rozdziale trzecim. Rozdział ten zawiera informacje na temat materiałów użytych w badaniach, między innymi przedstawiono podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne oraz chropowatość powierzchni zastosowanych w badaniach gatunków blach stalowych głębokotłocznych. Dodatkowo opisano wybrane do badań gatunki środków smarujących. Z kolei w rozdziale czwartym przedstawiono metodę badania polegającą na ciągnięciu pasa blachy przy użyciu skonstruowanego do tego celu tribotestera. Wspomniane testy ciągnięcia pasa blachy zostały zrealizowane przy zastosowaniu opisanych w tej części określonych parametrów procesu, takich jak: gatunek blachy, lepkość kinematyczna oleju, wielkość nacisku i ciśnienie oleju smarującego. Realizacja celu pracy była możliwa do przeprowadzenia dzięki zastosowaniu dodatkowej aparatury umożliwiającej rejestrację parametrów siłowych procesu ciągnięcia pasa blachy.

Rozdział piąty zawiera analizę i interpretację otrzymanych wyników, przedstawia wpływ zastosowanych parametrów procesu kształtowania blach na wartość współczynnika tarcia oraz jakość struktury geometrycznej powierzchni blachy. Dodatkowo przeprowadzono analizę wariancji, której celem było zbadanie interakcji pomiędzy analizowanymi parametrami oraz sprawdzenie ich rzeczywistego wpływu na zjawisko tarcia.

W ramach kolejnego rozdziału, z zastosowaniem analiz modelu neuronowego, przeprowadzono badania nad możliwością zastosowania ogólnie dostępnych narzędzi statystycznych, do tworzenia modeli sieci neuronowych pozwalających badanie i przewidywanie wpływu parametrów procesu na zachodzące zjawisko tarcia w procesie kształtowania blach. W tym celu przeanalizowano możliwość zastosowania dwóch najczęściej stosowanych sieci neuronowych, tj. perceptronu wielowarstwowego i sieci o radialnych funkcjach bazowych, by następnie wybrać tę, która lepiej odzwierciedla rzeczywiste pomiary.

W rozdziale siódmym pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu zmiennych parametrów wejściowych, wybranych miar statystycznych sygnałów siłowych procesu tarcia i funkcji aktywacji neuronów na jakość prognostyczną zastosowanych typów sieci neuronowych.

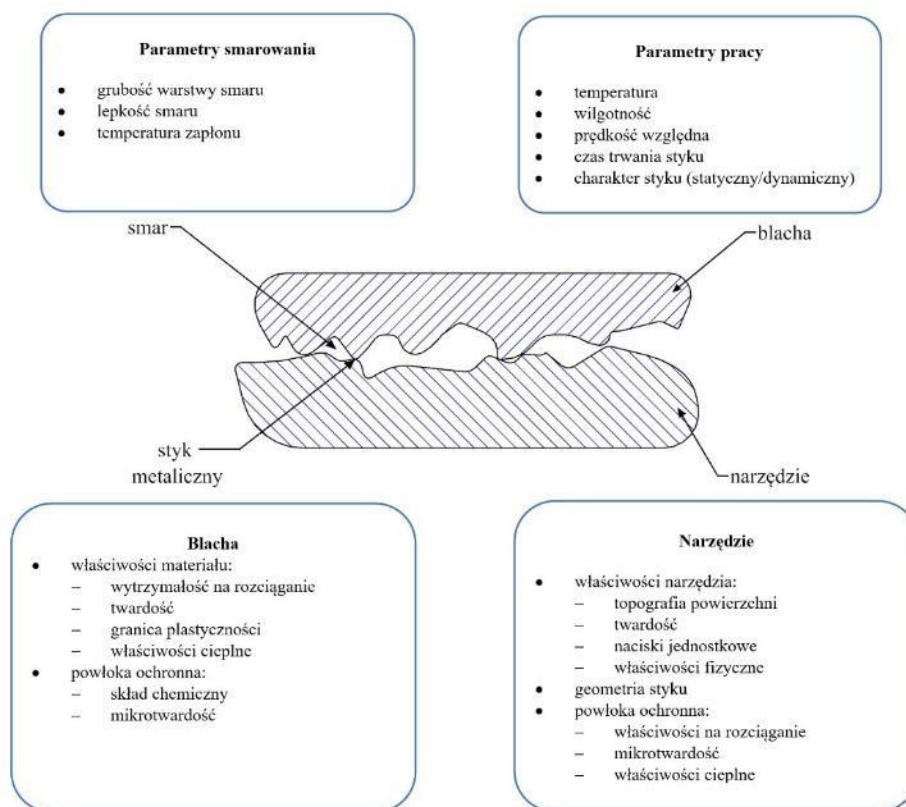
Ostatni rozdział pracy został poświęcony na podsumowanie i wnioski końcowe sformułowane na podstawie przeprowadzonych badań i analiz.

1. Przegląd literatury

1.1. System tribologiczny w procesie wytłaczania blach

1.1.1. Zjawisko tarcia

Na zjawiska tribologiczne występujące w procesie kształtowania blach składa się wiele czynników, między innymi: stopień obciążenia, kinematyka ruchu narzędzi, temperatura oraz geometria i zjawiska fizykochemiczne na powierzchni styku [1–5]. Do najczęściej analizowanych zjawisk tego procesu zalicza się tarcie, na które bezpośredni wpływ mają: parametry procesu, właściwości materiału oraz topografia powierzchni przedmiotu obrabianego i narzędzi. Dlatego chcąc dokładnie scharakteryzować rolę tarcia, niezbędne jest sprecyzowanie pojęcia systemu tribologicznego [6], składającego się z pary trącej, czyli narzędzia oraz odkształcanego metalu, ciała trzeciego występującego na styku pary trącej (np. olej, produkty zużycia) oraz szeroko pojętego otoczenia. Pod pojęciem otoczenia kryje się maszyna stosowana do realizacji procesu kształtowania blachy oraz parametry, takie jak: temperatura, drgania, wilgotność czy zapylenie. Aby lepiej to zobrazować, poniżej przedstawiono rysunek 1.1 ilustrujący składowe systemu tribologicznego.



Rys. 1.1. Schemat systemu tribologicznego występującego w procesie kształtowania blach, opracowano na podstawie [7]

Tarcie, a dokładniej opory tarcia, występujące w procesie kształtowania odpowiadają za charakterystyczne płynięcie materiału odkształcanego, umożliwiając tym samym otrzymanie elementów o wymaganym kształcie i wymiarach. Wielkość występujących oporów tarcia jest przede wszystkim zależna od wytrzymałości na ścinanie połączeń tarciovych ulegających zniszczeniu w trakcie ruchu [8-11].

Zużywanie się powierzchni jest procesem towarzyszącym tarcii, które zachodzi głównie w obszarze wierzchołków chropowatości. Obserwując wzajemne oddziaływanie powierzchni trących, do zjawisk najsilniej wpływających na powierzchnię można zaliczyć zużycie ściernie oraz adhezyjne [7, 12]. Skłonność do tworzenia adhezyjnych połączeń fazowych związana jest przede wszystkim z budową sieci krystalograficznej [13], ale również wynika z tendencji do szczepień różnych płaszczyzn struktury krystalograficznej w trakcie odkształcenia plastycznego, szczególnie w momencie, gdy mamy do czynienia z metalami krystalizującymi w układach regularnych. Metale krystalizujące w układzie heksagonalnym, pomimo iż cechują się tendencją do odkształceń w systemach łatwych poślizgów, to poślizgi te są ściśle ukierunkowane, a ich skłonność do defektowania jest dużo mniejsza aniżeli metali krystalizujących w sieci regularnej. To powoduje, że współczynnik tarcia metali o budowie sieci heksagonalnej jest znacząco mniejszy w porównaniu z metalami krystalizującymi w sieci regularnej [14].

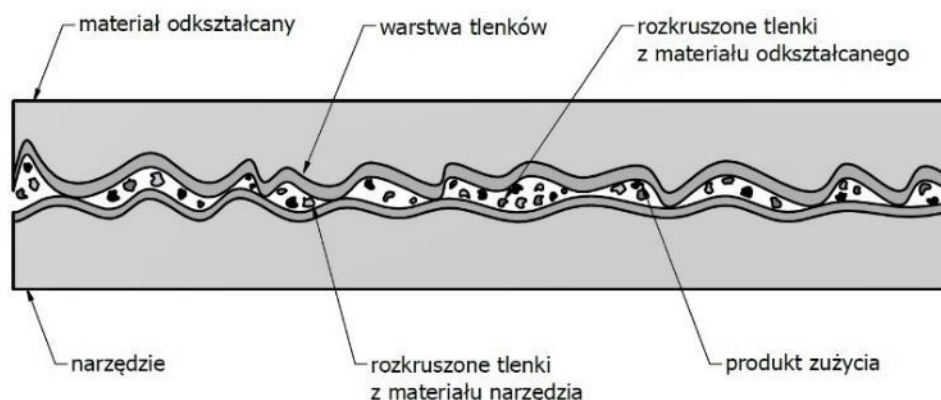
Pierwszymi badaczami, którzy rozpoczęli badania nad analizą tarcia zależnie od budowy krystalograficznej metalu, byli Buckley i Johnson [13] oraz Dübler i Feller [15]. Zaobserwowali oni, że w momencie kiedy parę trącą stanowią metale o sieciach regularnych, to współczynnik tarcia występujący pomiędzy nimi jest znacznie większy aniżeli w momencie, gdy tarcie odbywa się pomiędzy metalami o sieci heksagonalnej. Prowadzone przez Buckleya i Johnsona badania na temat wpływu sieci krystalograficznej na wartość współczynnika tarcia pozwoliły zobrazować różnice w występujących oporach tarcia metali o różnej budowie sieci krystalograficznej, co z kolei przypisano różnym systemom poślizgu.

Para trąca składająca się z metali o sieci krystalograficznej A1 lub A2 generuje znacząco wyższą wartość współczynnika tarcia, w stosunku do metali krystalizujących w sieci A3 zwanej heksagonalną [13]. Różnice w oporach tarcia, występujące pomiędzy metalami krystalizującymi w sieciach regularnych i heksagonalnych, związane są przede wszystkim z ilością płaszczyzn i kierunków poślizgów, co przekłada się na łatwość zachodzenia procesu odkształcenia, tym samym zwiększając styk pomiędzy powierzchniami. Bardziej szczegółowe badania na temat wpływu sieci krystalograficznej na wartości oporów tarcia można znaleźć w pracach Czichosa [16] i Buckleya [17].

1.1.2. Modele współpracy powierzchni trących

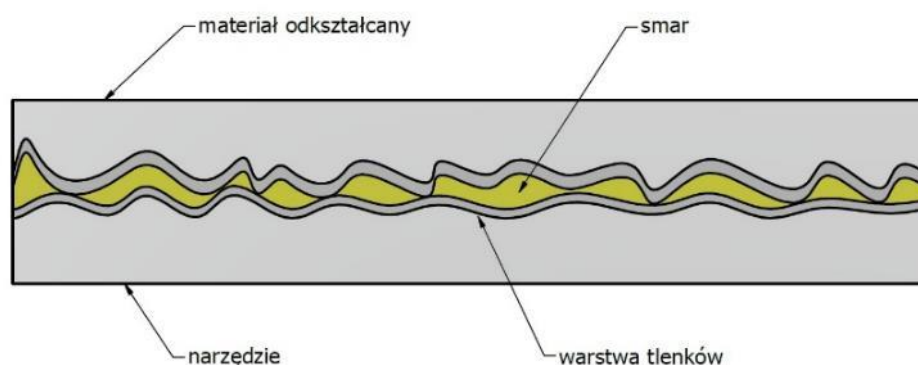
Ze względu na charakter tarcia występującego pomiędzy powierzchniami trącymi, wyróżnia się cztery rodzaje tarcia: technicznie suche, płynne, graniczne i mieszane.

Tarcie technicznie suche występuje pomiędzy blachą i narzędziem współpracującym, które są oddzielone od siebie warstwą tlenków (rys. 1.2). Ich budowa oraz skład chemiczny jest uzależniony od materiału, z którego wykonana jest blacha i narzędzia. Powstająca na powierzchni metalu warstwa tlenków charakteryzuje się dużo mniejszym zasięgiem potencjału sił elektrostatycznych, co skutecznie ogranicza wystąpienie szepień, przekładając się tym samym na zmniejszenie oddziaływania adhezyjnego metali.



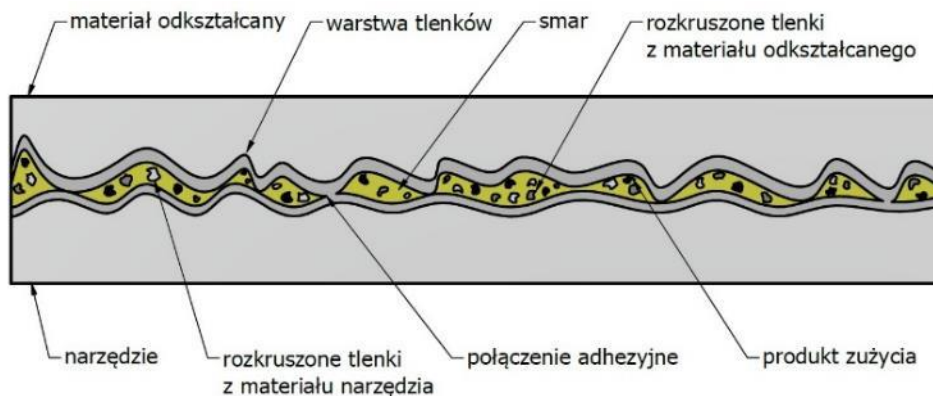
Rys. 1.2. Model tarcia technicznie suchego, opracowano na podstawie [7]

Tarcie graniczne powstaje pomiędzy powierzchniami trącymi, częściowo oddzielonymi od siebie warstwą smaru, której grubość jest mniejsza aniżeli suma średnich wysokości współpracujących nierówności (rys. 1.3). Kontakt pomiędzy powierzchnią blachy i powierzchnią narzędzia sprowadza się wówczas jedynie do stykania się wierzchołków nierówności powierzchni tych materiałów [7, 18].



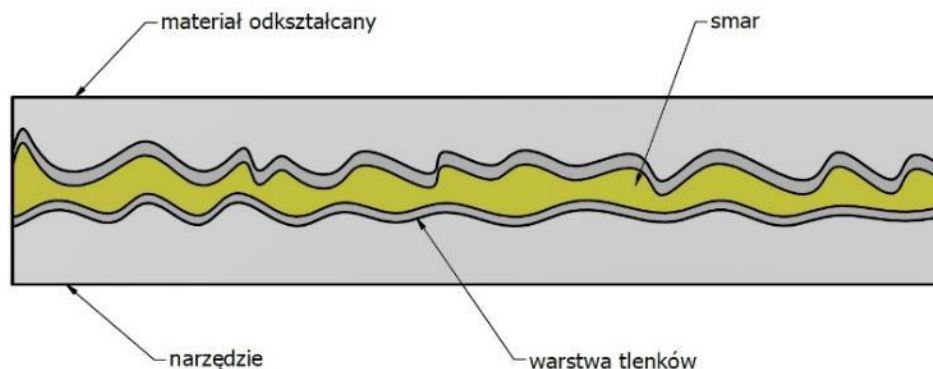
Rys. 1.3. Model tarcia granicznego, opracowano na podstawie [7]

Tarcie mieszane, nazywane również półpłynnym (rys. 1.4), występuje wtedy, kiedy pomiędzy parą trącą zachodzi jednocześnie oddziaływanie wierzchołków nierówności powierzchni oraz oddziaływanie substancji smarującej.



Rys. 1.4. Model tarcia mieszanego, opracowano na podstawie [7]

Ostatnim typem tarcia występującego w procesie kształtowania blach jest tarcie płynne występujące wówczas, gdy powierzchnie trące są oddzielone od siebie ciągłą, dobrze przylegającą do powierzchni warstwą smaru (rys. 1.5).



Rys. 1.5. Model tarcia płynnego, opracowano na podstawie [7]

1.2. Zjawiska wpływające na mechanizm tarcia w procesie kształtowania blach

1.2.1. Rola smarowania we współdziałaniu powierzchni trących

Głównym celem stosowania smarowania podczas procesu kształtowania blach jest przede wszystkim zmniejszenie wartości siły, jaka jest potrzebna do pokonania siły tarcia występującej pomiędzy parą trącą, jak również zmniejszenie zużycia i zwiększenie trwałości narzędzi. Zastosowanie smaru w procesie tłoczenia bezpośrednio wpływa na charakter płynięcia metalu odkształcanego, zmniejszenie nacisku i współczynnika tarcia,

co jednoznacznie przekłada się na poprawienie jakości powierzchni gotowego wyrobu [19-22].

Częstym zabiegiem, który jest stosowany w celu poprawienia wydajności smarowania podczas procesu kształtowania blach, jest teksturowanie powierzchni narzędzi w celu stworzenia kieszeni olejowych [23-25], pełniących rolę zasobników substancji smarującej. Według Gładysza i Matuszaka [26] głównymi parametrami wpływającymi na powstawanie tak zwanych kieszeni olejowych jest wartość nacisków powierzchniowych oraz stopień odkształcenia i orientacja blachy względem kierunku walcowania.

W celu określenia rodzaju występującego tarcia można posłużyć się wartością liczby Herseya H , której wartość wyliczana jest z zależności 1.1.

$$H = \frac{v \cdot \eta}{p_{sr}} \quad (1.1)$$

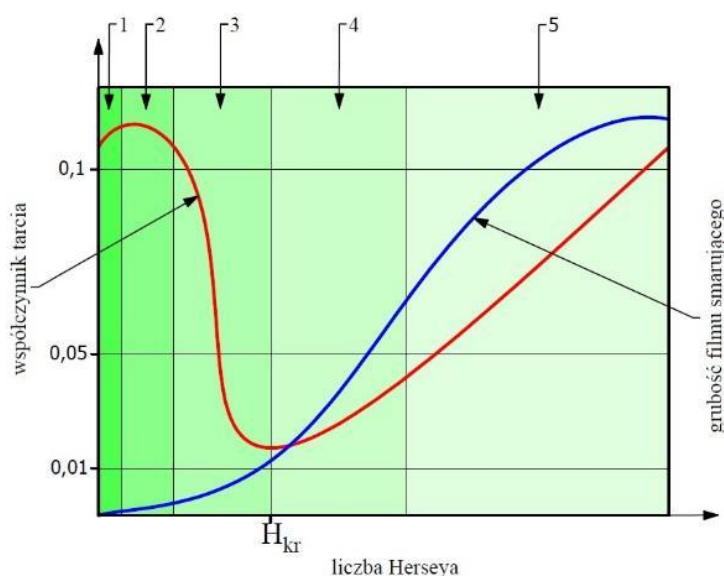
gdzie:

v – prędkość poślizgu,

η – lepkość dynamiczna smaru,

p_{sr} – średni nacisk na powierzchni styku.

Celem zobrazowania charakterystycznej zmiany wartości współczynnika tarcia w rezultacie zmieniających się parametrów procesu kształtowania, wpływających jednocześnie na występujący model tarcia, na rysunku 1.6 przedstawiono wykres Stribecka umożliwiający identyfikację rodzaju tarcia w zależności od wartości liczby Herseya.

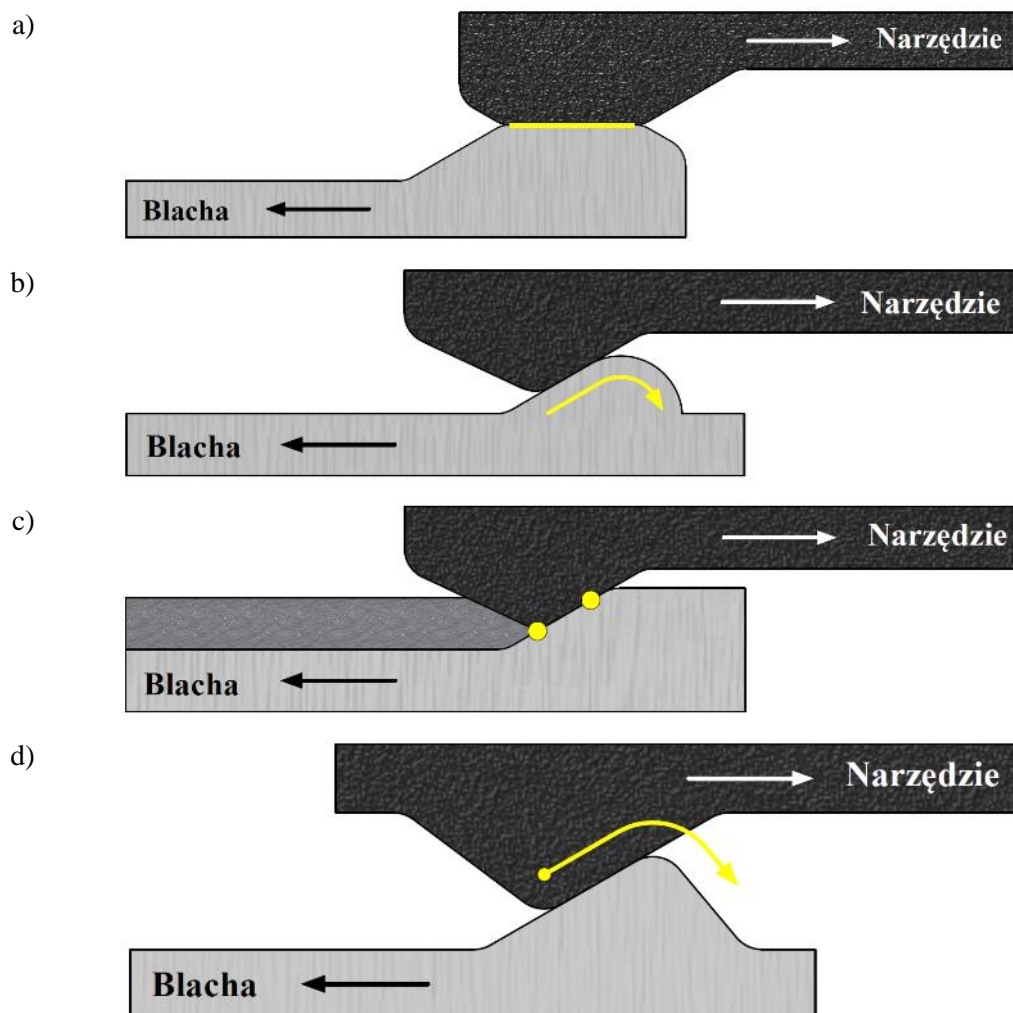


Rys. 1.6. Wykres Stribecka: 1 – tarcie suche, 2 – tarcie graniczne, 3 – tarcie mieszane, 4 – tarcie płynne (smarowanie elastohydrodynamiczne), 5 – tarcie płynne (smarowanie hydrodynamiczne), opracowano na podstawie [7]

Z przedstawionego na powyższym rysunku wykresu można odczytać charakterystyczne rodzaje tarcia, które zostały zaznaczone kolejno obszarami od 1 do 5. Obszar pierwszy jest to obszar tarcia suchego, w którym występuje współczynnik tarcia o dużej wartości oraz duże zużycie powierzchni, zachodzące na skutek oddziaływania trących powierzchni, które może występować w postaci:

- adhezji powierzchni ślizgowych,
- odkształceń sprężysto – plastycznych chropowatości powierzchni,
- bruzdowania,
- poślizgu nierówności powierzchni.

Wszystkie przedstawione mechanizmy zużycia powierzchni, charakterystyczne dla tarcia suchego, zostały przedstawione na rysunku 1.7.



Rys. 1.7. Udział czterech różnych rodzajów tarcia w warunkach tarcia suchego: a) adhezja, b) odkształcenie sprężysto - plastyczne, c) bruzdowanie, d) poślizg nierówności powierzchni

Drugi obszar (rys. 1.6) przedstawia tarcie graniczne, które podobnie jak w obszarze późniejszym, charakteryzuje się wysokim współczynnikiem tarcia, lecz zaczyna się powoli zmniejszać. Obszar trzeci jest to obszar tarcia mieszanego, w którym zachodzi największe zmniejszenie wartości współczynnika tarcia, aż do momentu osiągnięcia wartości minimalnej. Miejsce to zaznaczone jest krytyczną liczbą Herseya H_{kr} , która opisuje miejsce przejścia z tarcia mieszanego w tarcie płynne, kolejno tarcie płynne dla smarowania elastohydrodynamicznego (obszar czwarty) oraz dla smarowania hydrodynamicznego (obszar piąty).

W celu lepszego opisanie zjawiska zmiany oporów tarcia występujących na skutek oddziaływania smarowania hydrostatycznego lub hydrodynamicznego [27] Wihlborg i Crafoord [28] wprowadzili tak zwany wskaźnik Wihlborga–Crafoorda (ang. WC–index) [28] w następujący sposób:

$$WC = \frac{NIOP_t \cdot BL_{alfa}}{\alpha} \quad (1.2)$$

gdzie:

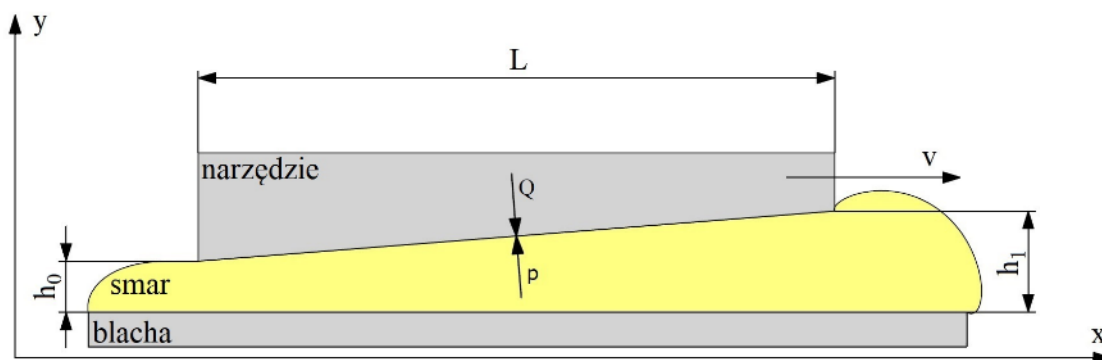
$NIOP_t$ – liczba odrębnych kieszeni olejowych,

BL_{alfa} – obwód zamkniętych kieszeni olejowych,

α – pole powierzchni styku.

Badania prowadzone przez Wihlborga i Crafoorda [28] na temat przydatności wskaźnika WC do określenia siły tarcia na podstawie rodzaju smarowania oraz sposobu dostarczania do strefy styku smaru pozwoliły na jednoznaczne stwierdzenie, że dana wartość wskaźnika WC odpowiada określonej wartości współczynnika tarcia, który zmienia się zależnie od zmieniającej się wartości wskaźnika WC .

Innym zjawiskiem, skutecznie ograniczającym tarcie pomiędzy poruszającymi się względem siebie powierzchniami blachy i narzędzia, jest tworzenie się tak zwanego klina smarowego, formującego się na skutek dostarczenia substancji smarującej między powierzchnie pary trącej. Wówczas w procesie tarcia zachodzą warunki korzystne do powstania procesu smarowania hydrodynamicznego, co umożliwia przenoszenie występujących obciążeń jedynie przez warstwę smaru (rys. 1.8).



Rys. 1.8. Schemat tworzenia się klina smarowego, opracowano na podstawie [7]

Wystąpienie klina smarowego oraz zjawiska smarowania hydrodynamicznego w procesie kształtowania blach jest możliwe, kiedy proces kształtowania odbywa się przy wystarczająco dużej prędkości oraz jeśli substancja smarująca charakteryzuje się właściwie dobraną lepkością, zgodnie z równaniem (1.3) [7]:

$$F_t = \eta F_s \frac{v_{sr}}{h} \quad (1.3)$$

gdzie:

F_t – siła tarcia,

η – lepkość dynamiczna smaru,

F_s – powierzchnia warstwy ścinanej smaru,

v_{sr} – średnia prędkość przemieszczania blachy względem narzędzia,

h – grubość warstwy smaru.

Występowanie zamkniętych kieszeni smarujących wiąże się ze zjawiskiem opisanym przez Emmensa [29] na podstawie równania Reynoldsa (1.4) opisującego ciśnienie smaru znajdującego się w nierównościach powierzchni (rys. 1.9).

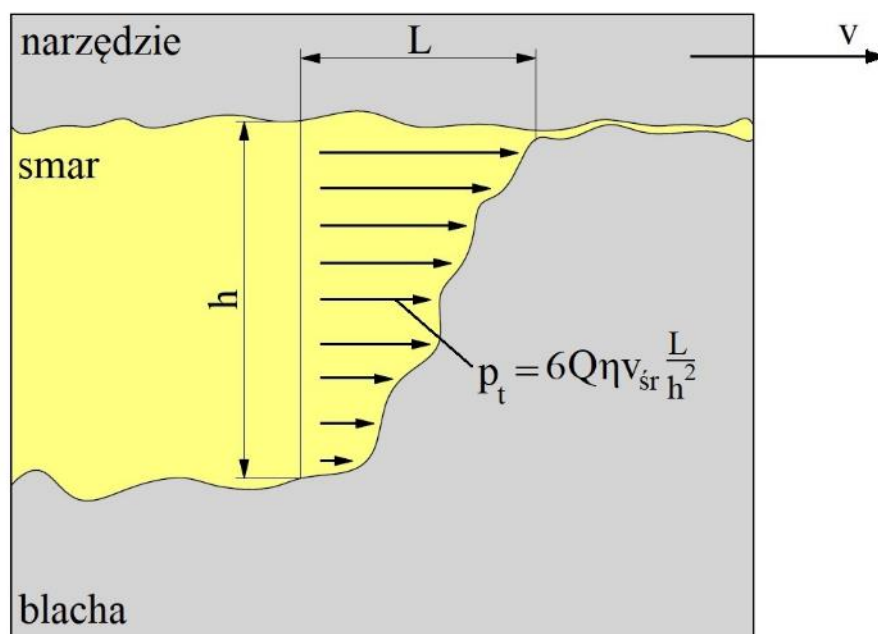
$$p_1 = 6Q\eta v_{sr} \frac{L}{h^2} \quad (1.4)$$

gdzie:

p_1 – ciśnienie smaru,

Q – bezwymiarowy współczynnik,

L – długość wzniosu nierówności.



Rys. 1.9. Schemat określenia ciśnienia smaru wewnątrz nierówności powierzchni, opracowano na podstawie [7]

Wartość użytego w powyższym równaniu współczynnika Q jest zmienna i jest wyznaczana na podstawie równania (1.5):

$$Q = \frac{1}{(m-1)^2} \left[\ln(m) - \frac{2(m-1)}{m+1} \right] \quad (1.5)$$

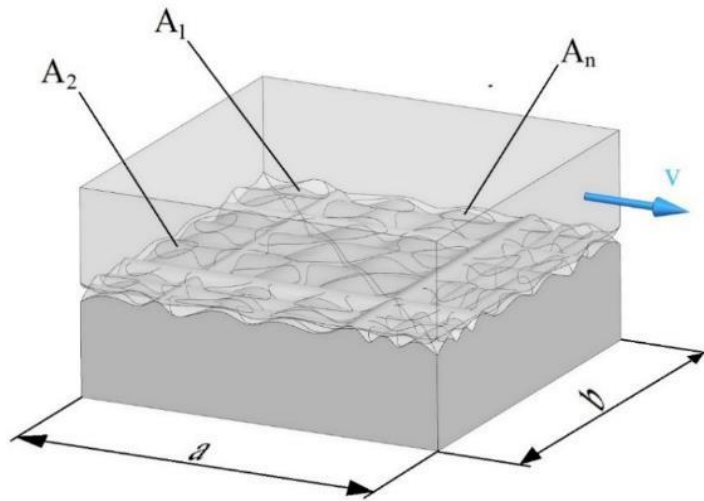
gdzie:

$m = \frac{h_1}{h_0}$ – stosunek wysokości warstwy smaru na końcu i początku klina smarowego (rys. 1.8).

1.2.2. Struktura geometryczna powierzchni

W procesie kształtowania blach olbrzymią rolę w wielkości występujących oporów tarcia odgrywa chropowatość powierzchni zarówno odkształcanej blachy, jak również narzędzi. Wpływ chropowatości powierzchni na zjawisko tarcia związany jest z ograniczeniem styku powierzchni pary trących jedynie do wierzchołków nierówności, które wskutek działającej siły nacisku zostają plastycznie odkształcane do momentu, w którym powstała rzeczywista powierzchnia styku będzie wystarczająca do przeniesienia obciążenia [30-32].

Zwiększona powierzchnia rzeczywistego styku powstała na skutek ścinania i odkształcania sprężysto–plastycznego nierówności, zgodnie z przykładem przedstawionym na rysunku 1.10, skutkuje wzrostem występujących naprężeń stycznych w czasie przemieszczania się względem siebie współpracujących powierzchni.



Rys. 1.10. Obszar styku pary trącej, opracowano na podstawie [7]

Na podstawie licznych badań poświęconych zależności siły tarcia od powierzchni styku można jednoznacznie stwierdzić, że to właśnie pole rzeczywistego styku, a nie nominalnego pola powierzchni, ma wpływ na wartość oporów tarcia [33-35].

Wartość rzeczywistej powierzchni styku A_r równa jest:

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad (1.6)$$

gdzie:

A_i – obszar styku chropowatości.

Wartość rzeczywistej powierzchni kontaktu A_r jest mniejsza od nominalnej powierzchni kontaktu A_n , wynoszącej:

$$A_n = a \cdot b \quad (1.7)$$

gdzie:

a, b – wymiary geometryczne rozpatrywanego pola powierzchni kontaktu.

Chcąc wyznaczyć przybliżoną wartość rzeczywistej powierzchni kontaktu pomiędzy współpracującymi powierzchniami, stosuje się zależność 1.8, która jest jednak obciążona błędem wynikającym ze stochastycznych metod szacowania wartości C_r .

$$A_r = C_r \cdot F_N \quad (1.8)$$

gdzie:

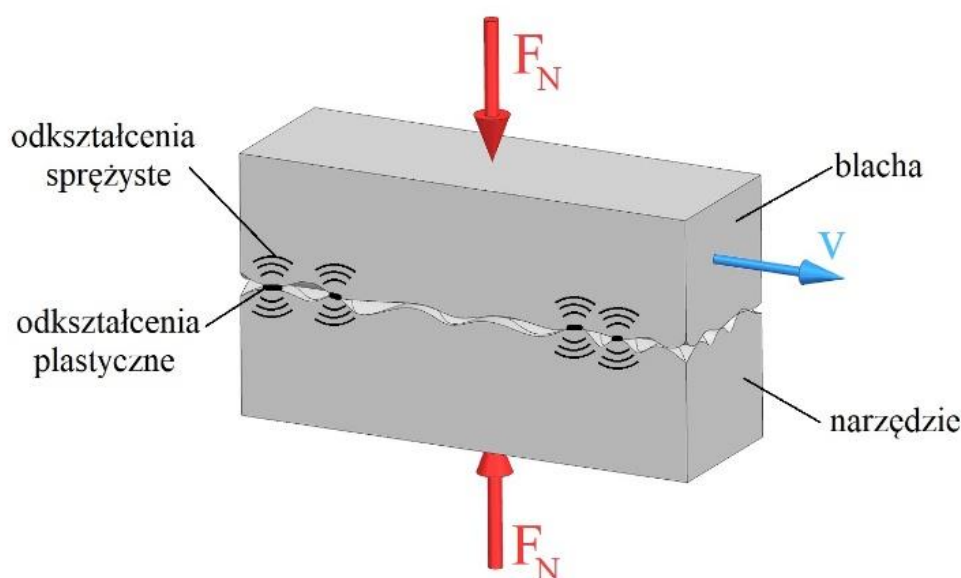
C_r – współczynnik zależny od rodzaju materiału, chropowatości powierzchni, typu obciążenia i warunków smarowania,

F_N – siła nacisku.

W procesie tarcia współpracujących powierzchni, ze względu na przypadkowy charakter ułożenia wierzchołków nierówności, zachodzi zjawisko nazwane efektem Bauschingera, który odnosi się do właściwości materiału, którego charakterystyka naprężeń i odkształceń zmienia się na skutek mikroskopijnych rozkładów naprężeń na powierzchni nierówności [3].

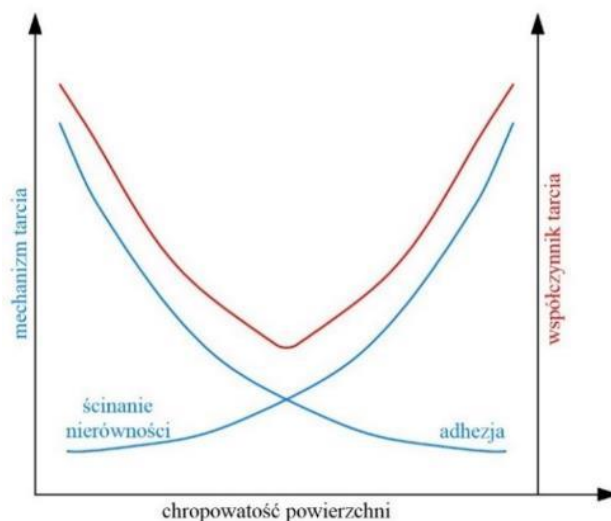
Wyniki uzyskane po prowadzonych badaniach [7, 35, 36] pokazują, że średnia powierzchnia styku jest w przybliżeniu stała, a liczba stykających się wierzchołków nierówności jest wprost proporcjonalna do siły nacisku. Zmiana powierzchni kontaktu jest efektem oddziaływania na siebie wierzchołków nierówności powierzchni, co zostało przedstawione na rysunku 1.11, ukazującym charakter oddziaływań powierzchni materiału odkształcanego i narzędzia w procesie obróbki plastycznej na skutek:

- odkształceń sprężystych,
- odkształceń sprężystych.



Rys. 1.11. Charakter oddziaływań powierzchni materiału odkształcanego i narzędzia w procesie obróbki plastycznej, opracowano na podstawie [7]

Występowanie wyżej wymienionych odkształceń wpływa na ewolucję chropowatości powierzchni, co jednoznacznie przekłada się na wzrost pola powierzchni rzeczywistego kontaktu oraz zmianę wartości współczynnika tarcia (rys. 1.12).

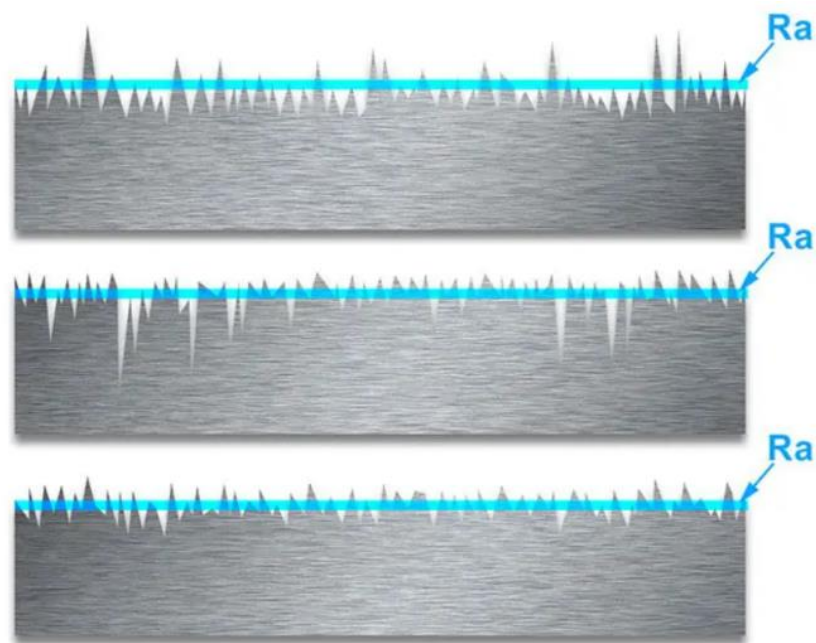


Rys. 1.12. Zależność współczynnika tarcia oraz powierzchni rzeczywistego styku, od chropowatości współpracujących powierzchni, opracowano na podstawie [7]

Z rysunku 1.12 wynika, że zarówno współczynnik tarcia, jak również mechanizmy tarcia, takie jak: ścinanie nierówności oraz adhezja, są zależne od chropowatości powierzchni, gdzie częstość występowania mechanizmu ścinania nierówności zwiększa się wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni, natomiast mechanizm adhezji przeciwnie, jego udział zmniejsza się wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni. Z kolei współczynnik tarcia dla wybranych warunków tarcia zmienia się wraz ze zmianą chropowatości powierzchni, przyjmując minimalną wartość dla charakterystycznej wartości chropowatości.

Kształt powierzchni trącej wpływa na wielkość nominalnego pola kontaktu, co z kolei przekłada się na wielkość występujących nacisków. Prowadzone badania opisujące geometrię styku na podstawie parametrów 2D oraz 3D chropowatości wskazują na istotny wpływ tych parametrów na wielkość siły tarcia [37] oraz charakter zjawisk tribologicznych [38, 39].

Najczęściej stosowanym parametrem służącym do opisu chropowatości powierzchni jest parametr średniej arytmetycznej odchylenia profilu – R_a , będący podstawowym parametrem opisującym profil chropowatości dla pomiarów 2D. Parametr ten, pomimo częstego stosowania w przemyśle, nie powinien pełnić jednoznacznego parametru do oceny chropowatości z naukowego punktu widzenia. Jest to związane z różnicami w charakterze zjawisk tribologicznych towarzyszących odkształceniu blach o różnej topografii, które jednak charakteryzują się tym samym parametrem R_a (rys. 1.13) [40, 41], dlatego dla dokładniejszego pomiaru charakterystyki powierzchni można stosować parametr R_q , który jest parametrem opisującym odchylenie średniokwadratowe, odpowiadające odchyleniu standardowemu [42, 43].



Rys. 1.13. Oddziaływanie płaskiej powierzchni narzędzia z powierzchniami chropowatymi o tej samej wartości parametru Ra [136]

Z kolei podstawowym parametrem opisującym profil chropowatości 3D, należącym do grupy 14 klas chropowatości [131], jest parametr S_q opisujący odchylenie standardowe wysokości nierówności powierzchni.

Częstym błędem popełnianym podczas analizowania wpływu topografii powierzchni na charakter procesu tarcia jest skupianie się na jednym wybranym parametrze, pomijając jednocześnie pozostałe. Jednak ze względu na złożony charakter zjawisk tribologicznych takie zawężenie generuje błędy wynikające z faktu, że wszystkie parametry chropowatości, w mniejszym bądź większym stopniu, wpływają bezpośrednio na charakter tego zjawiska. Nierzadko dochodzi jednocześnie do interakcji pomiędzy wybranymi parametrami, wpływając w sposób nieprzewidywalny na otrzymane wyniki.

Dlatego też do oceny topografii powierzchni blachy najkorzystniejszą metodą jest pomiar przestrzennych parametrów chropowatości, takich jak: S_v , S_p , S_z , S_a , S_q , S_{sk} i S_{ku} [131].

1.3. Wyznaczanie wartości współczynnika tarcia w procesie kształtowania blach

1.3.1. Podział metod wyznaczania współczynnika tarcia

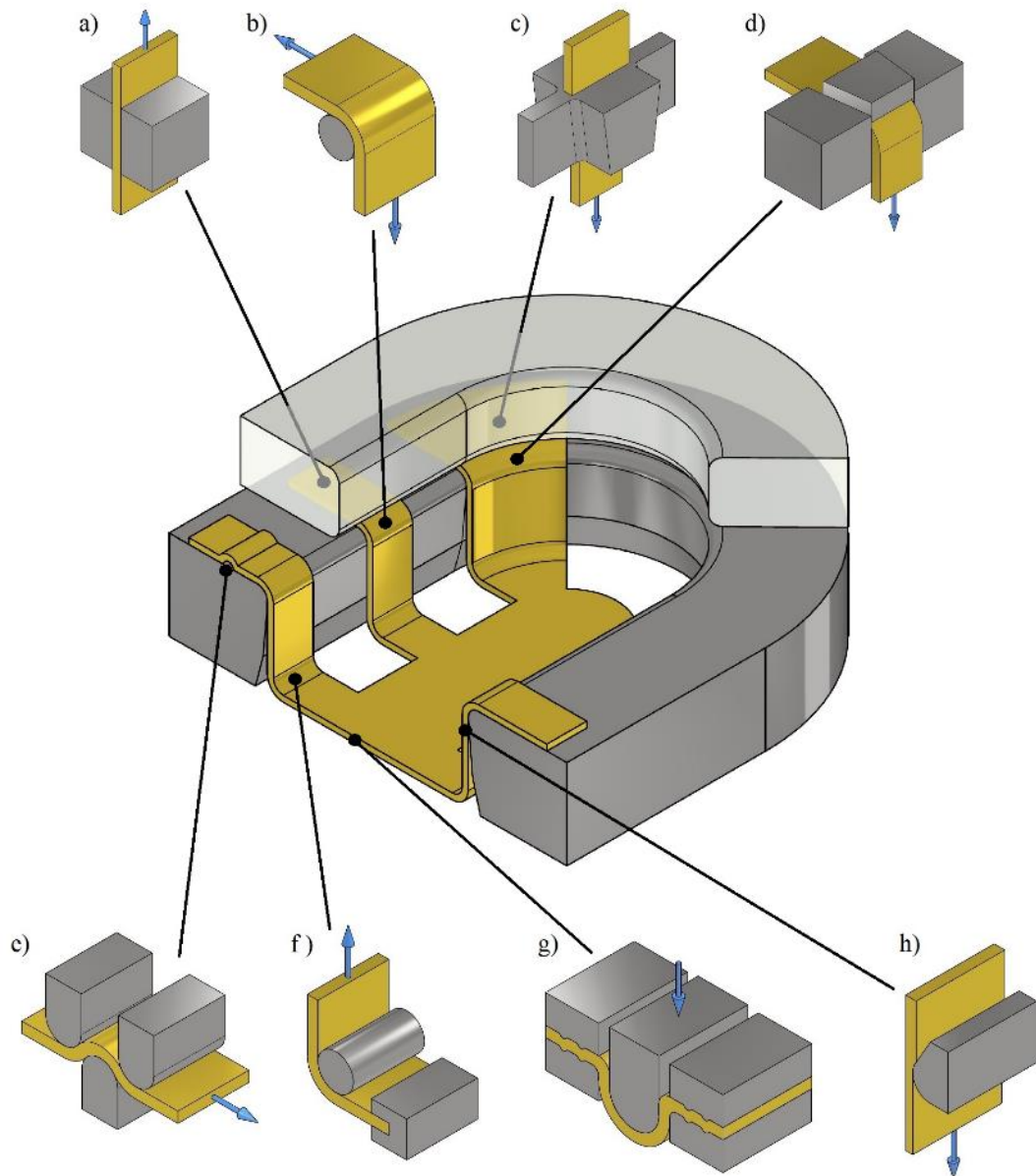
Prowadzone badania nad odwzorowaniem warunków tarcia w procesach kształtowania blach można podzielić na testy symulujące kinematykę procesu kształtowania oraz testy symulujące zjawiska tribologiczne.

Testy symulujące proces kształtowania blach mają na celu zbadanie całokształtu występujących zjawisk w czasie prowadzonej obróbki plastycznej z uwzględnieniem kinematyki procesu odpowiadającej rzeczywiste warunki. Druga metoda ma na celu symulowanie jedynie zjawisk tribologicznych występujących w poszczególnych obszarach kształtowanej wytłoczki [44, 45]. Bez względu na rodzaj wybranej metody istnieje duże ryzyko błędu, wynikającego z niemożności uwzględnienia wszystkich parametrów wpływających na charakter tarcia. Często jest także wpływ niezwiązanych ze sobą parametrów na inne w rezultacie zachodzących pomiędzy nimi interakcji.

W obydwu przedstawionych metodach sposób wyznaczenia współczynnika tarcia odbywać się może w sposób pośredni lub bezpośredni. Stosowanie metod bezpośrednich pozwala wprost określić współczynnik tarcia na podstawie przebiegu procesu kształtowania. Z kolei pośredni pomiar współczynnika tarcia, umożliwia jedynie wyznaczenie uśrednionej wartości współczynnika tarcia na podstawie parametrów, takich jak: siła normalna i siła tarcia.

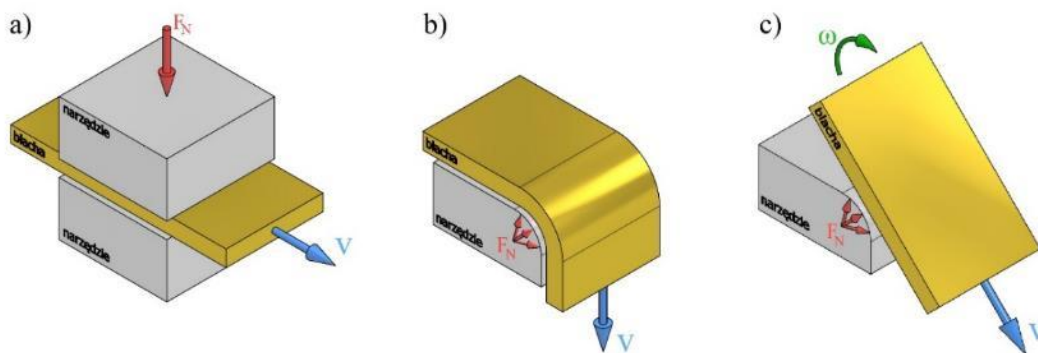
W poszczególnych miejscach wytłoczki występują różne stany naprężenia i odkształcenia oraz różne prędkości przemieszczenia ze względu na zastosowane parametry i specyfikę procesu. Powierzchnia wytłoczki dzielona jest na określone obszary charakteryzujące się zróżnicowanymi warunkami tarcia (rys. 1.14). Na ich podstawie opracowano szereg testów tribologicznych odpowiadających rzeczywistym warunkom występującym we wskazanych miejscach w czasie kształtowania blach [46]. Do podstawowych testów zaliczyć można:

- test ciągnięcia pasa blachy,
- test zginania blachy z ciągnięciem i rozciąganiem,
- test ciągnięcia i rozciągania blachy w warunkach ściskania blachy,
- test zginania blachy z ciągnięciem,
- test wtlaczania stempla półkulistego,
- test redukcji grubości blachy.



Rys. 1.14. Obszary wytłoczki z przypisanymi próbami tarcia: a) test ciągnięcia pasa blachy, b) test zginania blachy z rozciąganiem, c) test ciągnięcia blachy w warunkach ściskania, d) test rozciągania blachy w warunkach ściskania, e) test ciągnięcia blachy ze zginaniem, f) test ciągnięcia blachy ze zginaniem, g) wtlaczanie półkulistego stempla, h) test redukcji grubości blachy, opracowano na podstawie [7]

Geometria styku odkształcanej blachy z narzędziem, jak również różny charakter współpracy między nimi (rys. 1.15) utrudniają stworzenie jednego uniwersalnego sposobu określania współczynnika tarcia. Jurkovic i in. [47] zaproponowali sposób określania współczynnika tarcia na zaokrąglonej krawędzi wytłoczki, a przeprowadzone eksperymenty potwierdziły możliwość określenia wartości współczynnika tarcia na podstawie występującej siły tarcia i siły normalnej [48-50].

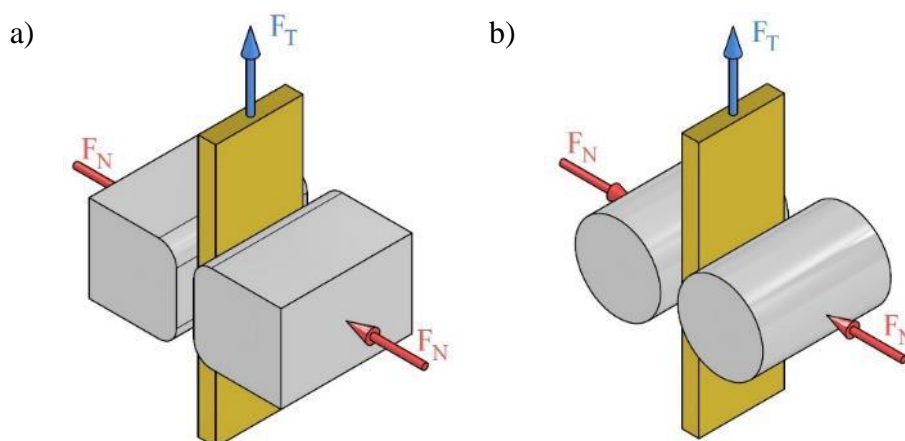


Rys. 1.15. Geometria styku i charakter współpracy blachy z narzędziem: a) kontakt pomiędzy powierzchnią blachy i płaską powierzchnią narzędzia, b) przemieszczanie blachy wokół narzędzia z zaokrągloną krawędzią, c) przemieszczanie blachy ze zmianą jej orientacji, opracowano na podstawie [7]

Zarówno odmiany prób tarcia w różnych obszarach wytłoczki (rys. 1.14), jak i również metody zaproponowane na rysunku 1.15 nie odpowiadają rzeczywistym warunkom procesu kształtowania, dlatego wartości współczynnika tarcia wyznaczone za pośrednictwem jednej z wyżej wymienionych metod należy traktować jako wartość uśrednioną występującą dla wybranego obszaru [51-53]. W celu oszacowania wartości współczynnika tarcia występującego w pozostałych obszarach konieczne jest przeprowadzenie właściwych dla tych obszarów testów tribologicznych, których metodyka uwzględnia m.in. charakterystyczny stan naprężeń wynikający z geometrii wytłoczki [46, 54].

1.3.2. Test ciągnięcia pasa blachy

Test ciągnięcia pasa blachy jest badaniem prowadzonym w celu określenia oporów tarcia podczas kształtowania blach, występujących pomiędzy dociskaczem a powierzchnią odkształcanej blachy. Schemat przeprowadzenia tego testu polega na ciągnięciu pasa blachy umieszczonego pomiędzy dwoma przeciwpróbkami, których kształt może mieć formę płaską [55-58] lub walcową [57, 59-61], zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1.16.



Rys. 1.16. Ciągnięcie pasa blachy przy zastosowaniu przeciwpróbek: a) płaskich i b) walcowych, opracowano na podstawie [7]

Występowanie w tym teście pary przeciwpróbek skutkuje kontaktem powierzchni odkształcanej blachy z powierzchniami przeciwpróbek zarówno po jednej, jak i po drugiej stronie [62-65]. Wyznaczenie wartości współczynnika tarcia w tej metodzie odbywa się na podstawie zależności (1.9).

$$\mu = \frac{F_T}{2F_N} \quad (1.9)$$

gdzie:

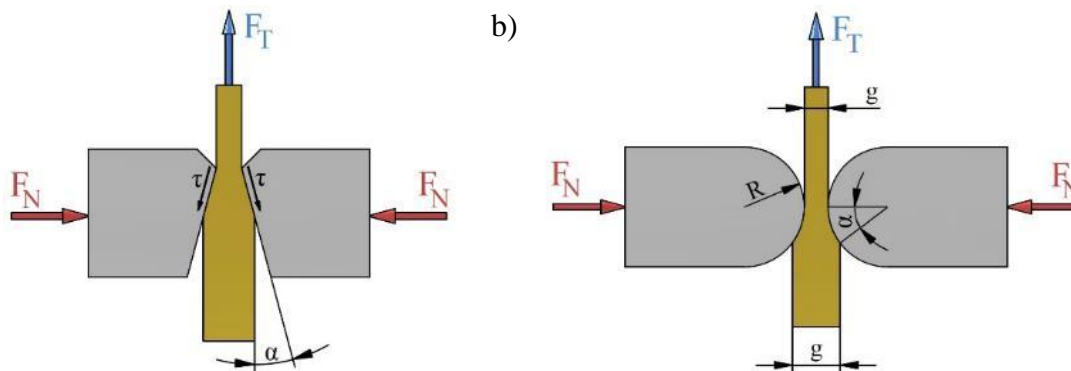
F_T – siła przeciągania pasa blachy,

F_N – siła normalna (docisku przeciwpróbek).

Poza zależnością występujących oporów tarcia od siły docisku zaobserwowano również wpływ innych parametrów, takich jak:

- chropowatość powierzchni, której charakter zmian po przeprowadzonych testach przeciągania pasa blachy pomiędzy przeciwpróbkami walcowymi i płaskimi wykazywał podobne zmiany oraz porównywalne wartości zmierzonego współczynnika tarcia [57],
- zastosowanie smarowania, które pozytywnie wpływa na zmniejszenie wartości współczynnika tarcia,
- lepkość zastosowanego smaru, badania zawarte w pracy [66] wykazały zmniejszenie wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem lepkości oleju,
- prędkość ciągnięcia próbki oraz zorientowanie kierunku ciągnięcia pasa blachy względem kierunku walcowania blachy [61, 67].

Poza podstawowym testem ciągnięcia pasa blachy (rys. 1.16), wykonywane są również testy z redukcją grubości zarówno dla przeciwpróbek klinowych (rys. 1.17.a) [68, 69], jak również z zastosowaniem przeciwpróbek o zaokrąglonym profilu (rys. 1.17.b) [4, 26, 70].



Rys. 1.17. Schemat ciągnięcia pasa blachy z redukcją grubości przy zastosowaniu przeciwpróbek: a) klinowych i b) o zaokrąglonym profilu, opracowano na podstawie [7]

W teście ciągnięcia pasa blachy z redukcją grubości blachy (rys. 1.17.a) wartość współczynnika tarcia wyznaczona jest na podstawie zależności (1.10) [68]:

$$\mu = \frac{F_T - 2F_N \tan \alpha_1}{2F_N + F_T \tan \alpha_1} \quad (1.10)$$

gdzie:

F_T – siła przeciągania pasa blachy,

F_N – siła normalna (docisku przeciwpróbek),

α_1 – kąt powierzchni kontaktu.

Z kolei wartość współczynnika tarcia dla testu ciągnięcia pasa blachy zgodnie ze schematem na rysunku 1.17.b wyznacza się z zależności (1.11).

$$\mu = \frac{F_T - 2F_T \tan \left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}{2F_T + F_T \tan \left(\frac{\alpha_2}{2}\right)} \quad (1.11)$$

gdzie:

α_2 – kąt łuku walcowej powierzchni kontaktu.

Wyrażenie $\tan \left(\frac{\alpha}{2}\right)$, można przedstawić jako:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{g_0 - g_1}{4R - (g_0 - g_1)}} \quad (1.12)$$

gdzie:

g_0 – grubość początkowa blachy,

g_1 – grubość końcowa blachy,

R – promień zaokrąglenia walcowej powierzchni kontaktu.

1.4. Smarowanie w procesach kształtowania blach

1.4.1. Zadania smarów technologicznych

W procesach kształtowania blach na zimno ważną rolę pełnią smary technologiczne, których głównym zadaniem jest zmniejszenie współczynnika tarcia za pomocą wytworzonej warstwy oddzielającej powierzchnię odkształcaną i powierzchnię roboczą narzędzia. Utrzymanie ciągłości warstwy smaru w procesie kształtowania blach jest mocno utrudnione ze względu na występujące duże naciski jednostkowe, dlatego często w procesie kształtowania blach zachodzi mechanizm tarcia półpłynnego.

Towarzyszące procesowi kształtowania blach duże odkształcenia i wydzielane się ciepła stawiają przed stosowanymi środkami smarującymi wymagania w postaci zdolności tworzenia warstwy ochronnej i dużej pojemności cieplnej. Celem zapewnienia tych właściwości olej powinien charakteryzować się odpowiednią lepkością [71], która minimalizuje zjawisko wyciekania smaru ze strefy kontaktu i składem chemicznym zapewniającym dobre i aktywne przyleganie smaru do powierzchni. Dodatkowo, smary stosowane w procesie powinny charakteryzować się łatwym nanoszeniem na powierzchnię blachy i narzędzia, pozostawiać minimalną ilość resztek oraz być obojętne chemicznie i nieszkodliwe dla pracowników.

Stosowanie jednego idealnego środka smarującego ze względu na różnorodność procesów, ich charakter i stosowane parametry kształtowania blach [72, 73] nie jest możliwe. Dlatego stosowane są różne środki, których zastosowanie jest przede wszystkim związane z oczekiwanym efektem końcowym.

1.4.2. Klasyfikacja substancji smarujących stosowanych podczas wytłaczania blach

Substancje smarujące stosowane w procesie kształtowania blach są klasyfikowane ze względu na konsystencję, pochodzenie i przeznaczenie. Ze względu na konsystencję stosowanych substancji smarujących można podzielić je na: smary płynne, smary plastyczne i smary stałe. Pierwszy z rodzajów, a zarazem najczęściej stosowany środek smarujący, to smar płynny. Oleje stosowane w przemyśle należą do grupy olejów mineralnych, syntetycznych, będących produktem ropy naftowej powstałym w procesie rafinacji oraz oleje naturalne. Obok wspomnianych wcześniej olejów grupę szeroko stosowanych środków

smarnych stanowią smary plastyczne. Smary plastyczne to substancje składające się z oleju, w zależności od potrzeb mineralnego lub syntetycznego, i środka zagęszczającego, tworząc razem substancję koloidalną. Smary te dodatkowo można opisać jako cieczy nieniutonowskie, których lepkość zależy od temperatury, ciśnienia oraz prędkości i czasu odkształcenia. Tym samym niewielkie naprężenia powodują ich niewielkie i odwracalne odkształcenia, z kolei przekroczenie wartości granicznej skutkuje tym, że smar zachowuje się jak ciecz.

Głównym czynnikiem podziału smarów plastycznych jest rodzaj zagęszczacza, ze względu na który można wyróżnić:

- smary mydlane, zagęszczane mydłami wyższych kwasów tłuszczowych i kationów metali,
- smary z zagęszczaczami mieszanymi, posiadające mieszane zagęszczacze w postaci mydła, celem wyodrębnienia pozytywnych cech poszczególnych rodzajów zagęszczaczy,
- smary węglowodorowe, smary zagęszczane za pomocą stałych węglowodorów, takich jak na przykład: parafina czy cerezyna,
- smary z zagęszczaczami nieorganicznymi, czyli zagęszczaczami w postaci bentonitów, żelu krzemionkowego i innych specjalnie przygotowanych minerałów,
- smary z zagęszczaczami polimerowymi, zagęszczane za pomocą polimerów i wielocząsteczkowych związków organicznych.

Stosowane w zakładach obróbki plastycznej blach oleje mineralne z rafinacji ropy naftowej i oleje syntetyczne charakteryzują się korzystnymi właściwościami eksploatacyjnymi, jednak ich stosowanie stwarza duże zagrożenie dla środowiska naturalnego w związku z emisją do środowiska szkodliwych produktów w wyniku ich użytkowania oraz konieczności ich recyklingu.

Na przestrzeni ostatnich lat, na skutek zaostrzających się przepisów dotyczących ochrony środowiska, wzrosło zainteresowanie olejami naturalnymi jako odpowiednikami olejów naftowych, które cechują się dobrymi właściwościami użytkowymi i tym, że są ekologiczne. Przykładem naturalnych olejów, które przodują wśród innych, są oleje roślinne, które w porównaniu z olejami mineralnymi charakteryzują się wysoką smarownością i lepkością, a dodatkowo są nietoksyczne i w wysokim stopniu biodegradowalne. Jednakże słaba stabilność oksydacyjna i hydrolityczna, a także niewielkie zawartości wosków, tokoferoli i fitosteroli w olejach roślinnych, skutecznie ogranicza ich stosowanie jako substancje smarujące w procesie kształtowania blach.

Przeprowadzony przegląd literatury wykazał jednak, że pomimo ograniczeń, nieustannie podejmowane są próby wykorzystania olejów roślinnych jako alternatywy dla olejów mineralnych i syntetycznych. Karthik [74] w swoich badaniach sprawdził zastosowanie olejów pongamia i jatrofy jako substancji smarujących w procesie kształtowania wytłoczek ze stopu aluminium EN AW-6061. W rezultacie przeprowadzonych badań dowiódł, że stosowanie oleju z jatrofy generuje najmniejsze obciążenie stempla, a olej pangamia pozwala na uzyskiwanie dużych odkształceń materiału. Z kolei Carcel i in. [75] badali zastosowanie olejów roślinnych, takich jak: kukurydziany, słonecznikowy, oliwkowy i sojowy do tłoczenia części karoserii z blachy głębokotłocznej w warunkach tarcia granicznego. W rezultacie przeprowadzonych badań wykazano, że odpowiednia kontrola topografii powierzchni pozwala na wyeliminowanie stosowania specjalnych olejów do przeróbki plastycznej na rzecz olejów roślinnych. Niemniej jednak większość opisywanych badań dotyczy olejów jadalnych, których stosowanie w obliczu narastającego kryzysu żywnościowego jest nieuzasadnione. Rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie olejów naturalnych, ale niejadalnych, jak opisano w artykule Trzepiecińskiego i in. [76] w którym przedstawiono porównanie właściwości smarne olejów niejadalnych (moringa i karanja) z olejami jadalnymi (słonecznikowym i rzepakowym). Porównanie przeprowadzono na podstawie badania wpływu stosowanych olejów na wartość współczynnika tarcia w rezultacie przeprowadzenia testu tribologicznego, jakim jest test ciągnięcia pasa blachy. Stwierdzono, że zastosowane niejadalne oleje naturalne zapewniły niższe wartości współczynnika tarcia w porównaniu z olejami jadalnymi.

Stosowanie do procesów przeróbki plastycznej olejów naturalnych, ale również olejów mineralnych i syntetycznych, wiąże się z koniecznością modyfikacji ich właściwości. W tym celu najczęściej stosowane są dodatki uszlachetniające, takie jak: grafit, dwusiarczek molibdenu, azotek boru i inne. Jak wskazuje Dyja i in. [77] w artykule na temat doboru smarów technologicznych do tłoczenia blach aluminiowych i tytanowych, dodanie dodatków, takich jak: kwas borowy i kwas stearynowy wpływa na zmniejszenie oporów tarcia. Poza niewątpliwym wpływem rodzaju dodatków uszlachetniających na zmniejszenie oporów tarcia, dodatki uszlachetniające bezpośrednio zmieniają właściwości środków smarujących. Rogoś w artykule [78] na temat wpływu dodatków AW/EP (AW – dodatki przeciwzatarciowe, EP – dodatki przeciwzużyciowe, ang. antiwear / extreme pressure) na właściwości smarne wskazuje, że dodatki uszlachetniające korzystnie wpływają na właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe narzędzi.

1.5. Stan wiedzy w zakresie badań zjawisk tribologicznych w strefie oddziaływania dociskacza

Analizując stan wiedzy z zakresu badań zjawisk tribologicznych w strefie oddziaływania dociskacza, przeprowadzono szczegółowy przegląd najnowszych badań z tego zakresu.

Schell i in. [79] w swoich badaniach porównali zastosowanie różnych klas środków smarnych do obróbki plastycznej blach ze stopu aluminium na gorąco i w temperaturze otoczenia, prowadząc testy ciągnięcia pasa blachy. W badaniach użyto stopu aluminium EN AW-7075 T6, którego testy przeciągania zrealizowano przy zastosowaniu zmiennych parametrów procesu, tj. nacisków równych 3, 5 i 10 MPa i temperatury (temperatura otoczenia, 225 i 425°C). Przeprowadzone testy przeciągania pasa blachy z zastosowaniem oleju syntetycznego, oleju mineralnego, oleju estrowego, emulsji olejowej, kleju termotopliwego, wosku, polimeru i grafitu wykazały, że smary olejowe oraz wosk wykazują doskonałą smarowność, jednak stabilność warstwy smarnej nie jest wystarczająca do zapewnienia ochrony przed zużyciem narzędzia. Zwiększenie wydajności smaru może zostać zrealizowane za pomocą stosowania stałych cząstek, na przykład przez połączenie właściwości oleju estrowego i grafitu. Rezultatem przeprowadzonych badań był wniosek, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest połączenie smarów o wysokiej smarowności (np. wosku) i warstwy ochronnej (np. polimeru), które wykazuje doskonałe działanie smarne przy niskich naciskach kontaktowych.

Masters i in. [80], w ramach przeprowadzonych testów przeciągania pasa blachy, zbadali wpływ wstępnie rozciągniętych taśm ze stopów aluminium o wysokiej wytrzymałości na zjawisko tarcia. W badaniach użyli trzy najpopularniejsze gatunki aluminium stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, czyli EN AW-5754, EN AW-6111 i EN AW-6451, których powierzchnia w teście była smarowana z zastosowaniem dwóch smarów woskowych ALO70, AlubVS i oleju MP404. W badaniach skupiono się na wpływie takich parametrów jak kierunek przeciągania względem kierunku walcowania taśmy, wykonując badania próbek wyciętych pod kątem 0°, 45°, i 90° oraz stosowania materiału w postaci pasów blachy wstępnie odkształconych na wartość 2%, 5%, 10% i 15%. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem matrycy wykonanej z żeliwa sferoidalnego EN-JS2070 utwardzonego laserowo do twardości 54-58 w skali Rockwella. Długość pomiarowa wynosiła 300 mm, z której analizie poddawano stabilny odcinek pomiarowy na długości od 100 do 200 milimetrów. Rezultatem przeprowadzonych analiz było wykazanie wpływu odkształcenia plastycznego blachy na chropowatość jej powierzchni i zachowania tarcia,

wskazując, że zwiększenie wielkości odkształcenia wstępnego zwiększa chropowatość powierzchni gotowego materiału. Z kolei niezależnie od kierunku i wielkości odkształcenia, chropowatość powierzchni jest zawsze największa prostopadle do kierunku walcowania. Opisane zależności świadczą o anizotropowym charakterze procesu tarcia w zależności od kierunku walcowania.

Badania o podobnej tematyce poddające analizie wpływ wstępnego odkształcenia blachy przeprowadzili Trzepieciński i in. [76]. W ramach przeprowadzonych eksperymentów przeanalizowali wpływ odkształcenia wstępnego próbek wykonanych z blachy DC04 na poziomie 7, 14 i 21 %, oraz zmiennych wartości siły docisku (3, 6, 9, 12 MPa) w aspekcie zastosowania biosmarów o różnych wartościach lepkości kinematycznej, takich jak: olej słonecznikowy ($\eta_k = 58 \text{ mm}^2/\text{s}$), olej rzepakowy ($\eta_k = 51 \text{ mm}^2/\text{s}$), olej moringa ($\eta_k = 73 \text{ mm}^2/\text{s}$) i olej karanja ($\eta_k = 75 \text{ mm}^2/\text{s}$). W wyniku badań wykazano zmniejszenie wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem ciśnienia nominalnego. Najniższe wartości współczynnika tarcia zostały osiągnięte przy zastosowaniu oleju moringa i karanja, które nie wykazały zerwania filmu olejowego. Skuteczność smarowania dla odkształcenia 21% wyraźnie różniła się od wartości dla wstępnych odkształceń na poziomie 7 i 14 %, dla którego po początkowym wzroście wartości efektywności smarowania, jego wartość zmniejszała się dla najwyższych wartości ciśnienia nominalnego. Dodatkowo przeprowadzona analiza zmian topografii powierzchni ujawniła zjawisko spłaszczania wierzchołków nierówności w efekcie przeprowadzonych prób tarcia, co zostało potwierdzone pomiarami chropowatości.

W artykule Szewczyka i in. [81, 82] przedstawiono wpływ siły docisku i lepkości smaru na współczynnik tarcia i jakość powierzchni blachy. W pracy tej przedstawiono wpływ wielkości siły docisku (3, 6, 9, 12 MPa) oraz lepkości oleju tj. 134 mm^2/s (olej przekładniowy Castrol EPX 80W-90) i 70 mm^2/s (olej silnikowy Castrol EDGE 5W-30) na proces tarcia w próbie testu ciągnięcia pasa blachy wykonanego dla próbek z blachy DC04. W rezultacie przeprowadzonych testów przedstawiono zależność współczynnika tarcia od nacisku nominalnego i wskazano, że jego wartość maleje wraz ze wzrostem siły docisku. Porównując efektywność smarowania, wykazano, że olej przekładniowy o większej lepkości wykazywał lepszą, bo wynoszącą od 11,24 do 15,7% efektywność smarowania, w porównaniu do oleju silnikowego, który w całym przedziale nacisków nominalnych wykazywał obniżenie wartości współczynnika tarcia na poziomie od 3,84 do 8,87 %. Porównując chropowatość powierzchni po teście, wyniki podzielono na otrzymane w rezultacie przeprowadzenia próby w warunkach tarcia suchego i z zastosowaniem smarowania. W warunkach tarcia suchego średnia arytmetyczna odchylenia wysokości

nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_a i średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_q zmniejszały się w zakresie od 3 do 6 MPa. Powyżej tych wartości zaobserwowano wzrost wartości tych parametrów w konsekwencji mechanizmu bruzdowania. Natomiast w przypadku testu z zastosowaniem smarowania, tendencja obniżania się parametrów S_a i S_q wraz ze wzrostem ciśnienia nominalnego była widoczna w całym badanym zakresie.

Żaba i in. [83] przeanalizowali wydajność tłoczenia na podstawie testu ciągnięcia pasa blachy przy zastosowaniu kompozytowych przeciwpróbek. Przeprowadzone badania zostały wykonane z zastosowaniem 4 różnych przeciwpróbek: pierwsza z nich (wariant podstawowy – F1) zawierała żywicę poliuretanową (PR) składającą się z izocyjanu, polioliu oraz mineralnego wypełniacza w postaci sproszkowanego wodorotlenku glinu. Drugi typ przeciwpróbek (F2), miał w swoim składzie wariant podstawowy uzupełniony o 5 procent tkaniny niedoprzędowej. Trzeci rodzaj przeciwpróbek (F3) składał się z wariantu podstawowego z dodatkiem sproszkowanego aluminium w ilości 10%. Ostatni rodzaj przeciwpróbek (F4) zawierał składniki podstawowe i dodatki w ilości 10% sproszkowanego aluminium, i 5% tkaniny niedoprzędowej. Z kolei próbki w postaci pasów blachy o wymiarach 400 mm długości i 18 mm szerokości przygotowano z blachy ze stopu niklu AMS5599 (1 mm grubości), stali żaroodpornej AMS5510 (1 mm grubości) i stopu aluminium AMS6061-T4 (2 mm grubości). Parametrem procesu przeciągania, który ulegał dodatkowej zmianie w czasie testu, był docisk przeciwpróbek w zakresie od 23 do 160 N. W rezultacie przeprowadzonych badań zaobserwowano tendencję zmniejszającej się wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem wartości docisku do wartości 100 N, powyżej tej wartości następuje efekt stabilizacji. Podczas badania stwierdzono również, że blachy ze stopu niklu AMS5599 wykazują najmniejsze wartości współczynnika tarcia dla przeciwpróbek wykonanych z materiału podstawowego zmodyfikowanego proszkiem aluminiowym i włóknem niedoprzędowym. W przypadku blachy AMS5510 największe wartości współczynnika tarcia zaobserwowano dla podstawowego wariantu przeciwpróbek. Z kolei najbardziej efektywnym materiałem przeciwpróbek do formowania stopu aluminium AMS6061-T6 jest wariant z dodatkiem tkaniny niedoprzędowej, której zastosowanie zmniejsza wartość współczynnika tarcia od 0,9 do 5,1%, zależnie od zastosowanej siły docisku.

W badaniach przeprowadzonych przez Słota i in. [84] przedstawiono wpływ zmiennej lepkości, siły docisku i prędkości poślizgu na tarcie w teście tribologicznym polegającym na przeciąganiu pasa blachy. Badania te zostały przeprowadzone na próbkach wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6082-T6 o wymiarach $240 \times 18 \times 1$ mm (długość

× szerokość × grubość), które przeciągano pomiędzy przeciwpróbkami wykonanymi ze stali do pracy na zimno 146Cr6. Zmienne parametry procesu obejmowały zmieniającą się prędkość poślizgu (10 i 20 mm/min), zmienną siłę docisku w przedziale od 4,38 MPa do 11,69 MPa i zmienną lepkość wynoszącą 21,9 mm²/s (olej hydrauliczny LHL 32), 43,9 mm²/s (olej maszynowy LAN 46) i 81 mm²/s (olej silnikowy SAE 5W-40 C3). Rezultatem przeprowadzonych badań było sformułowanie wniosków, że olej o największej lepkości wykazuje najlepsze właściwości smarujące, zapewniając najniższe wartości współczynnika tarcia. Stabilność współczynnika tarcia w warunkach smarowania wykazano wyłącznie w zakresie od 4 do 9 MPa, po którego przekroczeniu następowało przerwanie filmu olejowego i wzrost współczynnika tarcia. W warunkach tarcia suchego zaobserwowano malejący trend współczynnika tarcia wraz ze wzrostem siły docisku. Dodatkowo przeanalizowanie efektywności smarowania pozwoliło wyciągnąć wnioski, z których wynika, że dla obydwu zastosowanych prędkości poślizgu wartość współczynnika tarcia była zbliżona i wynosiła od 16,0 do 28,9 % dla oleju hydraulicznego LHL 32, od 19,2 do 33,8 % dla oleju maszynowego LAN 46 i od 28,9 do 40,2 % dla oleju silnikowego 5W-40 C3.

1.6. Wnioski wynikające z przeglądu literatury

Zjawisko tarcia występujące w obszarze oddziaływania dociskacza w procesie kształtowania blachy jest zjawiskiem niepożądanym, bezpośrednio wpływającym na efektywność, energochłonność procesu, jak również zużycie narzędzi i powierzchni materiału obrabianego [85-88]. Jedynie w strefie kontaktu stempla z powierzchnią wytłoczki tarcie wywiera korzystny wpływ, zwiększając siłę zrywającą wytłoczkę [1].

Prowadzone aktualnie badania mają przede wszystkim na celu opracowanie nowych technologii, które pozwoliłyby na zmniejszenie lub wyeliminowanie negatywnego oddziaływania zjawiska tarcia (tworzenie się zarysowań itp.). Aby rozwiązać te problemy, stosowane są różne metody polegające na doborze pary trącej, dostosowując materiał narzędzia kształtującego do materiału kształtowanego [89-92] lub nanosząc na powierzchnie pracujące powłoki odporne na zużycie [93-98]. Stosowanie powłok powierzchni współpracujących jest zjawiskiem bardzo częstym i w niektórych sytuacjach bywa jedynym rozwiązaniem. Popularyzacja tej metody jest związana przede wszystkim z trudnymi warunkami, w których muszą pracować narzędzia, czyli w atmosferze podwyższonej temperatury i jednocześnie w warunkach narażenia na działanie dużych nacisków jednostkowych [99]. Innym powodem stosowania techniki pokrywania narzędzi powłokami

ochronnymi są ich właściwości, które pozwalają zapewnić wysoką twardość powierzchni odpornej na zużycie i często obniżając tarcie w strefie bezpośredniego kontaktu [88, 100, 101].

Inną metodą wpływania na zjawisko tarcia jest modyfikacja sfery kontaktu za pomocą stosowania różnych środków smarnych lub ich bezpośrednia modyfikacja w celu uzyskania pożądanych cech. Parametrem najczęściej brany pod uwagę w wyborze właściwego oleju do przeróbki plastycznej jest jego lepkość, której wpływ na jakość powierzchni oraz tarcie zostało dokładnie sprawdzone w szeroko prowadzonych badaniach na ten temat [71, 102-104]. Kiedy jednak podstawowe właściwości środków smarnych są niewystarczające, najczęstszym sposobem rozwiązania tego problemu są dodatki uszlachetniające, których dodawanie wpływa w zamierzony sposób na ich właściwości, które są pożądane i istotne dla prawidłowego przebiegu procesu kształtowania.

Istotnym zagadnieniem podnoszonym przez naukowców w ostatnich latach jest wpływ środków smarnych na środowisko zarówno wynikający z zanieczyszczenia wskutek możliwego wycieku w trakcie eksploatacji, jak i również ich wpływ na środowisko naturalne, wynikający ze specyfiki procesu uzyskiwania i przetwarzania najpopularniejszych środków smarnych będących pochodną ropy naftowej oraz ich późniejsze przechowywanie i utylizacja [105]. Rozwiązaniem tego problemu jest stosowanie olejów o wysokim stopniu recyklingu [106-109], których stosowanie przynosi wyraźne korzyści dla środowiska naturalnego. Jednakowoż powodem, dla którego stosowanie owych olejów roślinnych nie jest tak szeroko rozpowszechnione, są przede wszystkim ich trwałość i właściwości, które nie zawsze zapewniają prawidłowy przebieg procesu produkcyjnego, a ich stosowanie nie jest wyraźnie tańsze w porównaniu z olejami na bazie ropy naftowej.

Analizując dostępną literaturę dotyczącą wpływu wybranych parametrów procesu kształtowania blach, można poznać różne metody badania zjawiska tarcia w zależności od miejsca jego występowania. Przykładem mogą być próby tarcia przypisane do konkretnych obszarów wylóczki. Na tej podstawie można się dowiedzieć, że testem, który powinien zostać zastosowany w badaniu zjawiska tarcia w bezpośrednim obszarze oddziaływania dociskacza, jest test ciągnięcia pasa blachy [19, 20, 110-112].

Opisywany test ciągnięcia pasa blachy [113-116] jest badaniem prowadzonym w celu wyznaczenia wartości współczynnika tarcia. Zasada stosowania testu ciągnięcia pasa blachy oparta jest na zależności siły ciągnięcia i siły docisku, i umożliwia określenie wartości współczynnika tarcia występującego pomiędzy powierzchnią dociskacza i blachy.

2. Cel, teza i zakres pracy

Celem pracy było zbadanie wpływu warunków smarowania na współczynnik tarcia i topografie powierzchni blach stalowych głębokotłocznych poddanych oddziaływaniu dociskacza w procesie wytłaczania, z wykorzystaniem opracowanego specjalnego testera do wyznaczania wartości współczynnika tarcia, zwłaszcza blach w warunkach smarowania ciśnieniowego. Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy sformułowano następującą tezę badawczą:

Zastosowanie smarowania z wymuszonym ciśnieniem płynnego smaru podczas testu ciągnięcia pasa blachy, symulującego warunki tarcia w strefie oddziaływania dociskacza w procesie wytłaczania blach, umożliwia zmniejszenie wartości współczynnika tarcia w porównaniu do smarowania konwencjonalnego, w którym smar dostarczany jest swobodnie na powierzchnię blachy przed procesem kształtowania.

W celu weryfikacji postawionej tezy badawczej przyjęto następujący plan badań:

1. Badania wytrzymałościowe oraz charakterystyka topografii powierzchni badanych blach.
2. Badania lepkości kinematycznej olejów do głębokiego tłoczenia użytych w badaniach.
3. Zaprojektowanie i skonstruowanie urządzenia (tribotestera) do badania zjawisk tarcia w procesie wytłaczania za pomocą testu ciągnięcia pasa blachy.
4. Badania twardości oraz charakterystyka topografii powierzchni narzędzi użytych w badaniach.
5. Dobór strategii i parametrów badań.
6. Zbudowanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego przeprowadzenie badań.
7. Analiza wpływu wybranych parametrów procesu tarcia na wartość współczynnika tarcia i topografię powierzchni blach.
8. Identyfikacja mechanizmów tarcia przy zastosowaniu mikroskopii skaningowej.
9. Analiza wariancji wpływu parametrów procesu tarcia na współczynnik tarcia i zmianę topografii powierzchni.
10. Zastosowanie wielowarstwowych sieci neuronowych do modelowania zjawisk tarcia.

3. Materiał badawczy

Materiałem zastosowanym w badaniach była walcowana na zimno blacha ze stali niskowęglowej o oznaczeniach DC03, DC04, DC05 i DC06 wg PN-EN 10130:2009. Stal ta ze względu na swoje właściwości mechaniczne, szczególnie dużą tłoczność, jest bardzo często stosowana w przemyśle motoryzacyjnym.

3.1. Wybrane właściwości mechaniczne i chemiczne blach

W tabeli 3.1 przedstawiono procentowy skład chemiczny badanych materiałów, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 10130:2009.

Tabela 3.1 Skład chemiczny dla poszczególnych gatunków blach użytych w badaniach (PN-EN 10130:2009)

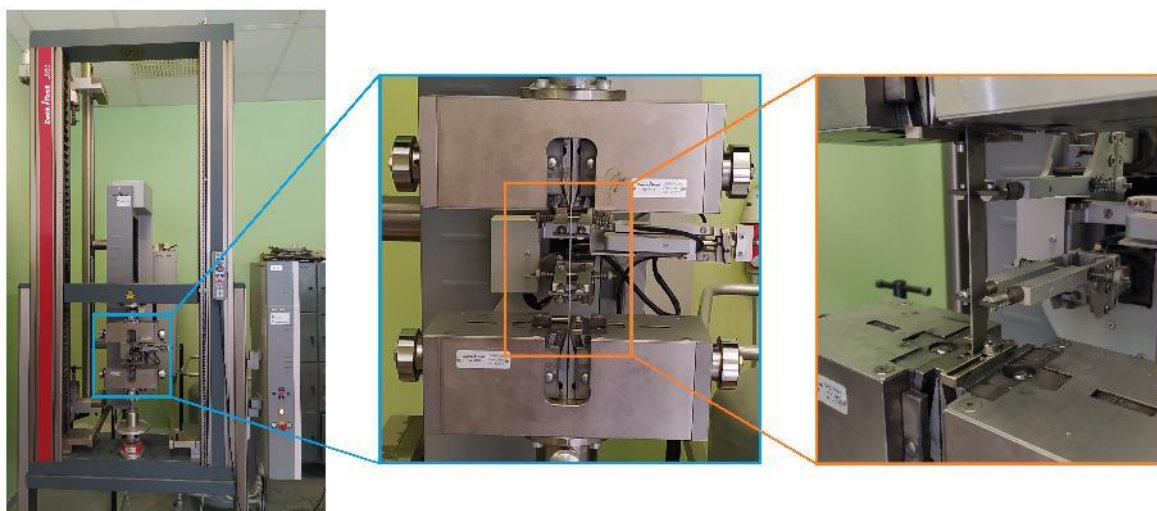
Gatunek stali	Zawartość pierwiastków, % mas.					
	C	Mn	P	S	Ti	Fe
DC03	≤ 0.1	≤ 0.45	≤ 0.035	≤ 0.035	-	Reszta
DC04	≤ 0.08	≤ 0.4	≤ 0.03	≤ 0.03	-	Reszta
DC05	≤ 0.06	≤ 0.35	≤ 0.025	≤ 0.025	-	Reszta
DC06	≤ 0.02	≤ 0.25	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.3	Reszta

Właściwości mechaniczne blach stalowych wyznaczono w statycznej próbie jednoosiowego rozciągania przeprowadzonej zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020. Badanie zostało przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 z zastosowaniem ekstensometru (rys.3.1). Do badań przygotowano materiał w postaci pasków blach o wymiarach: 13 (szerokość) × 200 (długość) (rys. 3.2), których grubość była zróżnicowana w zależności od zastosowanego gatunku blachy od 0,8 do 1,25 mm (tabela 3.2). Badaniom poddano po trzy próbki z każdego gatunku stali wycięte pod kątem 0° i 90° względem kierunku walcowania blachy.

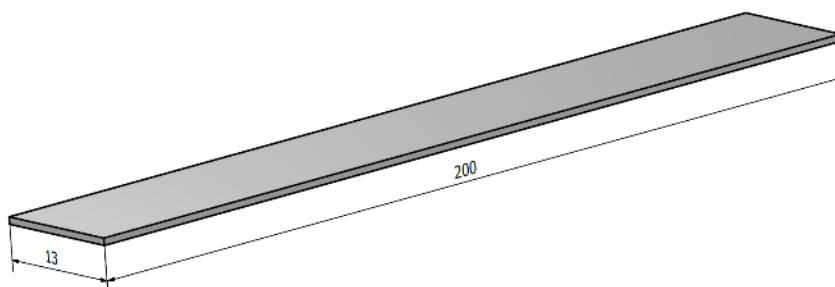
W wyniku przeprowadzonej statycznej próby rozciągania otrzymano wartości podstawowych parametrów mechanicznych (Tabela 3.2) oraz wykresy zależności rzeczywistego naprężenia od rzeczywistego odkształcenia (rys. 3.3 – rys. 3.10).

Tabela 3.2. Właściwości blach użytych w badaniach

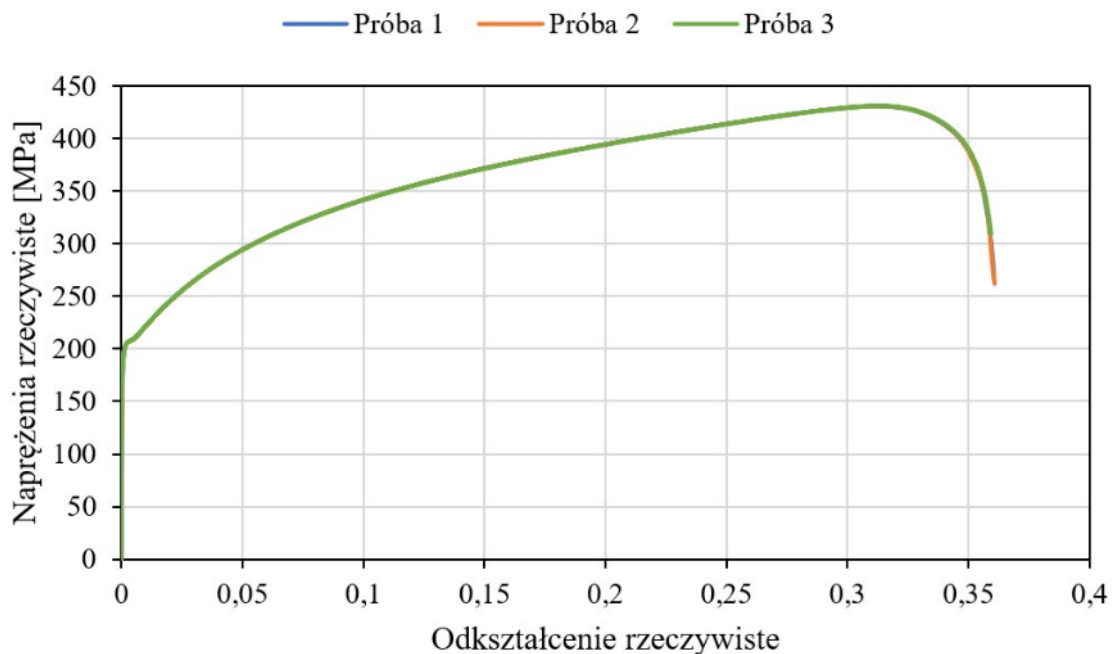
Gatunek blachy	Grubość blachy [mm]	Kąt wycięcia próbek względem kierunku walcowania [°]	Właściwości mechaniczne			
			Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa]	Moduł Younga E [GPa]	Wydłużenie A_{50} [%]
DC03	1.2	0	322,72 ± 0,06	203,88 ± 0,16	165,85 ± 1,56	23,87 ± 0,16
		90	320,13 ± 0,42	211,81 ± 0,64	162,37 ± 8,58	22,93 ± 0,22
DC04	1.25	0	315,41 ± 0,19	180,21 ± 1,93	176,93 ± 0,21	24,72 ± 0,33
		90	314,22 ± 0,32	190,77 ± 0,25	185,44 ± 8,54	24,27 ± 0,28
DC05	1.25	0	289,12 ± 0,97	162,51 ± 6,13	163,16 ± 24,30	25,9 ± 0,35
		90	281,65 ± 1,18	164,5 ± 2,14	171,91 ± 20,10	24,58 ± 0,10
DC06	0.8	0	308,57 ± 0,78	155,2 ± 3,21	160,29 ± 39,94	24,56 ± 0,08
		90	313,38 ± 0,01	154,26 ± 0,24	153,37 ± 5,45	26,1 ± 0,18



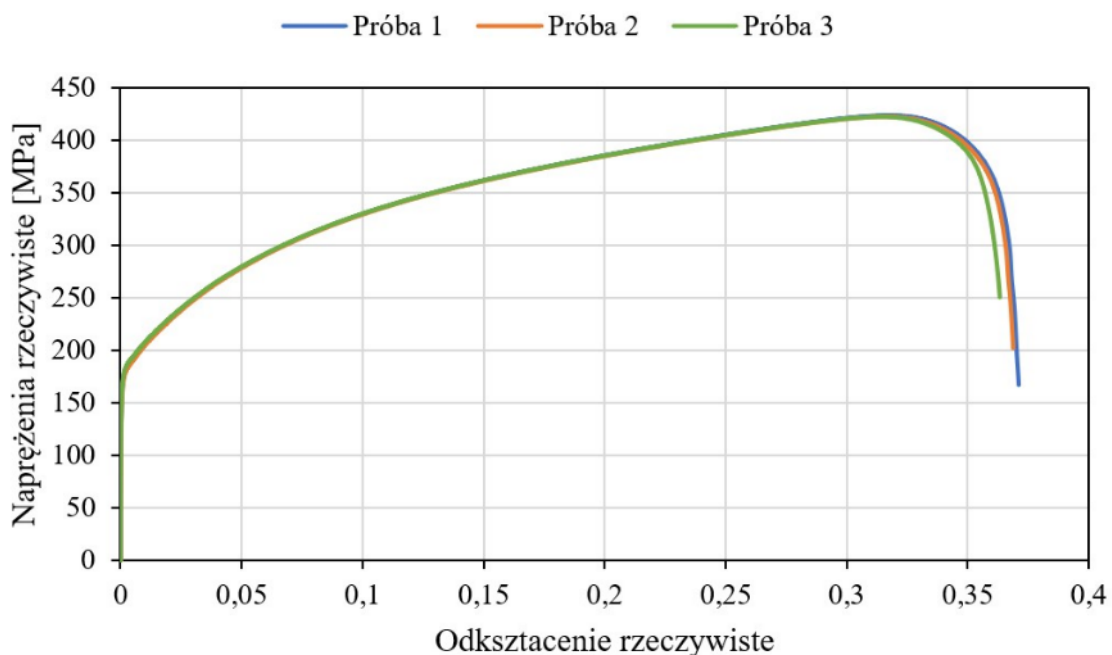
Rys. 3.1. Stanowisko badawcze do przeprowadzenia statycznej próby jednoosiowego rozciągania



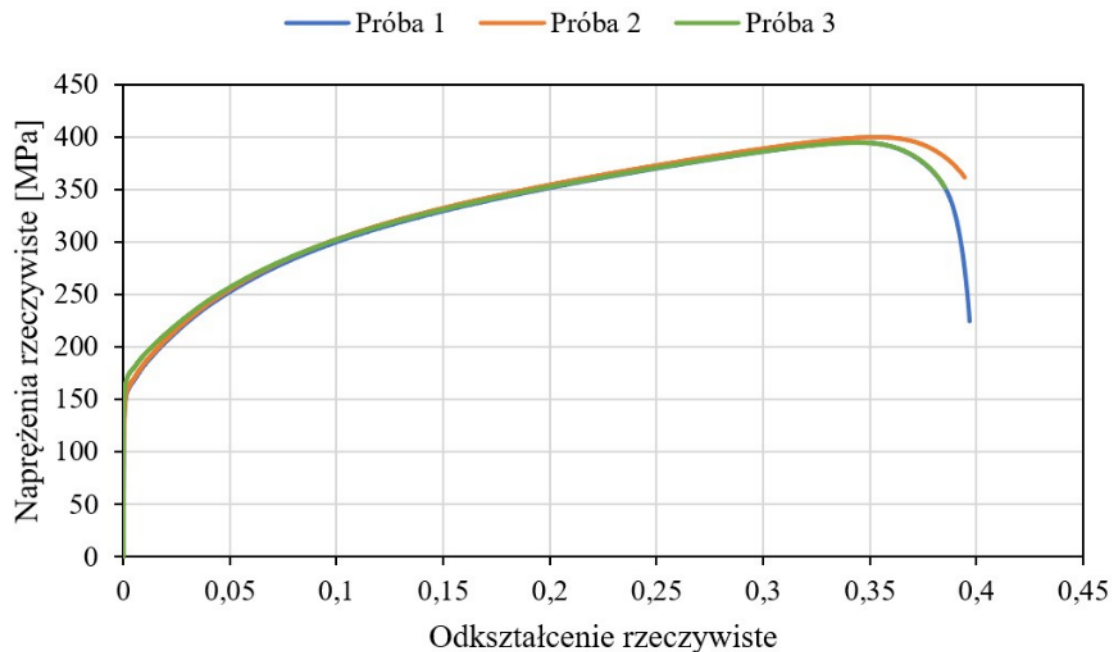
Rys. 3.2. Wymiary przygotowanych próbek



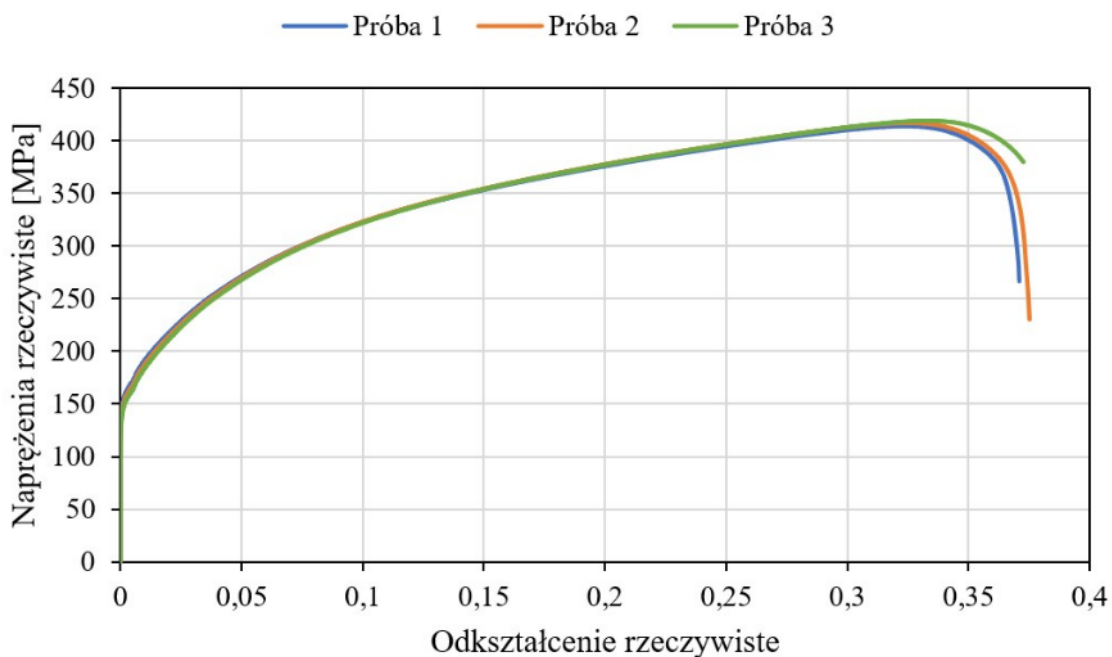
Rys. 3.3. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC03, wyciętych pod kątem 0° względem kierunku walcowania



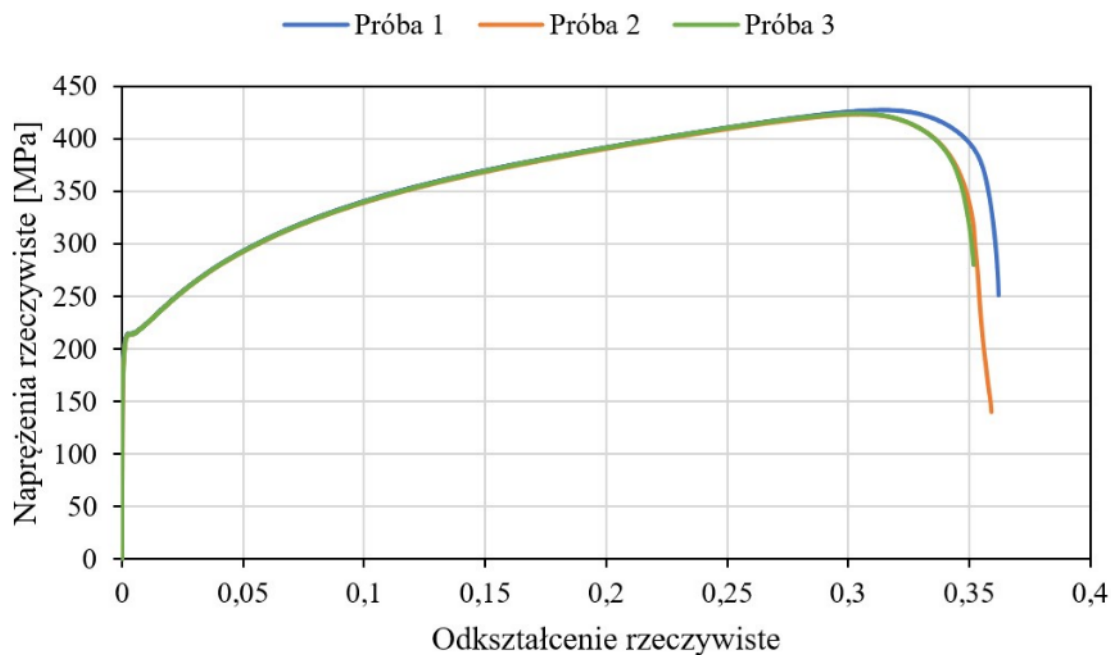
Rys. 3.4. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC04, wyciętych pod kątem 0° względem kierunku walcowania



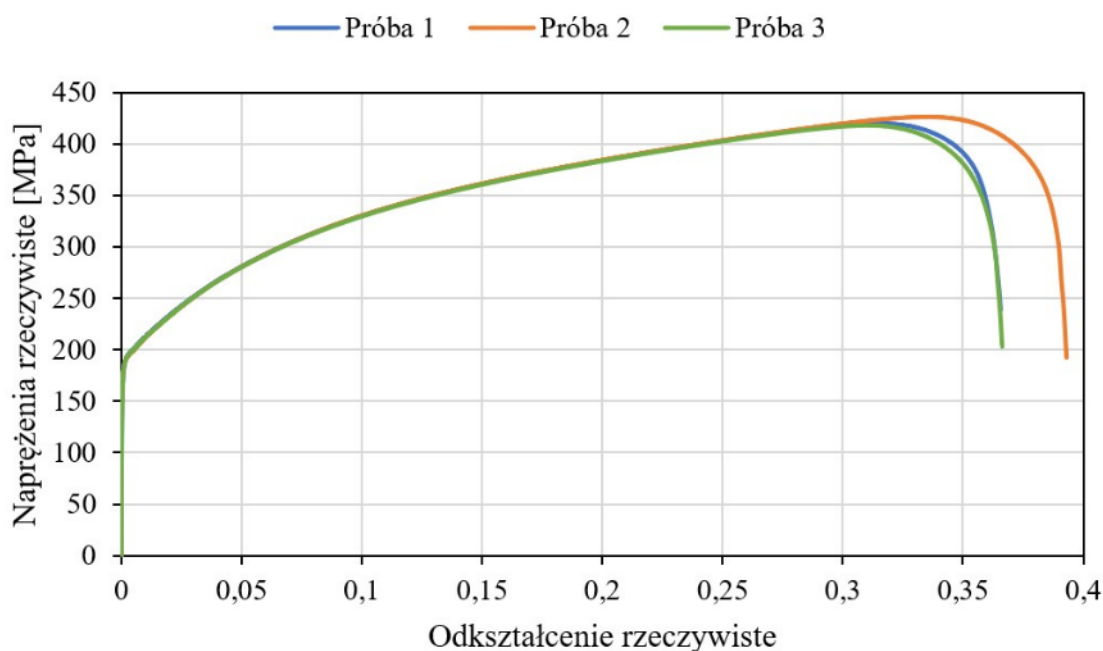
Rys. 3.5. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC05, wyciętych pod kątem 0° względem kierunku walcowania



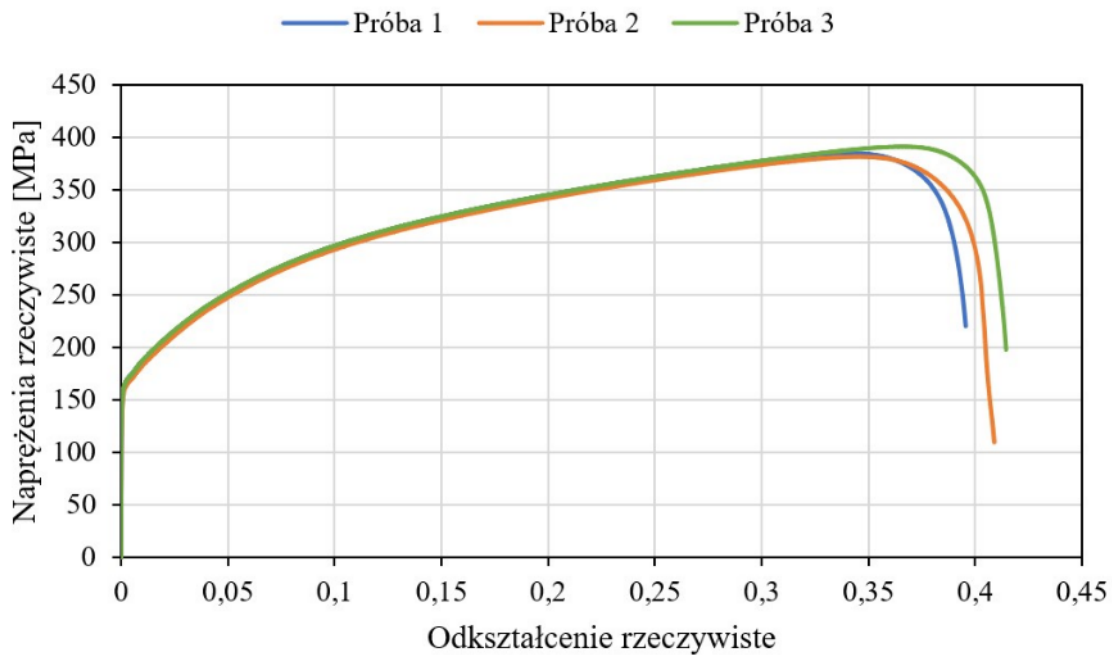
Rys. 3.6. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC06, wyciętych pod kątem 0° względem kierunku walcowania



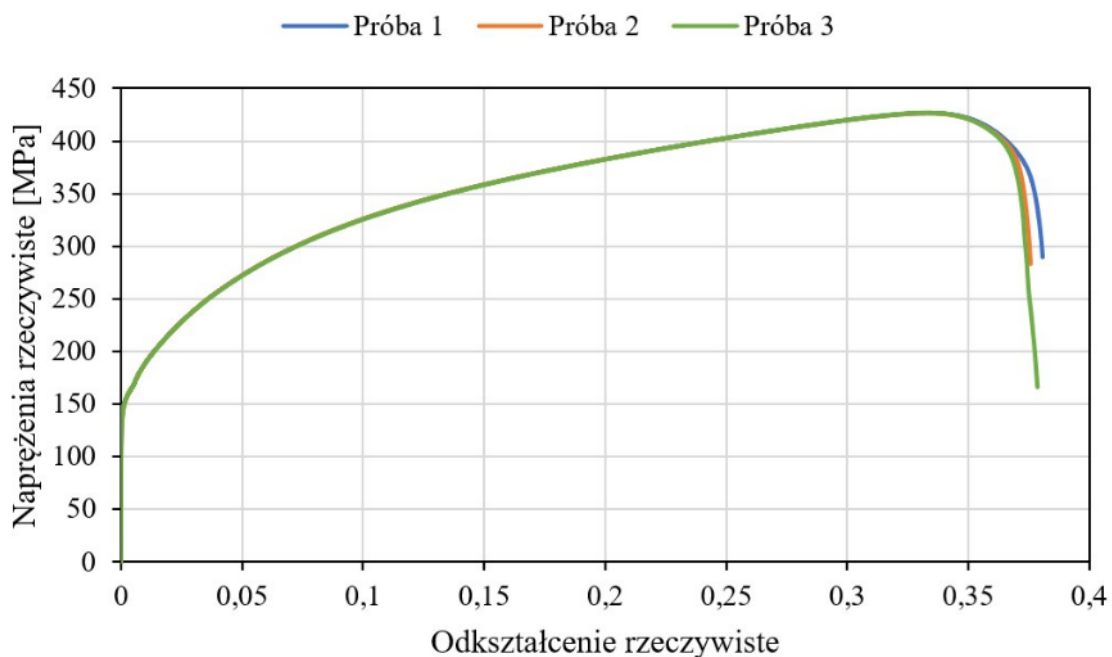
Rys. 3.7. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC03, wyciętych pod kątem 90° względem kierunku walcowania



Rys. 3.8. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC04, wyciętych pod kątem 90° względem kierunku walcowania



Rys. 3.9. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC05, wyciętych pod kątem 90° względem kierunku walcowania



Rys. 3.10. Zależność napężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego, wyznaczona dla próbek wykonanych z blachy DC06, wyciętych pod kątem 90° względem kierunku walcowania

Po przeprowadzeniu badań wytrzymałościowych zaobserwowano istotne różnice w zmierzonych właściwościach mechanicznych blach zależnie od gatunku. Gatunkiem, który charakteryzuje się największą wytrzymałością na rozciąganie i umowną granicą plastyczności, jest blacha DC03, z kolei najmniejszą wytrzymałość na rozciąganie zmierzono dla blachy DC05. Najmniejszą wartość umownej granicy plastyczności wykazała blacha DC06. Wszystkie badane blachy podlegają umocnieniu odkształceniowemu. Wartości współczynników umocnienia odkształceniowego K oraz wartości wykładników krzywych umocnienia n wyznaczono dla badanych blach z zależności (3.1).

$$\sigma_r = K \cdot \varepsilon_r^n \quad (3.1)$$

gdzie:

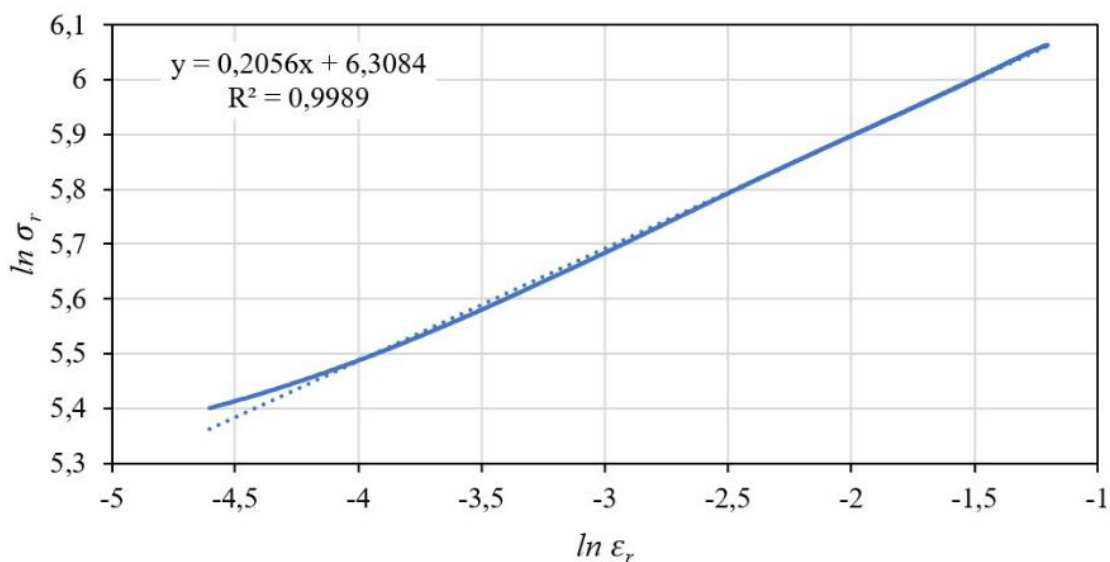
σ_r – naprężenia rzeczywiste [MPa],

K – współczynnik umocnienia odkształceniowego [MPa],

ε_r – odkształcenie rzeczywiste,

n – wykładnik krzywej umocnienia.

Wartości współczynników umocnienia odkształceniowego oraz wykładnika krzywej umocnienia wyznaczono przy zastosowaniu graficznej metody polegającej na naniesieniu wartości logarytmicznych $\ln \sigma_r$ i $\ln \varepsilon_r$ na wykresie oraz wyznaczeniu funkcji liniowej opisującej naniesione punkty z dokładnością R^2 , zgodnie z przykładem przedstawionym na rysunku 3.11.



Rys. 3.11. Wykres logarymiczny zależności naprężenia rzeczywistego od odkształcenia rzeczywistego próbki wykonanej z blachy DC03 wyciętej pod kątem 0° względem kierunku walcowania

Wiedząc, że krzywa umocnienia w układzie współrzędnych logarytmicznych ma postać wyrażoną wzorem (3.2) [117], wyznaczono średnie wartości współczynnika umocnienia odkształceniowego oraz wykładnika krzywej umocnienia dla badanych gatunków blachy. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 3.3.

$$\ln\sigma_r = \ln K + n \cdot \varepsilon_r \quad (3.2)$$

Tabela 3.3. Wartości współczynnika umocnienia odkształceniowego oraz wykładnika krzywej umocnienia

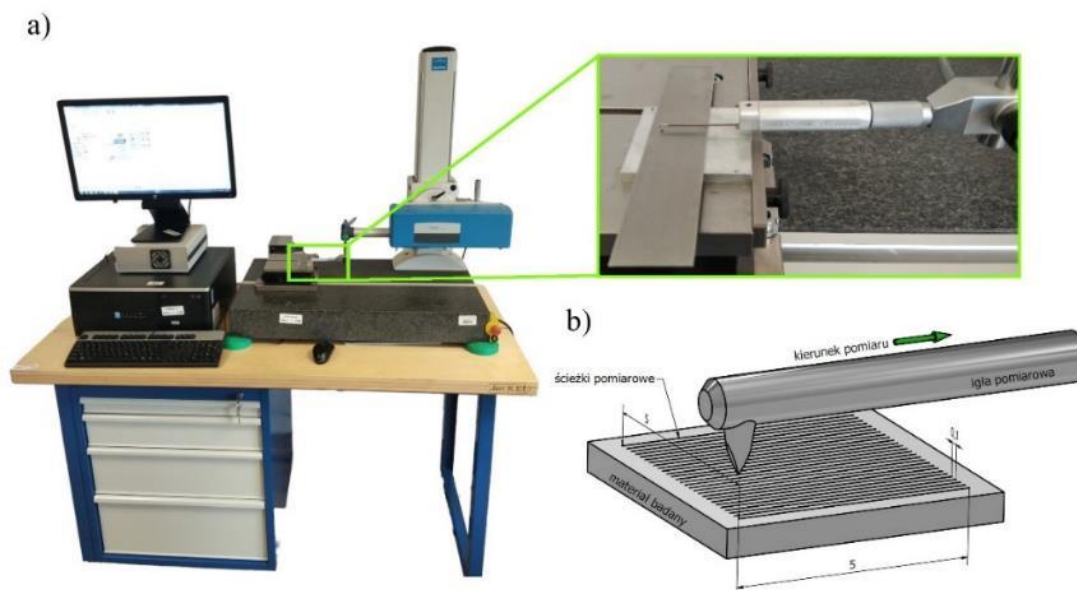
Gatunek blachy	Kąt wycięcia próbek względem kierunku walcowania [°]	Współczynnik umocnienia odkształceniowego K [MPa]	Wykładnik krzywej umocnienia n
DC03	0	549,00	0,206
	90	541,39	0,202
DC04	0	552,01	0,224
	90	542,26	0,216
DC05	0	508,77	0,228
	90	486,32	0,222
DC06	0	556,23	0,241
	90	566,68	0,244

Na podstawie przedstawionych w tabeli 3.3 wartości współczynnika umocnienia odkształceniowego oraz wykładnika krzywej umocnienia można zaobserwować, że w przypadku próbek wykonanych z blachy gatunku DC03, DC04 i DC05 kierunek wycięcia próbek równoległe (0°) do kierunku walcowania powoduje, że wyznaczone wartości współczynnika umocnienia odkształceniowego oraz wykładnika krzywej umocnienia są większe o około od 1,41 % do 4,62 % względem próbek wyciętych prostopadle do kierunku walcowania (90°). Z kolei w przypadku próbek wykonanych z blachy DC06 większe wartości mierzonych parametrów wyznaczono dla próbek wyciętych prostopadle do kierunku walcowania, a ich wartość wynosiła o około 1,5 % więcej w stosunku do próbek wyciętych równoległe do kierunku walcowania.

3.2. Topografia powierzchni blach

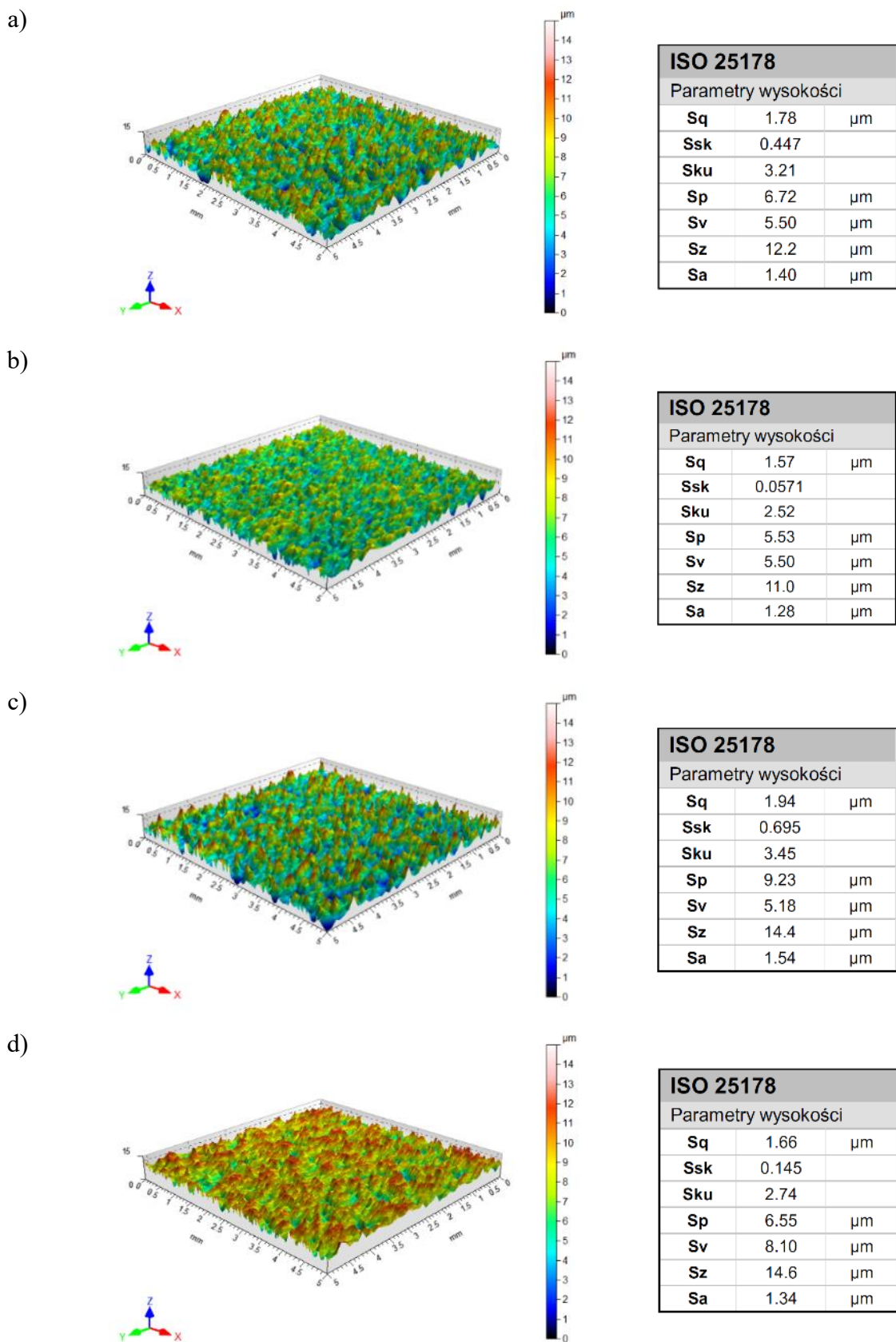
Ponieważ we współpracy pary ciernej, jak to ma miejsce w procesie wyłaczania, zachodzi kontakt obu elementów współpracujących ze sobą w styku powierzchniowym, istotne jest wyznaczenie topografii powierzchni z określonej powierzchni, a nie z odcinka elementarnego.

Pomiar topografii powierzchni blach dokonano zarówno przed, jak i po przeprowadzeniu testu ciągnięcia pasa blachy. Pomiary wykonano przy zastosowaniu profilometru stacjonarnego Hommel-Etamic T8000RC (rys. 3.12) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 25178-2:2022. Pomiar topografii zrealizowano na powierzchni o wymiarach 5×5 mm, realizując w czasie jego wykonywania 51 niezależnych przejść profilu chropowatości, a odległość pomiędzy poszczególnymi pomiarami wynosiła 0,1 mm. Dodatkowo prowadząc pomiar chropowatości powierzchni próbek przed i po badaniach, pomiar zawsze był realizowany w tym samym miejscu, co w pełni odzwierciedlało rzeczywisty charakter zmian topografii w wybranym miejscu, pozwalając tym samym na wiarygodne porównanie uzyskanych wyników pomiarów.



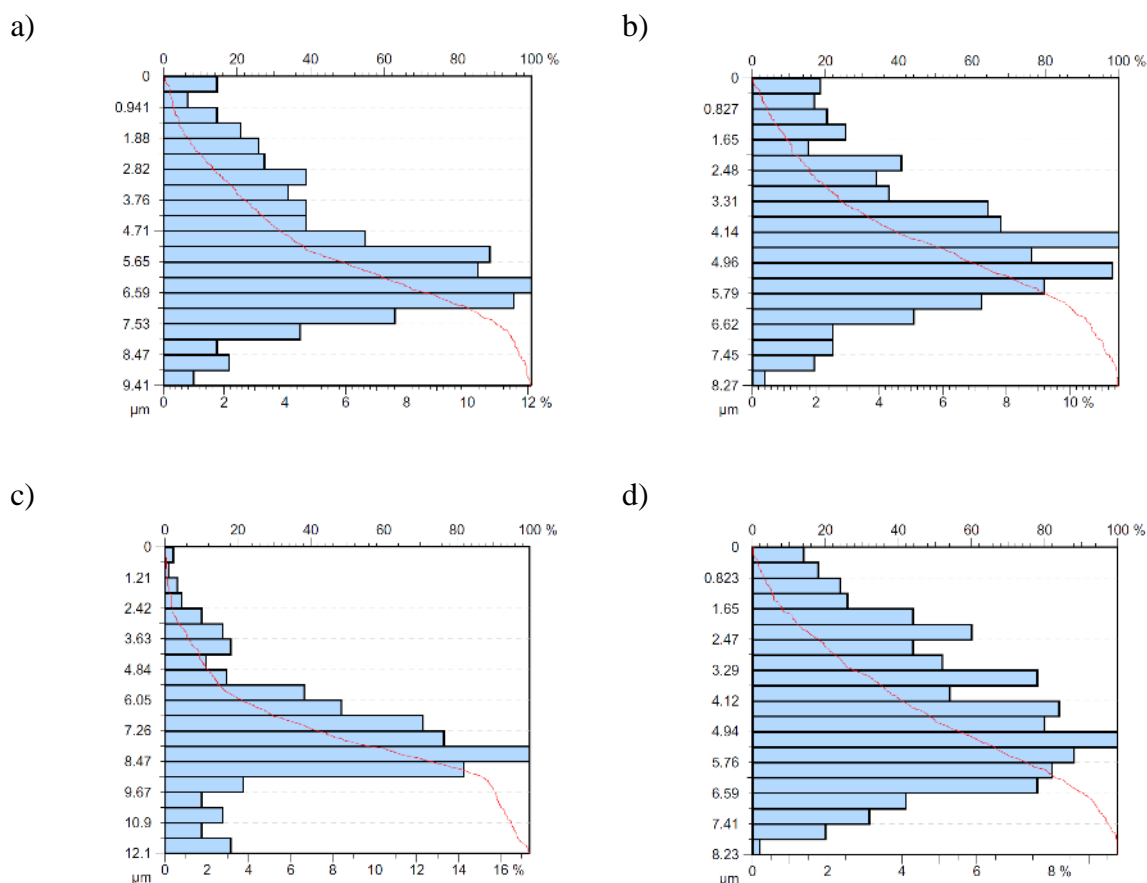
Rys. 3.12. Pomiar topografii powierzchni: a) profilometr stacjonarny Hommel-Etamic T8000RC, b) schemat pomiaru topografii powierzchni

W rezultacie przeprowadzonych pomiarów topografii powierzchni blach w stanie dostawy otrzymano ich widoki izometryczne oraz charakteryzujące je podstawowe parametry chropowatości (rys. 3.13) i krzywe udziału materiałowego (rys. 3.14).



Rys. 3.13. Wyniki pomiaru topografii powierzchni próbek blach w stanie dostawy:

a) DC03, b) DC04, c) DC05, d) DC06



Rys. 3.14. Krzywe udziału materiałowego blach w stanie dostawy: a) DC03, b) DC04, c) DC05, d) DC06

Uzupełnieniem widoku struktury geometrycznej powierzchni i wyników pomiaru podstawowych parametrów jej chropowatości są wykresy przedstawiające krzywe udziału materiałowego (rys. 3.14), nazywane również krzywymi Abbotta-Firestone’a, które traktuje się jako procentowy przyrost udziału materiałowego poszczególnych punktów w całym obszarze topografii powierzchni. Krzywe te umożliwiają interpretację występujących wierzchołków i wgłębień chropowatości.

Na podstawie krzywych udziału materiałowego oraz wartości parametrów udziału procentowego przedstawionego na rysunku 3.14 można dostrzec, że blacha DC05 (rys. 3.14.c) charakteryzuje się najbardziej skoncentrowanym rozkładem gęstości materiału, która posiada ponad 17% udziału materiału na głębokości około 8 μm. Z kolei blachy gatunku DC03 oraz DC04 (rys. 3.14.a i rys. 3.14.b) charakteryzują się mniejszym udziałem materiałowym wynoszącym około 12% na głębokości około 6,5 μm dla gatunku DC03 i około 4,5 μm dla gatunku DC04. Najmniejszy udział materiałowy jest widoczny dla blachy gatunku DC06 (rys. 3.14.d), która dodatkowo charakteryzuje się największym skoncentrowaniem rozkładu gęstości. Maksymalny udział materiałowy dla tego gatunku blachy wynosi prawie 10% i jest zlokalizowany na głębokości około 5 μm.

3.3. Smary

W celu określenia wpływu lepkości oleju na wartość współczynnika tarcia do przeprowadzenia badań tarcia postanowiono użyć ogólnie dostępnych handlowo dwóch rodzajów olejów dedykowanych do procesu tłoczenia blach, znacznie różniących się między sobą wartością lepkości kinematycznej.

W badaniach zastosowano olej Naftochem do tłoczenia S100 plus (rys. 3.15.b) oraz olej Naftochem do bardzo głębokiego tłoczenia S300 (rys. 3.15.c). Z racji, że producent oleju podaje wartość lepkości kinematycznej w temperaturze 40°C, postanowiono dodatkowo przeprowadzić badania mające na celu określenie wartości lepkości kinematycznej w temperaturze pokojowej (20°C). Pomiary lepkości przeprowadzono za pomocą wiskozymetru Ostwalda (rys. 3.15.a) a wyniki przedstawiono w tabeli 3.4.



Rys. 3.15. a) wiskozymetr Ostwalda, b) olej Naftochem do tłoczenia S100 plus, c) olej Naftochem do bardzo głębokiego tłoczenia S300

Tabela 3.4. Lepkość olejów użytych w badaniach

Rodzaj oleju	Lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C (podana przez producenta) [mm ² /s]	Lepkość kinematyczna w temperaturze 20°C (zmierzona) [mm ² /s]
Olej do tłoczenia S100 plus	105 ... 120	360
Olej S300 do bardzo głębokiego tłoczenia	288 ... 352	1135

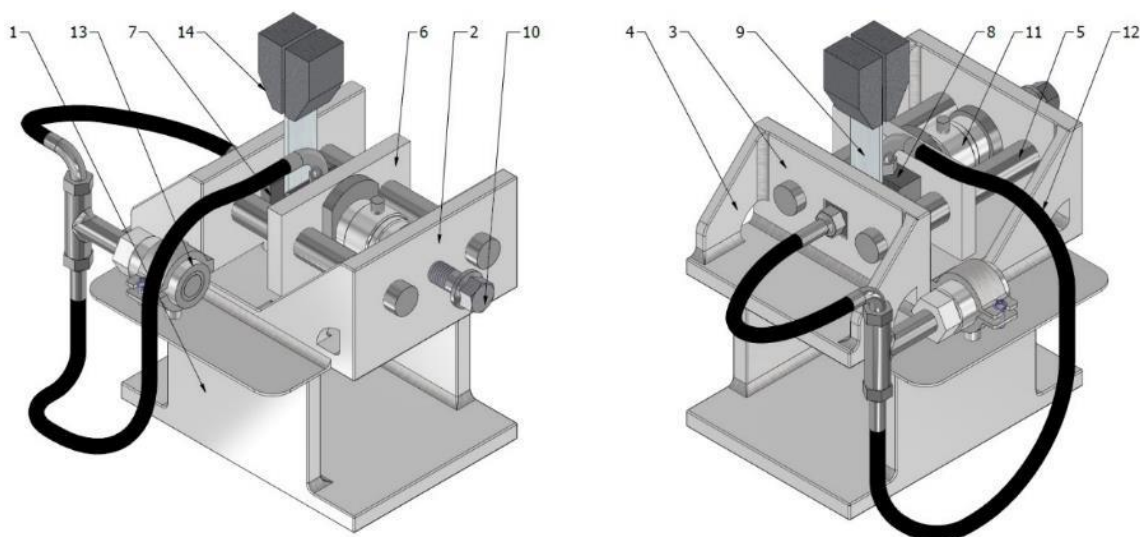
4. Test ciągnięcia pasa blachy

W technologii wyłaczania blach, w różnych miejscach kształtowanego materiału występują różne wartości nacisków powierzchniowych i prędkości poślizgu, dlatego stosuje się różne testy symulujące rzeczywiste warunki tarcia. Jednym z takich testów symulujących warunki tarcia w procesie wyłaczania blach jest przeciąganie pasa blachy pomiędzy dwoma płaskimi przeciwpróbkami z jednoczesnym pomiarem siły nacisku i siły ciągnięcia. Tym samym pozwalając na określenie współczynnika tarcia występującego w części kołnierzonej kształtowanej wytłoczki, objętej oddziaływaniem dociskacza.

Do przeprowadzenia badań zaprojektowano i wykonano specjalny tester współczynnika tarcia.

4.1. Opis tribotestera

Przyjęto, że konstrukcja testera współczynnika tarcia (rys. 4.1) powinna zapewnić możliwie płynną regulację zarówno siły docisku, jak i ciśnienia medium smarującego. Regulację siły docisku realizowano za pośrednictwem śruby z gwintem drobnozwojnym, a jej pomiar za pomocą piezoelektrycznego czujnika siły. W celu regulacji ciśnienia oleju zbudowano zasilacz hydrauliczny. Rejestracji parametrów procesu ciągnięcia pasa blachy (siła docisku, ciśnienie medium smarującego, droga tarcia) dokonywano za pomocą opracowanej do tego celu aplikacji w środowisku LabVIEW.

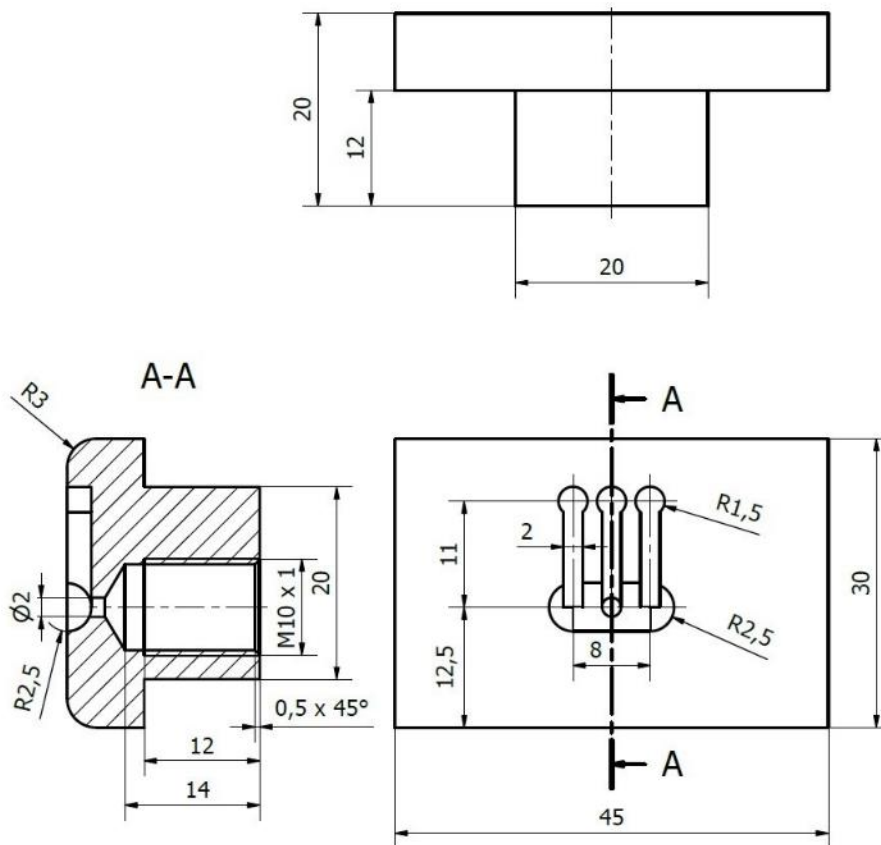


Rys. 4.1. Model testera do wyznaczania współczynnika tarcia: 1 – podstawa, 2, 3 – płyty wsporcze, 4 – żebro, 5 – trzpień prowadzący, 6 – wspornik, 7, 8 – przeciwpróbki, 9 – próbka, 10 – śruba dociskowa, 11 – czujnik piezoelektryczny, 12 – przewód hydrauliczny, 13 – złącze, 14 – uchwyt maszyny wytrzymałościowej

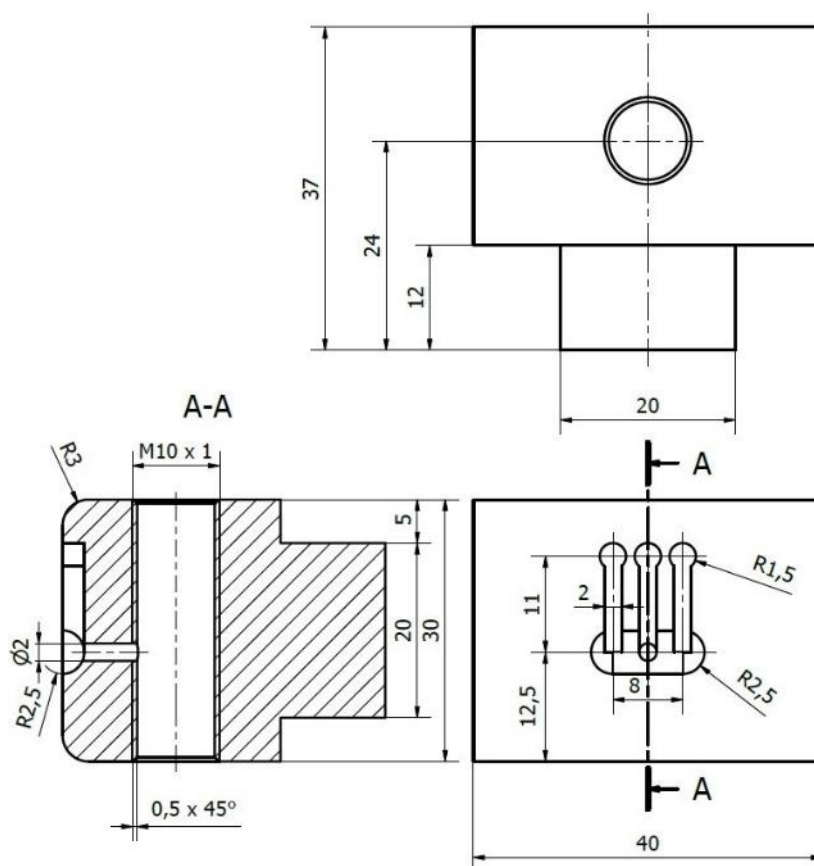
Tester do wyznaczania współczynnika tarcia, zwłaszcza blach, w warunkach aktywnego ciśnienia smarowania składa się z podstawy 1 oraz równoległych do siebie płyt wsporczych 2, 3, ustawionych na podstawie, prostopadle do niej. Obie te płyty wsporcze dla poprawienia stabilności są wzmocnione dwoma żebrami 4 rozłożonymi symetrycznie względem płaszczyzny symetrii, równoległe do siebie i prostopadle do powierzchni płyt wsporczych 2 i 3. Płyty wsporcze 2 i 3 są połączone ze sobą poprzez dwa równoległe do siebie i prostopadle do powierzchni płyt wspornikowych trzpienie prowadzące 5. Pomiedzy płytą wspornikową 2 i 3 na trzpieniach prowadzących 5, osadzony jest wspornik 6, do którego jest przymocowany czujnik piezoelektryczny 11 do pomiaru siły osiowej – siły nacisku F_N , której wartość jest sterowana za pomocą śruby dociskowej 10. W płycie wspornikowej 3 oraz wsporniku 6 wykonane są zagłębienia, w których zamocowane są kolejno przeciwpróbki 7 i 8, do których doprowadzany jest olej pod ciśnieniem za pomocą przewodów hydraulicznych 12, zakończonych złączem 13 umożliwiającym podłączenie zasilacza hydraulicznego. Tester ten został przygotowany w taki sposób, że bez żadnych dodatkowych zmian możliwe jest jego zamocowanie na maszynie wytrzymałościowej, której zadaniem jest realizowanie przemieszczenia próbki w postaci pasa blachy zamocowane w uchwycie 14 górnej trawersy.

Przeciwpróbka 7 i 8 różnią się między sobą wielkością, jest to związane przede wszystkim ze sposobem dostarczenia środka smarnego do obszaru tarcia. Z tego względu przeciwpróbka 7 jest znacząco mniejsza w porównaniu do przeciwpróbki 8. Proces doprowadzania smaru do obszaru tarcia był realizowany dzięki specjalnie zaprojektowanym kanalikom wyfrezowanym na powierzchniach przeciwpróbek, których wymiary zostały przedstawione na rysunku 4.2 i 4.3.

Główne elementy konstrukcyjne przedstawionego tribotestera służącego do wyznaczania wartości współczynnika tarcia, zwłaszcza blach, są przedmiotem zgłoszenia patentowego numer P.444834 [118]. Wstępna ocena zgłoszenia wynalazku nr P.444834 przeprowadzona przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej wykazała, że wynalazek spełnia wymóg jednolitości i przemysłowej stosowności, a także posiada odpowiedni poziom wynalazczy, co zostało przedstawione w sprawozdaniu o stanie techniki.



Rys. 4.2. Wymiary przeciwpróbki nr 7



Rys. 4.3. Wymiary przeciwpróbki nr 8

4.2. Charakterystyka przeciwpróbek

Badania zostały zrealizowane przy zastosowaniu płaskich przeciwpróbek (rys. 4.4) wykonanych ze stali narzędziowej 145Cr6 (1.2063) do pracy na zimno, której skład chemiczny przedstawiono w tabeli 4.1.

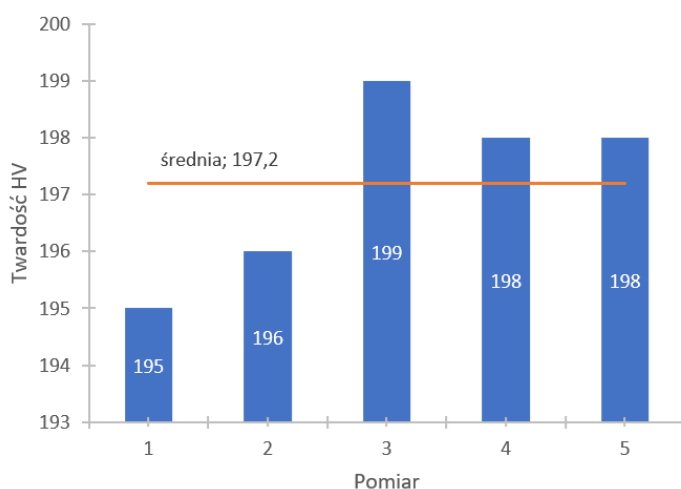


Rys. 4.4. Przeciwpróbki użyte w badaniach.

Tabela 4.1. Skład chemiczny (% mas.) stali narzędziowej 145Cr6 (1.2063) do pracy na zimno (PN-EN ISO 4957: 2018)

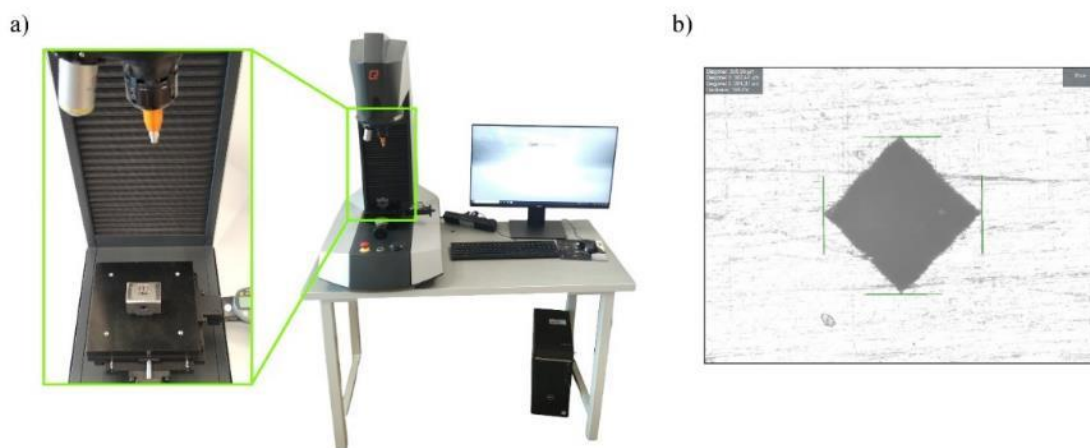
C	Cr	Mn	Si	S	P	Fe
1.4 – 1.6	1.3 – 1.5	0.5 – 0.7	0.15 – 0.3	≤ 0.0035	≤ 0.0035	Reszta

Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono pomiar twardości oraz chropowatości powierzchni przeciwpróbek. Pomiar twardości zrealizowano przy zastosowaniu twardościomierza Vickers serii Qness 60 EVO (rys. 4.6.a) przy sile próbnej 98,07 N. Na podstawie pięciu przeprowadzonych pomiarów twardości, których wartości wynosiły kolejno 195, 196, 199, 198 i 198 HV, wyliczono wartość średnią, która wyniosła 197,2 HV (rys. 4.5). Widok wybranego obrazu śladu testowego pokazano na rysunku 4.6.b.



Parametr	Wartość
Średnia twardość HV	197,2
Odchylenie standardowe	1,47
Maksymalna twardość HV	199
Minimalna twardość HV	195

Rys. 4.5. Wyniki pomiaru twardości przeciwpróbek



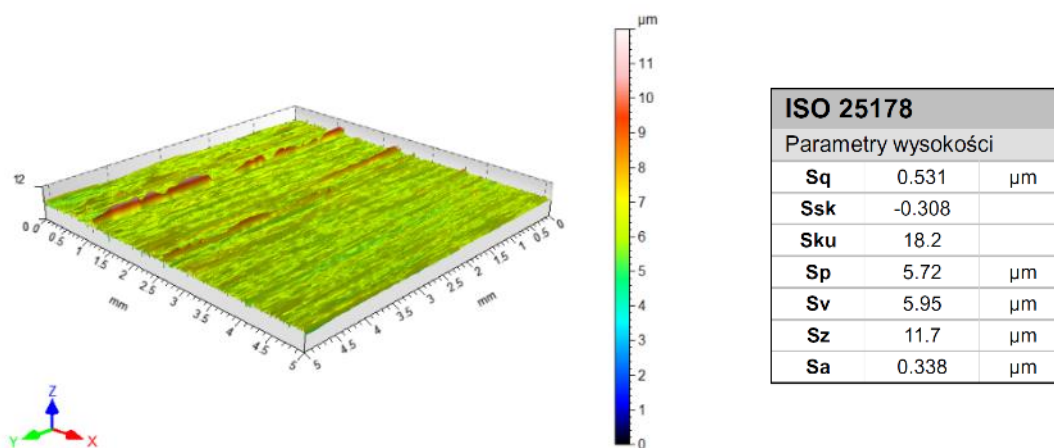
Rys. 4.6. Stanowisko do pomiaru mikrotwardości: a) twardościomierz Vickers serii Qness 60 EVO, b) obraz punktu testowego

Pomiary wskaźników 3D powierzchni przeciwpróbek wykonano na profilometrze stacjonarnym Hommel-Etamic T8000RC (rys. 4.7) zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 25178-2:2022.



Rys. 4.7. Pomiar topografii powierzchni przeciwpróbek

W celu uzyskania dokładnych wartości wskaźników 3D analizowanej powierzchni, pomiar został zrealizowany na powierzchni o wymiarach 5×5 mm, wykonując szereg niezależnych pomiarów oddalonych od siebie na odległość 0,1 mm. Dodatkowo tak samo jak miało to miejsce w przypadku pomiaru jakości powierzchni próbek, pomiar realizowano prostopadle do kierunku przeciągania pasa blachy [119]. Na podstawie tak przyjętej metody pomiaru wyznaczono wybrane przestrzenne parametry chropowatości oraz otrzymano widok izometryczny zmierzonej powierzchni (rys. 4.8).



Rys. 4.8. Topografia i wybrane parametry chropowatości powierzchni przeciwpróbek

4.3. Metodyka pomiaru

Badania związane z analizą wpływu aktywnego ciśnienia smarowania na wartość współczynnika tarcia bezpośrednio w obszarze tarcia między powierzchniami dociskacza i matrycy oraz powierzchniami odkształcanej blachy w obszarze kołnierza wytłoczki realizowano przy zmiennych wartościach siły docisku (p_n) i zmiennego ciśnienia medium smarującego (p_o), a także z udziałem smarów o różnej lepkości kinematycznej, co przedstawiono w tabeli 4.2. Zakres stosowanej siły docisku, jaki został zastosowany w teście ciągnięcia pasa blachy [71, 115, 120], został określony na poziomie odpowiadającym typowym naciskom docisku w obszarze kołnierza wytłoczki [108]. Z kolei zakres stosowanego ciśnienia smarowania był podyktowany technicznymi założeniami, które ograniczyły zakres do maksymalnego ciśnienia, przy którym olej nie wypływał ze strefy kontaktu.

Tabela 4.2. Parametry zastosowane w testach

Parametr	Wartość	Jednostka
Nacisk nominalny, p_n	2; 4; 6; 8	MPa
Ciśnienie smarowania, p_o	0; 0,6; 1,2; 1,8	MPa
Lepkość kinematyczna oleju w temp. 20°C	360; 1135	mm ² /s

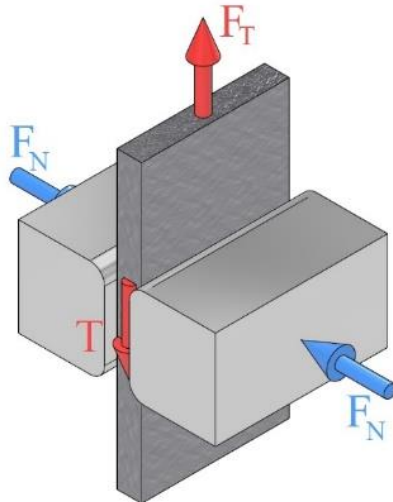
Wyznaczenie współczynnika tarcia, zwłaszcza blach, jest realizowane za pomocą testu tribologicznego polegającego na przeciąganiu pasa blachy pomiędzy płaskimi przeciwpróbkami, umożliwiając na określenie jego wartości na podstawie zależności 4.1, zgodnie z przedstawionym schematem procesu przeciągania pasa blachy (rys. 4.9).

$$\mu = \frac{F_T}{2 \cdot F_N} \quad (4.1)$$

gdzie:

F_T – siła przeciągania pasa blachy,

F_N – siła nacisku.



Rys. 4.9. Schemat procesu przeciągania pasa blachy

Zgodnie z zależnością 4.1 współczynnik tarcia jest wyznaczany na podstawie stosunku siły nacisku F_N i przeciągania pasa blachy F_T . Pomiar tych sił, w celu ustalenia wartości współczynnika tarcia na podstawie testu ciągnięcia pasa blachy, zrealizowano dla czterech gatunków blach (DC03, DC04, DC05, DC06), z których na potrzeby badań wycięto próbki w postaci pasów blachy o wymiarach 25 mm (szerokość) \times 140 mm (długość). Próbki wycięto wzdłuż kierunku walcowania blachy.

Dodatkowo wykonując proces kształtowania blach, nacisk wywierany przez narzędzie na odkształcaną blachę jest ustalany z uwzględnieniem zmiennej powierzchni kontaktu i siły docisku. Dlatego w celu zastosowania w badaniach właściwego nacisku (p_n) (tabela 4.2), niezbędne było wyznaczenie właściwej siły nacisku (F_N) zgodnie z zależnością (4.2), uwzględniającej powierzchnię kontaktu ograniczoną na podstawie szerokości próbek, wysokości przeciwpróbek i powierzchni rowka doprowadzającego olej pod ciśnieniem.

$$p_n = \frac{F_N}{A_{nom}} \quad (4.2)$$

gdzie:

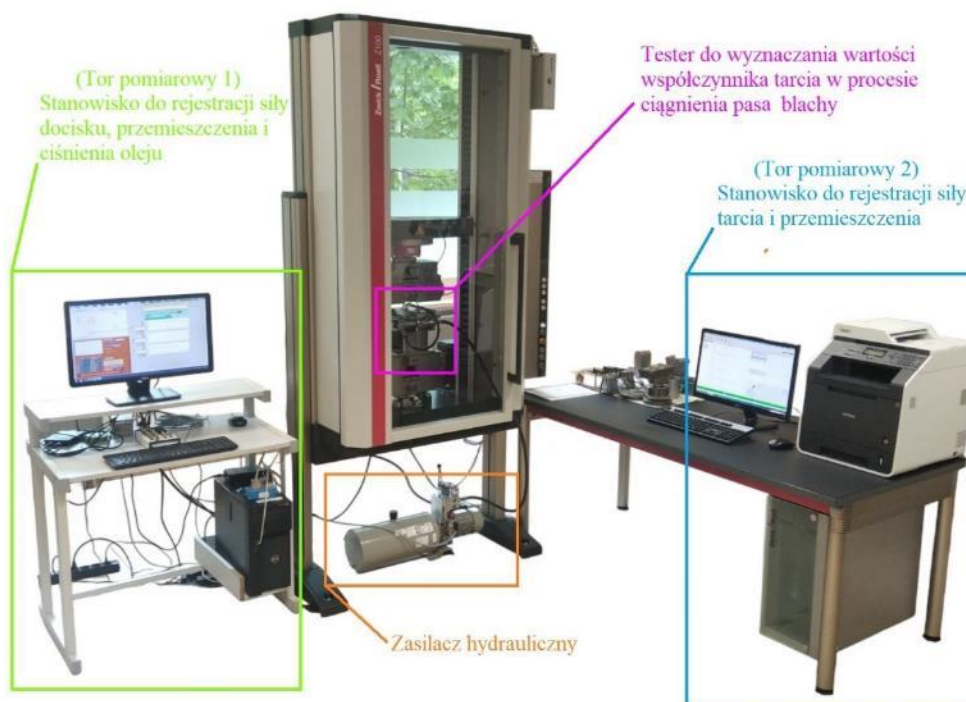
F_N – siła nacisku,

A_{nom} – pole powierzchni kontaktu próbki z przeciwpróbką ($A_{nom} = A_1 - A_2$),

A_1 – pole powierzchni kontaktu próbki z przeciwpróbką ($A_1 = \text{szerokość próbki} \cdot \text{wysokość przeciwpróbki}$),

A_2 – pole powierzchni rowka doprowadzającego olej pod ciśnieniem (obszar nie biorący udziału w procesie tarcia).

Przygotowane do badań stanowisko, składające się z maszyny wytrzymałościowej firmy Zwick/Roell Z100, testera do wyznaczania współczynnika tarcia, zasilacza hydraulicznego oraz toru pomiarowego, zostało przedstawione na rysunku 4.10.



Rys. 4.10. Stanowisko do wyznaczania współczynnika tarcia w teście ciągnięcia pasa blachy

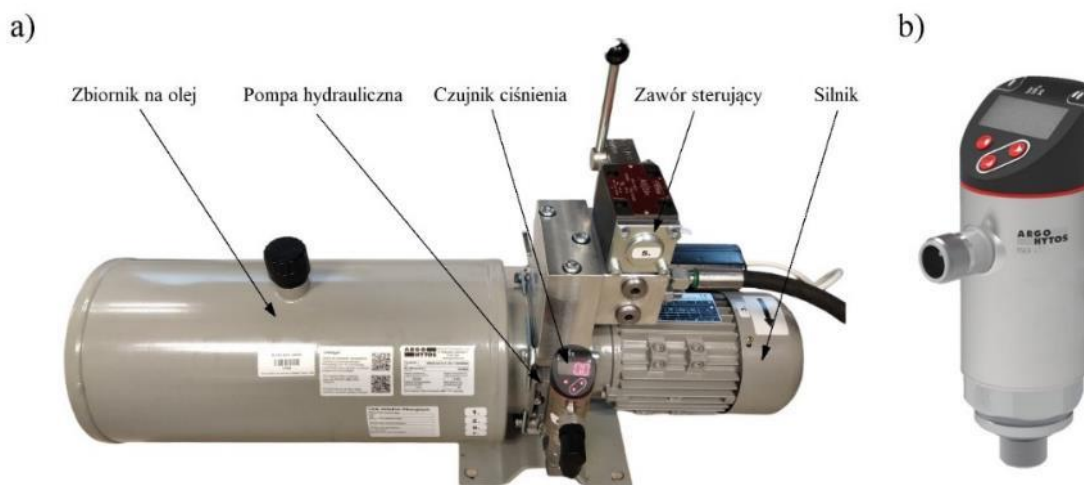
Przed przystąpieniem do testu ciągnięcia pasa blachy próbki oczyszczono z zanieczyszczeń znajdujących się na powierzchni metalu wskutek procesu produkcyjnego blachy i przygotowań próbek.

Pomiar wartości współczynnika tarcia rozpoczął się od zamontowania wybranej próbki w górnym uchwycie trawersy maszyny wytrzymałościowej. Zamontowana próbka w uchwycie była następnie dociskana do powierzchni przeciwpróbek z zadaną siłą za pomocą śruby dociskowej. Wartość siły docisku była mierzona przy zastosowaniu czujnika piezoelektrycznego typu 9345B firmy KISTLER (rys. 4.11) o zakresie pomiarowym od 0 do 10 kN.



Rys. 4.11. Czujnik siły typu 9345B firmy KISTLER

W momencie gdy została osiągnięta wartość siły docisku, przystępowano do ustawienia zaplanowanego ciśnienia smarowania. Ciśnienie oleju doprowadzanego bezpośrednio do strefy tarcia było wytwarzane przy pomocy zasilacza hydraulicznego (rys. 4.12.a) umożliwiającego płynną regulację przepływu (od 0 do 0,4 dm³/min) i ciśnienia (od 0 do 6,3 MPa). Regulacja wartości ciśnienia była realizowana na podstawie wskazania czujnika ciśnienia ARGO-HYTOS TSE3-D-400-2-1-1 (rys. 4.12.b).



Rys. 4.12. Układ zasilania olejem: a) zasilacz hydrauliczny, b) czujnik ciśnienia

Gdy wartość siły docisku i ciśnienia smarowania była ustawiona na zadanym poziomie, próbkę w postaci pasa blachy przeciągano pomiędzy zaciśniętymi przeciwpróbkami ze stałą prędkością 0,5 mm/s. Układ pomiarowy maszyny wytrzymałościowej, której parametry zostały przedstawione w tabeli 4.3, rejestrował wartość siły potrzebnej do przeciągania pasa blachy.

Tabela 4.3. Parametry techniczne maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100

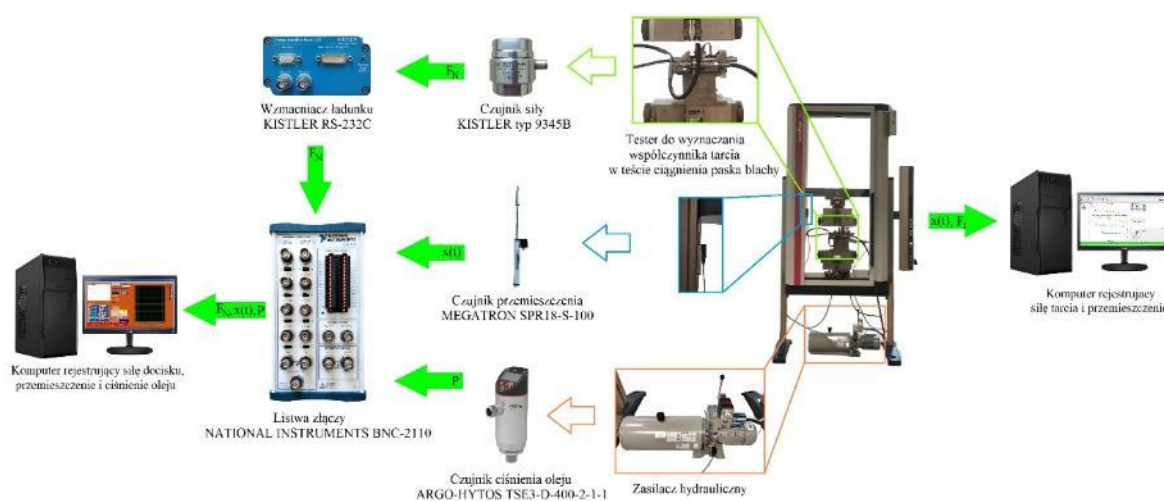
Parametr	Wartość	Jednostka
Maksymalna siła pomiarowa	100	kN
Prędkość przemieszczania się trawersy	0.0001 ... 1500	mm/min
Odchylenie wskazań prędkości trawersy	0.05	% $V_{aktualnej}$
Szerokość obszaru roboczego	640	mm
Wysokość obszaru roboczego	1355	mm

Celem korelacji w czasie uzyskanych wyników pomiaru siły przemieszczenia i siły docisku konieczne było powiązanie w czasie danych uzyskanych z obu torów pomiarowych. Dlatego zastosowano czujnik przemieszczenia MEGATRON SPR18-S-100 (rys. 4.13). Czujnik ten realizował pomiar przemieszczania się trawersy maszyny wytrzymałościowej w funkcji czasu trwania testu. Uzyskane dane pomiarowe były archiwizowane za pomocą tego samego oprogramowania co pomiar siły nacisku (F_N) i ciśnienia smarowania (p_o). Rozwiązanie to pozwoliło na skorelowanie w czasie wartości siły przeciągania pasa blachy i siły nacisku.



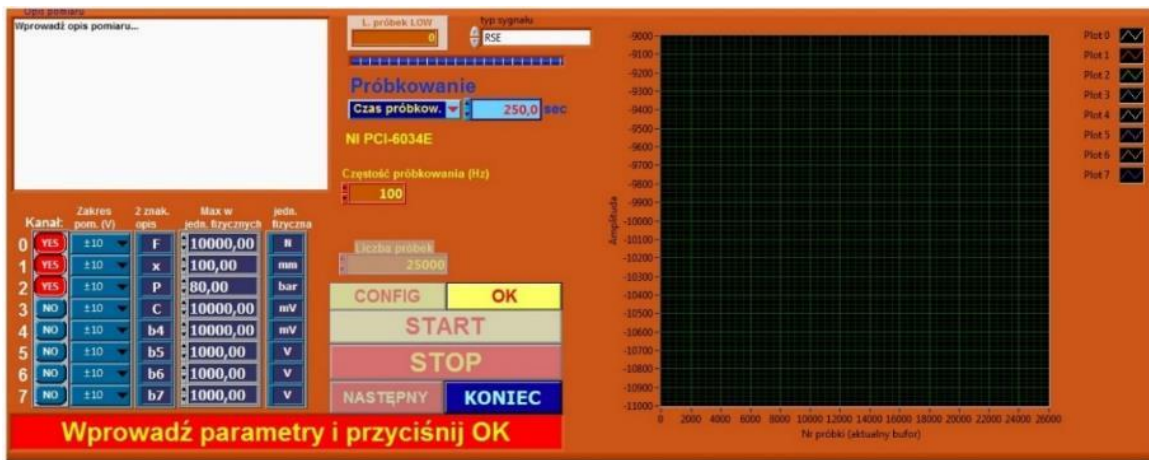
Rys. 4.13. Czujnik przemieszczenia MEGATRON SPR18-S-100

Na rysunku 4.14 przedstawiono szczegółowy schemat toru pomiarowego zastosowanego w badaniach.



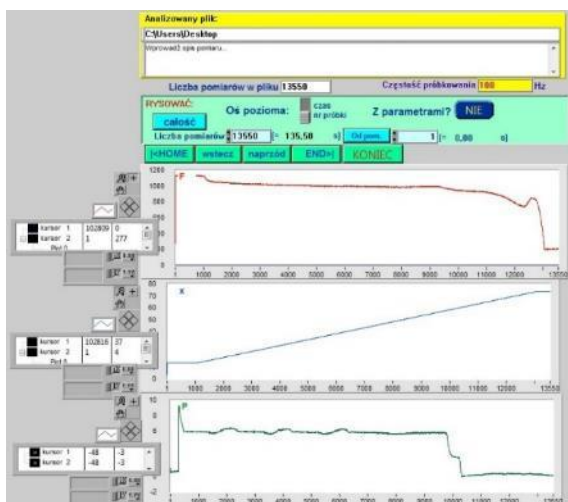
Rys. 4.14. Schemat toru pomiarowego

Do rejestracji i archiwizacji sygnałów pochodzących z toru pomiarowego nr 1 (rys. 4.10) opracowano aplikację w środowisku LabVIEW. Opracowany program do rejestracji pozwala użytkownikowi na określenie liczby rejestrowanych kanałów, czasu próbkowania oraz częstotliwości próbkowania (rys. 4.15). Wizualizacja zarejestrowanych sygnałów możliwa jest w opracowanym podprogramie (rys. 4.16.a). Dodatkowo aplikacja umożliwia wyznaczenie współczynnika tarcia dla całego przebiegu testu na podstawie zarejestrowanych sygnałów zarówno przez tor pomiarowy 1, jak i 2 (rys. 4.10). Ponadto istnieje możliwość wyboru określonego fragmentu przebiegu sygnałów, z których wyznaczana będzie średnia wartość współczynnika tarcia.

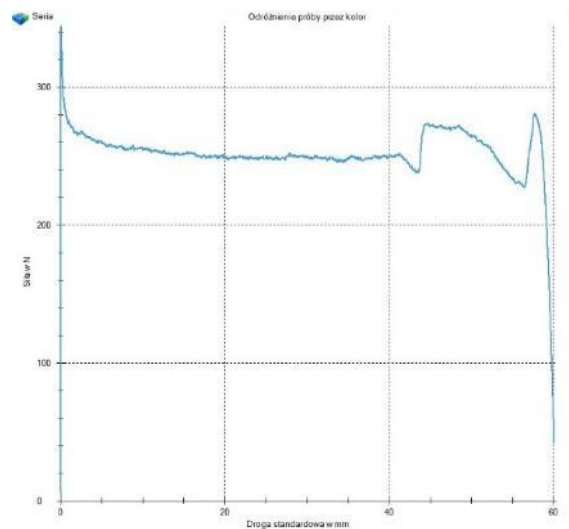


Rys. 4.15. Widok interfejsu programu do rejestracji wartości siły docisku, przemieszczenia i ciśnienia oleju

a)



b)

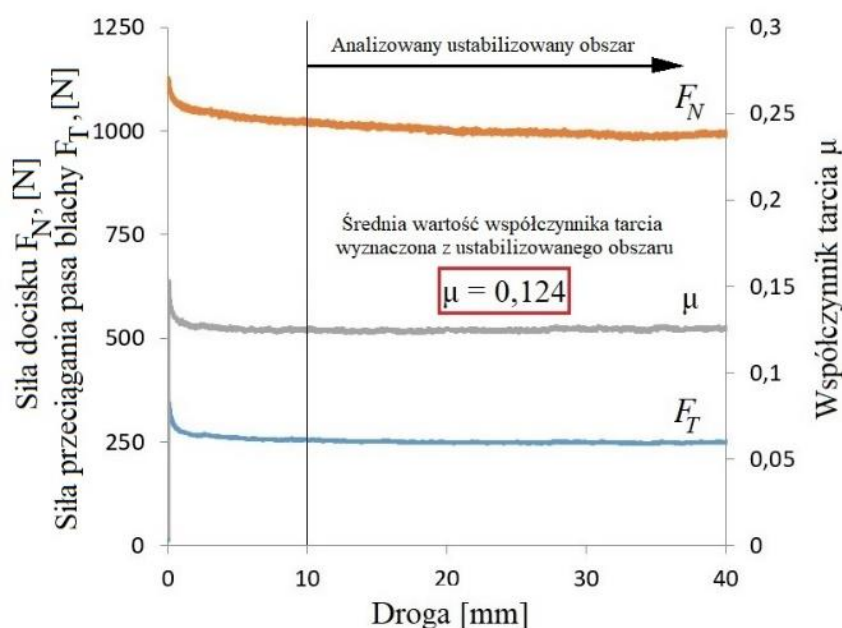


Rys. 4.16. Przykładowy wykres wartości siły nacisku F_N , siły przeciągania pasa blachy F_T , przemieszczenia $x(t)$ i ciśnienia oleju (p_o) zarejestrowanych w czasie testu:

a) tor pomiarowy 1, b) tor pomiarowy 2

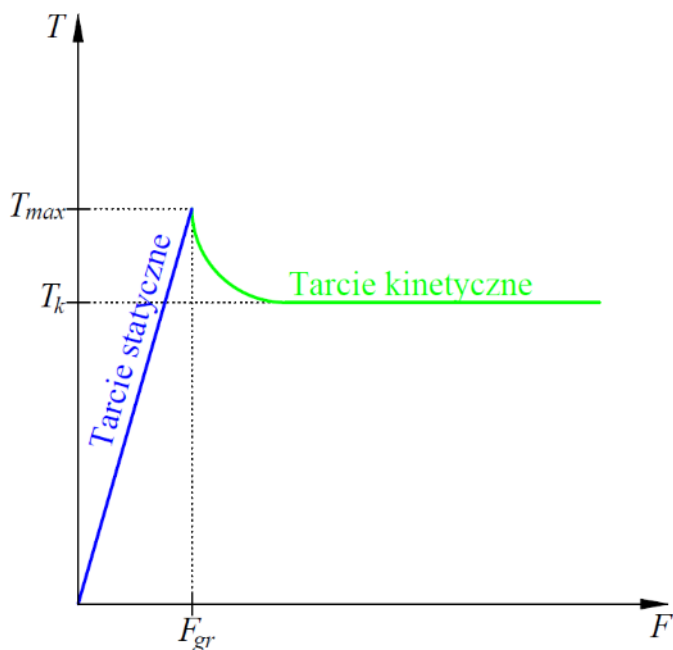
Mając zarejestrowane sygnały pochodzące z obu torów pomiarowych (rys. 4.16.a i rys. 4.16.b), możliwe było wyznaczenie współczynnika tarcia. Postanowiono, że w badaniach współczynnik tarcia będzie wyznaczany z określonego fragmentu, ustabilizowanego przebiegu zarejestrowanych sygnałów.

Średnią wartość współczynnika tarcia w ustabilizowanym obszarze wyznaczano na podstawie 20 000 pomiarów wartości współczynnika tarcia, obliczonych na podstawie niezależnych pomiarów wartości siły docisku (F_N) i siły potrzebnej do przeciągania próbki (F_T). Uzyskany wynik współczynnika tarcia z wizualizacją przebiegów przedstawiono na rys. 4.17.



Rys. 4.17. Zmiana współczynnika tarcia na podstawie zarejestrowanych wartości siły przeciągania pasa blachy i siły nacisku ($F_N = 2$ MPa, $p_o = 0,6$ MPa, $\eta_k = 360$ mm²/s, gatunek blachy DC04)

Badając wpływ wybranych parametrów procesu kształtowania blach na wartość współczynnika tarcia, otrzymujemy charakterystyczny wykres (rys. 4.17). Na jego podstawie można zaobserwować i opisać zmianę rodzaju tarcia, czyli przejście z tarcia statycznego w tarcie kinetyczne, zjawisko to jest przedstawione w początkowej fazie wykresu. Dla lepszego wyjaśnienia tego zjawiska zamieszczono rysunek 4.18.



Rys. 4.18. Wykres zmiany charakterystyki tarcia

Rodzaj tarcia zmienia się wraz ze wzrostem siły (F) (rys. 4.18). Na początku pomiędzy ciałami, z których jedno jest poddane działaniu siły, zachodzi zjawisko tarcia statycznego, w którym nie zachodzi ruch. W momencie osiągnięcia granicznej wartości siły (F_{gr}) rozpoczyna się ruch i od tego momentu tarcie zmniejsza się i stabilizuje na charakterystycznym poziomie tarcia kinetycznego (T_k). Moment zmiany (przejścia) siły tarcia statycznej w tarcie kinetyczne odpowiada największej wartości siły tarcia (T_{max}).

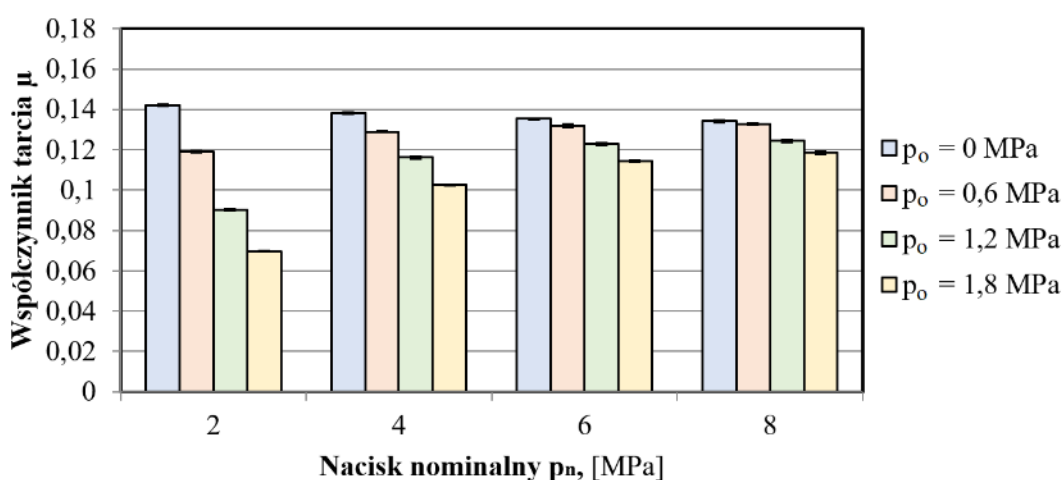
5. Wyniki eksperymentalne oraz ich interpretacja

Celem analizy wyników zebranych w czasie prowadzonych badań na temat wpływu wybranych parametrów testu tarcia, na wartość współczynnika tarcia oraz topografię powierzchni blach, zastosowano podział ze względu na parametry procesu, wartości mierzone i rodzaj zastosowanego materiału (gatunek blachy).

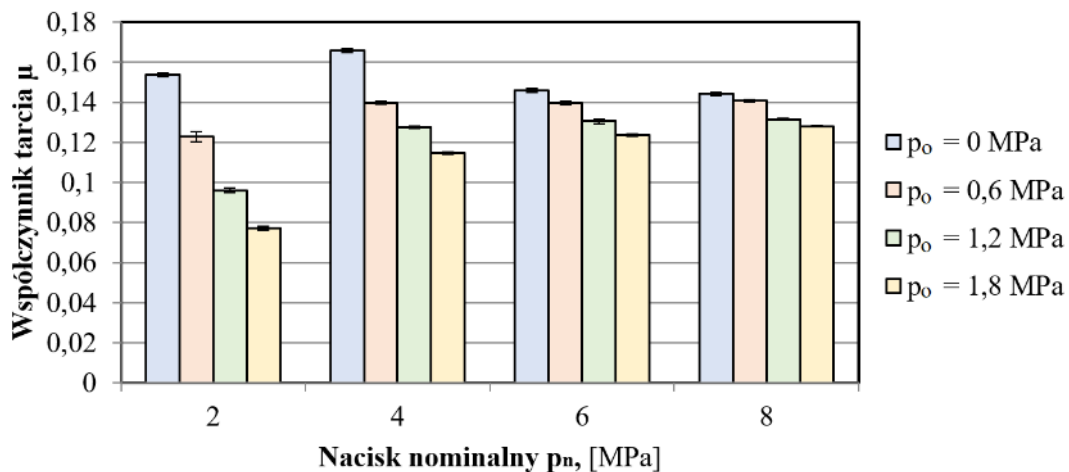
5.1. Współczynnik tarcia

5.1.1. Wpływ nacisku na zmianę wartości współczynnika tarcia

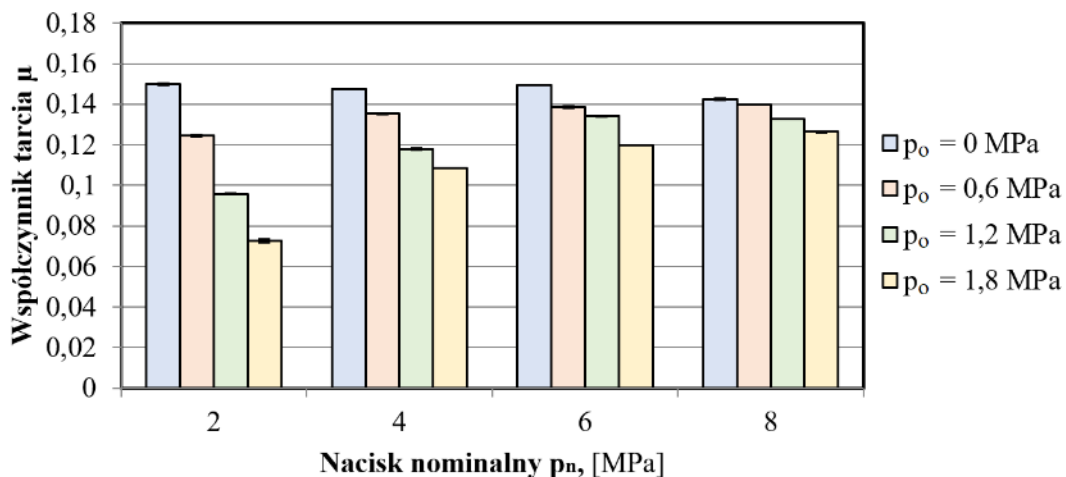
Pierwszym parametrem poddanym analizie pod kątem jego zmiany na skutek zastosowanych parametrów tarcia jest współczynnik tarcia zmierzony w czasie testu ciągnięcia pasa blachy. Na wstępie, przedstawiając wykresy na rysunkach 5.1-5.8, poddano analizie wpływ nacisku na zmianę wartości współczynnika tarcia. Rysunek 5.1 przedstawia wyniki zmierzonego współczynnika tarcia dla blachy DC03 oraz oleju o lepkości kinematycznej 360 mm²/s (S100 Plus), w zależności od nacisku (p_N) i ciśnienia oleju (p_o). Z kolei wykres na rysunku 5.2 przedstawia wyniki zmierzonego współczynnika tarcia dla blachy DC03 oraz oleju o lepkości kinematycznej 1135 mm²/s (S300), w zależności od nacisku (p_N) i ciśnienia oleju (p_o). Na kolejnych wykresach przedstawiono wyniki dla pozostałych gatunków blachy, zachowując ten sam schemat. Tym samym na rysunku 5.3 przedstawiono wyniki dla gatunku blachy DC04 i oleju o lepkości kinematycznej 360 mm²/s (S100 Plus), a na rysunku 5.4 dla oleju o lepkości kinematycznej 1135 mm²/s (S300). Rysunki 5.5 oraz 5.6, przedstawiają wyniki dla blachy DC05 i oleju kolejno S100 Plus i S300, podobnie zobrazowano wyniki dla gatunku blachy DC06 na rysunkach 5.7 oraz 5.8.



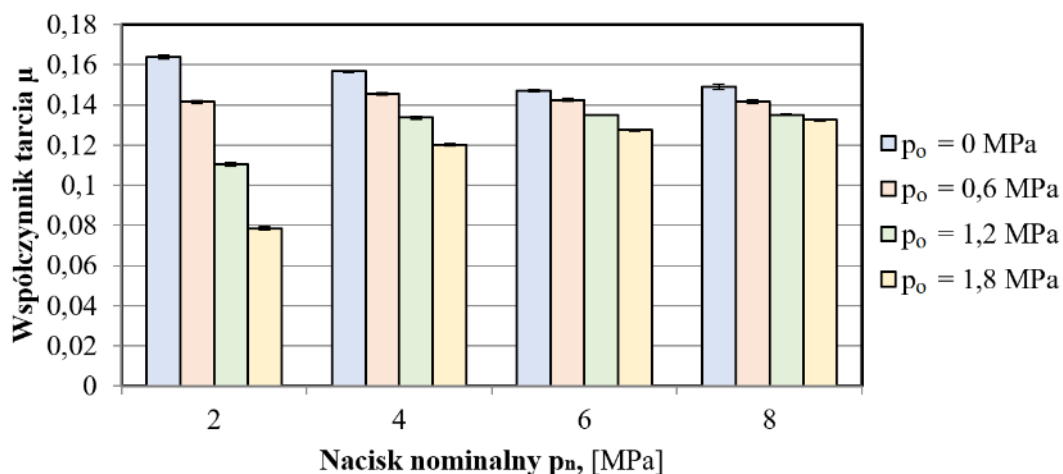
Rys. 5.1. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC03 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



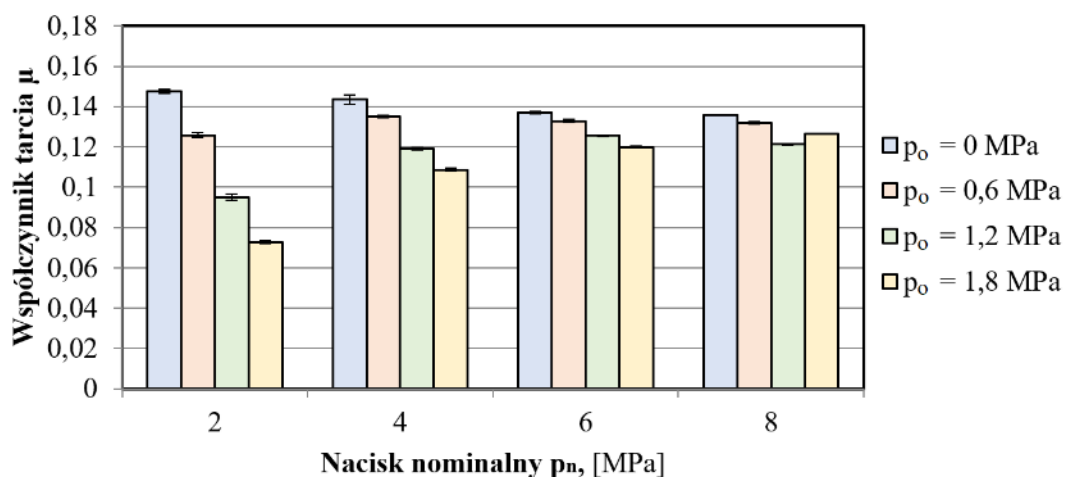
Rys. 5.2. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC03 w warunkach smarowania olejem S300



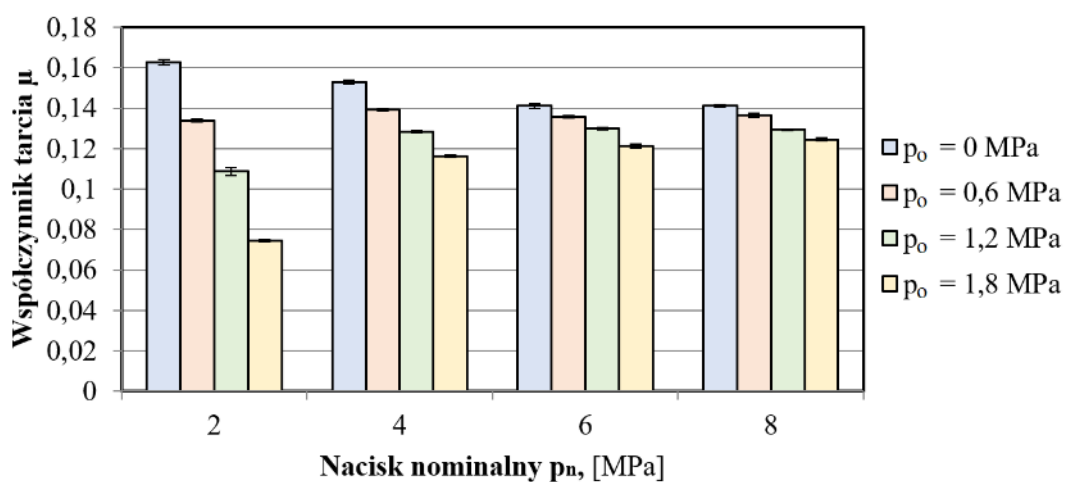
Rys. 5.3. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC04 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



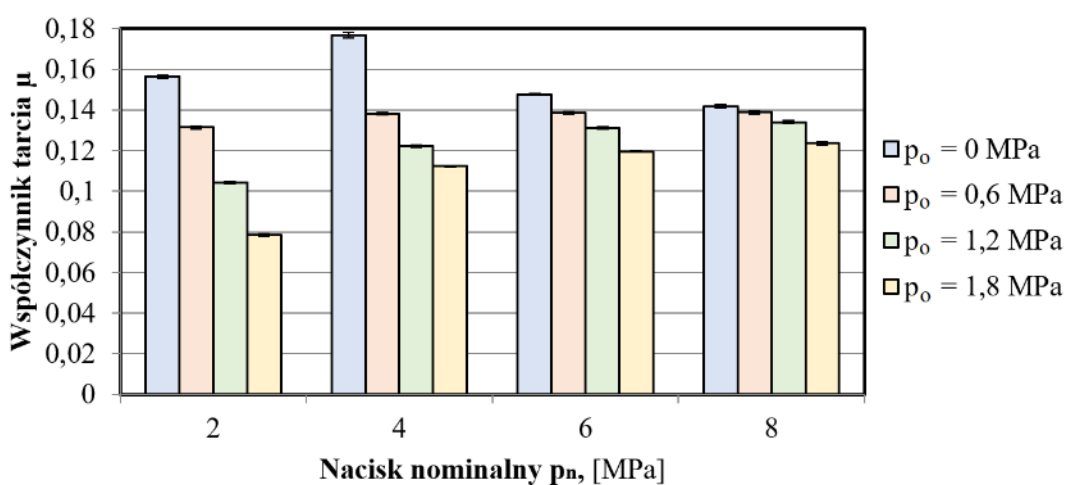
Rys. 5.4. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC04 w warunkach smarowania olejem S300



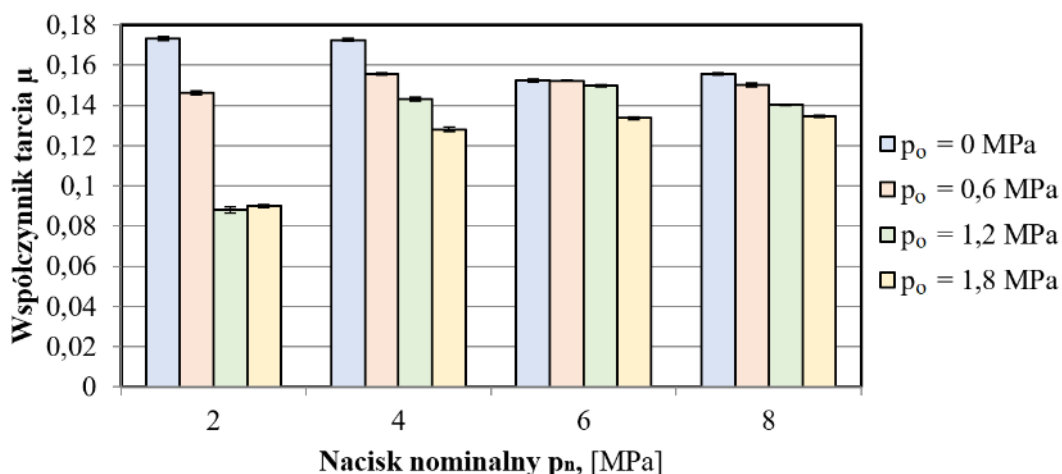
Rys. 5.5. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC05 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



Rys. 5.6. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC05 w warunkach smarowania olejem S300

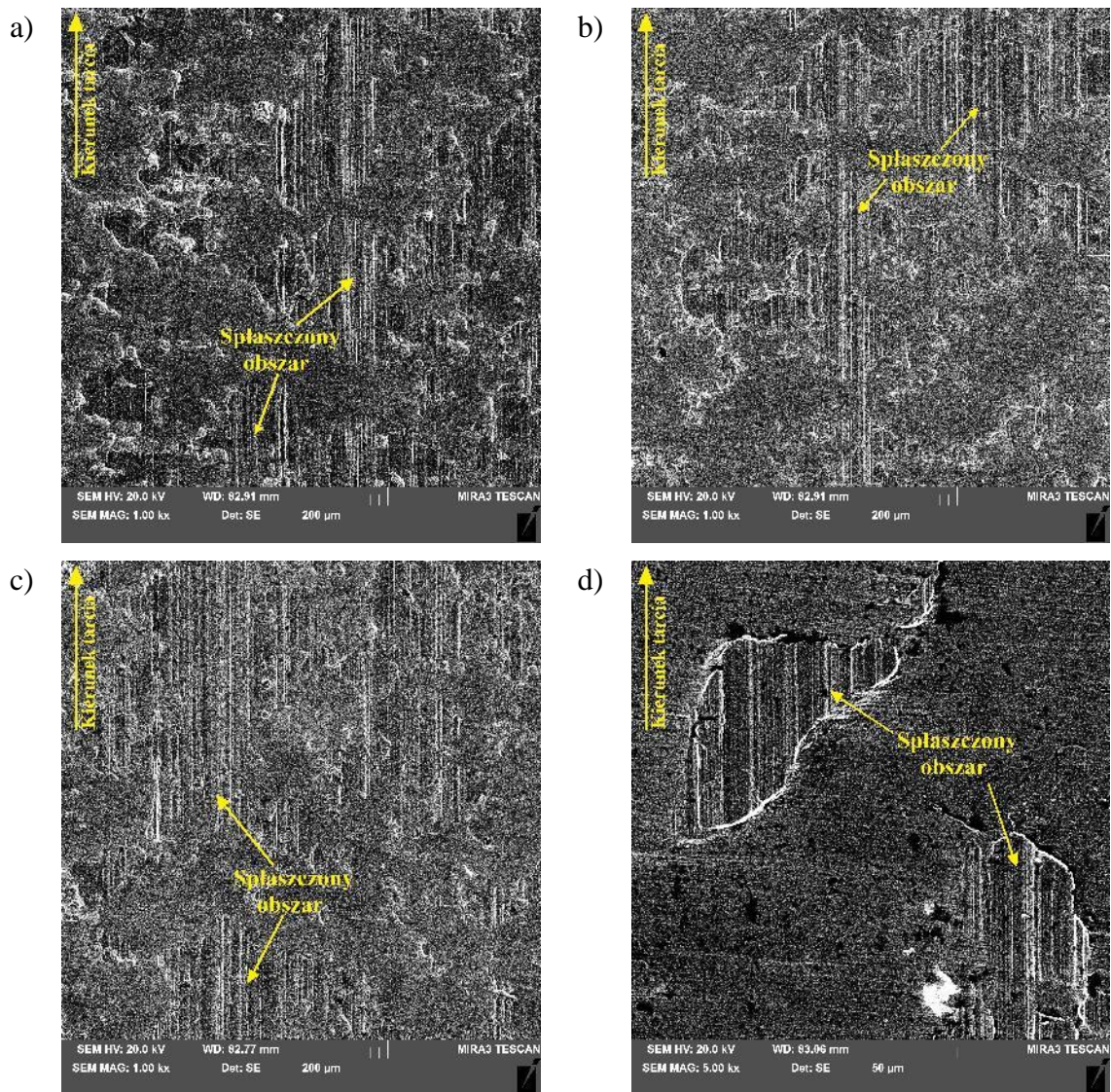


Rys. 5.7. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC06 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



Rys. 5.8. Wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia blachy DC06 w warunkach smarowania olejem S300

Po przeprowadzonej analizie wyników wpływu nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia dla czterech gatunków blachy w warunkach smarowania olejem S100 plus oraz S300 z zastosowaniem zmiennego ciśnienia smarowania zaobserwowano istotne zależności pomiędzy parametrami procesu i wartościami współczynnika tarcia. Między innymi zaobserwowano trend zmniejszającego się co do wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem wartości nacisku nominalnego dla tarcia z zastosowaniem smarowania olejem S100 plus oraz S300 bez wymuszonego ciśnienia oleju. Zjawisko to może być wynikiem przekroczenia pewnej wartości obciążenia, powyżej której zależność siły przeciągania pasa blachy i siły docisku nie jest liniowa, powodując tym samym, że współczynnik tarcia zmienia się nieproporcjonalnie wraz ze wzrostem nacisku. Nieliniowa zależność pomiędzy siłą przeciągania pasa blachy i siłą docisku, daje do zrozumienia, że w pewnym zakresie obciążenia, może zachodzić zjawisko spłaszczenia nierówności oraz zmniejszenie się roli mechanizmu zazębienia się nierówności w całkowitym oporze tarcia. Zjawisko to zostało już wcześniej zaobserwowane i opisane przez innych badaczy [83, 106]. Celem przedstawienia zjawiska wyrównywania wierzchołków wskutek tarcia występującego w procesie kształtowania blach, próbki w postaci pasków blach zostały poddane badaniom mikroskopowym z zastosowaniem mikroskopu skaningowego firmy TESCAN MIRA3 (rys. 5.10). Przy pomocy mikroskopu wykonano serię zdjęć mikroskopowych obrazujących powierzchnię próbek po testach (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Mikrofotografie SEM powierzchni blachy po próbach tarcia przeprowadzonych dla blachy gatunku DC06 w następujących warunkach: a) lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny – 4 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa, b) lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny – 4 MPa; ciśnienie smarowania 1,8 MPa, c) lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny – 2 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa, d) lepkość kinematyczna oleju – $1135 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny – 8 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa

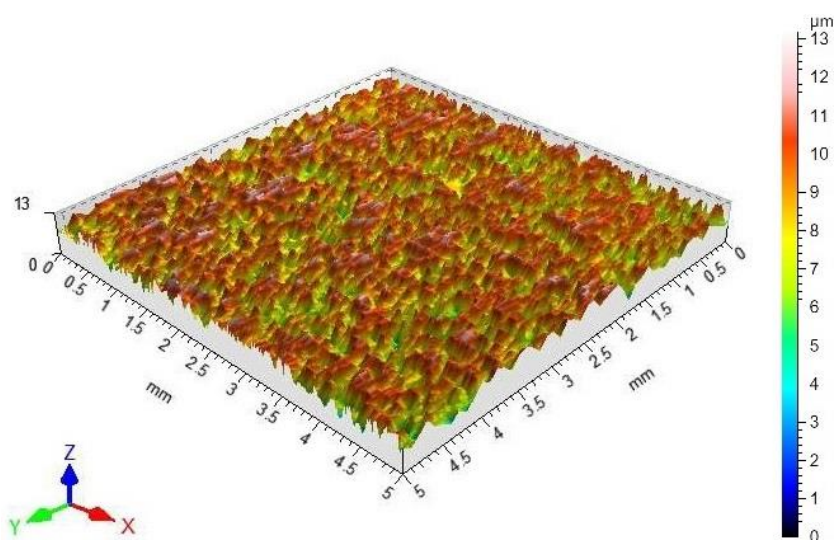


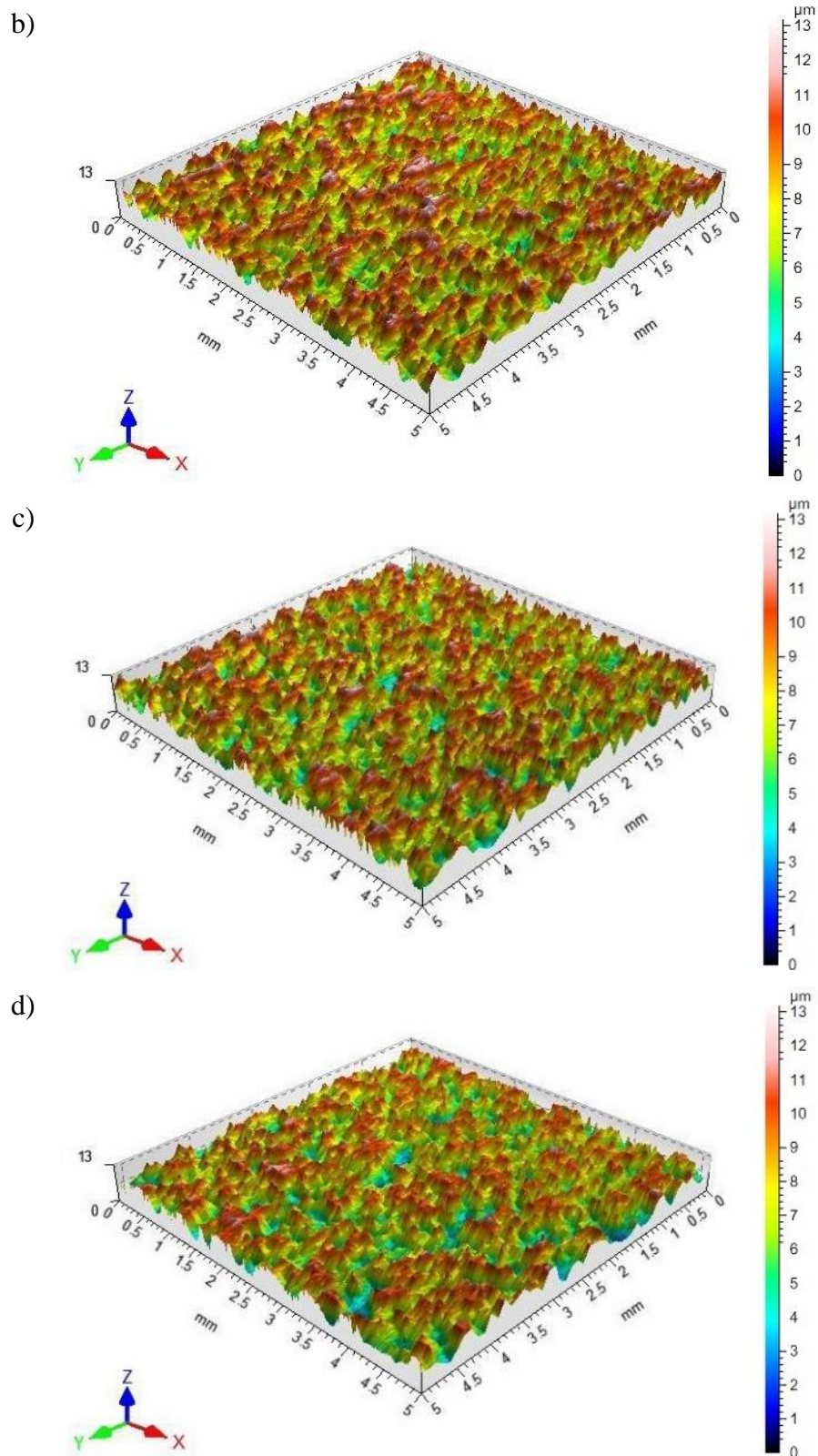
Rys. 5.10. Mikroskop skaningowy firmy TESCAN MIRA3

Przedstawione niewielkie odkształcenia plastyczne wierzchołków nierówności powierzchni (rys. 5.9) powodują, że przy stosunkowo małych naciskach nominalnych, siła tarcia nie zmienia się w stosunku do siły nacisku w sposób proporcjonalny.

Zjawisko wyrównywania nierówności wierzchołków jest również widoczne na profilach chropowatości powierzchni (rys. 5.11), które otrzymano w wyniku przeprowadzonych pomiarów topografii powierzchni za pomocą profilometru stacjonarnego Hommel-Etamic T8000RC.

a)





Rys. 5.11. Topografia powierzchni blach po teście z zastosowaniem zmiennych parametrów procesu wytłaczania: a) gatunek blachy – DC04; lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny – 2 MPa; ciśnienie smarowania 0 MPa, b) gatunek blachy – DC05; lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny – 8 MPa; ciśnienie smarowania 1,8 MPa, c) gatunek blachy – DC06; brak smarowania; nacisk nominalny – 4 MPa, d) gatunek blachy – DC06; brak smarowania; nacisk nominalny – 6 MPa

Kolejną zależnością, którą można zaobserwować na wykresach przedstawionych na rysunkach 5.1-5.8, jest zjawisko zmieniającej się wartości współczynnika tarcia dla różnych wartości nacisku nominalnego w zależności od zastosowanego ciśnienia smarowania. Zmiana wartości współczynnika tarcia w próbach, w których zastosowano zmienne ciśnienie smarowania o wartościach 0,6, 1,2 i 1,8 MPa, zmienia się w sposób proporcjonalny zależnie od zastosowanego nacisku nominalnego oraz ciśnienia smarowania. Największe różnice w wartościach współczynnika tarcia, wynikające z zastosowanego ciśnienia smarowania są widoczne dla nacisku nominalnego 2 MPa, dla którego wzrost wartości ciśnienia smarowania, powoduje zmniejszenie wartości współczynnika tarcia. Patrząc kolejno na pozostałe wartości nacisku nominalnego, czyli 4, 6 oraz 8 MPa, widoczna jest tendencja do zmniejszania się współczynnika tarcia w zależności od zastosowanego ciśnienia smarowania, lecz wpływ tego parametru zmniejsza się wraz ze wzrostem nacisku.

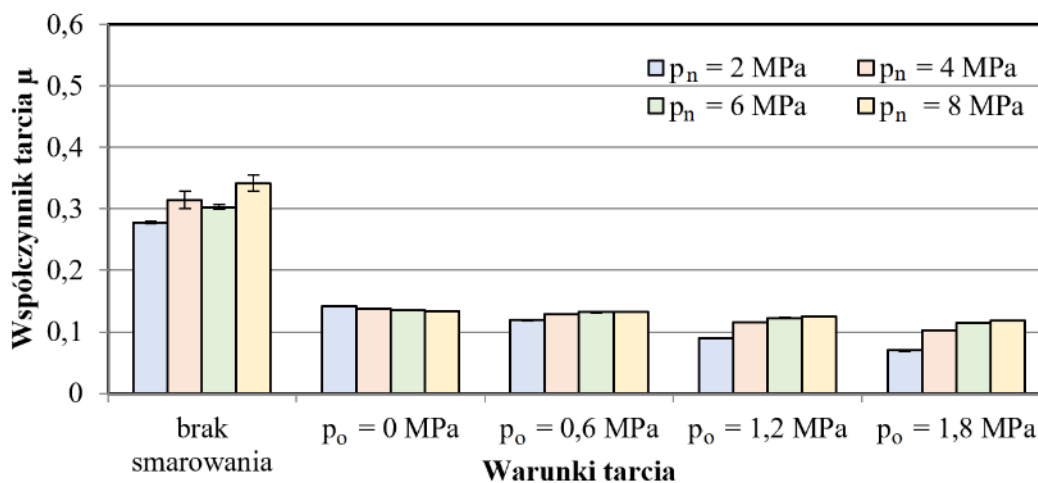
Ze względu na udział ciśnienia smarowania w procesie kształtowania blach dla małych wartości nacisku nominalnego, obserwujemy znaczące zmniejszenie się wartości współczynnika tarcia. Wpływ udziału ciśnienia smarowania znacząco zmniejsza się wraz ze wzrostem nacisku, powodując jednoczesny wzrost wartości współczynnika tarcia. Powodując tym samym, że wartość współczynnika tarcia dla nacisku 4, 6 i 8 MPa, jest stosunkowo wyższa aniżeli dla nacisku 2 MPa.

5.1.2. Wpływ strategii smarowania na zmianę wartości współczynnika tarcia

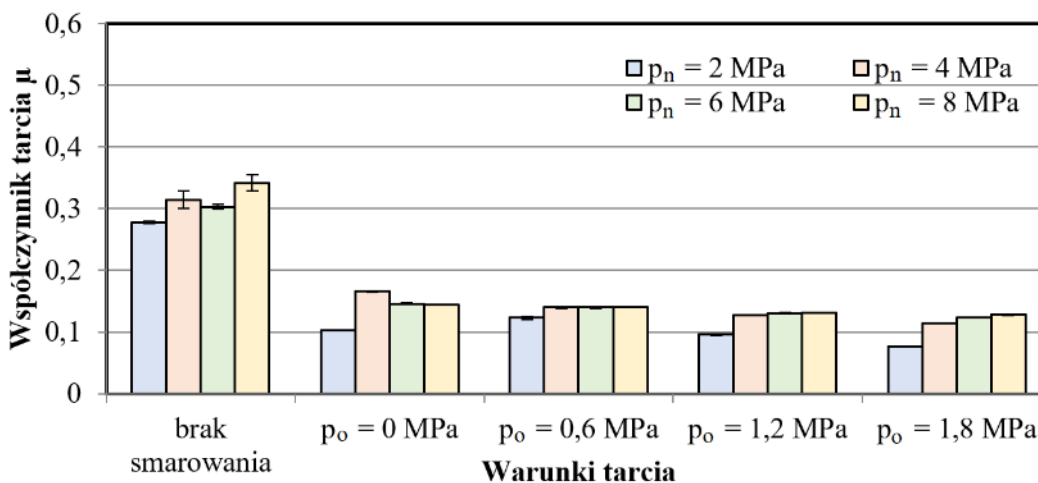
W tym rozdziale poddano analizie wpływ strategii smarowania na wartość współczynnika tarcia. Wykonując analizę, skupiono się na zbadaniu wpływu zastosowania olejów o różnej lepkości oraz porównaniu ich z wartościami współczynnika tarcia zmierzonego dla testu przeprowadzonego bez smarowania. Dodatkowo w celu zbadania wpływu zastosowanego ciśnienia smarowania na wartość współczynnika tarcia, przeprowadzono analizy efektywności smarowania.

W celu zbadania wpływu środka smarnego na zmianę wartości współczynnika tarcia w procesie kształtowania blach porównano wartości współczynnika tarcia wyznaczonego dla tych samych parametrów procesu tarcia, zmieniając jedynie środki smarujące, które różniły się między sobą wartością lepkości kinematycznej. Wyniki wyznaczonych wartości współczynnika tarcia do celów analizy zostały przedstawione na wykresach 5.12-5.19. Dwa pierwsze rysunki przedstawiają zmianę wartości współczynnika tarcia, dla blachy DC03 z zastosowaniem smarowania olejem S100 Plus (rys. 5.12) oraz S300 (rys. 5.13). Kolejne odnoszą się do pozostałych gatunków blach i użytych olejów, tzn. rysunek 5.14 oraz 5.15 przedstawiają wyniki dla blachy DC04 i oleju kolejno S100 Plus i S300, rysunki 5.16

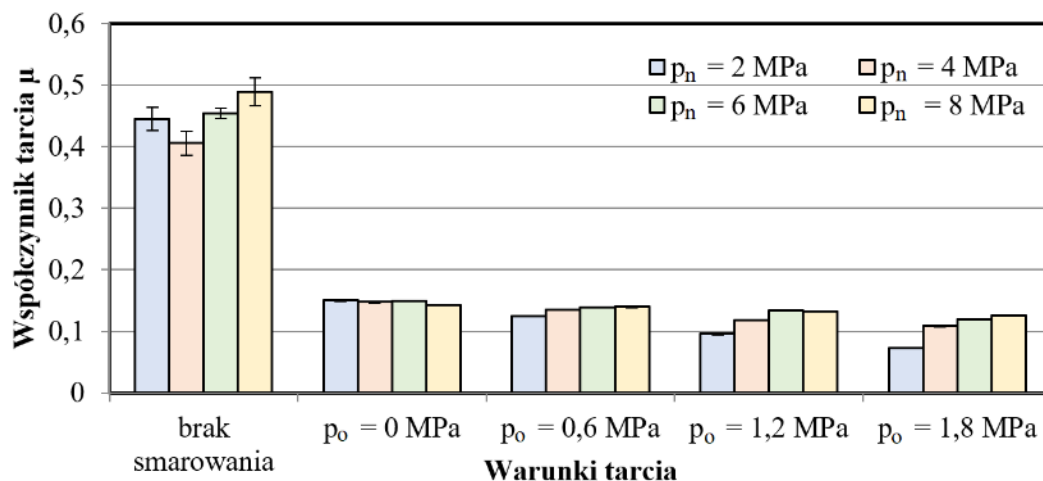
i 5.17 odnoszą się do blachy DC05 i kolejno dwóch analizowanych olejów, tak samo jak ma to miejsce na rysunkach 5.18-5.19 opisujących wartości współczynnika tarcia dla blachy DC06.



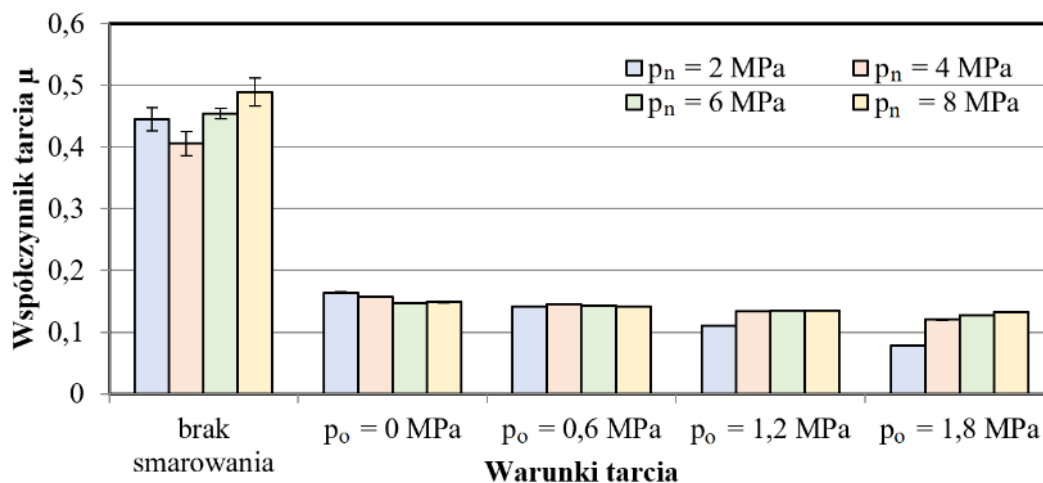
Rys. 5.12. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC03 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



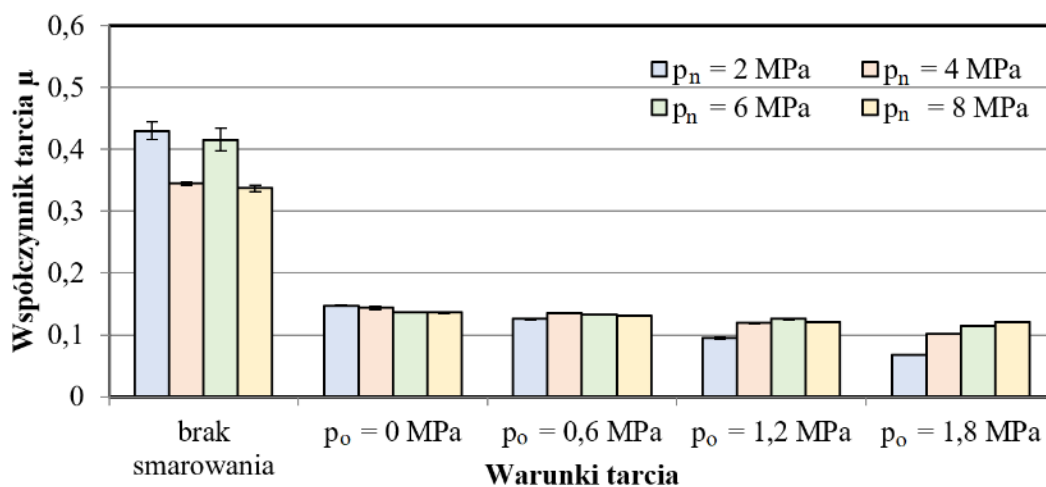
Rys. 5.13. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC03 w warunkach smarowania olejem S300



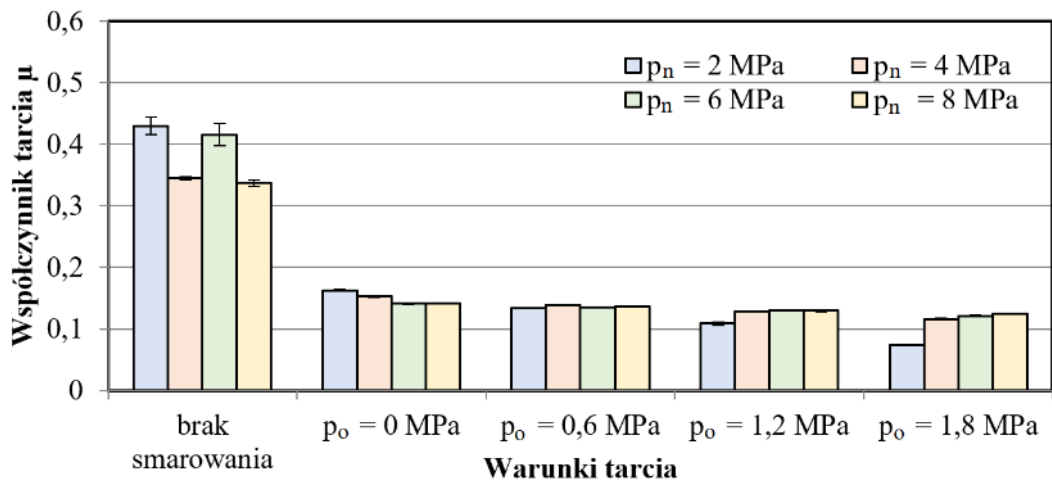
Rys. 5.14. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC04 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



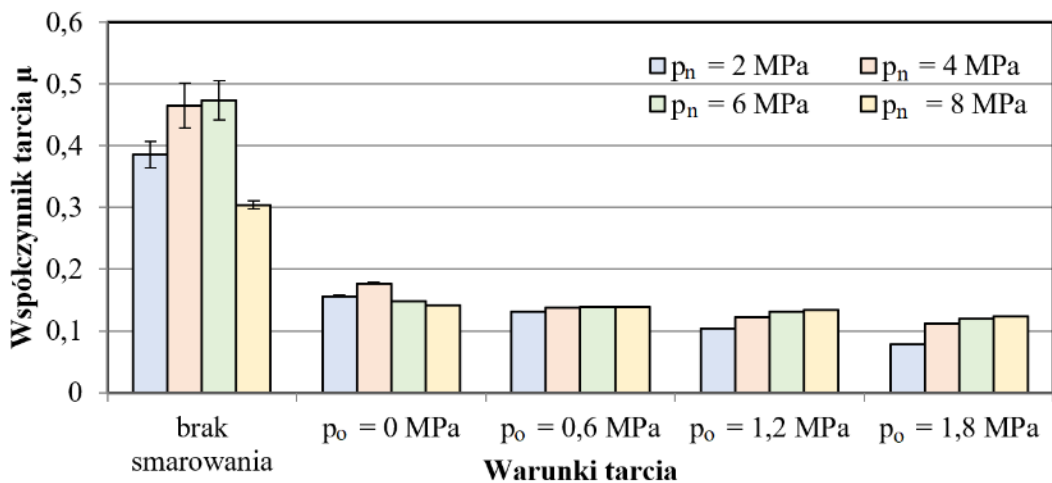
Rys. 5.15. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC04 w warunkach smarowania olejem S300



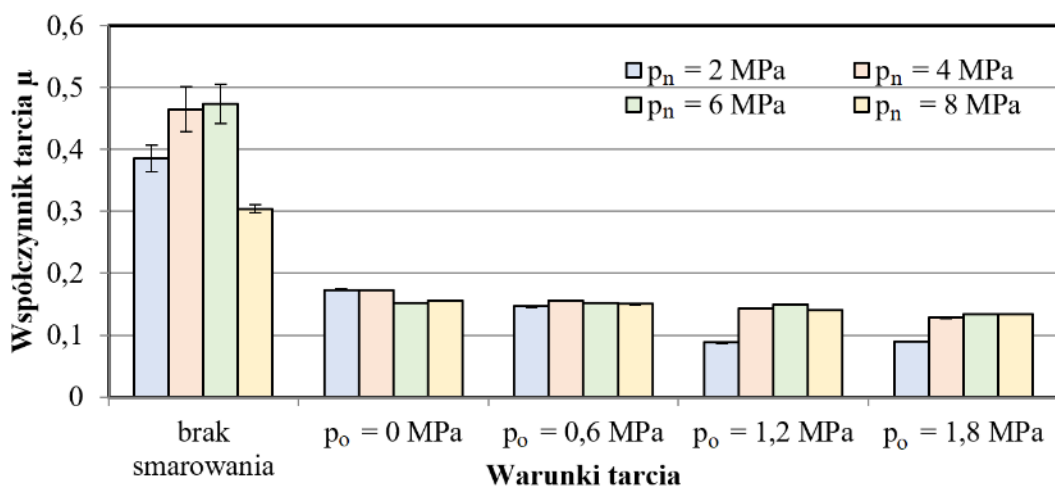
Rys. 5.16. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC05 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



Rys. 5.17. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC05 w warunkach smarowania olejem S300



Rys. 5.18. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC06 w warunkach smarowania olejem S100 Plus



Rys. 5.19. Wpływ warunków tarcia na wartość współczynnika tarcia blachy DC06 w warunkach smarowania olejem S300

Zależnością, którą zaobserwowano po przeprowadzonych testach, jest wyraźny wpływ stosowania środków smarnych na wartość współczynnika tarcia, gdzie na podstawie przedstawionych danych można dostrzec, że zastosowanie smarowania w procesie ciągnięcia pasa blachy powoduje zmniejszenie się wartości współczynnika tarcia na poziomie od 47 do 71% w stosunku do wartości wyznaczonej dla tarcia bez smarowania.

Ze względu na fakt, iż samo stosowanie smarowania w procesie kształtowania blach odgrywa znaczącą rolę, postanowiono na podstawie wyznaczonych wartości współczynnika tarcia sprawdzić jego zależność od wielkości zastosowanego ciśnienia smarowania. Zaproponowano wyznaczenie wartości współczynnika efektywności smarowania, przy użyciu którego opisano zależność uzyskanej wartości współczynnika tarcia dla prób z zastosowaniem smarowania pod ciśnieniem 0,6, 1,2 i 1,8 MPa, w stosunku do wartości współczynnika tarcia wyznaczonego dla próby przeprowadzonej z zastosowaniem smarowania bez wymuszonego ciśnienia. Wartość wspomnianego współczynnika efektywności smarowania, wyznaczono z zależności (5.1):

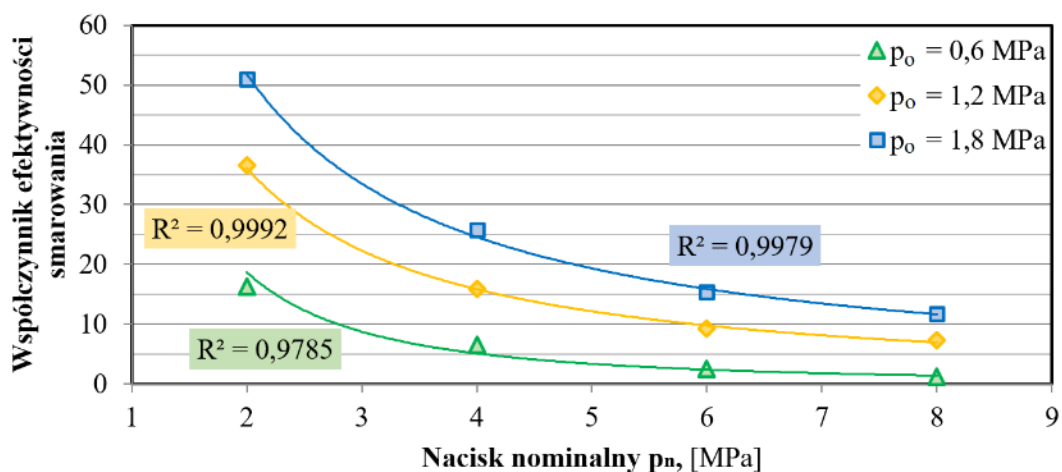
$$\text{współczynnik efektywności smarowania} = \frac{\mu_o - \mu_{o0}}{\mu_o} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

gdzie:

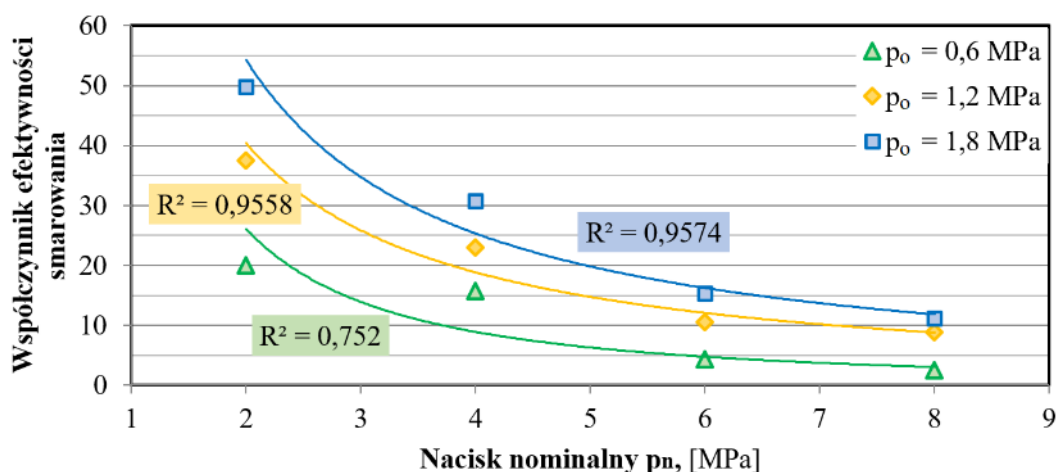
μ_o – współczynnik tarcia wyznaczony w warunkach smarowania ciśnieniowego,

μ_{o0} – współczynnik tarcia wyznaczony w warunkach smarowania bez wymuszonego ciśnienia ($p_o = 0$ MPa).

Wartości współczynnika efektywności smarowania dla ciśnień 0,6, 1,2 i 1,8 MPa, dla dwóch rodzajów olejów i dla czterech gatunków blach zostały przedstawione na wykresach (rys. 5.20-5.27). Punkty danych aproksymowano krzywymi potęgowymi. Analizując wykresy porównujące efektywność smarowania oleju S100 plus oraz S300, nie można jednoznacznie wskazać, który olej charakteryzuje się lepszą efektywnością smarowania. Wyznaczona efektywność smarowania dla badanych olejów nie jest bowiem efektem jednego charakterystycznego parametru oleju, w tym przypadku lepkości kinematycznej, lecz wpływa na nią zestaw parametrów stosowanych w badaniach, takich jak: nacisk nominalny, ciśnienie smarowania, i topografia powierzchni badanego materiału zmieniająca się w zależności od zastosowanego gatunku blachy. Na wstępie, pod kątem efektywności smarowania, analizie poddano blachę DC03 oraz dwa gatunki oleju S100 Plus (rys. 5.20) oraz S300 (rys. 5.21)

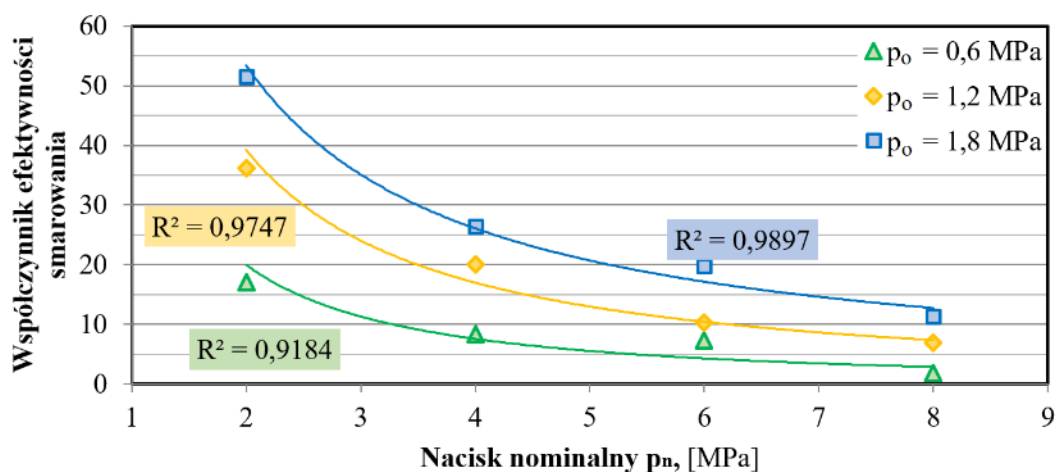


Rys. 5.20. Porównanie efektywności smarowania oleju S100 Plus podczas badań blachy DC03

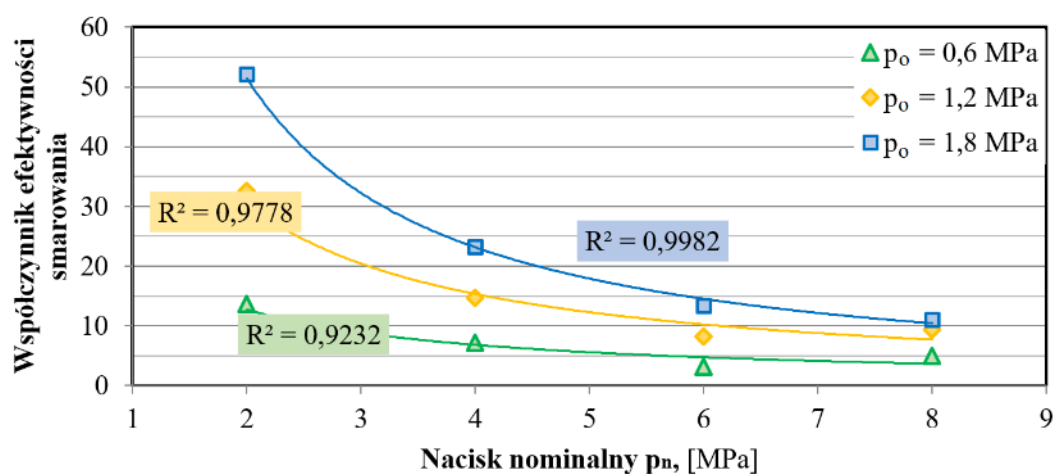


Rys. 5.21. Porównanie efektywności smarowania oleju S300 podczas badań blachy DC03

Analizując efektywność smarowania przy wykorzystaniu pomiaru ze względu na zastosowany gatunek blachy, można zaobserwować, że dla blachy o oznaczeniu DC03 (rys. 5.20 i 5.21) olejem wykazującym większą skuteczność smarowania jest olej S300. Zależność ta jest widoczna przede wszystkim dla ciśnienia smarowania wynoszącego 0,6 oraz 1,2 MPa, dla którego wyznaczony współczynnik efektywności smarowania dla wszystkich zastosowanych nacisków nominalnych, czyli 2, 4, 6 i 8 MPa. Wskazuje ona, że olej S300 charakteryzuje się lepszą efektywnością smarowania w zależności od zastosowanego ciśnienia smarowania. Z kolei zastosowanie ciśnienia smarowania na poziomie 1,8 MPa powoduje, że różnice w wartościach efektywności smarowania dla oleju S100 plus oraz S300 są minimalne i na ich podstawie nie da się jednoznacznie określić większej skuteczności smarowania dla żadnego z zastosowanych olejów. W ten sam sposób postanowiono przeanalizować blachę DC04. W tym celu, na rysunkach przedstawiono wykresy efektywności smarowania dla oleju S100 Plus (rys. 5.22) i S300 (rys. 5.23).

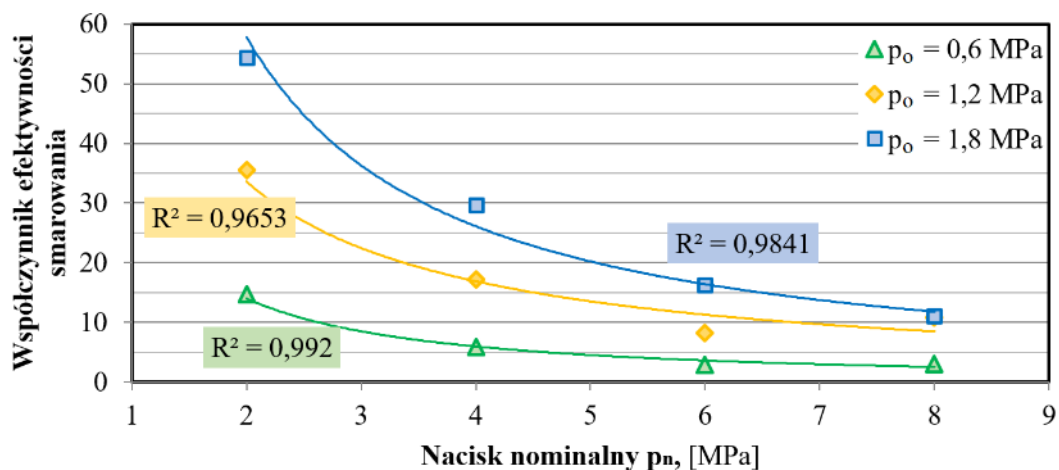


Rys. 5.22. Porównanie efektywności smarowania oleju S100 Plus podczas badań blachy DC04

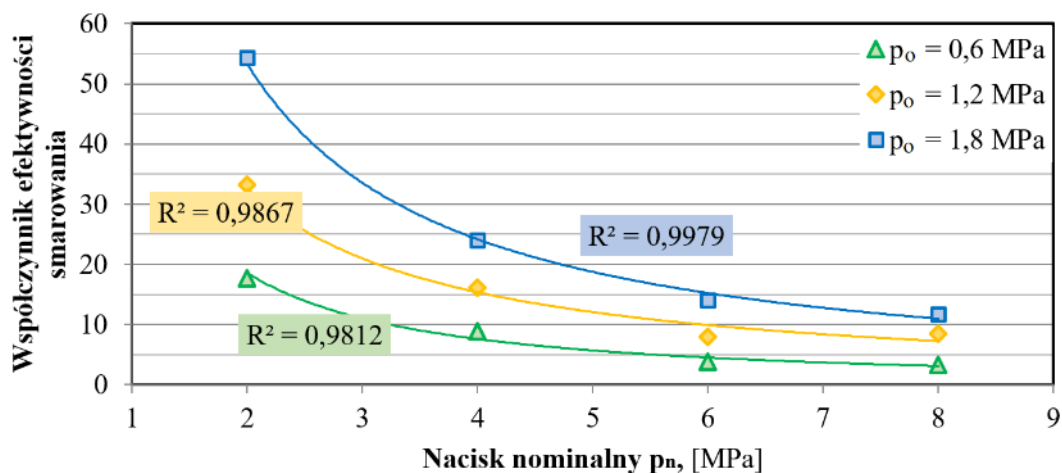


Rys. 5.23. Porównanie efektywności smarowania oleju S300 podczas badań blachy DC04

W przypadku prób przeprowadzonych dla blachy DC04, dla których wartości współczynnika efektywności smarowania zostały przedstawione na rys. 5.22 i 5.23, widoczna jest większa skuteczność smarowania z wymuszonym ciśnieniem oleju przy zastosowaniu oleju S100 plus. Jest to szczególnie widoczne dla prób przeprowadzonych z zastosowaniem ciśnienia 0,6 oraz 1,2 MPa dla nacisku nominalnego 2, 4 i 6 MPa. W zakresie stosowania ciśnienia smarowania o wartości 0,6 i 1,2 MPa, zwiększenie nacisku nominalnego do poziomu 8 MPa powoduje, że skuteczniejszy w smarowaniu okazuje się olej S300. W przypadku ciśnienia smarowania 1,8 MPa również można dostrzec, że olej S100 Plus przy nacisku 4 i 6 MPa wykazuje większą efektywność smarowania w porównaniu z olejem S300, natomiast wartości współczynnika efektywności smarowania dla nacisku 2 i 8 MPa są do siebie zbliżone. Celem prowadzenia dalszej analizy efektywności smarowania poszczególnych olejów, na rysunku 5.24 przedstawiono wykres efektywności smarowania dla blachy DC05 i oleju S100 Plus, a na rysunku 5.25 z zastosowaniem oleju S300.

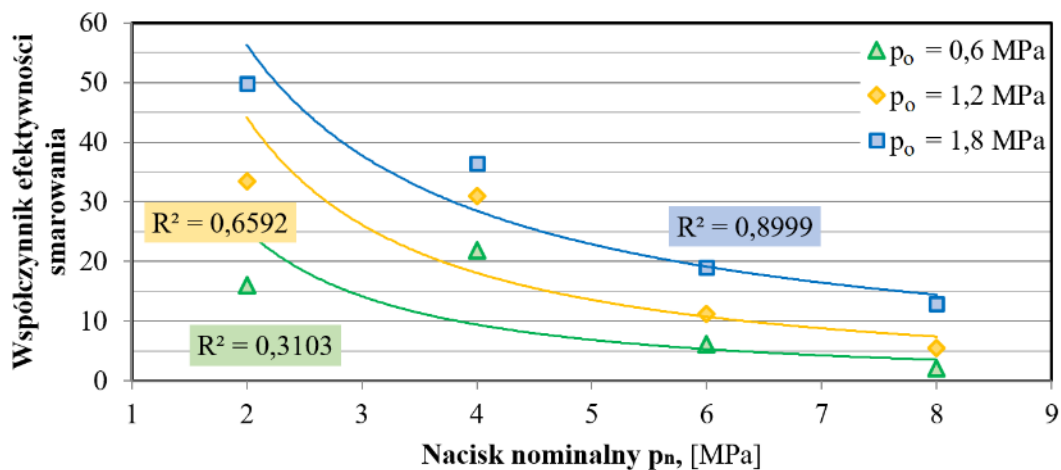


Rys. 5.24. Porównanie efektywności smarowania oleju S100 Plus podczas badań blachy DC05

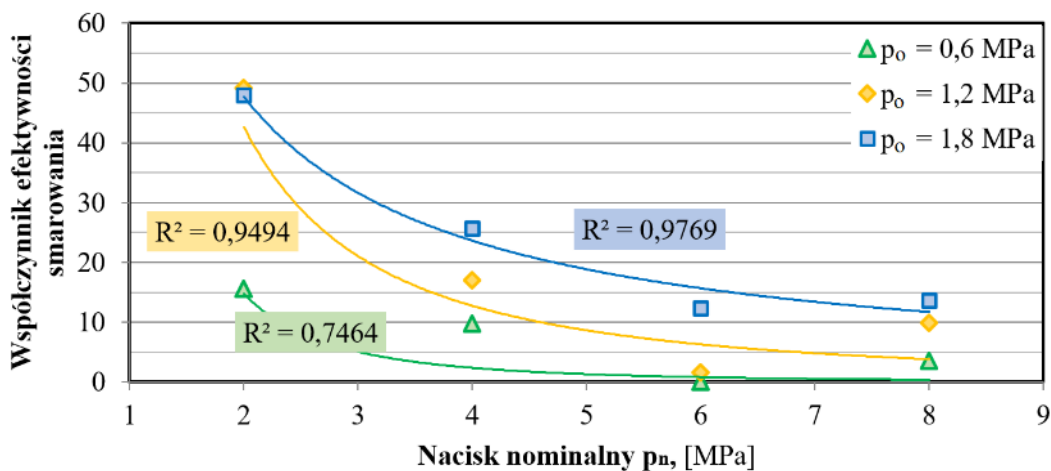


Rys. 5.25. Porównanie efektywności smarowania oleju S300 podczas badań blachy DC05

Analizując wartości współczynnika efektywności smarowania dla prób przeprowadzonych przy zastosowaniu blachy DC05 (rys. 5.24 i 5.25), można zaobserwować, że olej S300 wykazuje lepsze właściwości smarowania dla wszystkich wartości zastosowanych nacisków nominalnych i ciśnienia smarowania równego 0,6 MPa. Zwiększenie ciśnienia smarowania do poziomu 1,2 MPa powoduje, że to olej S100 Plus wykazuje lepszą efektywność smarowania. Podobna tendencja utrzymuje się przy ciśnieniu smarowania 1,8 MPa, pomijając jedynie wartości współczynnika tarcia dla nacisku 2 oraz 8 MPa, dla których różnice w zależności od zastosowanego oleju są minimalne. Dokonując porównania efektywności smarowania, zależnie od zastosowanego środka smarnego dla blachy DC06, sporządzono wykresy dla oleju S100 Plus (rys. 5.26) oraz S300 (rys. 5.27).



Rys. 5.26. Porównanie efektywności smarowania oleju S100 Plus podczas badań blachy DC06



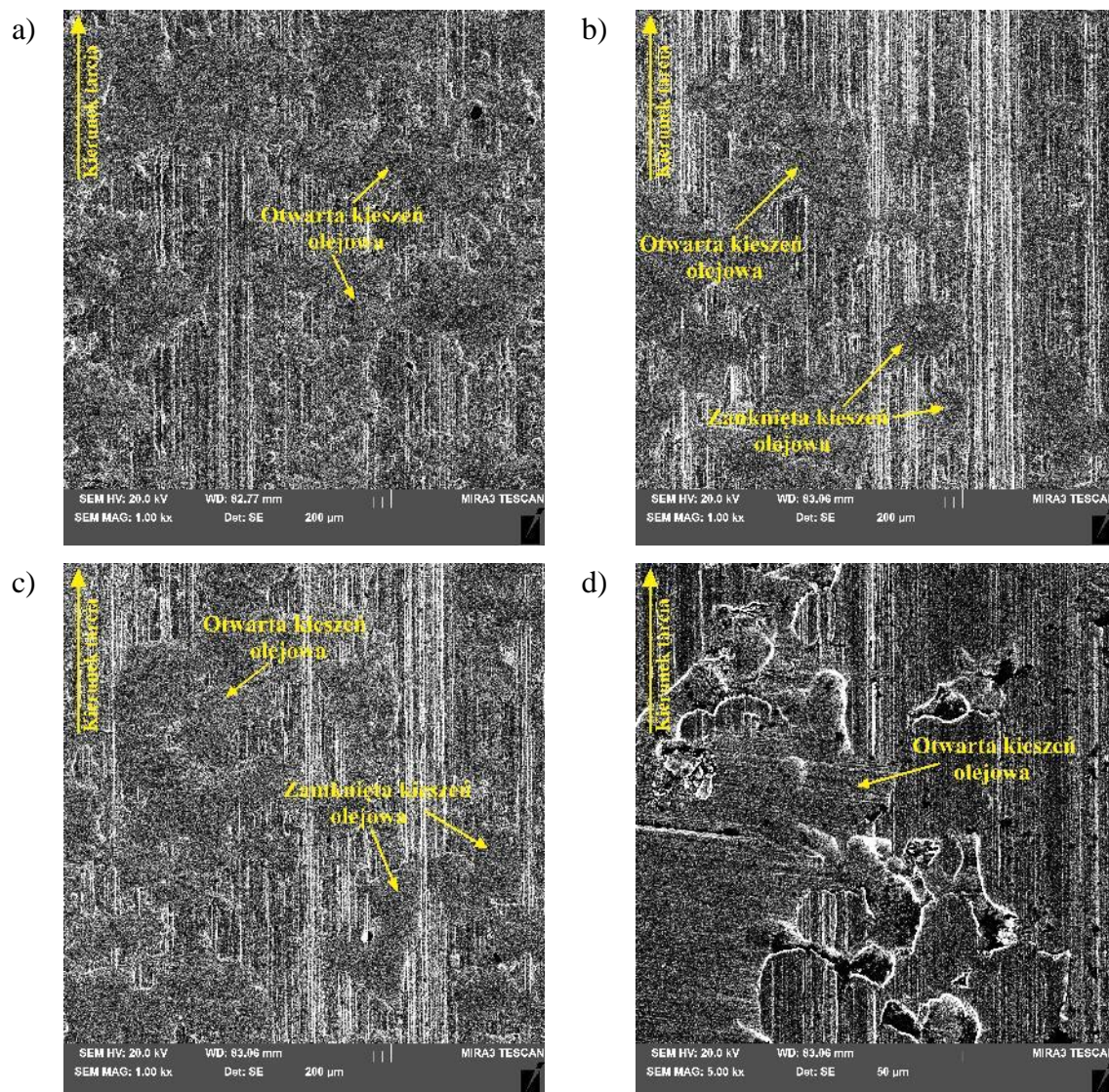
Rys. 5.27. Porównanie efektywności smarowania oleju S300 podczas badań blachy DC06

Ostatnim gatunkiem blachy poddawanych badaniom jest blacha DC06, dla której wyniki porównujące efektywności smarowania w zależności od zastosowanych olejów, zostały przedstawione na rysunkach 5.26 i 5.27, na których widoczne jest, że w znaczącym stopniu, większą efektywność smarowania wykazuje olej S100 plus. Wyjątkiem są próby z zastosowaniem nacisku nominalnego na poziomie 8 MPa, dla którego olej S300 wykazywał lepszą efektywność smarowania.

Poddając analizie wszystkie wykresy efektywności smarowania dla badanych olejów przedstawione na rysunkach 5.20-5.27, można zaobserwować trzy charakterystyczne zależności, z których wynika, że na efektywność smarowania w procesie tarcia między innymi wpływa gatunek blachy. Drugą zależnością, jaką można dostrzec po przeanalizowaniu rysunków 5.20-5.27, jest brak istotnego wpływu zastosowanego oleju na efektywność smarowania dla małych nacisków nominalnych (2 MPa), co jest szczególnie widoczne dla ciśnienia smarowania 1,2 i 1,8 MPa, dla których wartości współczynnika efektywności smarowania były na bardzo zbliżonym poziomie. Z kolei wyznaczone wartości

współczynnika efektywności smarowania dla nacisku nominalnego wynoszącego 8 MPa, jednoznacznie wykazały, że olej o większej lepkości skutkuje lepszą efektywnością smarowania.

Ważnym parametrem wpływającym na jakość smarowania jest występowanie kieszeni olejowych (rys. 5.28), które pełnią rolę zbiorników oleju tworzących poduszkę ciśnieniową oleju, zmniejszając w ten sposób tarcie. Największy wpływ na zmniejszenie współczynnika tarcia mają zamknięte kieszenie olejowe (rys. 5.28.b i 5.28.c), w których występujący olej jest poddawany działaniu ciśnienia hydrodynamicznego.



Rys. 5.28. Mikrofotografie SEM powierzchni blachy po próbach tarcia przeprowadzonych dla blachy gatunku DC06 w następujących warunkach: a) lepkość kinematyczna oleju – 360 mm²/s; nacisk nominalny – 2 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa, b, c, d) lepkość kinematyczna oleju – 1135 mm²/s; nacisk nominalny – 8 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa

5.1.3. Analiza wariancji wpływu parametrów procesu kształtowania blach na wartość współczynnika tarcia

Celem dokładniejszego sprawdzenia wpływu parametrów biorących udział w procesie kształtowania blach na wartość współczynnika tarcia, przeprowadzono analizę wariancji (ang. Analysis of variance – ANOVA) przy zastosowaniu programu Statistica 13.3. ANOVA, czyli analiza statystyczna, została przeprowadzona dla zmiennych parametrów procesu, takich jak: gatunek blachy (DC03, DC04, DC05, DC05), lepkość kinematyczna oleju (360 mm²/s, 1135 mm²/s), nacisk nominalny (2 MPa, 4 MPa, 6 MPa i 8 MPa), ciśnienie smarowania (0 MPa, 0,6 MPa, 1,2 MPa i 1,8 MPa), uwzględniając również wyniki pomiarów dla testów przeprowadzonych na sucho. Pozwoliło to zaobserwować wpływ i określić poziom istotności poszczególnych czynników w modelu regresji.

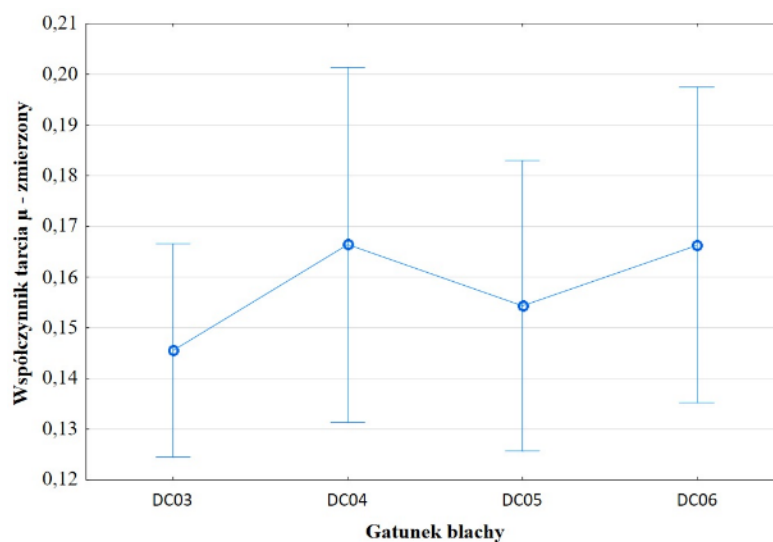
Analiza ANOVA została przeprowadzona z zastosowaniem analizy efektów głównych pozwalających określić wpływ czynnika na zmienną zależną. W wyniku przeprowadzenia analizy wariancji otrzymano wyniki istotności poszczególnych parametrów procesu kształtowania, które zostały przedstawione w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Wyniki istotności parametrów procesu tarcia na wartość współczynnika tarcia

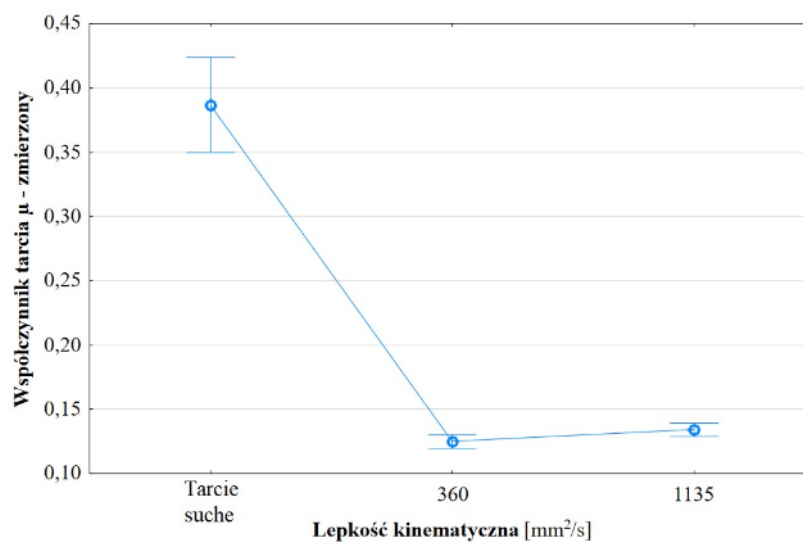
Parametr	F	p
Gatunek blachy	6,26366	0,000523
Lepkość kinematyczna oleju	4,46061	0,036569
Nacisk nominalny	4,73383	0,003605
Ciśnienie smarowania	17,15633	0,000000

Istotność wpływu wybranych czynników na wartość współczynnika tarcia jest określona za pomocą zmiennej p, której wartość istotności jest określona na poziomie 0,05. Patrząc na wyniki analizy przedstawione w tabeli 5.1, można stwierdzić, że wszystkie analizowane czynniki mają istotny wpływ, jednak przedstawione wartości testu F pozwalają ocenić jak duży wpływ na wartość współczynnika tarcia ma wartość poszczególnych parametrów. Na podstawie wskazanego parametru F określono, że parametrem, który w największym stopniu wpływa na rzeczywiste wartości współczynnika tarcia, jest ciśnienie smarowania (F = 17,15633). Drugim parametrem istotnie wpływającym jednak w mniejszym stopniu jest gatunek blachy (F = 6,26366), z kolei lepkość kinematyczna i nacisk nominalny mają podobny wpływ na zmierzone wartości współczynnika tarcia (lepkość kinematyczna F = 4,46061, nacisk nominalny F = 4,73383)

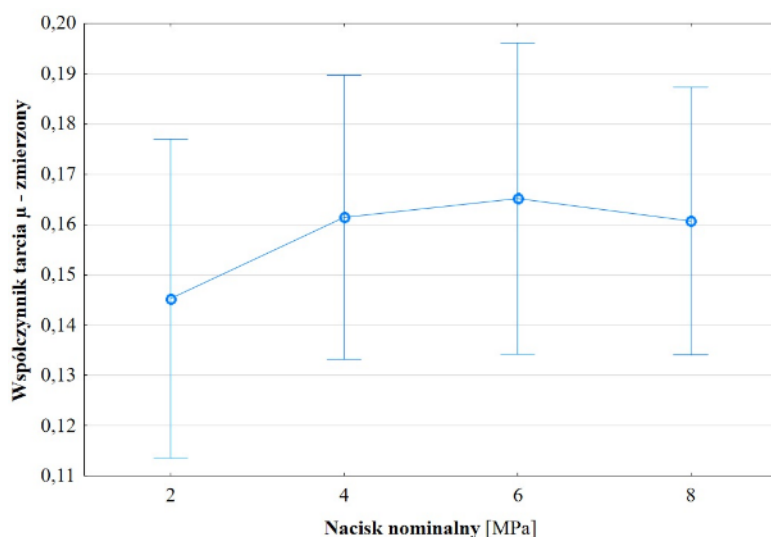
W celu lepszego zobrazowania wpływu poszczególnych parametrów na wielkość współczynnika tarcia, wyniki analizy zostały przedstawione za pomocą wykresów zależności gatunku blachy (rys. 5.29), lepkości kinematycznej oleju (rys. 5.30), nacisku nominalnego (rys. 5.31) i ciśnienia smarowania (rys. 5.32) na wartość współczynnika tarcia. Dodatkowo na wykresach za pomocą pionowych linii w miejscach odpowiadających zastosowanym wartościom parametrom w badaniach, przedstawiono poziom ufności wynoszący 95%.



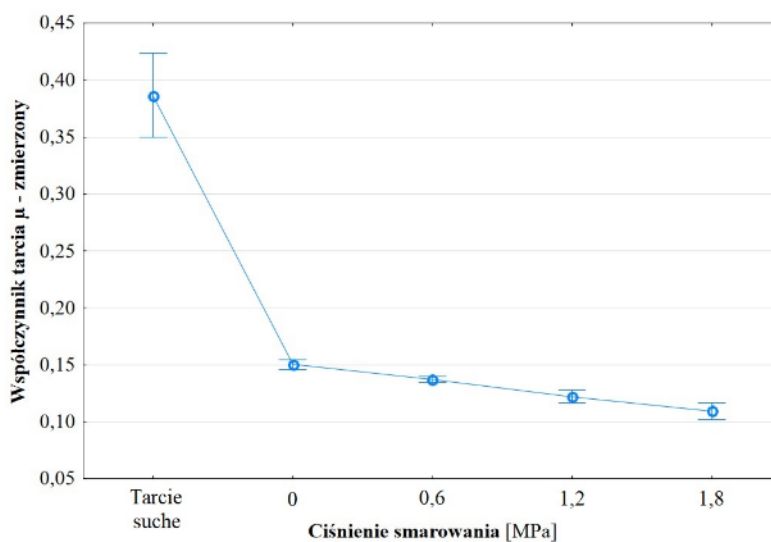
Rys. 5.29. Wpływ gatunku blachy na wartość współczynnika tarcia



Rys. 5.30. Wpływ lepkości kinematycznej na wartość współczynnika tarcia



Rys. 5.31. Wpływ nacisku na wartość współczynnika tarcia

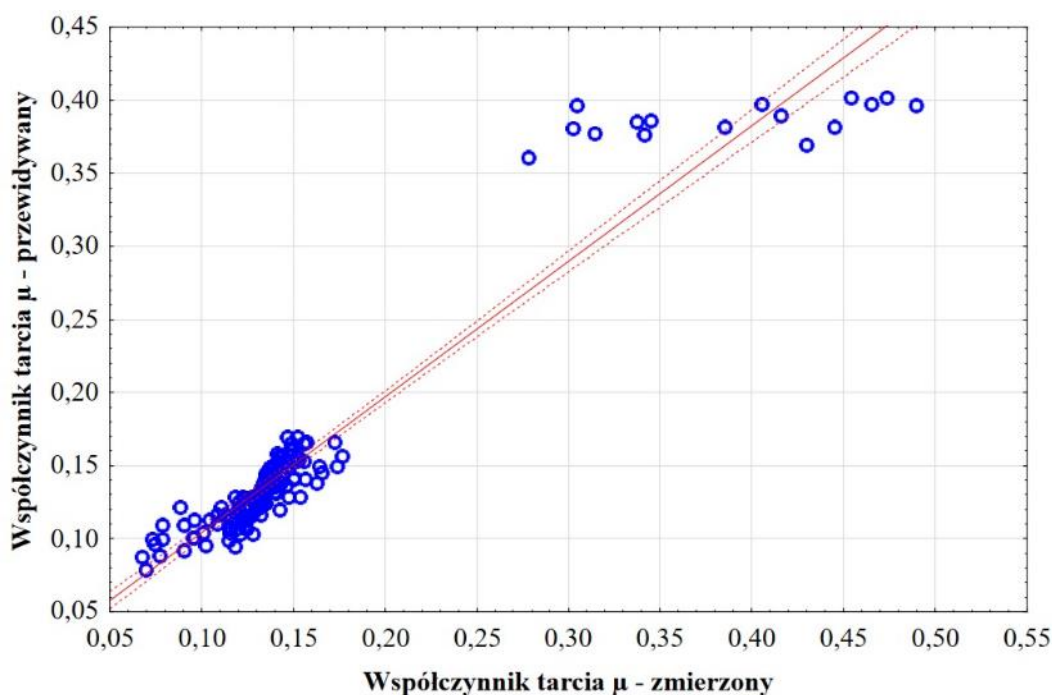


Rys. 5.32. Wpływ ciśnienia smarowania na wartość współczynnika tarcia

Wykresy przedstawione na rysunkach 5.29-5.32 dowodzą, że wszystkie parametry procesu kształtowania blach mają istotny wpływ na wartość współczynnika tarcia. Jednakowoż wielkość rozrzutu sugeruje, że parametry procesu tarcia, takie jak: gatunek blachy (rys. 5.29) oraz nacisk nominalny (rys. 5.31), pomimo zmiany wartości wciąż znajdują się na zbliżonym poziomie. Zjawisko to jest również widoczne w odniesieniu do parametru ciśnienia smarowania (rys. 5.32) oraz lepkości kinematycznej (rys. 5.30), lecz w znacznie mniejszym stopniu.

Dodatkowo w wyniku przeprowadzonej analizy ANOVA możliwe było porównanie wartości współczynnika tarcia zmierzonego i przewidywanego. W wyniku tej analizy otrzymano wykres przedstawiony na rysunku 5.33, na którym jest widoczny podział na dwie grupy wartości. Pierwsza z grup obrazuje zbiór wartości współczynnika tarcia na poziomie od 0,07 do około 0,18, jest to zbiór, którego wartości współczynnika tarcia zostały zmierzone

i przewidziane dla tarcia z zastosowaniem smarowania olejem. Z kolei druga grupa stanowi pomiary dla warunków tarcia bez zastosowania smarowania. Porównując rozbieżność pomiędzy wartościami zmierzonymi i przewidywanymi przedstawione na rysunku 5.33, można zaobserwować, że wyniki uzyskane dla prób bez zastosowania oleju charakteryzują się znacznie większym błędem, co jest potwierdzone tym, że w przedziale ufności 95% ograniczonym przerywanymi czerwonymi liniami zawiera się tylko 3 punkty, a pozostałe z nich są daleko oddalone od wartości przewidywanej.



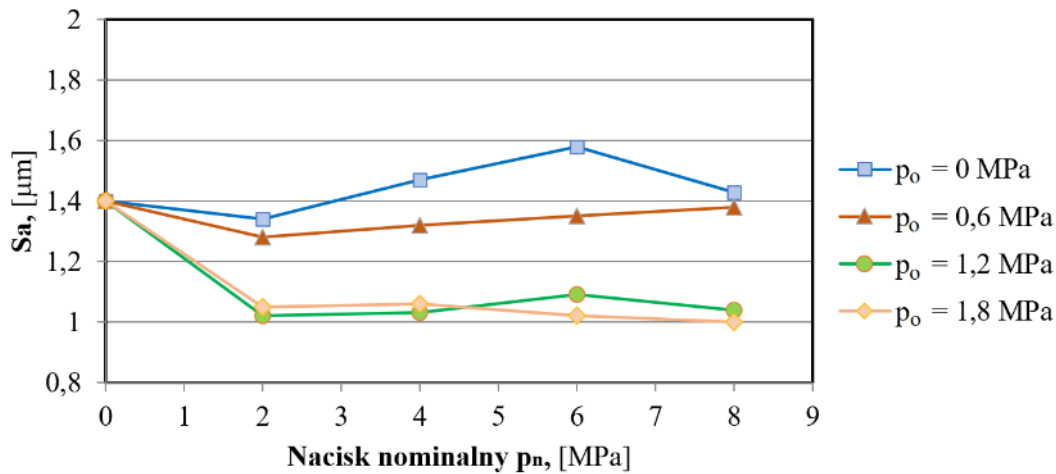
Rys. 5.33. Wykres zależności wartości współczynnika tarcia zmierzonego i przewidywanego

5.2. Topografia powierzchni

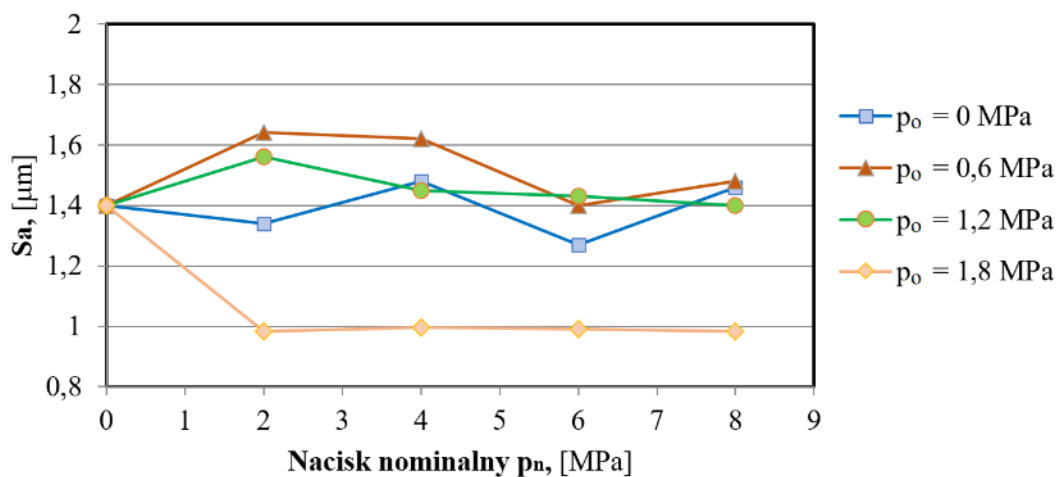
5.2.1. Wpływ nacisku na zmianę podstawowych parametrów chropowatości blach

Analizę wpływu nacisku nominalnego na zmianę podstawowych parametrów chropowatości przeprowadzono skupiając się na trzech parametrach, takich jak: S_a , S_{sk} i S_{ku} [121], gdyż są to parametry najczęściej stosowane do opisu chropowatości powierzchni blach w praktyce przemysłowej [34]. W przypadku tarcia z zastosowaniem smarowania najbardziej odpowiednie do opisu tarcia, występującego podczas konwencjonalnego formowania blach, są parametry S_{sk} i S_{ku} , gdyż wykazano, że powierzchnie o bardziej ujemnej wartości parametru skośności i wyższych wartościach kurtozy wykazują mniejsze wartości współczynnika tarcia i w związku z tym w mniejszym stopniu zmieniają się podczas procesu kształtowania metalu [122].

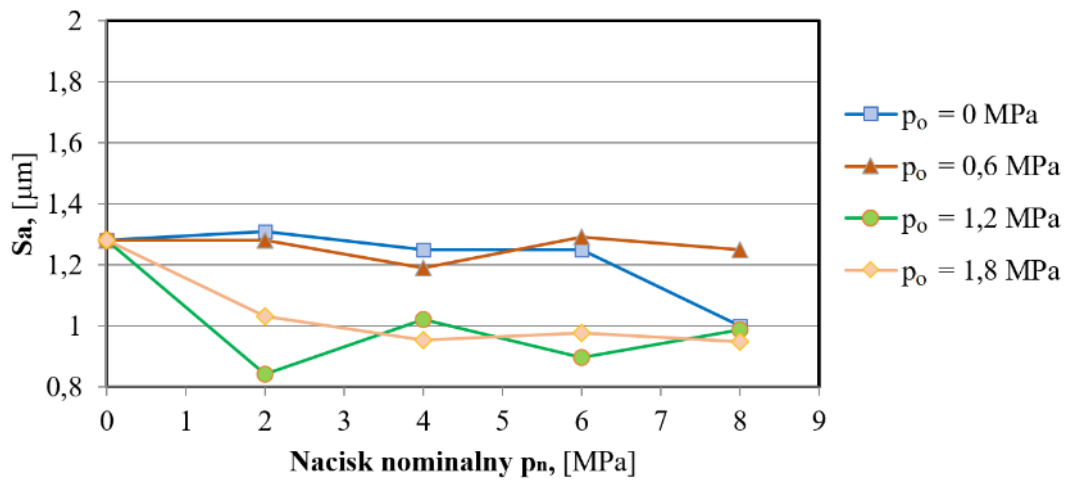
Analizę rozpoczęto od parametru S_a , którego zmianę opisano na wykresach przedstawionych na rysunkach 5.34-5.41, w których uwzględniono rodzaj zastosowanego gatunku blachy oraz środka smarnego. Wobec czego wykresy z zastosowaniem oleju S100 Plus przeanalizowano zależnie od blachy gatunku DC03 (rys. 5.34), DC04 (rys. 5.36), DC05 (rys. 5.38) i DC06 (rys. 5.40), tak samo przedstawiono wykresy parametru S_a dla oleju S300 i zastosowanego gatunku blachy DC03 (rys. 5.35), DC04 (rys. 5.37), DC05 (rys. 5.39) i DC06 (rys. 5.41).



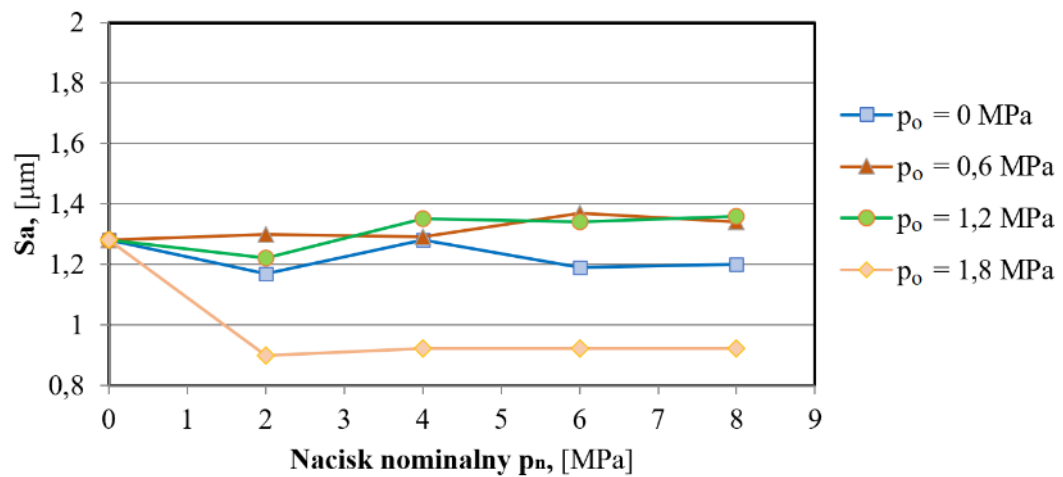
Rys. 5.34. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru S_a w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC03



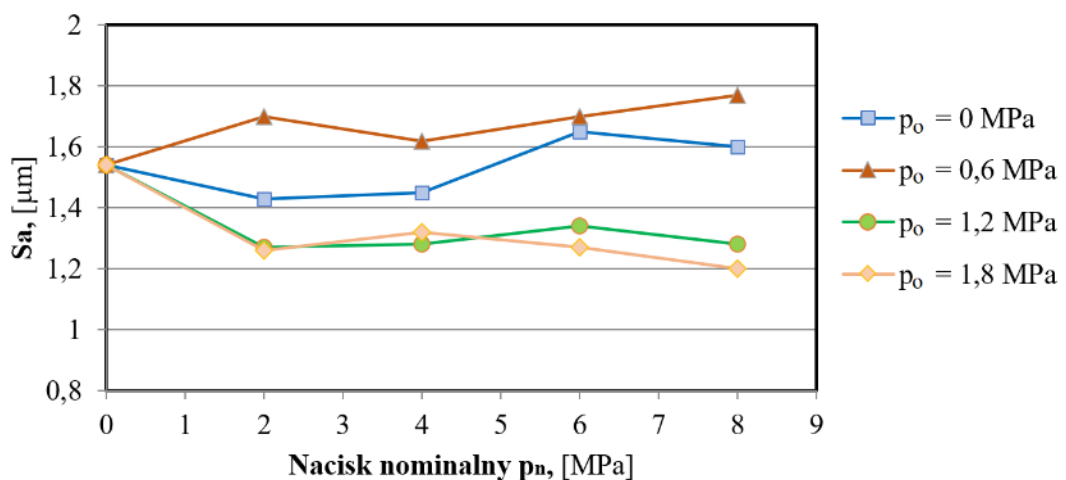
Rys. 5.35. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru S_a w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC03



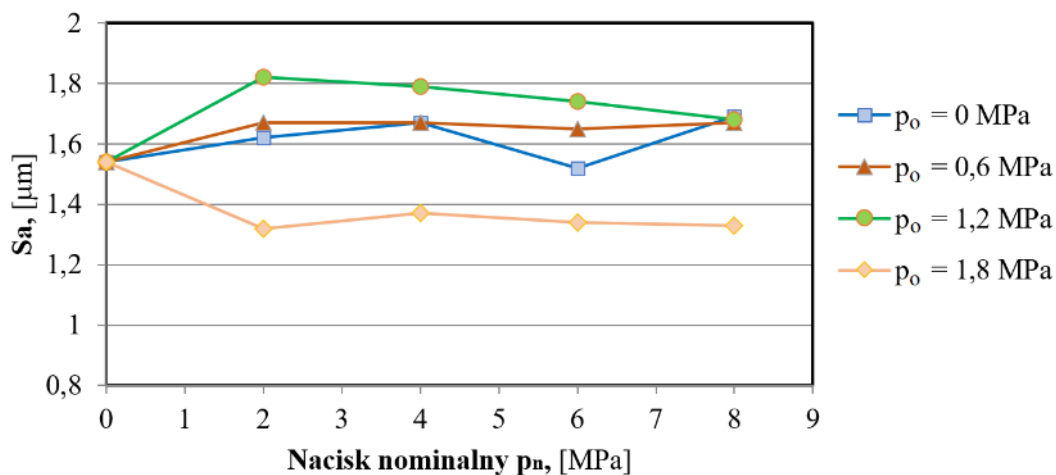
Rys. 5.36. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC04



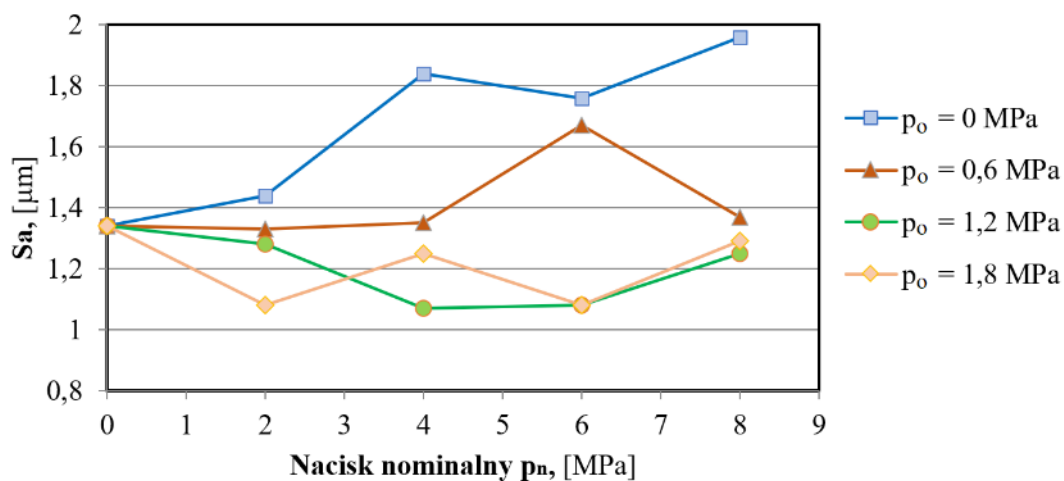
Rys. 5.37. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC04



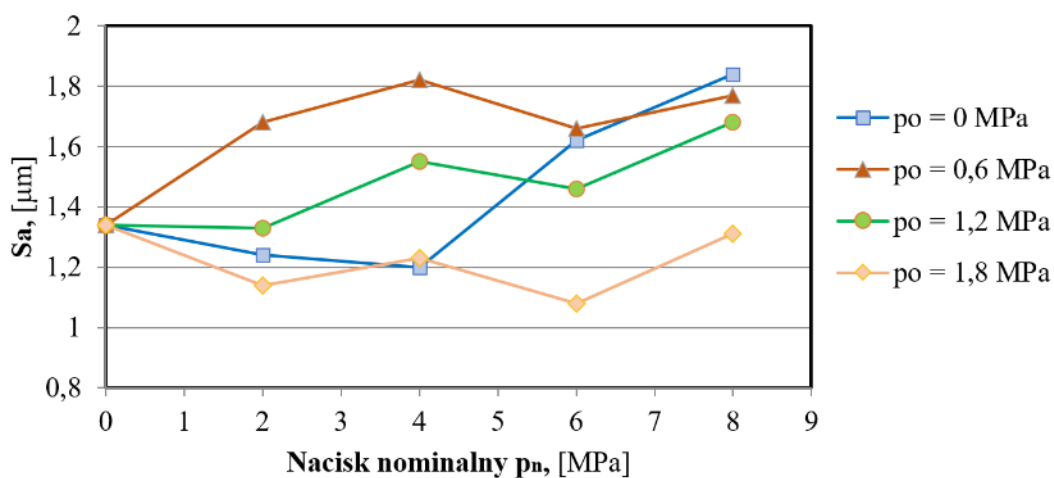
Rys. 5.38. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC05



Rys. 5.39. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC05



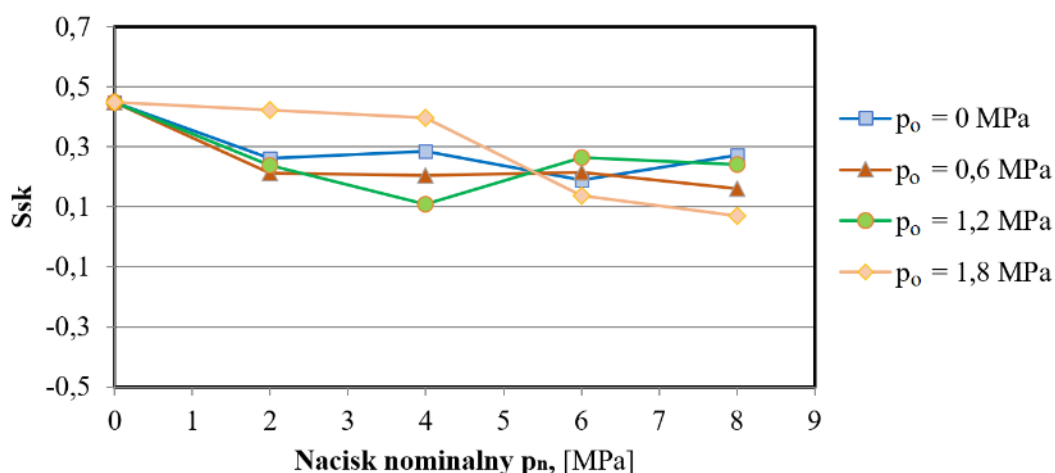
Rys. 5.40. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC06



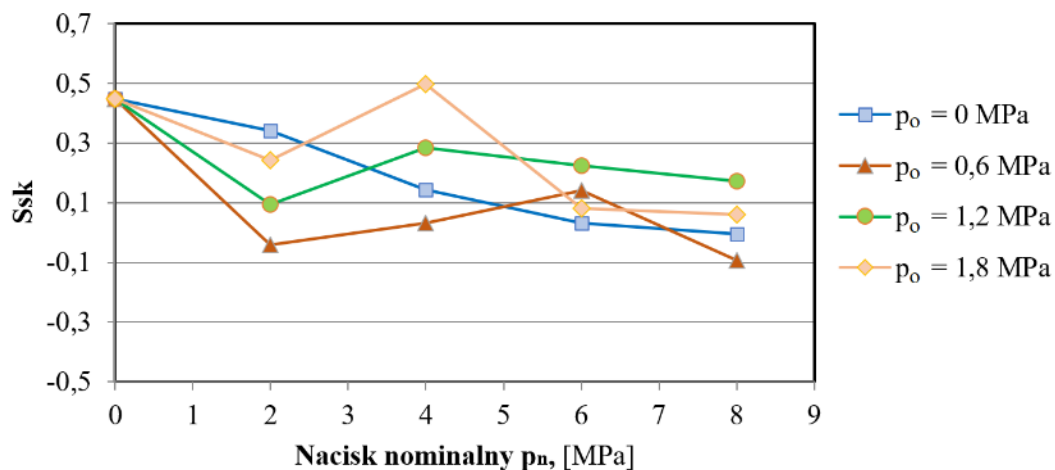
Rys. 5.41. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC06

Zmierzone wartości średniego arytmetycznego odchylenia wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia przedstawione na rysunkach 5.34-5.41 ilustrują istotne zależności chropowatości powierzchni wyrażone parametrem S_a zależnie od zastosowanego nacisku nominalnego. Porównując wykresy, można dostrzec, że bez względu na zastosowany materiał blachy, dla nacisku nominalnego równego 2 MPa, widoczne są różnice w wartości parametru S_a , w stosunku do wartości zmierzonej na powierzchni materiału będącego w stanie dostawy. Z kolei patrząc na wykresy (rys. 5.34-5.41), pod kątem zastosowanego oleju smarującego, widoczny jest podział w zależności od zastosowanego ciśnienia smarującego, gdzie ciśnienie smarowania równe 1,2 i 1,8 MPa dla oleju S100 Plus oraz ciśnienie smarowania 1,8 MPa dla oleju S300 powoduje, że wartość S_a w zakresie od 2 do 8 MPa nacisku nominalnego nie zmienia się. Inaczej jest w przypadku analizowanych wartości S_a dla pozostałych wartości ciśnienia smarowania, dla których zmiana nacisku powoduje zwiększenie wartości parametru S_a lub utrzymanie jego wartości na poziomie zbliżonym do wartości materiału będącego w stanie dostawy.

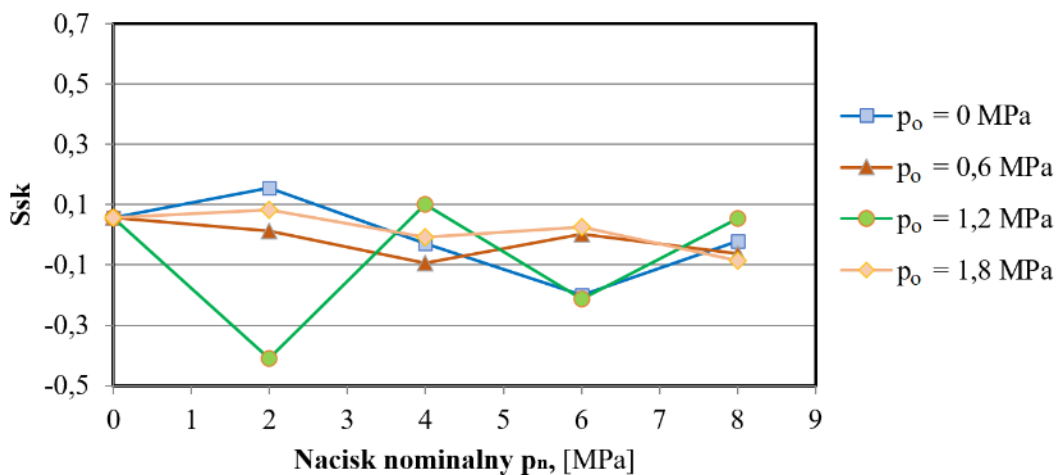
W ten sam sposób jak przedstawiono wyniki wartości parametru S_a , przeanalizowano wpływ warunków tarcia na skośność S_{sk} , gdzie wykresy z zastosowaniem oleju S100 Plus przedstawiono zależnie od gatunku blachy: DC03 (rys. 5.42), DC04 (rys. 5.44), DC05 (rys. 5.46) i DC06 (rys. 5.48). Tak samo przedstawiono wykresy parametru S_{sk} dla oleju S300 z zastosowaniem blachy gatunku DC03 (rys. 5.43), DC04 (rys. 5.45), DC05 (rys. 5.47) i DC06 (rys. 5.49).



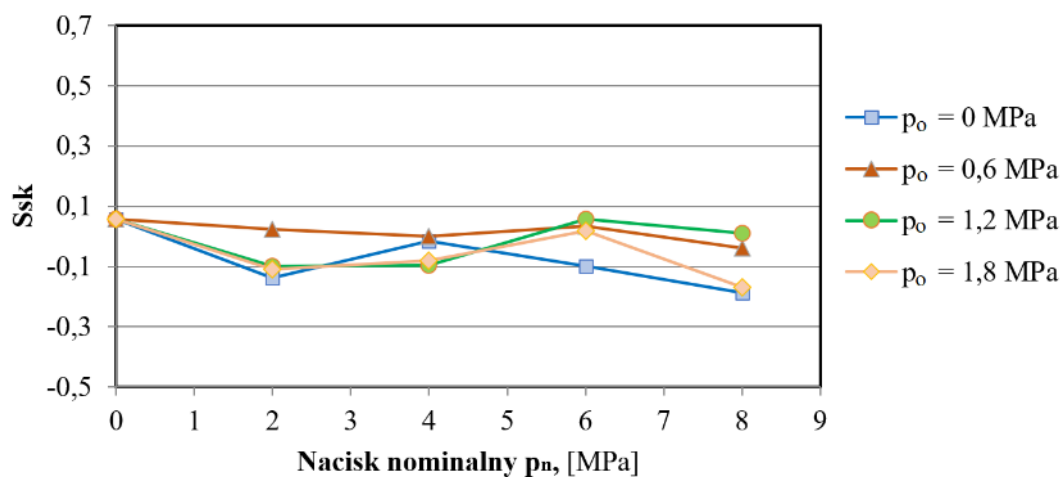
Rys. 5.42. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności S_{sk} w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC03



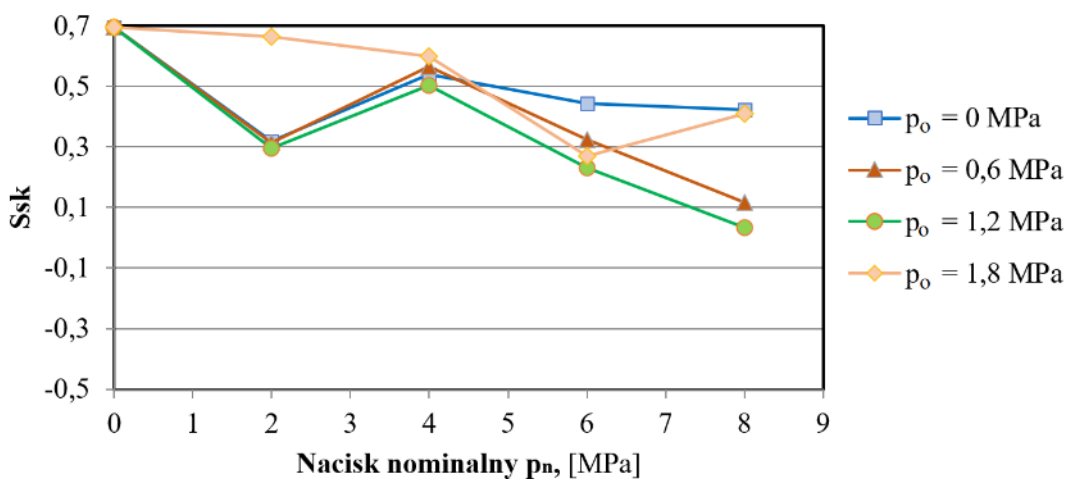
Rys. 5.43. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC03



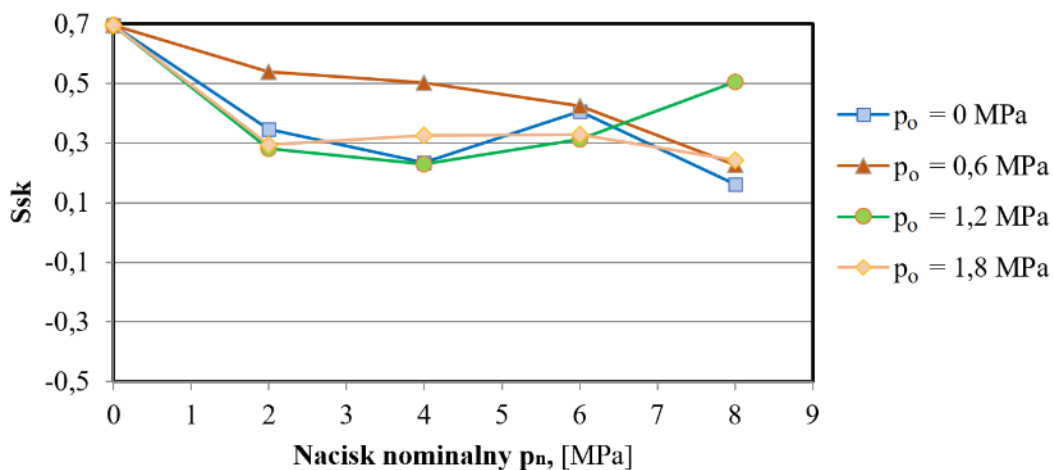
Rys. 5.44. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC04



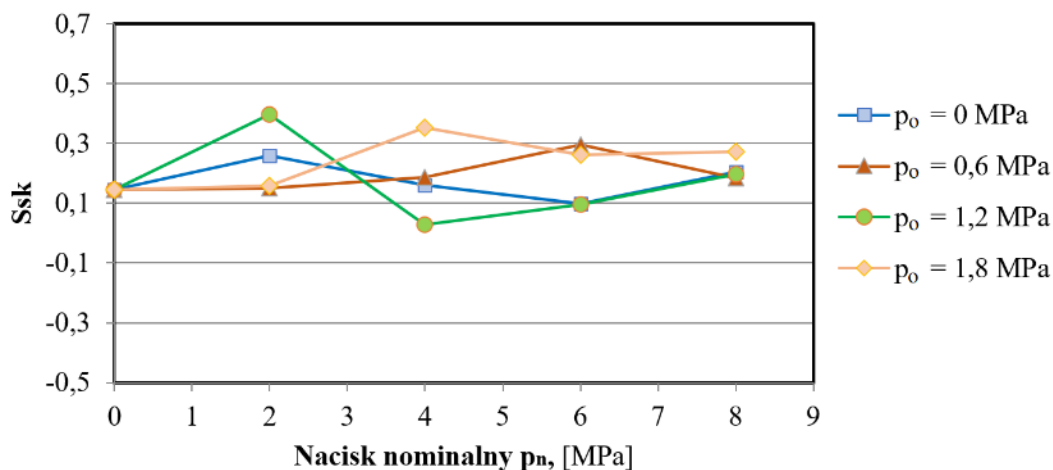
Rys. 5.45. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC04



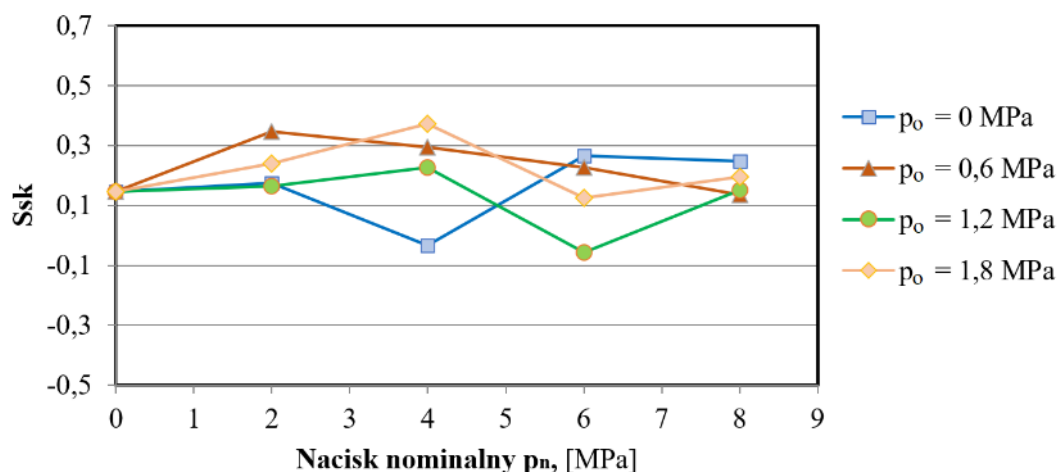
Rys. 5.46. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności S_{sk} w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC05



Rys. 5.47. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności S_{sk} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC05

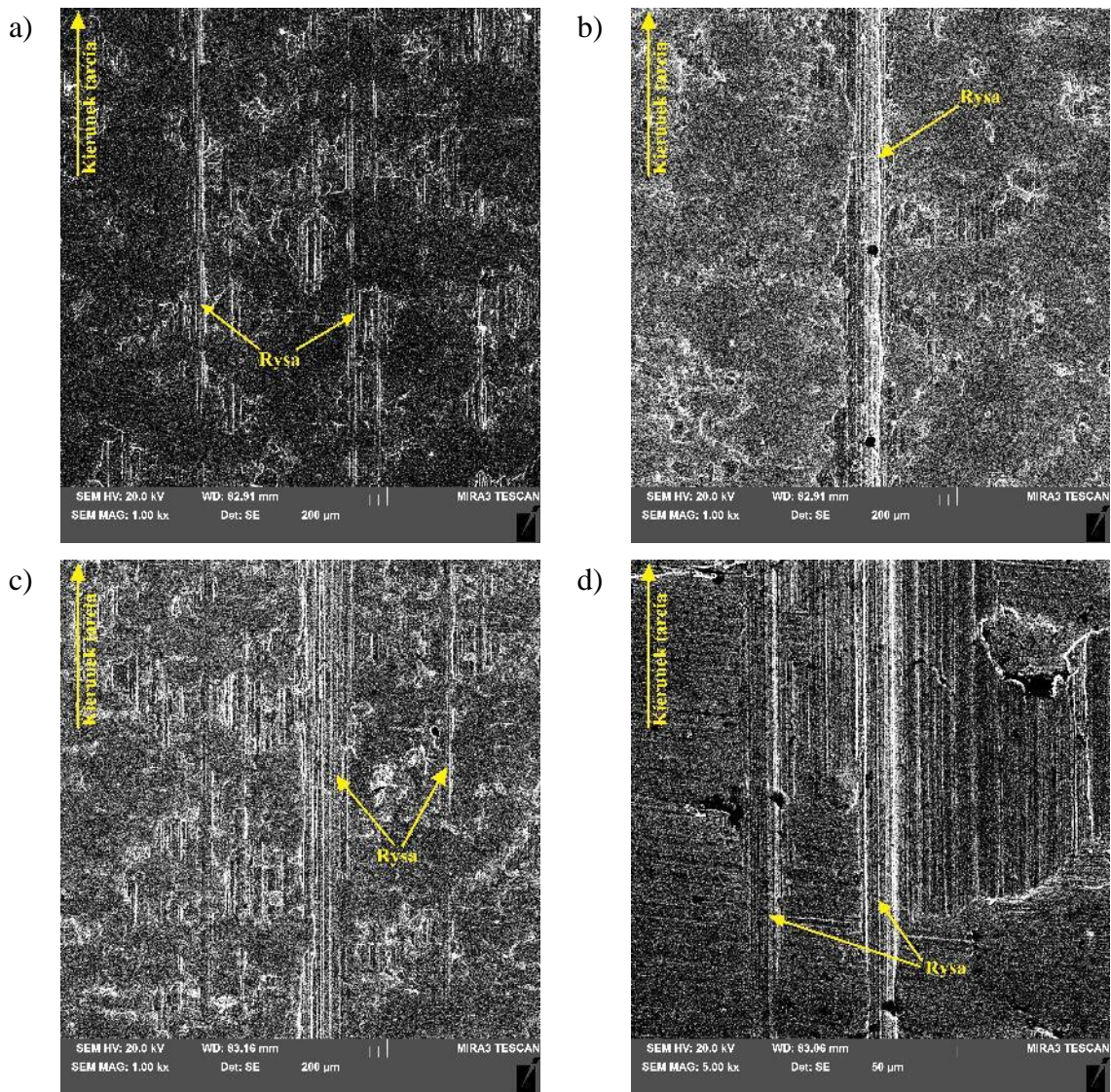


Rys. 5.48. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności S_{sk} w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC06



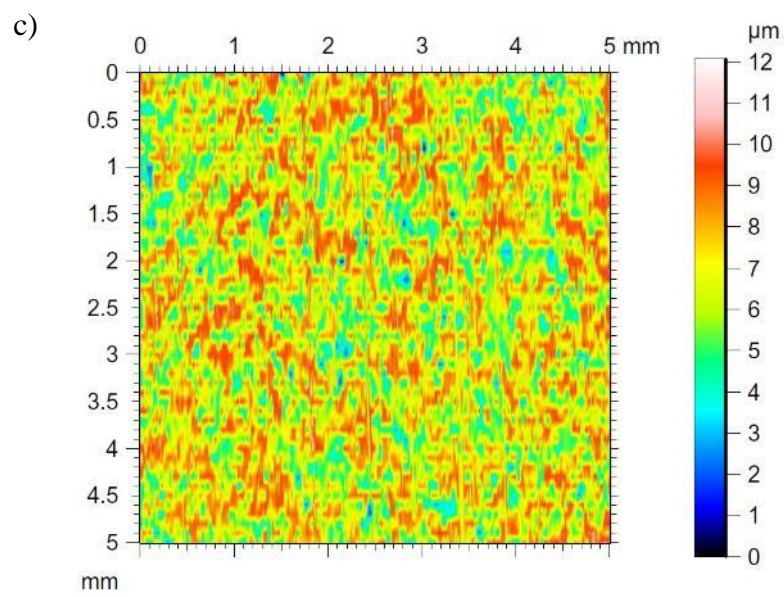
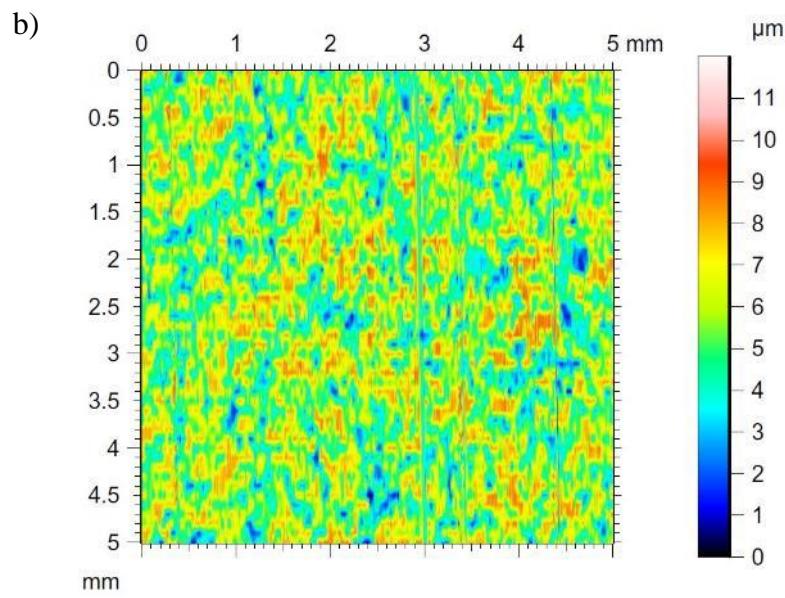
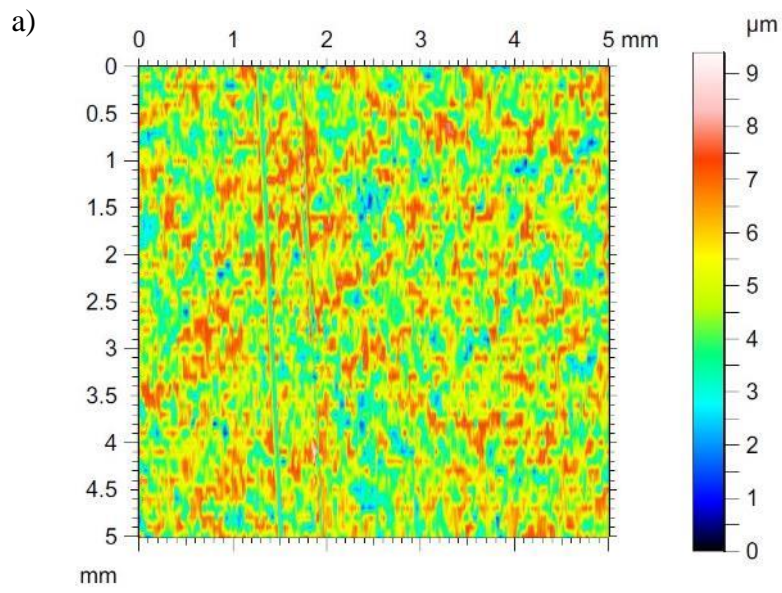
Rys. 5.49. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności S_{sk} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC06

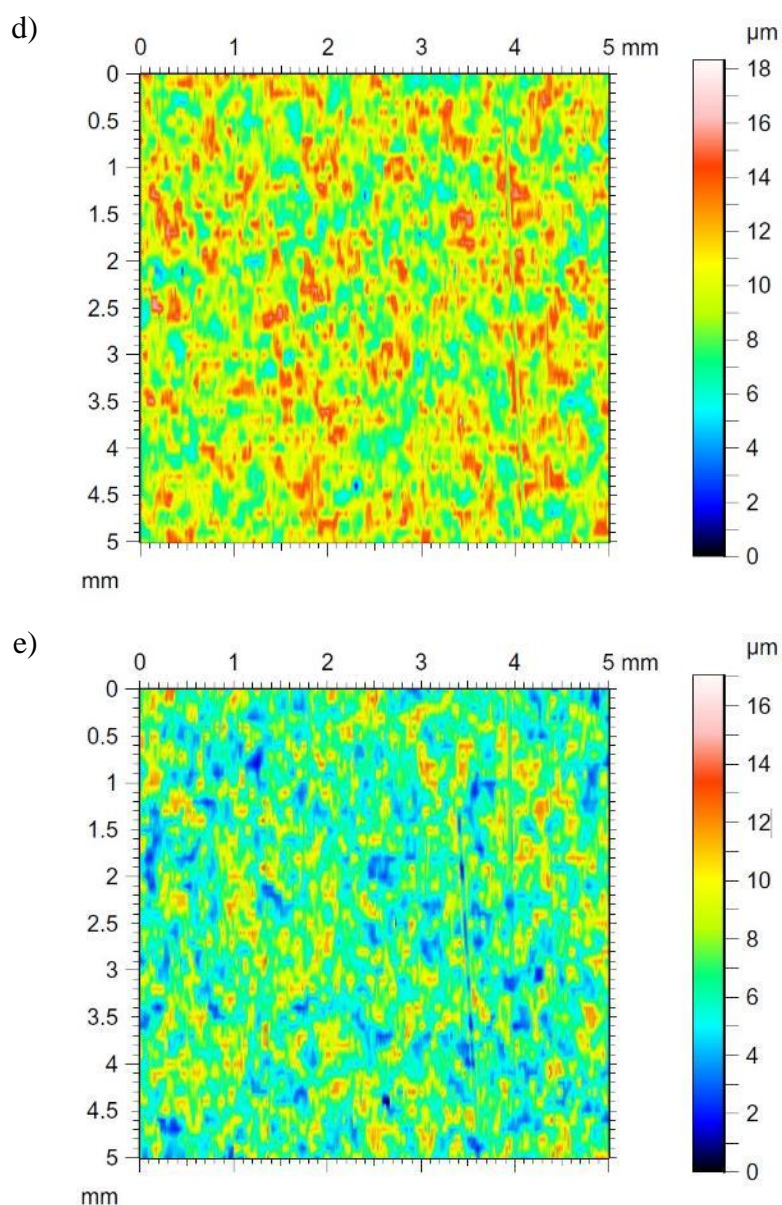
Dane przedstawione na rysunkach 5.42-5.49, które obrazują wpływ nacisku nominalnego, materiału blachy oraz rodzaju i ciśnienia oleju na wartość skośności, pozwalają zaobserwować wyraźną zależność zmieniającej się wartości skośności wskutek zmiany nacisku w zależności od zastosowanego oleju oraz ciśnienia smarowania. Parametr, który identyfikuje charakter zmiany, to gatunek blachy. W przypadku blachy DC03 (rys. 5.42 i rys. 5.43) oraz DC05 (rys. 5.46 i rys. 5.47) widoczna jest tendencja zmniejszania się parametru S_{sk} wraz ze wzrostem wartości nacisku nominalnego. Z kolei blacha DC04 (rys. 5.44 i rys. 5.45) oraz DC06 (rys. 5.48 i rys. 5.49) nie wykazują wyraźnej tendencji zmieniającej się wartości S_{sk} zależnie od zastosowanego nacisku. Zmierzone po teście wartości skośności S_{sk} na poziomie 0 wykazują, że badana powierzchnia charakteryzuje się dużą nośnością wynikającą z braku wysokich wierzchołków, natomiast lokalny wzrost wartości skośności przy dużych wartościach ciśnienia smarowania i nacisku nominalnego oznacza, że procesowi tarcia towarzyszy mechanizm brzdowania, powodujący powstawanie na powierzchni blachy rys (rys. 5.50).



Rys. 5.50. Mikrofotografie SEM powierzchni blachy po próbach tarcia przeprowadzonych dla blachy gatunku DC06 w następujących warunkach: a) tarcie bez smarowania; nacisk nominalny – 4 MPa, b) lepkość kinematyczna oleju – 360 mm²/s; nacisk nominalny – 4 MPa; ciśnienie smarowania 1,8 MPa, c) lepkość kinematyczna oleju – 1135 mm²/s; nacisk nominalny – 2 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa, d) lepkość kinematyczna oleju – 1135 mm²/s; nacisk nominalny – 8 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa

Występowanie zjawiska brzdowania potwierdzają również profile topografii powierzchni przedstawione na rysunku 5.51, na którym można dostrzec rysy. Występujące rysy na powierzchni badanych blach istotnie wpływają na wartości parametru skośności S_{sk} , gdyż parametr ten jest silnie wrażliwy na występujące doliny i szczyty, zależnie od których parametr S_{sk} przyjmuje kolejno wartości większe od 0 dla powierzchni przejawiających występowanie pików oraz wartości mniejsze od 0 dla powierzchni, na których występują doliny.

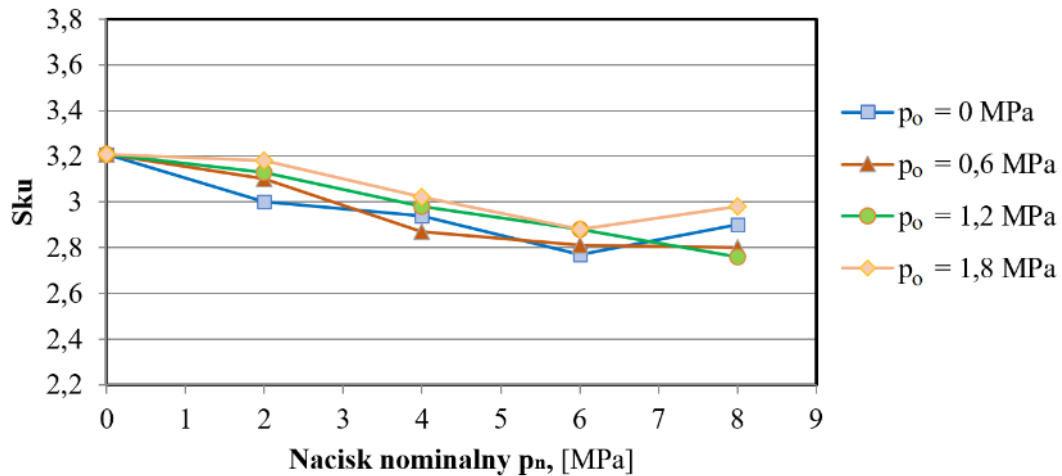




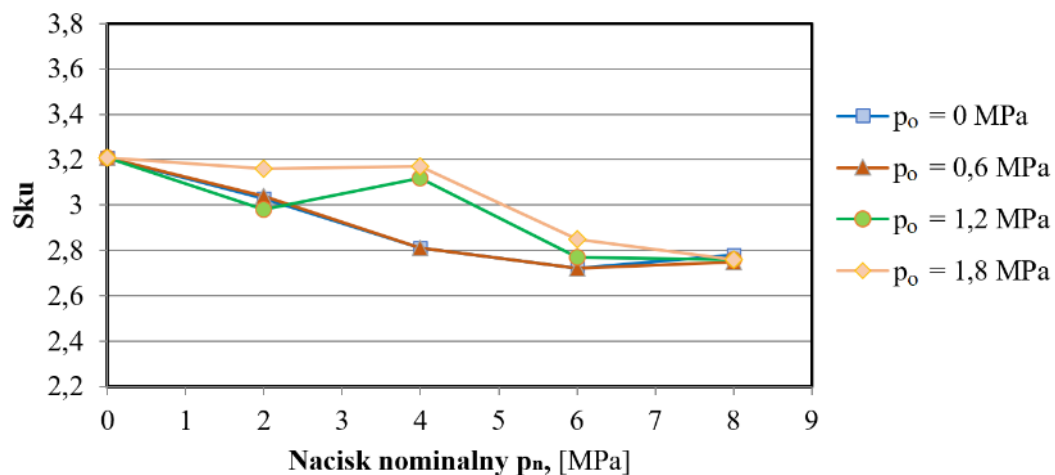
Rys. 5.51. Topografia powierzchni blach po teście z zastosowaniem zmiennych parametrów procesu wytłaczania: a) gatunek blachy – DC04; lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny 8 MPa; ciśnienie smarowania 0 MPa, b) gatunek blachy – DC04; lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny 8 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa, c) gatunek blachy – DC04; lepkość kinematyczna oleju – $1135 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny 8 MPa; ciśnienie smarowania 0 MPa, d) gatunek blachy – DC05; lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny 2 MPa; ciśnienie smarowania 0,6 MPa, e) gatunek blachy – DC05; lepkość kinematyczna oleju – $360 \text{ mm}^2/\text{s}$; nacisk nominalny 8 MPa; ciśnienie smarowania 0 MPa

Ostatnim analizowanym parametrem chropowatości była kurtoza, której zmianę zależnie od zastosowanych parametrów wejściowych przedstawiono z zachowaniem podziału ze względu na materiał blachy i rodzaj oleju. Tym samym wykresy

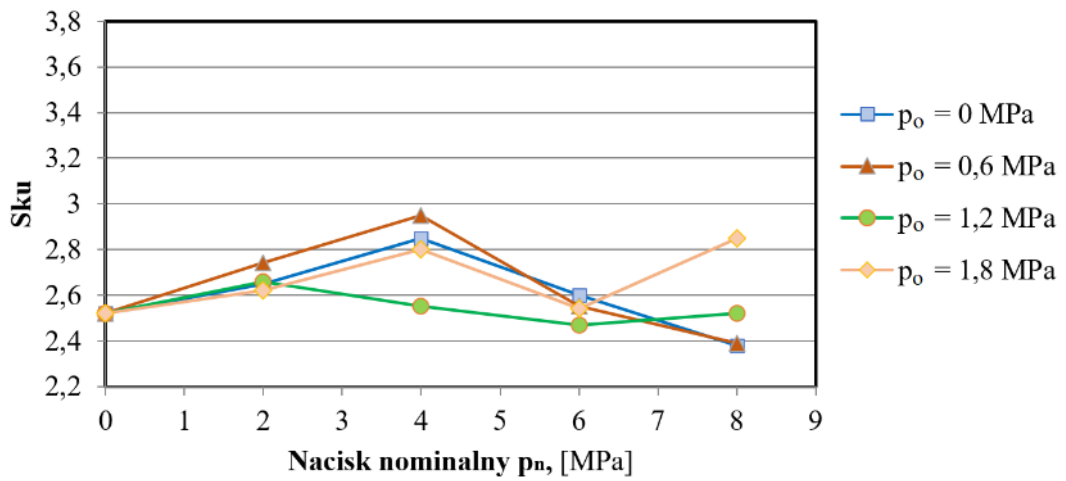
charakteryzujące proces tarcia z zastosowaniem oleju S100 Plus przedstawiono zależnie od gatunku blachy: DC03 (rys. 5.52), DC04 (rys. 5.54), DC05 (rys. 5.56) i DC06 (rys. 5.58). Tak samo przedstawiono wykresy parametru S_{ku} dla oleju S300 z zastosowaniem blachy gatunku DC03 (rys. 5.53), DC04 (rys. 5.55), DC05 (rys. 5.57) i DC06 (rys. 5.59).



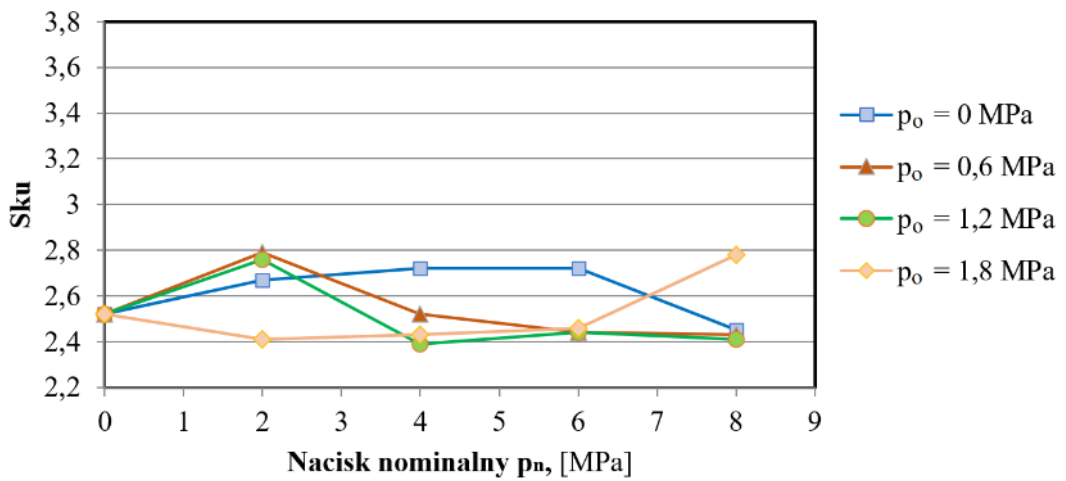
Rys. 5.52. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC03



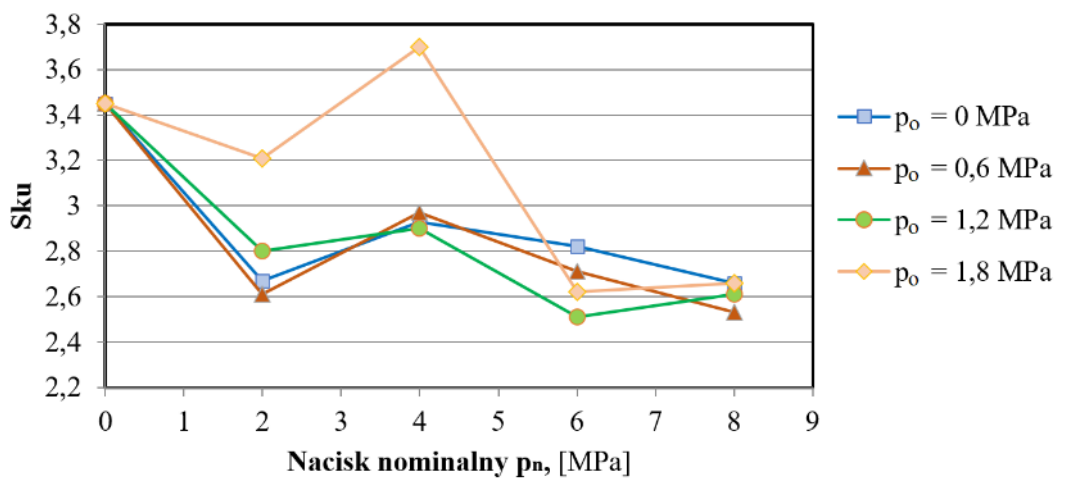
Rys. 5.53. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC03



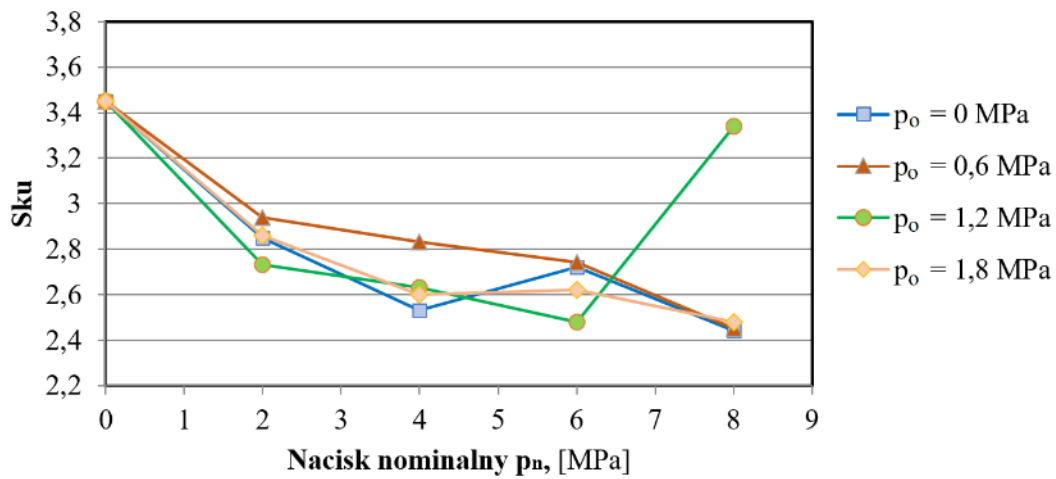
Rys. 5.54. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC04



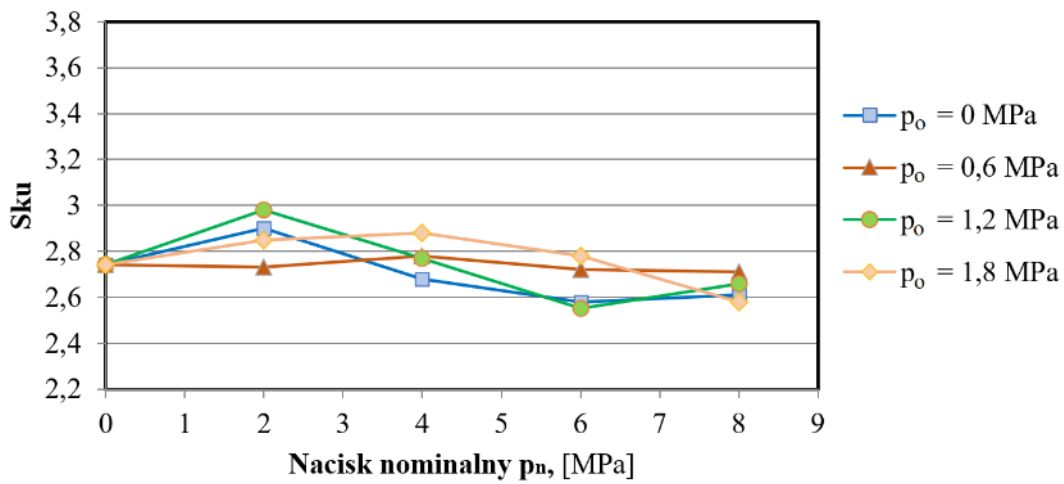
Rys. 5.55. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC04



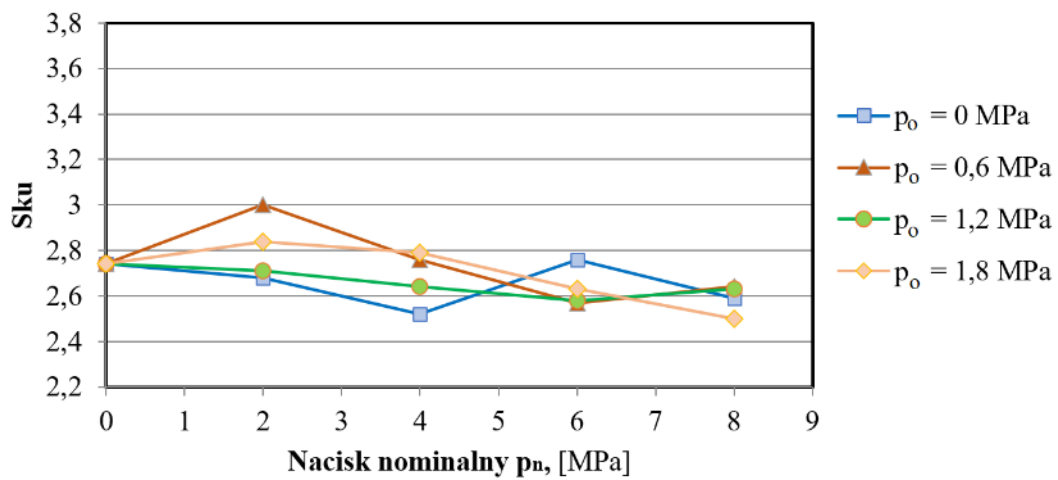
Rys. 5.56. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC05



Rys. 5.57. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC05



Rys. 5.58. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S100 plus blachy gatunku DC06



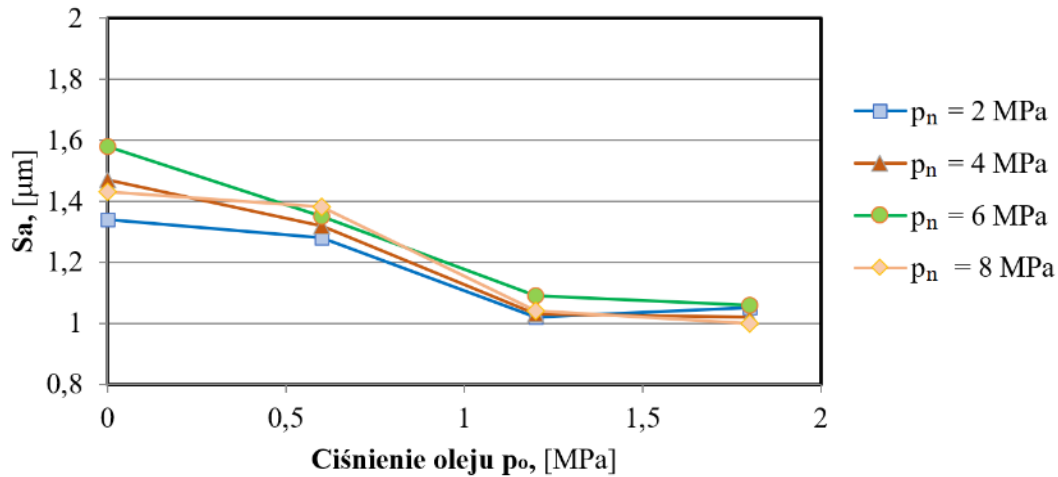
Rys. 5.59. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC06

Wykresy przedstawione na rysunku 5.52 oraz 5.59 ilustrują zmianę wartości kurtozy S_{ku} w zależności od nacisku nominalnego użytego w teście ciągnięcia pasa blachy DC03 z zastosowaniem oleju S100 Plus i S300, na podstawie których zaobserwowano, że wartość S_{ku} zmniejsza się wraz z rosnącym naciskiem, w stosunku do wartości S_{ku} zmierzonej na powierzchni blachy w stanie dostawy. W przypadku wykresów przedstawiających wyniki testów przeprowadzonych dla blachy DC04 (rys. 5.54 i 5.55), zachowanie parametru S_{ku} zależnie od nacisku nominalnego jest bardziej złożone i na jego wpływ ma dodatkowo zastosowany środek smarny i ciśnienie smarowania. Na ich podstawie można zaobserwować, że w zakresie małych nacisków nominalnych 2, 4 MPa, wartość kurtozy wzrasta w stosunku do wartości zmierzonej na powierzchni blachy w stanie dostawy. Dalszy wzrost nacisku powoduje, że blacha po procesie kształtowania charakteryzuje się mniejszą bądź zbliżoną wartością S_{ku} w stosunku do blachy w stanie dostawy. Wartości kurtozy zmierzonej dla próbek wykonanych z blachy DC05 (rys. 5.56 i 5.57) wykazują wyraźną tendencję zmniejszania się wartości S_{ku} wraz ze wzrostem nacisku. Wyjątkiem są wartości zmierzone dla próby przeprowadzonej z zastosowaniem nacisku 4 MPa oraz ciśnienia smarowania 1,8 MPa olejem S100 plus, dla którego można zaobserwować wzrost wartości S_{ku} , odbiegając tym samym od ogólnej tendencji. Podobne zachowanie jest widoczne na rysunku 5.57, na którym dla największej wartości nacisku i ciśnienia smarowania 1,2 MPa, wartość S_{ku} znacząco wzrosła. Z kolei wykresy dla prób przeprowadzonych dla blachy DC06, przedstawione na rysunku 5.58 i 5.59, ilustrują tendencję zmniejszania się wartości S_{ku} wraz ze wzrostem nacisku, wyjątkiem są wartości dla nacisku równego 2 MPa, dla którego można zaobserwować wzrost wartości parametru S_{ku} w stosunku do wartości początkowej. Zmieniająca się wartość parametru kurtozy S_{ku} , po procesie tarcia, z wartości $S_{ku} > 3$ na wartości $S_{ku} < 3$ informuje, że powierzchnia próbek ewoluuje z rozkładu o charakterze dzwonowym zawierającym wiele wysokich szczytów i płytkich dolin ($S_{ku} > 3$), na spłaszczony rozkład zawierający niewiele wysokich szczytów i płytkich dolin.

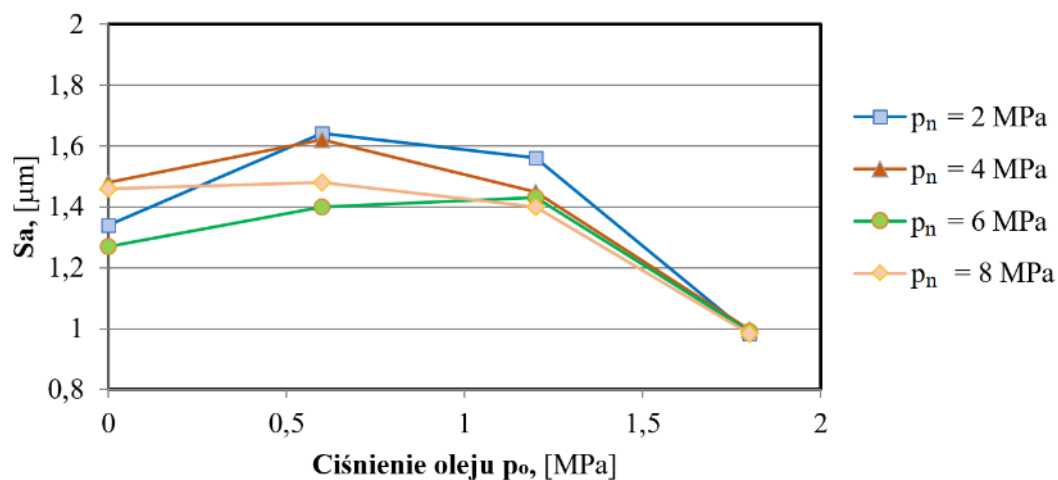
5.2.2. Wpływ ciśnienia oleju na zmianę podstawowych parametrów chropowatości blach

Badając wpływ strategii smarowania na zmianę podstawowych parametrów chropowatości, kontynuowano analizę na podstawie trzech parametrów, takich jak: S_a , S_{sk} i S_{ku} . Celem tej analizy było sprawdzenie, czy strategia smarowania oraz stosowanie smarowania olejem z wymuszonym ciśnieniem wpływa, a jeśli tak, to w jakim stopniu, na chropowatość powierzchni blachy po procesie tarcia. W rezultacie przeprowadzonej

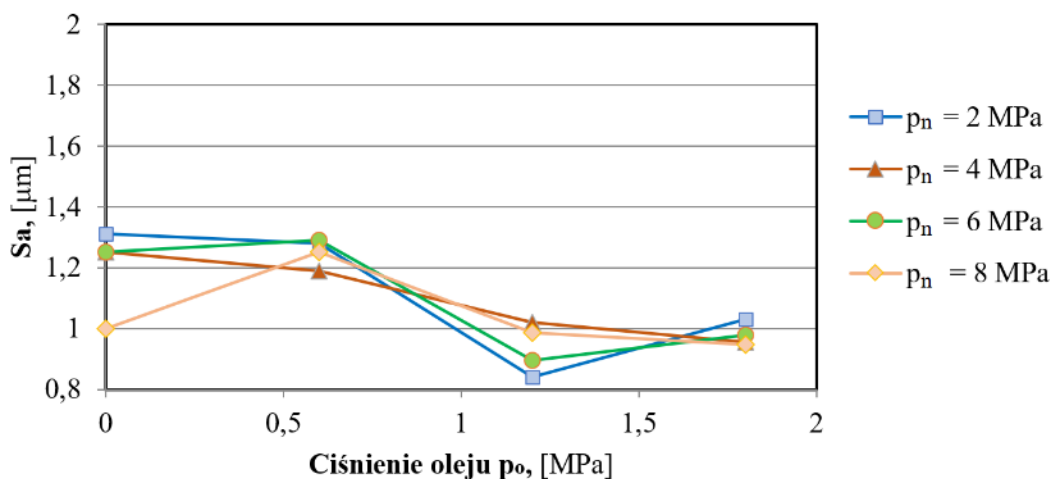
analizy otrzymano zestaw wykresów zależnie od zastosowanego środka smarnego i materiału blachy, czyli na przykład oleju S100 Plus i czterech gatunków blachy: DC03 (rys. 5.60), DC04 (rys. 5.62), DC05 (rys. 5.64) i DC06 (rys. 5.66) oraz oleju S300 i blachy: DC03 (rys. 5.61), DC04 (rys. 5.63), DC05 (rys. 5.65) i DC06 (rys. 5.67).



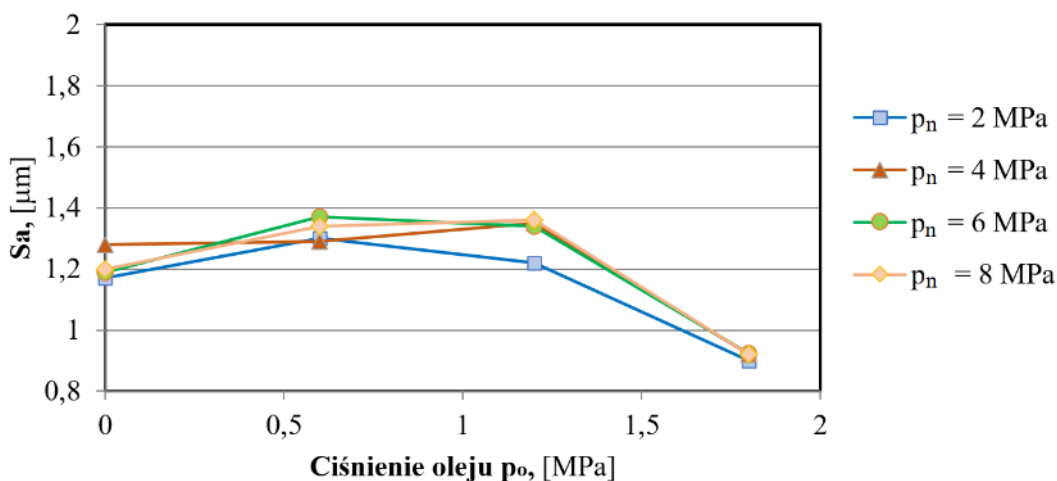
Rys. 5.60. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC03



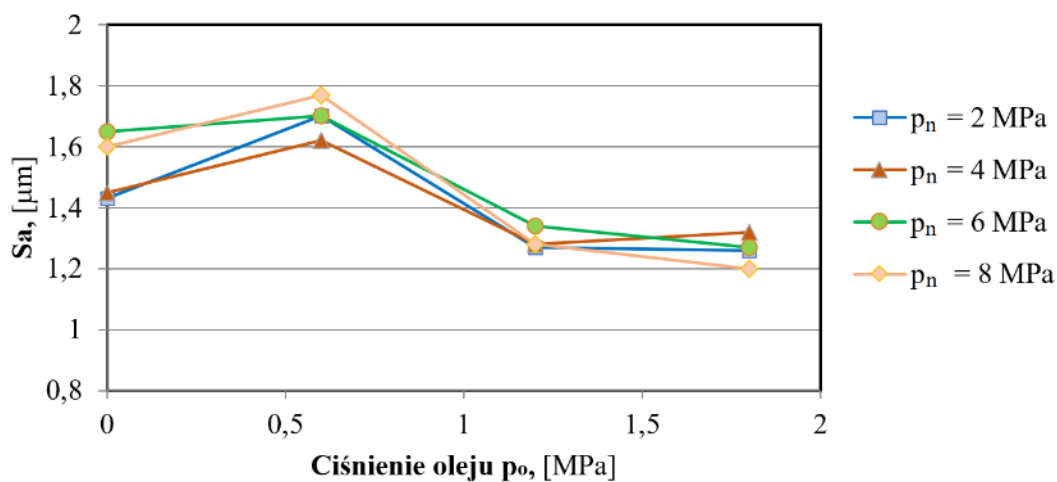
Rys. 5.61. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC03



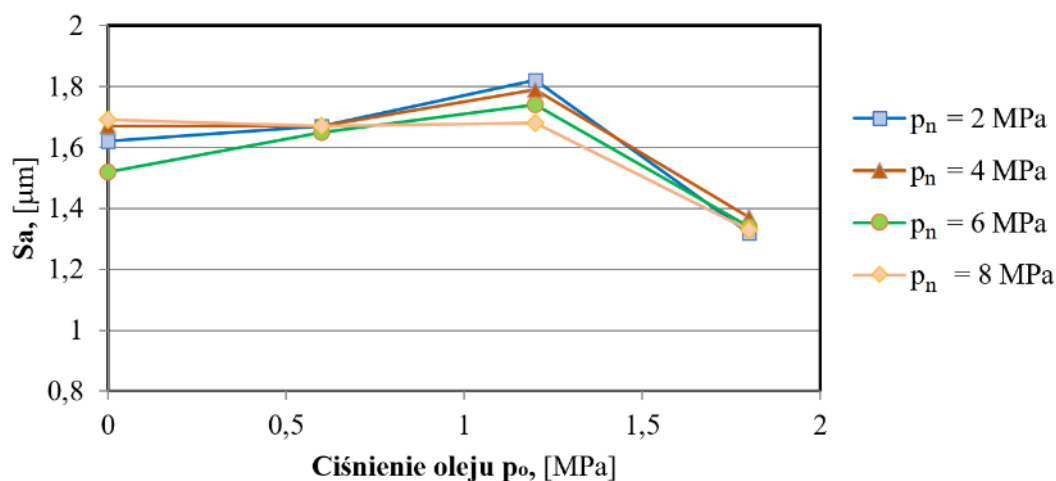
Rys. 5.62. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC04



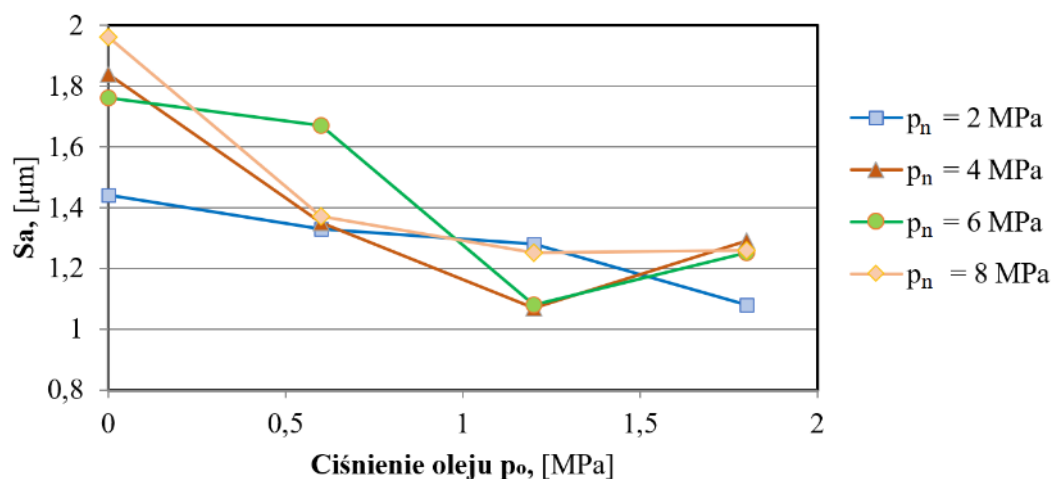
Rys. 5.63. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC04



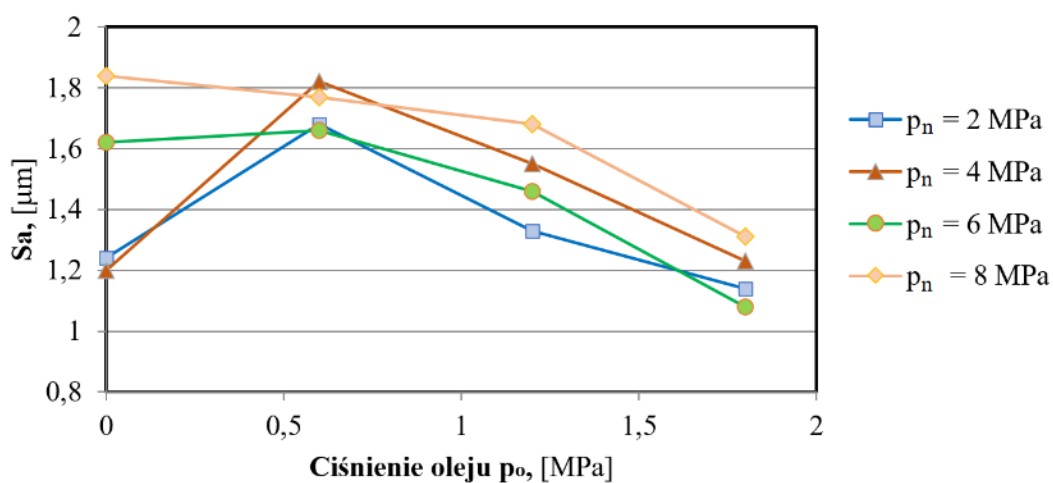
Rys. 5.64. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC05



Rys. 5.65. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC05



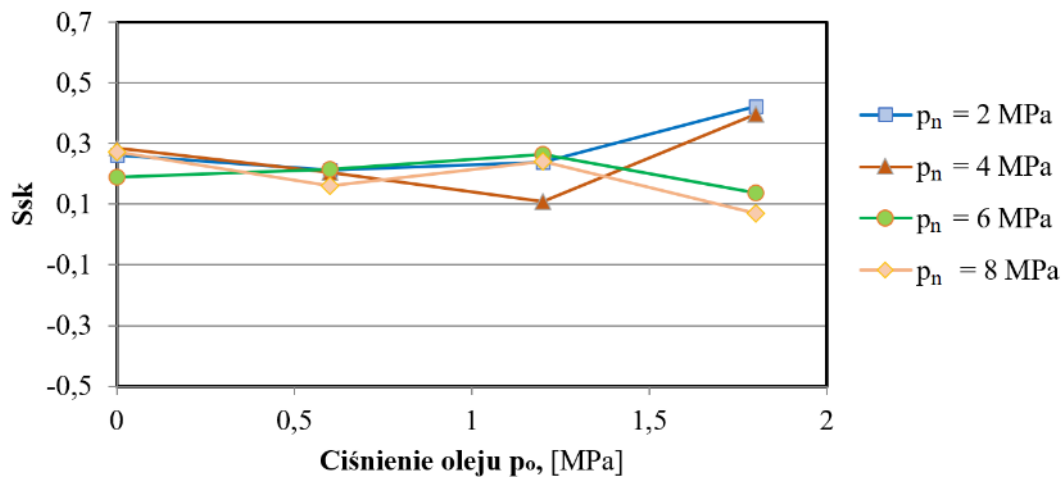
Rys. 5.66. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC06



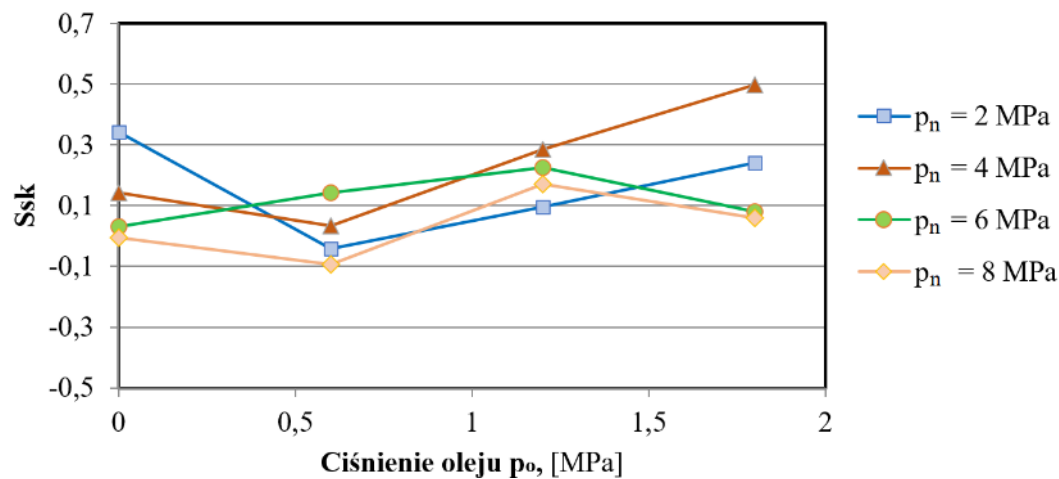
Rys. 5.67. Wpływ strategii smarowania na wartość parametru Sa w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC06

Na rysunkach 5.60–5.67 widoczne są jednoznacznie zależności pomiędzy ciśnieniem oleju smarującego a wartością parametru Sa. Wpływ ten jednakże ma różny charakter ze względu na zastosowany gatunek blachy i rodzaj oleju. Stosując smarowanie olejem S100 Plus, widoczna jest tendencja zmniejszania się wartości parametru Sa wraz ze wzrostem ciśnienia smarowania. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w momencie zwiększenia ciśnienia smarowania z wartości 0,6 do 1,2 MPa, powyżej ciśnienia smarowania wynoszącego 1,2 MPa zauważalne jest zjawisko stabilizacji parametru Sa. Ciśnienie smarowania 0,6 MPa w stosunku do wartości smarowania bez wymuszonego ciśnienia również przynosi efekty w postaci zmniejszającej się wartości parametru Sa, lecz wyłącznie dla blachy DC03 i DC06 (rys. 5.60, 5.66). Dla pozostałych gatunków (rys. 5.62 i 5.64) w tym samym zakresie ciśnienia smarowania można zaobserwować wzrost lub utrzymanie się wartości Sa na zbliżonym poziomie. Z kolei stosowanie oleju S300 (rys. 5.61, 5.63, 5.65, 5.67) sprawia, że tendencja zmiany chropowatości wyrażonej wartością parametru Sa jest inna w stosunku do stosowania oleju S100 plus, co jednoznacznie wskazuje wpływ lepkości stosowanego oleju na chropowatość. Olej o większej lepkości, w zakresie mniejszego ciśnienia smarowania, wykazuje tendencję zwiększającego się parametru Sa (rys. 5.61, 5.63, 5.65, 5.67). Zjawisko to jest bardzo widoczne dla wartości ciśnienia smarowania 1,2 i 1,8 MPa w zależności od badanego materiału blachy, powyżej którego jest widoczne zmniejszenie chropowatości wartości parametru Sa.

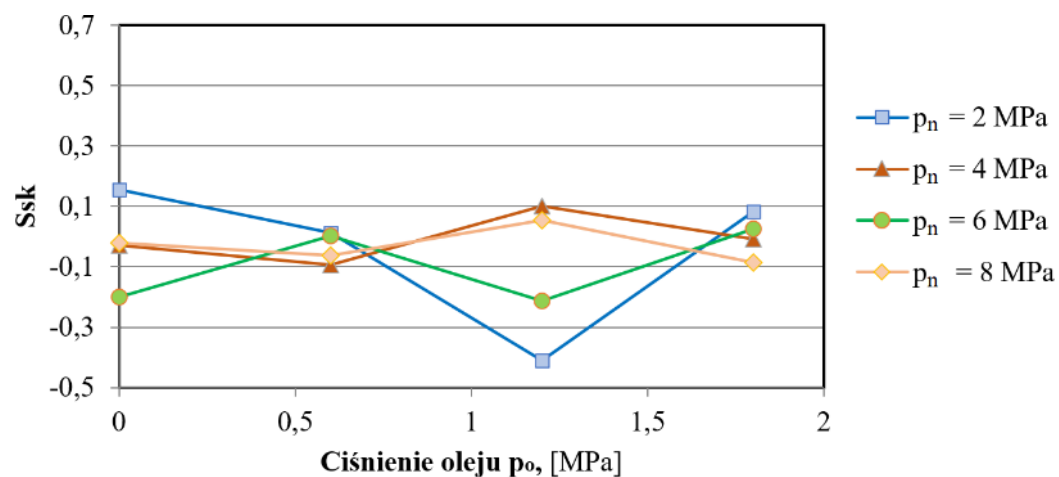
W następnej kolejności analizie graficznej za pomocą wykresów poddano parametry Ssk oraz Sku. Przedstawiając najpierw wyniki skośności Ssk z podziałem na zastosowany w procesie olej S100 Plus oraz cztery gatunki blachy DC03 (rys. 5.68), DC04 (rys. 5.70), DC05 (rys. 5.72) i DC06 (rys. 5.74) oraz olej S300 i blachy DC03 (rys. 5.69), DC04 (rys. 5.71), DC05 (rys. 5.73) i DC06 (rys. 5.75). Tę samą metodę zastosowano dla kurtozy Sku, stosując podział na 8 wykresów zależnie od zastosowanych parametrów w procesie (z zastosowaniem oleju S100 Plus i blachy DC03 (rys. 5.76), DC04 (rys. 5.78), DC05 (rys. 5.80) i DC06 (rys. 5.82) oraz oleju S300 i blachy DC03 (rys. 5.77), DC04 (rys. 5.79), DC05 (rys. 5.81) i DC06 (rys. 5.83)).



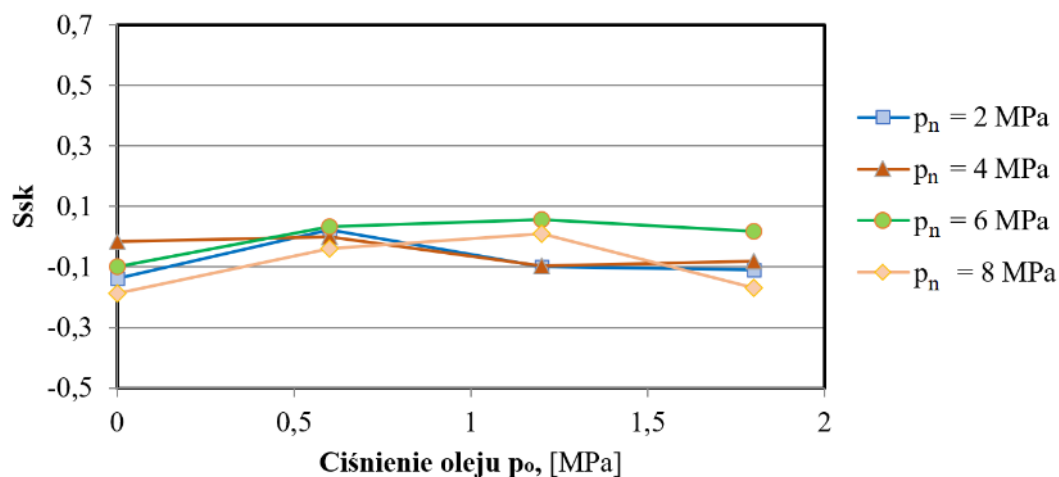
Rys. 5.68. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC03



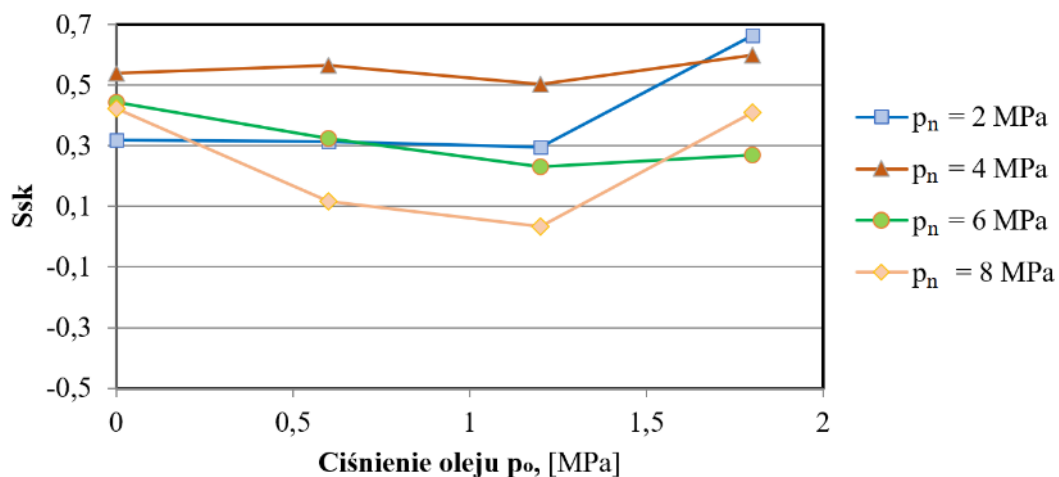
Rys. 5.69. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC03



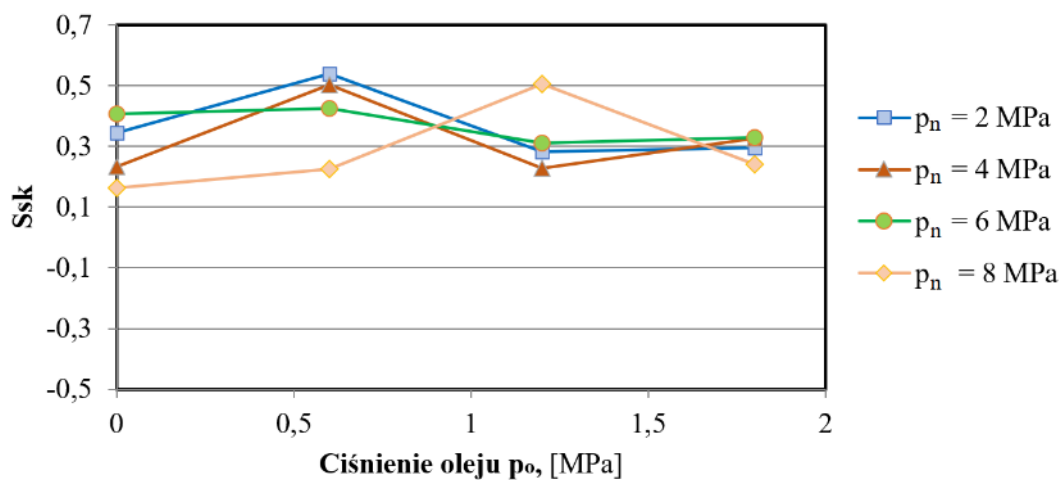
Rys. 5.70. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC04



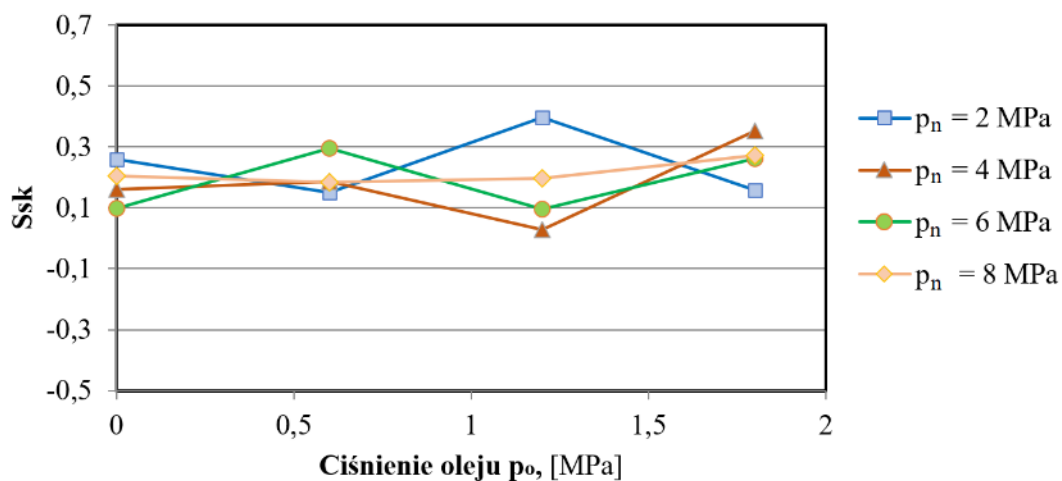
Rys. 5.71. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC04



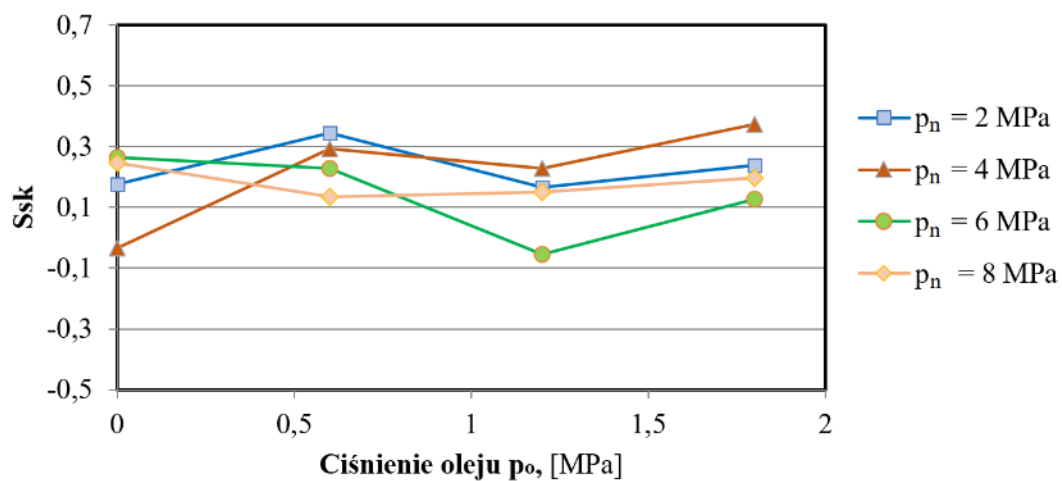
Rys. 5.72. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC05



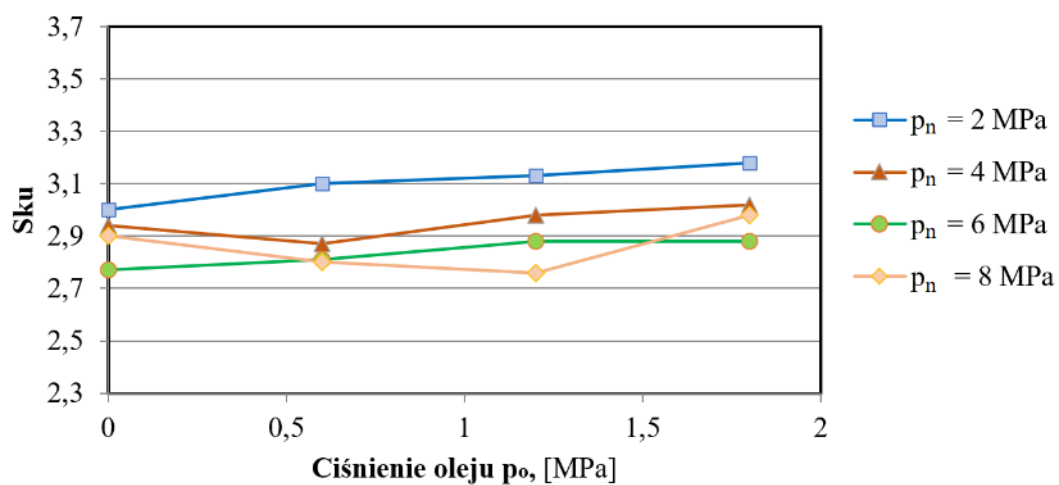
Rys. 5.73. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC05



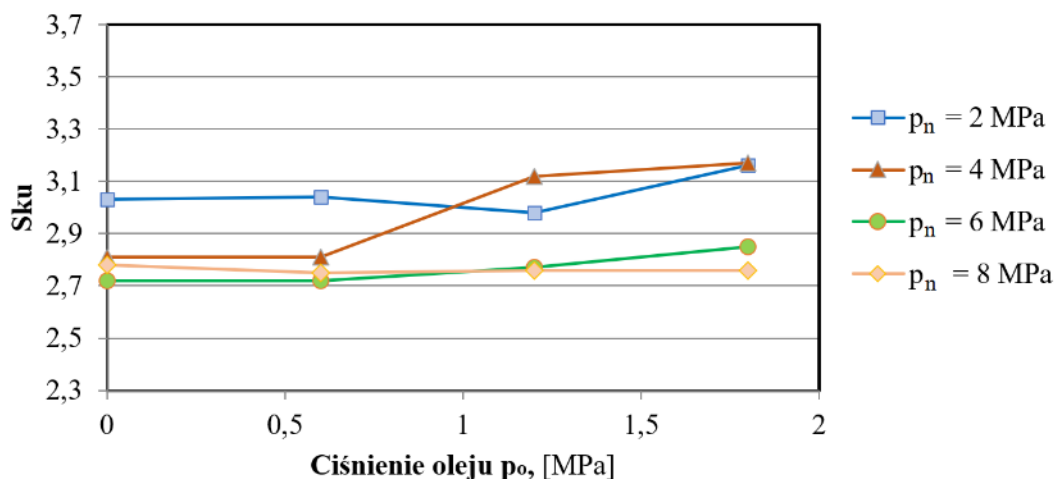
Rys. 5.74. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC06



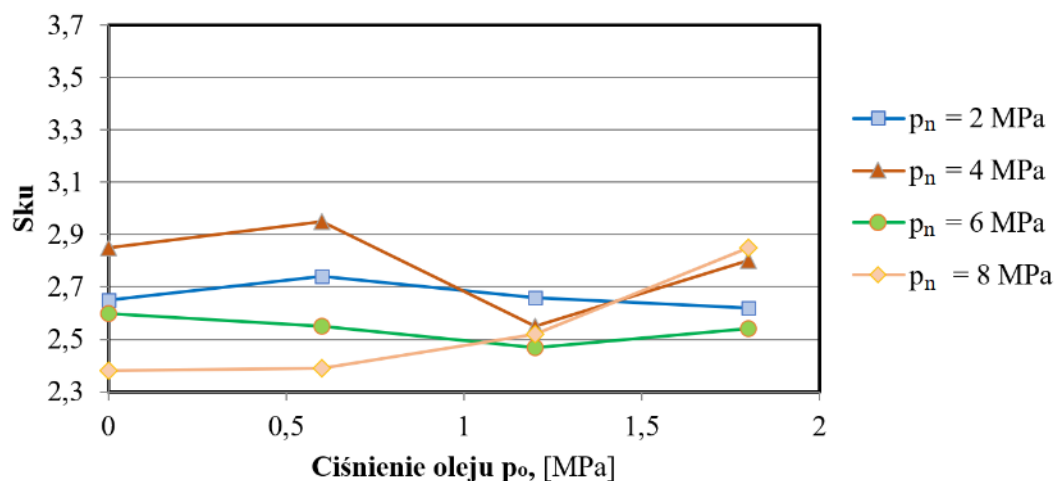
Rys. 5.75. Wpływ strategii smarowania na wartość skośności Ssk w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC06



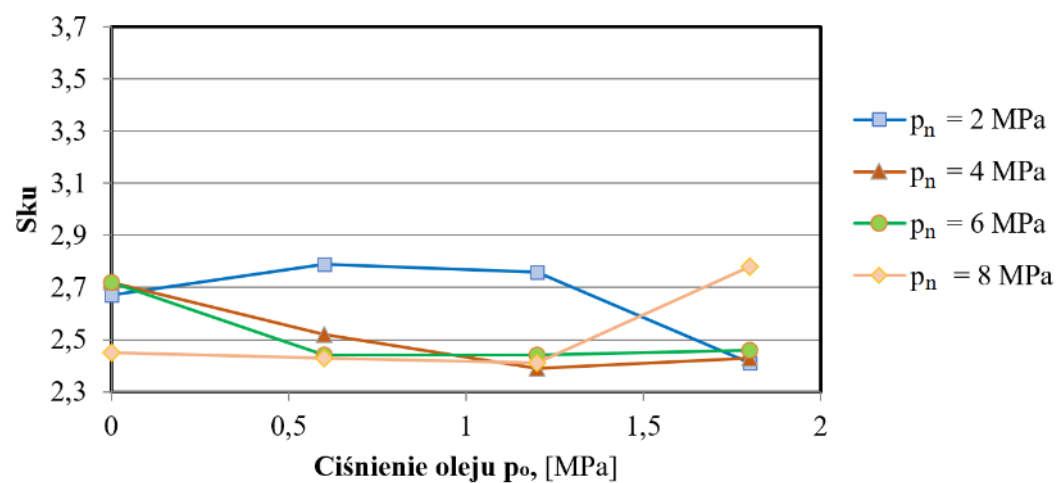
Rys. 5.76. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy Sku w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC03



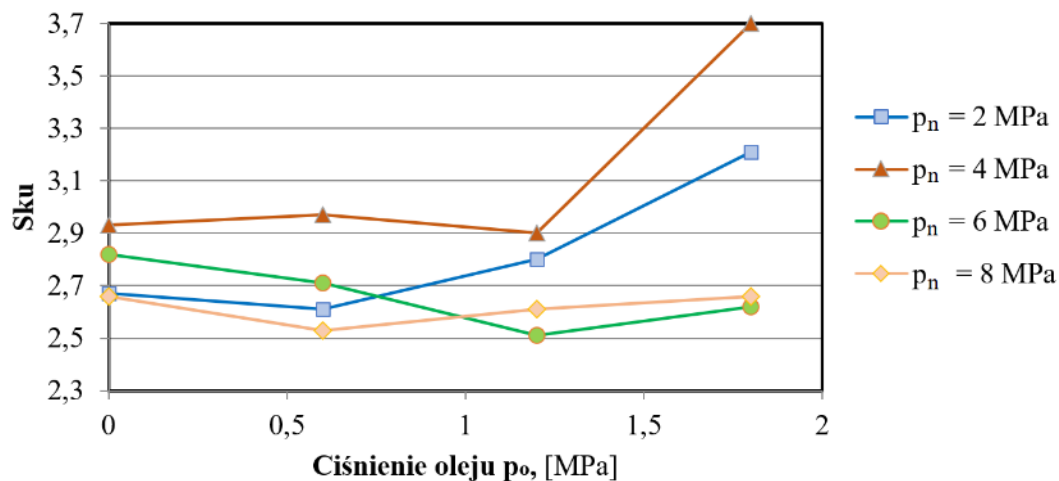
Rys. 5.77. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC03



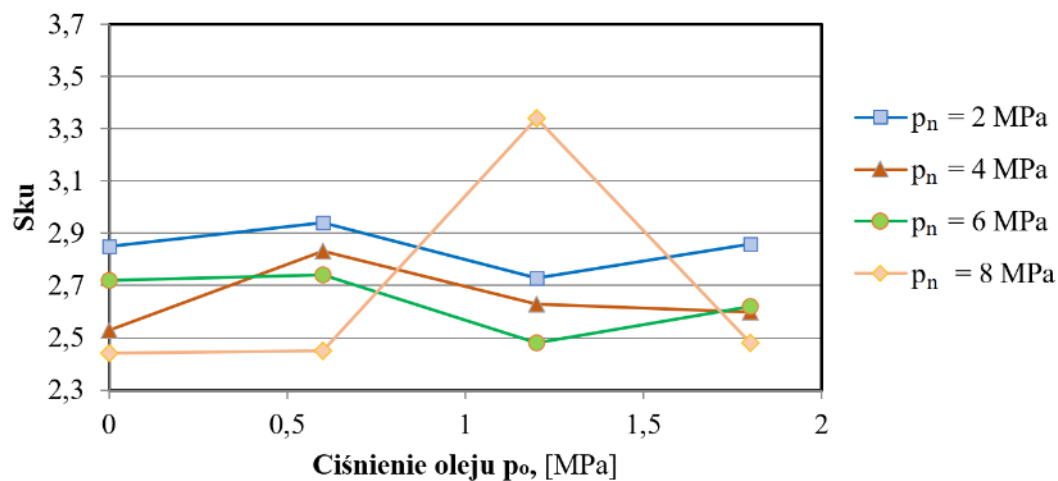
Rys. 5.78. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC04



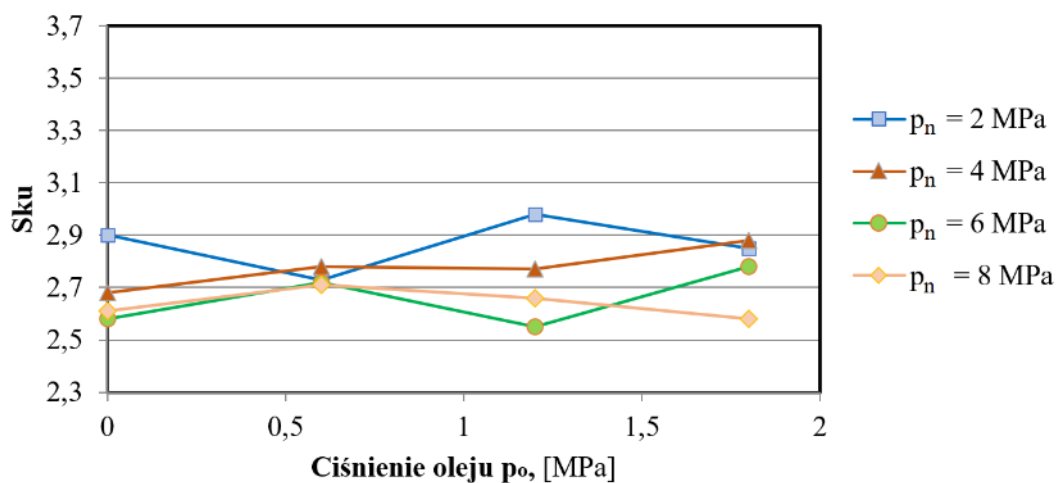
Rys. 5.79. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC04



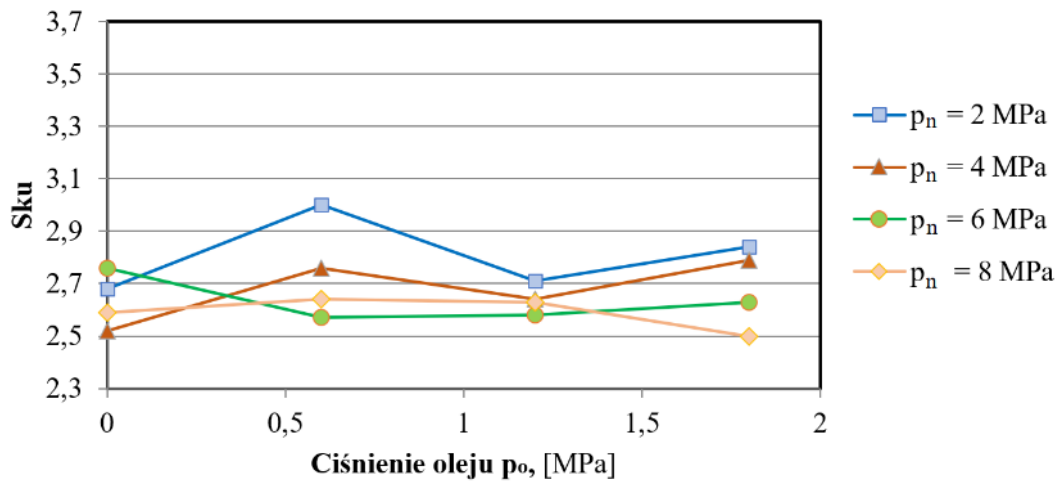
Rys. 5.80. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC05



Rys. 5.81. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC05



Rys. 5.82. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S100 Plus blachy gatunku DC06



Rys. 5.83. Wpływ strategii smarowania na wartość kurtozy S_{ku} w warunkach smarowania olejem S300 blachy gatunku DC06

Dane przedstawione na rysunkach od 5.68 do 5.83 ilustrują wpływ strategii smarowania na chropowatość powierzchni, której poziom został oszacowany na podstawie parametru skośności S_{sk} i kurtozy S_{ku} . Po przeanalizowaniu danych przedstawionych na rysunkach stwierdzono brak wyraźnej tendencji zmiany zmierzonych wartości tych parametrów chropowatości od zastosowanego ciśnienia smarowania.

5.2.3. Analiza wariancji wpływu parametrów procesu kształtowania blach na wartość parametrów chropowatości powierzchni

Celem dokładniejszego przeanalizowania wpływu parametrów procesu kształtowania blach na wielkość parametrów chropowatości przeprowadzono analizę ANOVA, przeprowadzając ją trzyetapowo, oddzielnie dla każdego z analizowanych parametrów chropowatości (S_a , S_{sk} , S_{ku}). W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano wyniki istotności poszczególnych parametrów, takich jak: gatunek blachy, lepkość kinematyczna oleju, nacisk i ciśnienie smarowania dla wskaźnika S_a (tabela 5.2).

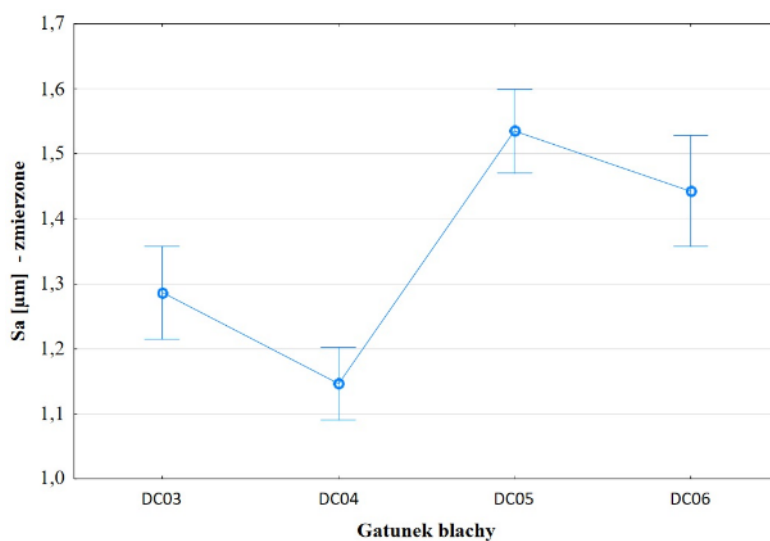
Tabela 5.2. Wyniki wartości F i prawdopodobieństwa p dla modelu uwzględniającego wpływ parametrów procesu tarcia na wartość parametru S_a

Parametr	F	p
Gatunek blachy	53,91461	0,000000
Lepkość kinematyczna oleju	21,51764	0,000008
Nacisk nominalny	0,98848	0,400391
Ciśnienie smarowania	48,05981	0,000000

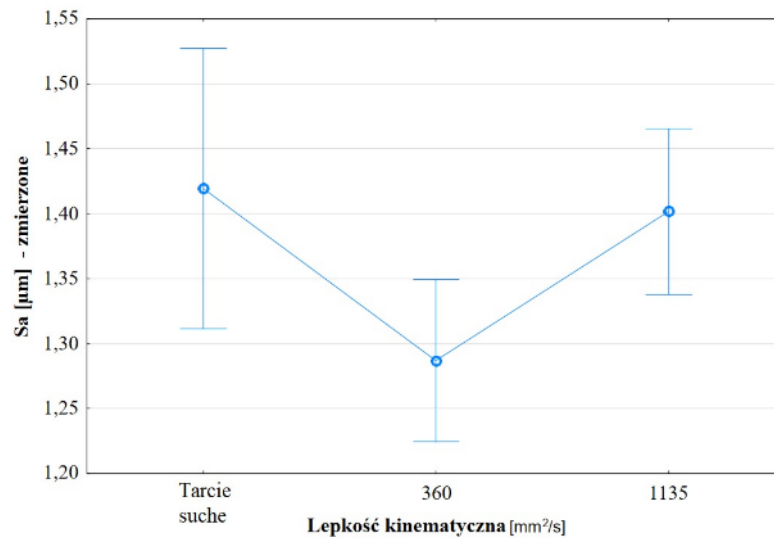
Istotność wpływu wybranych czynników na wartości parametrów chropowatości, podobnie jak dla wartości współczynnika tarcia, określono na poziomie istotności

wynoszącym $p \leq 0,05$. Na podstawie tego poziomu istotności oraz wyników przedstawionych w tabeli 5.2 można zaobserwować, że parametrami istotnymi wpływającymi na parametr Sa jest gatunek blachy, lepkość kinematyczna oleju oraz ciśnienie smarowania. Z kolei wartość poziomu istotności dla nacisku nominalnego świadczy o jego braku wpływu na parametr Sa. Przeprowadzona dodatkowa analiza mająca na celu sprawdzenie wielkości wpływu poszczególnych parametrów wykazała, że parametrem najsilniej wpływającym na wartość parametru Sa jest gatunek blachy, dla którego wartość parametru Fishera wynosi $F = 53,91461$. Drugim, równie silnie wpływającym parametrem, było ciśnienie smarowania, dla którego wartość testu F wynosiła 48,05981. Z kolei trzeci parametr wpływający na wartość parametru Sa, czyli lepkość kinematyczna, charakteryzowała się dużo mniejszym wpływem w porównaniu z dwoma pozostałymi istotnymi parametrami, a jej istotność określono na poziomie $F = 21,51764$.

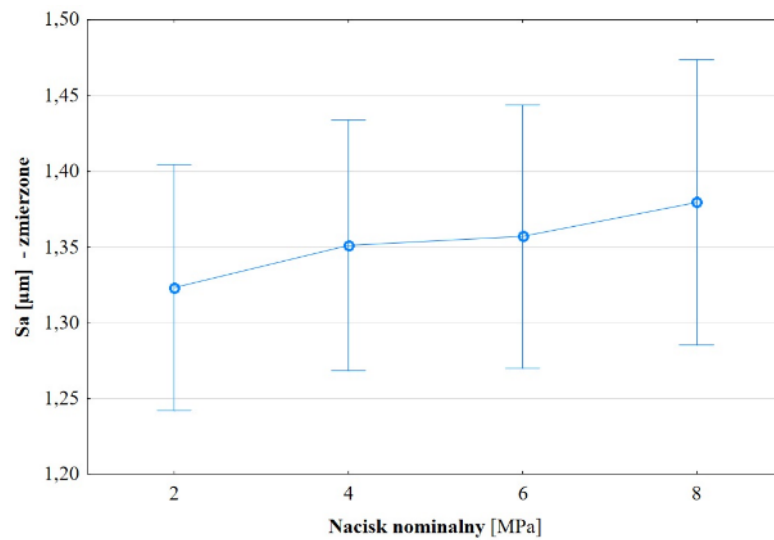
Po przeprowadzonej wstępnej analizie istotności wybranych parametrów, wyniki analizy wariancji przedstawiono za pomocą wykresów (rys. 5.84-5.87), dla których w charakterystycznych punktach parametrów użytych w badaniach za pomocą pionowych linii zaznaczono wielkość rozrzutu zmierzonych wartości.



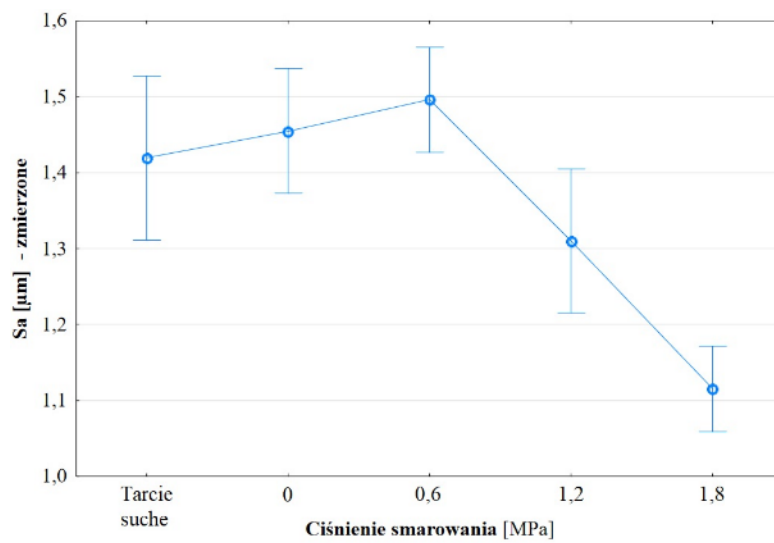
Rys. 5.84. Wpływ gatunku blachy na wartość parametru Sa



Rys. 5.85. Wpływ lepkości kinematycznej na wartość parametru Sa



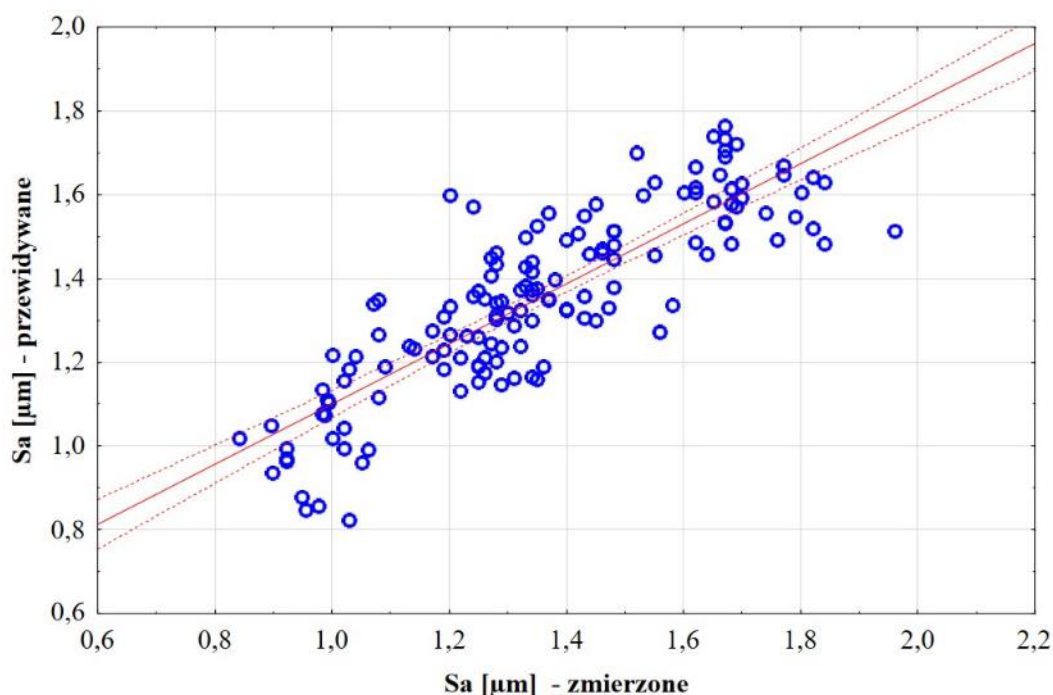
Rys. 5.86. Wpływ nacisku nominalnego na wartość parametru Sa



Rys. 5.87. Wpływ ciśnienia smarowania na wartość parametru Sa

Wykresy przedstawione na rysunkach 5.84-5.87 dowodzą, że wszystkie parametry użyte w analizach wpływają na zmianę wartości parametru chropowatości S_a . Jednak duży zakres poziomu ufności na wykresie zależności S_a od nacisku nominalnego, skutkuje tym, że wartości zawierają się w jednym przedziale, nachodząc na siebie, dlatego nie udało się jednoznacznie określić istotności tego parametru na wartość S_a , co potwierdza poziom istotności na poziomie 0,400391 (tabela 5.2). Drugim parametrem, który również przejawiał duży zakres rozrzutu wartości, jest lepkość kinematyczna, szczególnie dla wartości, która opisuje proces tarcia bez zastosowania smarowania. Dwa pozostałe parametry, czyli gatunek blachy oraz ciśnienie smarowania, charakteryzują się dużym wpływem na wartości S_a , co potwierdzają wykresy na rysunkach 5.84 i 5.87 oraz wartości istotności na poziomie 0,000000 w tabeli 5.2.

Porównanie wartości wskaźnika S_a zmierzonego i przewidywanego na podstawie przeprowadzonej analizy ANOVA przedstawiono na rysunku 5.88.



Rys. 5.88. Wykres zależności wartości parametru S_a zmierzonego i przewidywanego

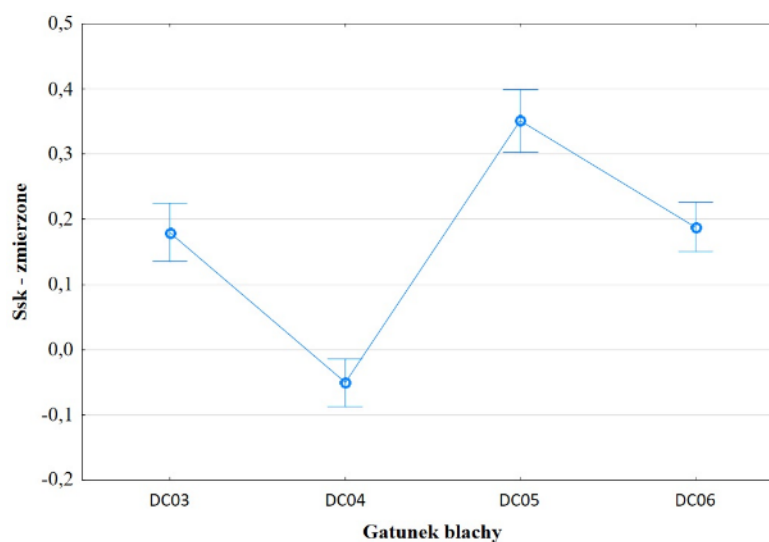
Wartości parametru S_a zaznaczone za pomocą niebieskich punktów rozłożone są równomiernie na całej długości analizowanego przedziału w sposób uniemożliwiający wskazanie podziału na poszczególne grupy. Dodatkowo czerwona linia opisująca dopasowanie do zmierzonych danych obrazuje ich przemieszczenie względem wartości przewidywanych, a przerywane czerwone linie zawierające obszar poziomu ufności 95% obrazują, że duża ilość uzyskanych wartości jest poza zakresem ufności.

Po przeprowadzeniu analizy ANOVA dla parametru Sa przeprowadzono analizę dla dwóch pozostałych wskaźników chropowatości, stosując tę samą procedurę wyznaczania. Na wstępie wyznaczono wartości poziomu istotności poszczególnych parametrów procesu dla skośności Ssk (tabela 5.3), a następnie przedstawiono je graficznie (rys. 5.89-5.92).

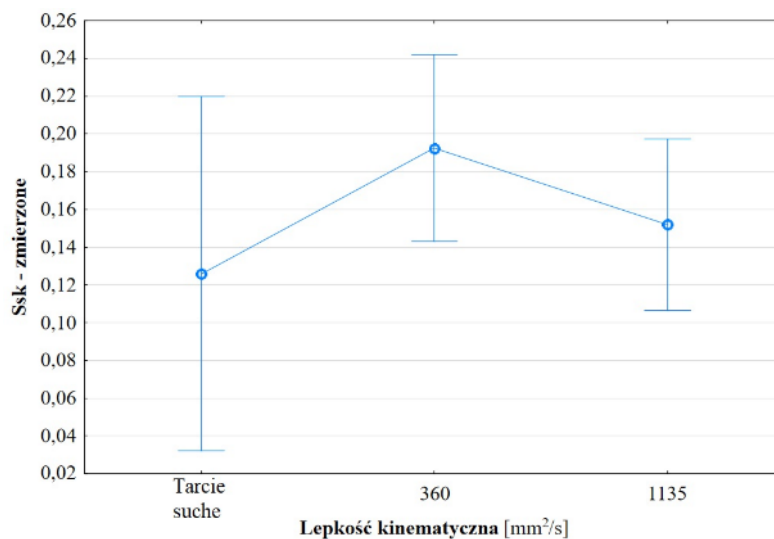
Tabela 5.2. Wyniki wartości F i prawdopodobieństwa p dla modelu uwzględniającego wpływ parametrów tarcia na wartość skośności Ssk

Parametr	F	p
Gatunek blachy	71,44075	0,000000
Lepkość kinematyczna oleju	3,79035	0,053672
Nacisk nominalny	4,61678	0,004184
Ciśnienie smarowania	1,70874	0,168308

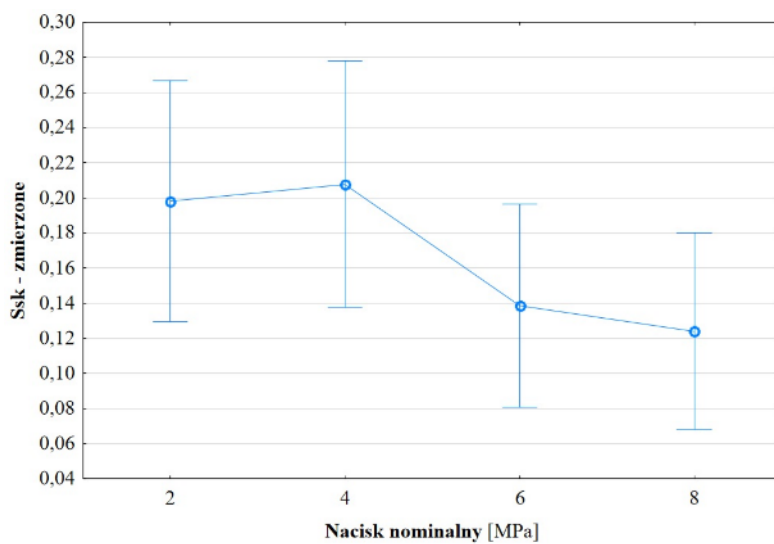
W wyniku analizy istotności parametrów procesu kształtowania blach na wartość parametru Ssk wykazano, że ze względu na określony poziom istotności dwa parametry, tj. gatunek blachy oraz nacisk nominalny mają istotny wpływ na wartości parametru Ssk. Z kolei przeanalizowanie wartości F testu Fishera określającego wielkość wpływu poszczególnych parametrów na wartość parametru Ssk wykazało, że najsilniej wpływającym parametrem jest gatunek blachy ($F = 71,44075$).



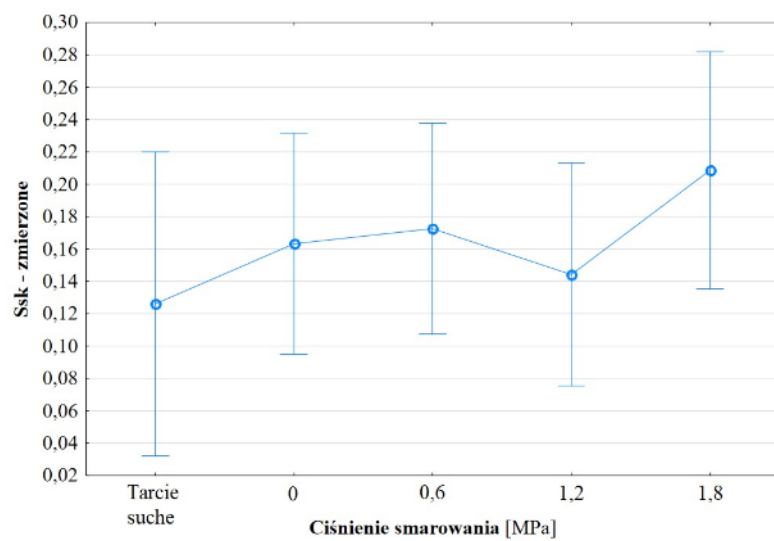
Rys. 5.89. Wpływ gatunku blachy na wartość skośności Ssk



Rys. 5.90. Wpływ lepkości kinematycznej na wartość skośności Ssk



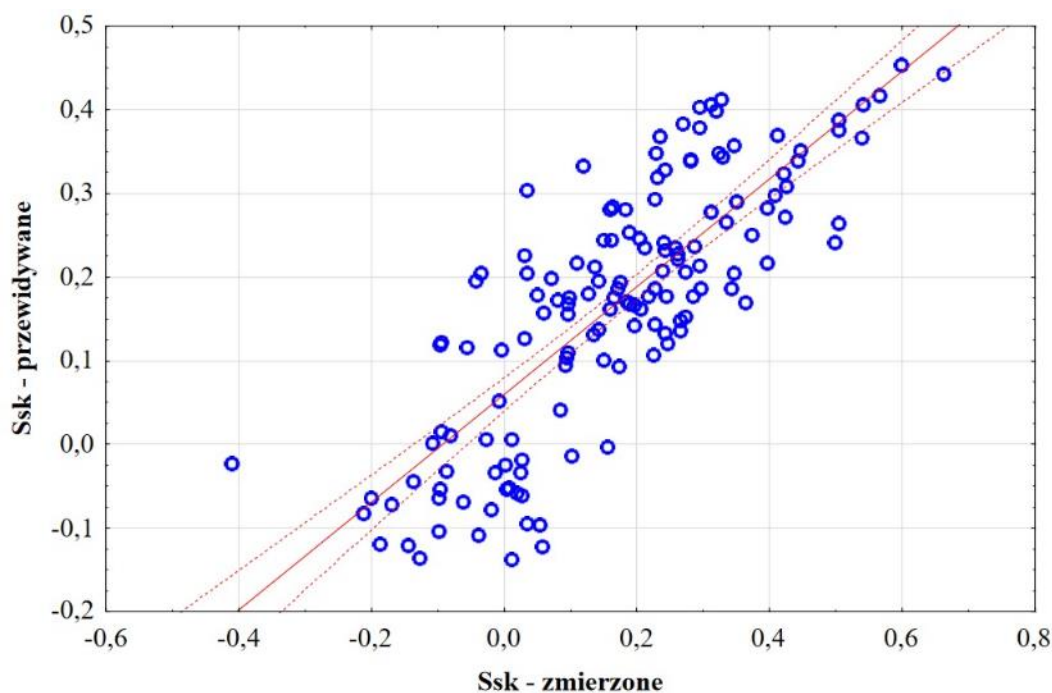
Rys. 5.91. Wpływ nacisku nominalnego na wartość skośności Ssk



Rys. 5.92. Wpływ ciśnienia smarowania na wartość skośności Ssk

Przedstawione wykresy na rysunkach 5.89-5.92 potwierdzają wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonej analizy istotności, której wyniki przedstawiono w tabeli 5.3, i z których wynika, że parametrami wpływającymi na wartość skośności Ssk po procesie kształtowania blach jest gatunek zastosowanej blachy oraz zastosowany w procesie nacisk nominalny. Z kolei dla lepkości kinematycznej oraz ciśnienia smarowania, ze względu na duży rozrzut zmierzonych wartości, niemożliwe jest wyciągnięcie jednoznacznych wniosków o istotnym wpływie tego parametru na skośność powierzchni blachy po teście.

Kolejnym krokiem analizy istotności wpływu parametrów procesu na wielkość Ssk jest przedstawienie na wykresie (rys. 5.93) wartości Ssk zmierzonych i przewidywanych. Analizując przedstawiony wykres, można dostrzec, że zachowanie wskaźnika Ssk jest analogiczne do wcześniej analizowanego parametru Sa, dla którego wartości charakteryzowały się równomiernym rozłożeniem i dużym błędem wartości zmierzonych względem wartości przewidywanych.



Rys. 5.93. Wykres zależności wartości wskaźnika Ssk zmierzonego i przewidywanego

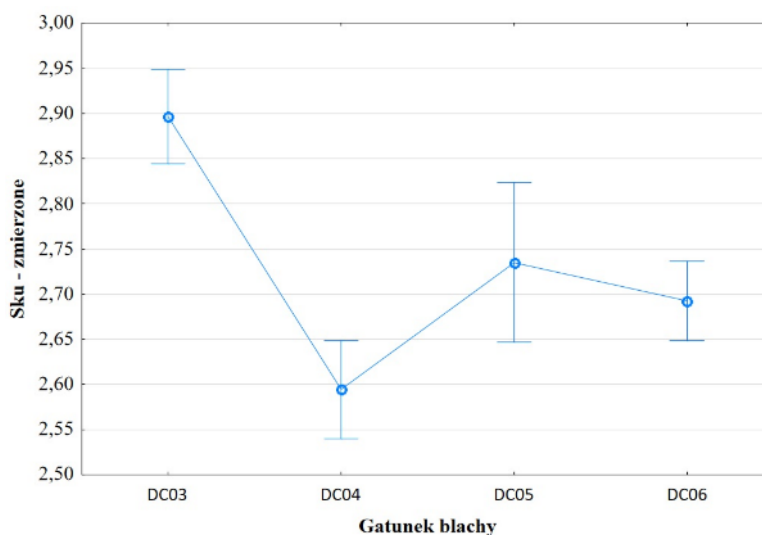
Ostatnim analizowanym parametrem chropowatości powierzchni jest parametr Sku, podobnie jak wcześniej rozpoczęto od wyznaczenia poziomu istotności i wpływu wskazanych parametrów procesu tarcia (tabela 5.4).

Tabela 5.4. Wyniki wartości F i prawdopodobieństwa p dla modelu uwzględniającego wpływ parametrów tarcia na wartość kurtozy S_{ku}

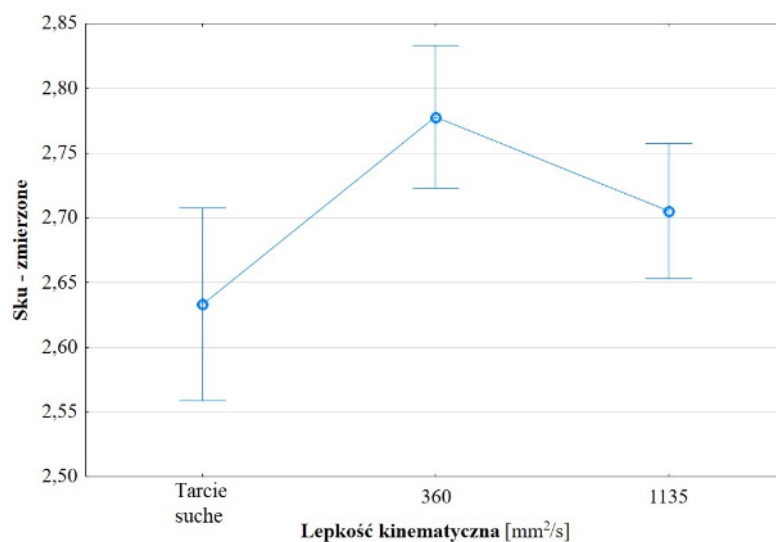
Parametr	F	p
Gatunek blachy	23,65697	0,000000
Lepkość kinematyczna oleju	7,01465	0,009070
Nacisk nominalny	14,65908	0,000000
Ciśnienie smarowania	1,82763	0,145225

Na podstawie wartości przedstawionych w tabeli 5.4 wykazano, że parametrami istotnie wpływającymi na wartość kurtozy S_{ku} są: gatunek blachy, lepkość kinematyczna i nacisk nominalny. Z kolei ciśnienie smarowania z wynikiem $p = 0,145225$ wykracza poza zakres $p \leq 0,05$, dyskwalifikując go tym samym jako parametr istotny. Z grupy trzech istotnych parametrów gatunek blachy wykazywał największy wpływ na wartość parametru S_{ku} ($F = 23,65697$). Z kolei wartość efektu F dla dwóch pozostałych istotnych parametrów wynosił 14,65908 dla nacisku nominalnego oraz 7,01465 dla lepkości kinematycznej.

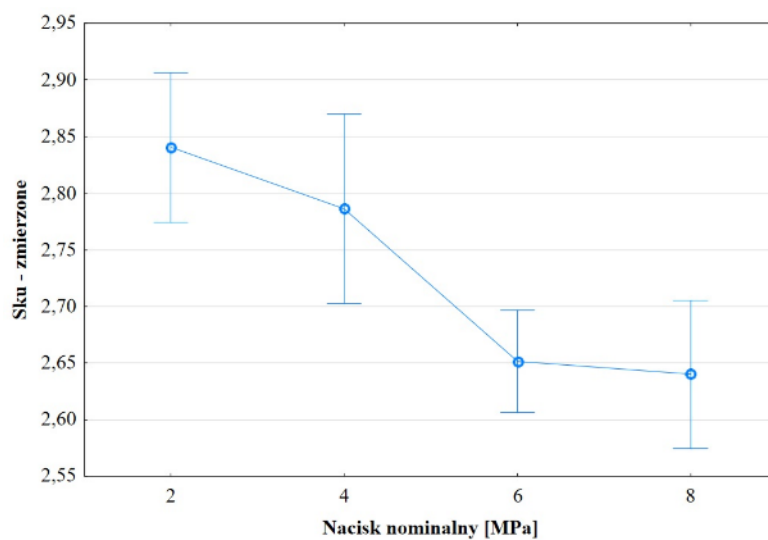
Dla lepszego zobrazowania istotności tych parametrów dla procesu tarcia blach wyniki dodatkowo zostały przedstawione za pomocą wykresów przedstawionych na rysunkach 5.94-5.97.



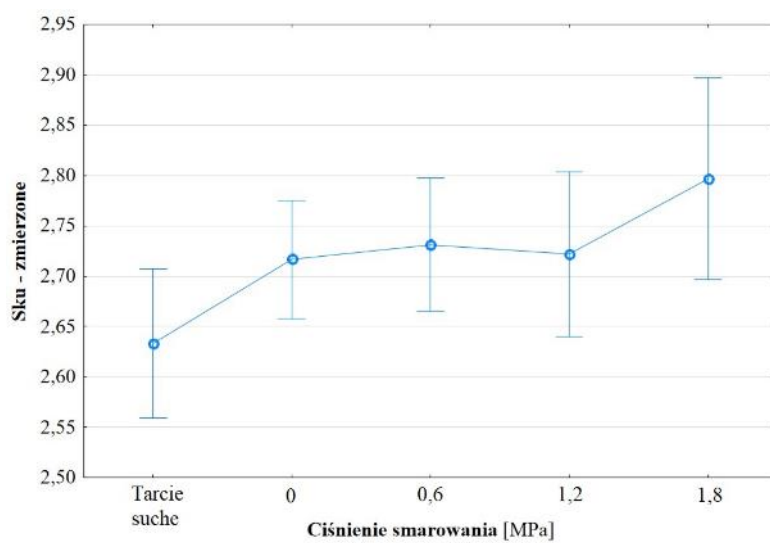
Rys. 5.94. Wpływ gatunku blachy na wartość kurtozy S_{ku}



Rys. 5.95. Wpływ lepkości kinematycznej na wartość kurtozy Sku



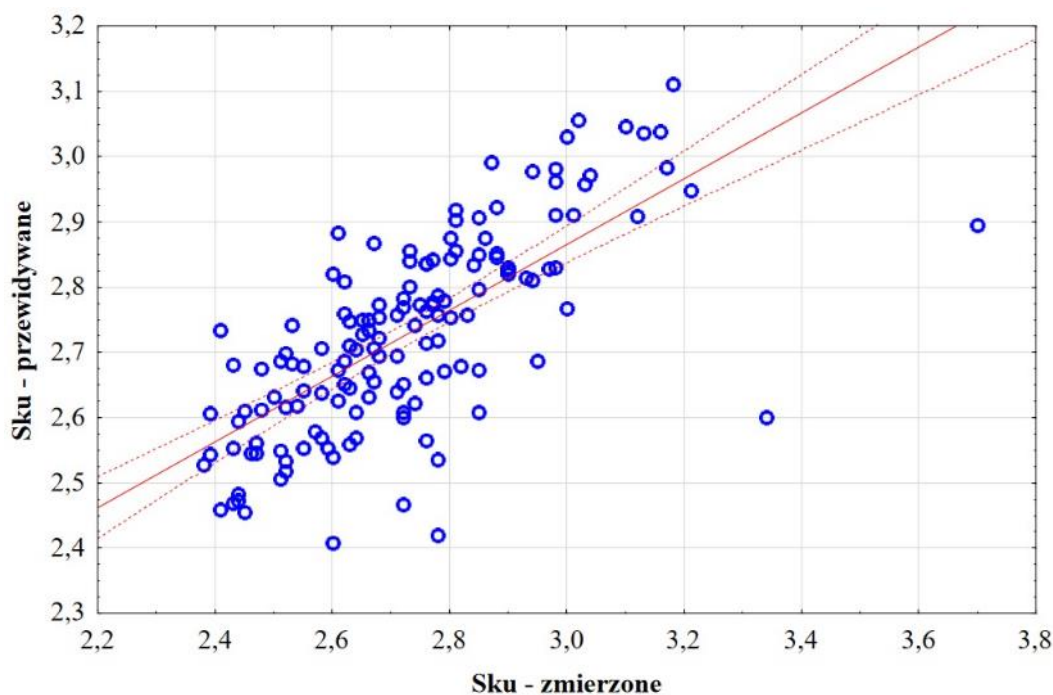
Rys. 5.96. Wpływ nacisku nominalnego na wartość kurtozy Sku



Rys. 5.97. Wpływ ciśnienia smarowania na wartość kurtozy Sku

Wykresy przedstawione na rysunkach 5.94-5.97 dowodzą, że zmiana wartości parametrów procesu, takich jak: gatunek blachy, lepkość kinematyczna i nacisk nominalny mają bezpośredni wpływ na wartość Sku . Z kolei ciśnienie smarowania w zakresie od 0 do 1,2 MPa nie wpływa istotnie na zmianę wartości Sku , a wzrost wartości Sku dla ciśnienia 1,8 MPa zawiera się w zakresie rozrzutu wartości dla pozostałych parametrów.

W ostatnim kroku porównania wpływu parametrów procesu tarcia na parametr Sku przedstawiono wykres zależności wartości Sku zmierzonego w stosunku do wartości przewidywanych przez model ANOVA (rys. 5.98).



Rys. 5.98. Zależności wartości parametru Sku zmierzonego i przewidywanego

Przedstawiony na rysunku 5.98 wykres zależności wartości wskaźnika Sku zmierzonego i przewidywanego obrazuje różnicę pomiędzy wartościami zmierzonymi, zaznaczonymi niebieskimi punktami i wartościami przewidywanymi, zaznaczonymi za pomocą czerwonej linii wykazującej najlepsze dopasowanie do zbioru zmierzonych wartości. Z wykresu można odczytać, że znaczna część wartości Sku znajduje się poza poziomem ufności 95%, wykazując tym samym brak możliwości opisanie zebranych danych funkcją, która pozwoliłaby w skuteczny sposób opisywać i przewidywać wyniki.

6. Zastosowanie sieci neuronowych do modelowania zjawiska tarcia

W kolejnym etapie prac związanych z badaniem zjawiska tarcia zbudowano model neuronowy pozwalający skutecznie i dokładnie wyznaczać wybrane parametry występujące w procesie tarcia blach.

6.1. Ogólne zasady tworzenia modelu neuronowego

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

Model neuronowy został utworzony na podstawie danych zebranych w czasie badań tarcia, takich jak parametry procesu, czyli: nacisk nominalny, ciśnienie smarowania, lepkość kinematyczna oleju oraz wyznaczone po przeprowadzonych testach ciągnięcia pasa blachy wartości współczynnika tarcia oraz wartość parametru chropowatości S_a . Ze względu, iż w badaniach stosowano różne gatunki blachy, konieczne było uwzględnienie tej zmiennej. Do tego celu postanowiono wyznaczyć wartości charakterystyczne dla badanych materiałów i uwzględnić je na etapie budowania modelu neuronowego [123, 124]. Parametrami, które zastosowano, były właściwości materiałowe wyznaczone w statycznej próbie jednoosiowego rozciągania oraz wyniki chropowatości powierzchni zmierzone na powierzchni materiału blach w stanie dostawy. Parametry te to między innymi: wytrzymałość na rozciąganie R_m , umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, wydłużenie całkowite A_{50} , moduł Younga E , współczynnik umocnienia odkształceniowego K , wykładnik krzywej umocnienia n , średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_a , skośność S_{sk} i kurtoza S_{ku} .

W celu uporządkowania danych wejściowych i wyjściowych, tak żeby ich wartości mieściły się w pewnym zakresie, przeprowadzono procedurę mającą na celu normalizację danych. Rodzajem normalizacji użytej do uporządkowania danych była normalizacja min/max mająca na celu sprowadzenie danych do zakresu od -1 do 1 [125, 137], zgodnie z zależnością (6.1):

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} (u - l) + l \quad (6.1)$$

gdzie:

x' – wartość znormalizowana należąca do zbioru $x' = \langle l ; u \rangle$,

l – minimalna wartość zakresu danych po normalizacji,
 u – maksymalna wartość zakresu danych po normalizacji,
 x – wartość oryginalna przed normalizacją,
 x_{min} – minimalna wartość dla serii analizowanych danych,
 x_{max} – maksymalna wartość dla serii analizowanych danych.

Po wyznaczeniu danych znormalizowanych do właściwego arkusza przystąpiono do budowy modelu neuronowego, rozpoczynając od wybrania typu analizy w programie STATISTICA (sieci neuronowe) i zdefiniowania danych. W ustawieniach podstawowych określono właściwe zmienne, dzieląc je na zmienne wyjścia ilościowe, czyli wartości wyznaczonych współczynników tarcia dla poszczególnych parametrów procesu oraz parametr S_a określający chropowatość powierzchni blach po teście. Z kolei pozostałe zmienne zostały określone jako zmienne ilościowe wejścia z wyjątkiem zmiennej ciśnienia smarowania, która została sklasyfikowana jako zmienna jakościowa wejścia

Posiadając zdefiniowane zmienne, określono podzbiory oraz metodę próbkowania. Określając metodę próbkowania, wybrano metodę losowego próbkowania z podziałem na 70% zbioru uczącego, 15% zbioru testowego i 15% zbioru walidacyjnego. Zbiór uczący jest zbiorem najliczniejszym i jest to zestaw danych, który jest używany przez algorytm uczenia na podstawie klasyfikowania i budowania zależności pomiędzy danymi. Zbiór walidacyjny jest to z kolei zbiór używany do niezależnej kontroli zbieżności algorytmu uczenia na podstawie zbioru uczącego. Ostatni zbiór, czyli zbiór testowy, jest to zestaw danych, przy pomocy których testowany jest wytrenowany model sieci neuronowej na podstawie danych zawartych w zbiorze uczącym i walidacyjnym.

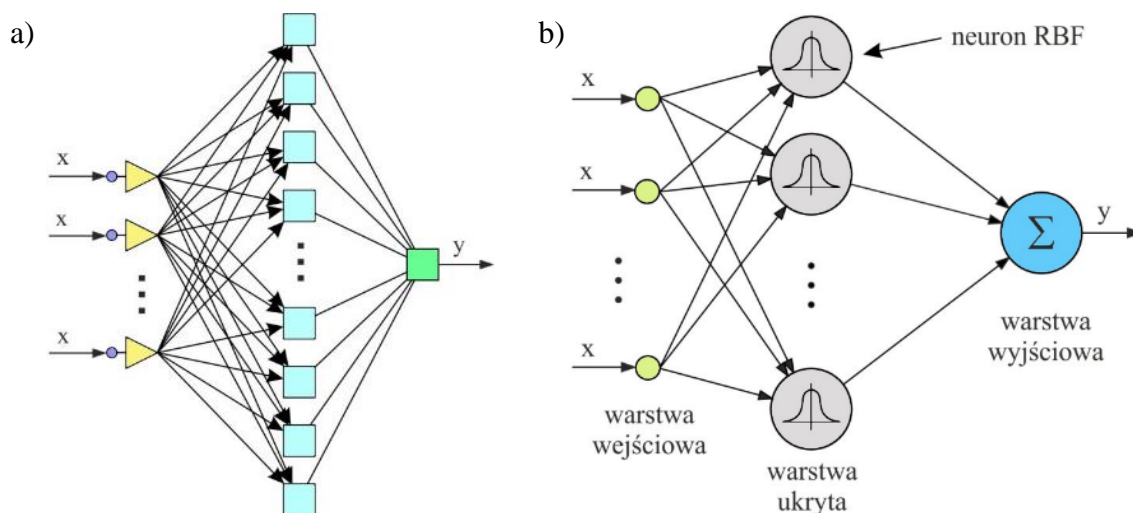
Po określeniu procentowego udziału poszczególnych zbiorów w analizowanym zestawie danych, wskazano parametry, takie jak: typ sieci, minimalną i maksymalną liczbę ukrytych neuronów oraz liczbę zamodelowanych i zachowanych sieci. Typ sieci, który został wybrany, to sieć MLP (ang. Multilayer Perceptron) [126, 127], czyli perceptron wielowarstwowy składający się z wielu warstw zawierających pojedyncze neurony. W sieci tej wyjścia neuronów warstwy poprzedniej tworzą wektor informacji przekazywanych na wejście każdego z neuronów następnej warstwy, nie łącząc się tym samym między sobą w obrębie danej warstwy. Drugi rodzaj dostępnej w programie STATISTICA sieci to sieć o radialnych funkcjach bazowych (ang. Radial Basis Functions – RBF) [128, 129] o działaniu jednokierunkowym, w którym wykorzystywana jest technika radialnych funkcji bazowych. Minimalna i maksymalna liczba neuronów, z których składać się może projektowana sieć, ma na celu sterowanie wielkością tworzonych sieci, których liczba również jest wskazywana w programie.

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

Ostatecznym krokiem tworzenia modelu neuronowego było wybranie sieci neuronowej, która charakteryzowała się najlepszą jakością testowania, której jakość określona jest za pomocą liczby w zakresie od 0 do 1, gdzie 0 oznacza brak dopasowania, a wartość 1 dokładne odzwierciedlenie wartości przewidywanych. Wybrana sieć następnie pozwoliła na otrzymanie wyników analizy w postaci wykresów i danych pozwalających na ocenienie wrażliwości danej sieci na zmiany w zmiennych, korelacji współczynników, statystyki danych i błędów dopasowania.

6.2. Budowa i analiza modelu neuronowego

Zgodnie z przedstawioną procedurą tworzenia modelu neuronowego zbudowano perceptron wielowarstwowy (rys. 6.1.a) oraz sieć o radialnych funkcjach bazowych (ang. Radial basic functions – RBF) (rys. 6.1.b). Tworząc te sieci, w celu sprawdzenia wpływu danego typu sieci na uzyskiwane wyniki, zastosowano te same parametry je tworzące, czyli rodzaj i podział na liczbę próbkowania, liczba neuronów ukrytych (minimalna liczba – 4, maksymalna liczba – 30), liczba uczonych i zachowanych sieci (ilość sieci uczących – 100, ilość sieci zachowania 15).



Rys. 6.1. Architektury: a) sieci wielowarstwowej i b) sieci o radialnych funkcjach bazowych

6.2.1. Perceptron wielowarstwowy

Zbudowany model neuronowy pozwolił na analizę zebranych danych i przewidywanie wyników dla parametrów niebadanych. Konieczne było wybranie procedury, przy pomocy której dokonywano wyboru sieci o najlepszym dopasowaniu. W tym celu wybrano metodę oceny jakości generowanych sieci w oparciu o największą wartość jakości testowania i najmniejszą wartość błędu testowania.

Po przeprowadzeniu procesu uczenia sieci, program zachował piętnaście sieci, które charakteryzowały się najlepszym dopasowaniem (tabela 6.1), z których wybrano jedną, której dopasowanie było na najwyższym poziomie. Wybrana sieć to sieć numer 5 (MLP 16-26-2) o najwyższej jakości testowania wynoszącej 0,965591 i błędzie równym 0,006906.

Tabela 6.1. Podsumowanie parametrów wygenerowanych sieci MLP

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 16-15-2	0,986329	0,917212	0,923680	0,005468	0,016219	0,041017	BFGS 57	SOS	Tanh	Logistyczna
2	MLP 16-7-2	0,977710	0,880249	0,922871	0,008832	0,019605	0,038640	BFGS 74	SOS	Tanh	Logistyczna
3	MLP 16-6-2	0,977662	0,900734	0,921362	0,008841	0,012748	0,038701	BFGS 116	SOS	Logistyczna	Liniowa
4	MLP 16-6-2	0,945554	0,893279	0,924093	0,021227	0,014781	0,035318	BFGS 31	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
5	MLP 16-26-2	0,984183	0,965591	0,918858	0,006266	0,006906	0,044888	BFGS 88	SOS	Tanh	Liniowa
6	MLP 16-17-2	0,984097	0,929608	0,933062	0,006301	0,011128	0,037456	BFGS 87	SOS	Logistyczna	Liniowa
7	MLP 16-7-2	0,976614	0,851004	0,933048	0,009251	0,012850	0,032083	BFGS 78	SOS	Logistyczna	Wykładnicza
8	MLP 16-7-2	0,970991	0,867374	0,925951	0,011492	0,013807	0,037375	BFGS 44	SOS	Logistyczna	Logistyczna
9	MLP 16-17-2	0,982149	0,921249	0,917435	0,007070	0,011895	0,044639	BFGS 78	SOS	Tanh	Liniowa
10	MLP 16-30-2	0,984912	0,907720	0,929042	0,005990	0,012877	0,040318	BFGS 70	SOS	Tanh	Wykładnicza
11	MLP 16-19-2	0,967649	0,840929	0,922970	0,012702	0,017530	0,038613	BFGS 36	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
12	MLP 16-6-2	0,972918	0,818249	0,923502	0,010710	0,012283	0,037607	BFGS 75	SOS	Logistyczna	Logistyczna
13	MLP 16-25-2	0,976860	0,855578	0,919735	0,009138	0,014989	0,043401	BFGS 54	SOS	Tanh	Wykładnicza
14	MLP 16-17-2	0,969254	0,912114	0,919150	0,012073	0,014076	0,040061	BFGS 36	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
15	MLP 16-20-2	0,985645	0,893880	0,917720	0,005721	0,014014	0,048363	BFGS 59	SOS	Tanh	Logistyczna

Po wybraniu najlepszej sieci pod kątem dopasowania parametrów testujących, przeprowadzono analizę wrażliwości, której celem było sprawdzenie wpływu poszczególnych zmiennych na dokładność sieci. Uzyskane wyniki po przeprowadzonej analizie zostały przedstawione w tabeli 6.2. Parametrem najistotniejszym, mającym największy wpływ na budowany model neuronowy, jest ciśnienie smarowania.

Tabela 6.2. Analiza wrażliwości wybranej sieci neuronowej (MLP 16-26-2)

Ciśnienie smarowania	Lepkość kinematyczna	E	Sku	R _m	R _{p0,2}	Ssk	Sa	K	Nacisk nominalny	A ₅₀	n
38,39689	3,232927	3,147627	2,236363	2,172965	2,003479	1,945743	1,804947	1,782571	1,698983	1,373600	1,081705

Założenie wartości istotności na poziomie 1.5 spowodowało, że zmienne, takie jak: wydłużenie całkowite A₅₀, wartości bezwymiarowego wykładnika krzywej umocnienia n znajdowały się na poziomie nieistotnym dla tworzenia modelu neuronowego. Dlatego przeprowadzono kolejne analizy polegające na uczeniu sieci, ale pomijając zmienne, które zostały określone jako nieistotne dla tworzonego modelu neuronowego.

Powtórne przeprowadzenie uczenia sieci, tym razem bez uwzględnienia zmiennej n, skutkowało otrzymaniem sieci, z których najlepszym dopasowaniem odznaczała się sieć numer 13 (MLP 15-11-2) o jakości testowania na poziomie 0,950013 i błędzie 0,010834 (tabela 6.3).

Tabela 6.3. Podsumowanie aktywnych sieci neuronowych wygenerowanych z pominięciem zmiennej n

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 15-10-2	0,975471	0,847256	0,932743	0,009705	0,015646	0,035843	BFGS 48	SOS	Tanh	Wykładnicza
2	MLP 15-12-2	0,980240	0,913010	0,926912	0,007825	0,012646	0,038770	BFGS 45	SOS	Tanh	Logistyczna
3	MLP 15-18-2	0,985081	0,912178	0,922348	0,005932	0,014013	0,042550	BFGS 79	SOS	Tanh	Liniowa
4	MLP 15-14-2	0,972164	0,906391	0,924672	0,010954	0,015323	0,041739	BFGS 46	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
5	MLP 15-6-2	0,975097	0,707785	0,918517	0,009876	0,017624	0,036877	BFGS 72	SOS	Tanh	Logistyczna
6	MLP 15-4-2	0,959970	0,735485	0,924629	0,015682	0,014762	0,036018	BFGS 37	SOS	Tanh	Wykładnicza
7	MLP 15-8-2	0,979019	0,837769	0,931485	0,008303	0,011091	0,035671	BFGS 96	SOS	Logistyczna	Liniowa
8	MLP 15-27-2	0,984648	0,924794	0,924708	0,006112	0,015488	0,043962	BFGS 62	SOS	Logistyczna	Logistyczna
9	MLP 15-13-2	0,984362	0,916331	0,928970	0,006221	0,011299	0,040621	BFGS 93	SOS	Logistyczna	Logistyczna
10	MLP 15-18-2	0,981210	0,843300	0,934844	0,007451	0,012181	0,032589	BFGS 77	SOS	Tanh	Liniowa
11	MLP 15-9-2	0,973318	0,914138	0,920486	0,010550	0,013788	0,039996	BFGS 39	SOS	Tanh	Logistyczna
12	MLP 15-8-2	0,975043	0,894835	0,922170	0,009829	0,018641	0,040789	BFGS 69	SOS	Logistyczna	Liniowa
13	MLP 15-11-2	0,986174	0,950013	0,922883	0,005496	0,010834	0,044363	BFGS 152	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
14	MLP 15-12-2	0,978306	0,855519	0,928343	0,008623	0,016623	0,037775	BFGS 75	SOS	Logistyczna	Logistyczna
15	MLP 15-24-2	0,985005	0,918895	0,918465	0,005950	0,013863	0,043784	BFGS 90	SOS	Logistyczna	Liniowa

Przeprowadzenie analizy danych nieuwzględniających zmiennej A₅₀ skutkowało otrzymaniem kompletu sieci neuronowych (tabela 6.4), z których najlepsze dopasowanie dla

danych testowanych wykazała sieć numer 2 (MLP 15-22-2) o jakości testowania wynoszącej 0,936565 i błędzie 0,015699.

Tabela 6.4. Podsumowanie parametrów wygenerowanych sieci neuronowych z pominięciem zmiennej A_{50}

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 15-17-2	0,982275	0,928346	0,927598	0,007023	0,011118	0,038842	BFGS 69	SOS	Logistyczna	Sinus
2	MLP 15-22-2	0,981932	0,936565	0,934236	0,007190	0,015699	0,036536	BFGS 74	SOS	Tanh	Liniowa
3	MLP 15-28-2	0,976617	0,877325	0,918035	0,009250	0,012080	0,045061	BFGS 48	SOS	Tanh	Wykładnicza
4	MLP 15-7-2	0,977327	0,862061	0,924082	0,008944	0,013759	0,042069	BFGS 85	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
5	MLP 15-11-2	0,978657	0,885142	0,922645	0,008443	0,013834	0,039700	BFGS 46	SOS	Tanh	Logistyczna
6	MLP 15-11-2	0,982572	0,870893	0,928155	0,006927	0,015098	0,041074	BFGS 80	SOS	Logistyczna	Logistyczna
7	MLP 15-4-2	0,963851	0,849698	0,937555	0,014256	0,015937	0,029212	BFGS 242	SOS	Tanh	Logistyczna
8	MLP 15-22-2	0,980824	0,925441	0,933214	0,007587	0,013500	0,037282	BFGS 71	SOS	Logistyczna	Liniowa
9	MLP 15-27-2	0,984078	0,934893	0,922363	0,006320	0,012288	0,040392	BFGS 79	SOS	Tanh	Sinus
10	MLP 15-4-2	0,961535	0,871343	0,930584	0,015007	0,016196	0,037109	BFGS 211	SOS	Tanh	Liniowa
11	MLP 15-18-2	0,972011	0,883903	0,918941	0,011007	0,015843	0,043281	BFGS 49	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
12	MLP 15-18-2	0,980590	0,907976	0,922338	0,007679	0,010844	0,039611	BFGS 78	SOS	Tanh	Liniowa
13	MLP 15-5-2	0,946009	0,887545	0,921245	0,021030	0,019309	0,035231	BFGS 31	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
14	MLP 15-13-2	0,967512	0,888793	0,927018	0,012745	0,014971	0,035101	BFGS 38	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
15	MLP 15-6-2	0,977059	0,928680	0,921394	0,009048	0,007258	0,041741	BFGS 130	SOS	Tanh	Sinus

Z kolei przeprowadzając analizę z pominięciem obu zmiennych, które znajdowały się poniżej poziomu istotności, otrzymano sieci neuronowe przedstawione w tabeli 6.5, z których siecią charakteryzującą się najlepszym dopasowaniem była sieć numer 3 (MLP 14-11-2) o jakości testowania równej 0,942851 i błędzie 0,010607.

Tabela 6.5. Podsumowanie parametrów wygenerowanych sieci neuronowych z pominięciem zmiennej A_{50} i n

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 14-20-2	0,988309	0,918366	0,933292	0,004675	0,015867	0,038982	BFGS 73	SOS	Logistyczna	Logistyczna
2	MLP 14-24-2	0,984369	0,927669	0,934713	0,006200	0,011134	0,038197	BFGS 89	SOS	Logistyczna	Sinus
3	MLP 14-11-2	0,981922	0,942851	0,934574	0,007167	0,010607	0,035231	BFGS 57	SOS	Tanh	Logistyczna
4	MLP 14-14-2	0,978242	0,913042	0,919822	0,008581	0,013286	0,043006	BFGS 59	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
5	MLP 14-15-2	0,985875	0,919064	0,932486	0,005619	0,011629	0,045420	BFGS 78	SOS	Tanh	Wykładnicza
6	MLP 14-5-2	0,967725	0,845479	0,924241	0,012700	0,016684	0,035405	BFGS 71	SOS	Tanh	Wykładnicza
7	MLP 14-20-2	0,978684	0,913164	0,914992	0,008428	0,016940	0,041304	BFGS 56	SOS	Logistyczna	Logistyczna
8	MLP 14-15-2	0,983249	0,922629	0,918914	0,006640	0,007578	0,043130	BFGS 77	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
9	MLP 14-22-2	0,970178	0,904082	0,922766	0,011711	0,014029	0,041292	BFGS 41	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
10	MLP 14-20-2	0,974923	0,907845	0,932911	0,009915	0,015904	0,038820	BFGS 52	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
11	MLP 14-14-2	0,984427	0,938379	0,920369	0,006171	0,011003	0,045384	BFGS 110	SOS	Logistyczna	Sinus
12	MLP 14-10-2	0,981796	0,896857	0,928589	0,007225	0,011797	0,043339	BFGS 64	SOS	Tanh	Wykładnicza
13	MLP 14-5-2	0,961004	0,787797	0,918944	0,015272	0,015206	0,037232	BFGS 58	SOS	Logistyczna	Logistyczna
14	MLP 14-11-2	0,976676	0,914164	0,924166	0,009196	0,014690	0,041062	BFGS 55	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
15	MLP 14-10-2	0,975650	0,906381	0,916909	0,009612	0,016407	0,045018	BFGS 57	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza

W wyniku przeprowadzonej analizy wykazano, że pominięcie dowolnej zmiennej charakteryzującej się nawet niewielkim wpływem na tworzony model neuronowy, skutkuje pogorszeniem dopasowania sieci oraz zwiększeniem błędu testowania. W związku z tym do dalszych prac związanych z analizą zebranych danych postanowiono zastosować sieć MLP pierwotnie zbudowaną, uwzględniającą wszystkie zmienne.

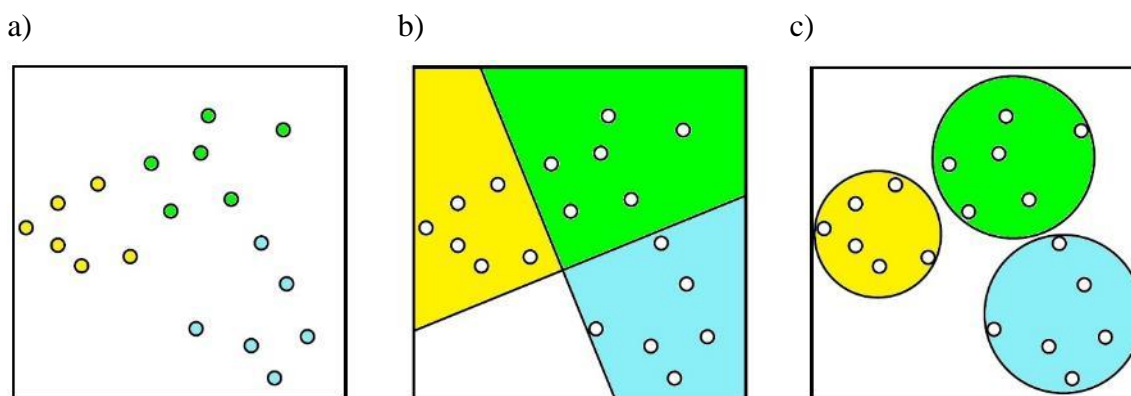
Na wstępie przeprowadzono ogólną analizę informacji podsumowujących dokładność i budowę funkcji. Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 6.6 dobrano strukturę sieci składającą się z 16 neuronów wejściowych wynikających z 11 wejść ilościowych oraz jednego wejścia jakościowego składającego się z pięciu zmiennych, 26 neuronów ukrytych i 2 neuronów wyjściowych odpowiadających zmiennym określonym jako wyjścia ilościowe, czyli współczynnik tarcia oraz chropowatość powierzchni próbki po procesie kształtowania wyrażona parametrem S_a . W przypadku dokładności wygenerowanej sieci widoczna jest bardzo dobra jakość, nie tylko dla zbioru testowanego (0,965591), ale również zbioru uczącego (0,984183) i zbioru walidacyjnego (0,918858). Porównując wartości błędów dla różnych prób wyznaczonych za pomocą funkcji sumy kwadratów błędu (ang. sum of squares – SOS), czyli funkcji opisującej sumę kwadratów różnic między wartością oczekiwaną a rzeczywistą można zaobserwować, że występujący błąd uczenia i testowania jest bardzo mały i nie przekracza 0,01. Z kolei błąd walidacji jest na poziomie 0,044888. Algorytmem, który został zastosowany do zbudowania przedstawionego modelu neuronowego, jest algorytm BFGS 88, czyli algorytm Broydena – Fletchera – Goldfarba – Shanno stosowany do rozwiązywania problemów nieliniowych. Algorytm BFGS jest algorytmem quasi-Newtonowskim, w którym nie oblicza się macierzy Hassego drugiej pochodnej, lecz się ją aproksymuje. Natomiast stosowane w modelowaniu sieci funkcje aktywacji umożliwiają wzbudzenie neuronów ukrytych i wyjściowych, pozwalając na obliczenie wartości zadanego zadania. Doborem właściwej funkcji zajmuje się program na podstawie analizy wartości błędu w zależności od zastosowanej funkcji. Funkcja, która została użyta do aktywacji warstwy ukrytej, to tangens hiperboliczny, zaś do aktywacji warstwy wyjściowej zastosowano funkcję liniową (tabela 6.6).

Tabela 6.6. Podsumowanie parametrów tworzących sieć MLP

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
5	MLP 16-26-2	0,984183	0,965591	0,918858	0,006266	0,006906	0,044888	BFGS 88	SOS	Tanh	Liniowa

6.2.2. Sieć o radialnych funkcjach bazowych

Po wstępnym przeprowadzeniu analizy z zastosowaniem perceptronu wielowarstwowego przeprowadzono badania mające na celu sprawdzenie zastosowania sieci o radialnych funkcjach bazowych do analizy zjawiska tarcia. Różnice pomiędzy perceptronem wielowarstwowym a siecią o radialnych funkcjach bazowych najlepiej opisuje przedstawiony rysunek 6.2, według którego działanie sieci MLP polega na podziale przestrzeni pomiędzy sygnałami wejściowymi za pomocą hiperpłaszczyzn dzielących przestrzeń danych na poszczególne obszary charakteryzujące poszczególne klasy. Wspomniane hiperpłaszczyzny są odpowiednikami linii prostych w przestrzeni dwuwymiarowej. Z kolei sieć RBF w swoim działaniu również dzieli przestrzeń pomiędzy sygnałami wejściowymi, lecz wykonuje to za pomocą hipersfer będących wielowymiarowym odpowiednikiem okręgów w przestrzeni dwuwymiarowej.



Rys. 6.2. a) rozkład sygnałów wejściowych w układzie dwuwymiarowym, b) realizacja zadania klasyfikacyjnego przez sieć MLP, c) realizacja zadania klasyfikacyjnego przez sieć RBF

Analizę z zastosowaniem sieci o radialnych funkcjach bazowych rozpoczęto, podobnie jak w przypadku sieci MLP, od wyznaczenia jednej z piętnastu zachowanych sieci (tabela 6.7), które wykazały najlepsze dopasowanie ze stu przeanalizowanych. Jako dane wejściowe i dane wyjściowe zastosowano te same parametry służące do budowania sieci wielowarstwowych opisanych w rozdziale 6.2.

Tabela 6.7. Współczynniki determinacji R^2 (jakość) i błędy wygenerowanych sieci neuronowych metodą RBF wyznaczone niezależnie dla poszczególnych zbiorów danych

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	RBF 16-17-2	0,511117	-0,094077	0,562280	0,148079	0,108124	0,130355	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
2	RBF 16-26-2	0,474831	0,383337	0,533763	0,150456	0,098725	0,158938	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
3	RBF 16-30-2	0,670660	0,374264	0,632868	0,107249	0,099797	0,113717	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
4	RBF 16-20-2	0,479810	0,153297	0,602868	0,153394	0,112982	0,130200	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
5	RBF 16-6-2	0,448802	0,218592	0,510464	0,200472	0,122347	0,179128	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
6	RBF 16-20-2	0,670245	0,099460	0,591168	0,118407	0,103785	0,113285	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
7	RBF 16-8-2	0,463835	0,206148	0,516765	0,198037	0,114647	0,171773	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
8	RBF 16-21-2	0,515515	0,708303	0,654997	0,144503	0,072110	0,124309	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
9	RBF 16-28-2	0,654351	0,373593	0,647634	0,112630	0,100212	0,114774	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
10	RBF 16-20-2	0,545003	0,244245	0,550254	0,140626	0,100958	0,115380	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
11	RBF 16-13-2	0,524531	0,540272	0,557530	0,145194	0,075788	0,121197	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
12	RBF 16-7-2	0,323970	0,350144	0,564856	0,200588	0,123187	0,178869	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
13	RBF 16-26-2	0,513581	0,065322	0,518059	0,147603	0,101835	0,132658	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
14	RBF 16-24-2	0,530971	0,485819	0,514829	0,135528	0,065818	0,117659	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
15	RBF 16-12-2	0,512279	0,290695	0,545521	0,146482	0,121142	0,129802	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa

Z przedstawionych w tabeli 6.7 sieci neuronowych do dalszej analizy wybrano sieć numer 8 (RBF 16-21-2) charakteryzującą się najlepszym dopasowaniem testowania na poziomie 0,708303 oraz błędem testowania wynoszącym 0,072110. Następnie przeprowadzono analizę wrażliwości (tabela 6.8), z której wynika, że parametrem najmniej istotnym w tworzeniu modelu sieci jest moduł Younga (E), którego wartości wskaźnika istotności jest mniejsza od 0,98.

Tabela 6.8. Analiza wrażliwości wybranej sieci neuronowej (RBF 16-21-2)

Ciśnienie smarowania	Lepkość kinematyczna	K	Sa	R_m	Nacisk nominalny	Ssk	$R_{p0,2}$	A_{50}	n	Sku	E
1,513409	1,041464	1,002044	1,001579	1,001437	0,992574	0,990138	0,987780	0,985385	0,981375	0,980367	0,978245

Powtórne przeprowadzenie uczenia sieci, tym razem bez uwzględnienia zmiennej wejściowej E , skutkowało otrzymaniem jakości testowania na poziomie 0,480707 oraz wielkości błędu testowania na poziomie 0,079876 dla najlepszej z zachowanych sieci neuronowych (tabela 6.9).

Tabela 6.9. Współczynniki determinacji R^2 (jakość) i błędy sieci neuronowych wygenerowanych z pominięciem zmiennej wejściowej E

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	RBF 15-27-2	0,731261	0,427222	0,781267	0,092511	0,078444	0,078077	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
2	RBF 15-9-2	0,560285	0,362744	0,644009	0,136844	0,114346	0,109774	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
3	RBF 15-21-2	0,586615	0,122406	0,601903	0,129102	0,090897	0,131536	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
4	RBF 15-28-2	0,715809	0,443944	0,699552	0,097688	0,081389	0,111070	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
5	RBF 15-17-2	0,650114	0,314324	0,710160	0,115477	0,094897	0,127578	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
6	RBF 15-25-2	0,673795	0,314023	0,744155	0,108427	0,092428	0,093060	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
7	RBF 15-28-2	0,670887	0,426739	0,630266	0,112620	0,095267	0,123498	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
8	RBF 15-14-2	0,485983	0,163317	0,602998	0,152927	0,102874	0,120833	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
9	RBF 15-21-2	0,521963	0,410173	0,659328	0,145947	0,086645	0,105942	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
10	RBF 15-23-2	0,502253	0,281178	0,616938	0,142459	0,108839	0,126400	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
11	RBF 15-16-2	0,660925	0,444788	0,706961	0,111884	0,098545	0,097606	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
12	RBF 15-24-2	0,549913	0,321420	0,633009	0,140362	0,092589	0,111437	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
13	RBF 15-22-2	0,614206	0,404272	0,610522	0,124689	0,095319	0,107638	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
14	RBF 15-11-2	0,469039	0,346142	0,606506	0,157672	0,106030	0,107631	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
15	RBF 15-27-2	0,606984	0,480707	0,638597	0,121960	0,079876	0,090714	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa

Na podstawie przeprowadzonej próby zbudowania modelu neuronowego o jak najlepszej jakości i najmniejszym błędzie próby testowania, przy pominięciu modułu Younga E , czyli zmiennej charakteryzującej się najniższym poziomem istotności, można zauważyć, że przeprowadzona zmiana spowodowała obniżenie jakości modelu neuronowego w stosunku do modelu zbudowanego z zastosowaniem wszystkich zmiennych wejściowych.

Chcąc przeprowadzić analizę procesu tarcia za pomocą modelu neuronowego, który w jak najlepszy sposób odwzorowuje warunki tarcia, przeprowadzono analizę pierwotnie utworzonego modelu sieci RBF z uwzględnieniem wszystkich 16. parametrów wejściowych. Na wstępie opisano model, który charakteryzował się najlepszą dokładnością (tabela 6.10).

Tabela 6.10. Podsumowanie statystyk sieci o najlepszej jakości

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
8	RBF 16-21-2	0,515515	0,708303	0,654997	0,144503	0,072110	0,124309	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa

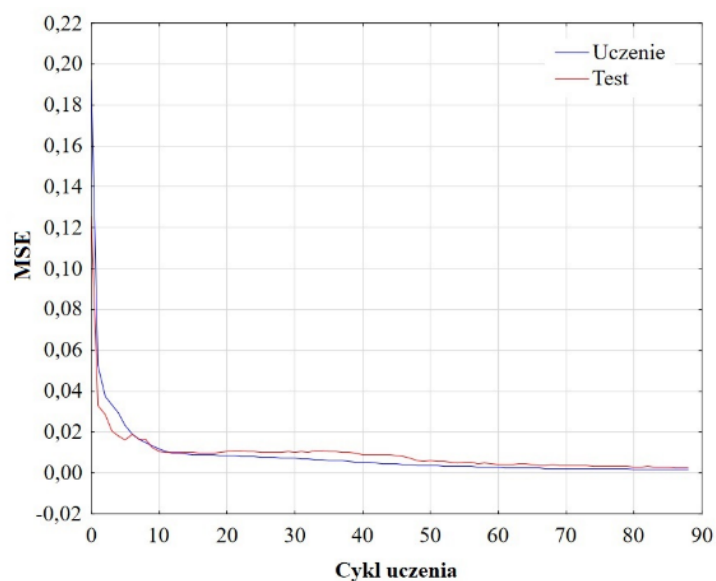
Na podstawie tabeli 6.10 można wywnioskować, że najlepszą siecią RBF jest sieć o strukturze 16 neuronów wejściowych, 21 neuronów ukrytych i 2. neuronach wyjściowych. Ta budowa sieci pozwoliła na osiągnięcie jakości: 0,515515 (uczenie), 0,708303 (testowanie) i 0,654997 (walidacja) i kolejno wielkości błędu SOS na poziomie 0,144503 dla prób uczenia, 0,072110 dla prób testowania i 0,124309 dla prób walidacji. Przedstawiony

model neuronowy został zbudowany w oparciu o algorytm uczenia RBFT (ang. Redundant Byzantine Fault Tolerance), która identyfikuje wadliwe węzły i nadaje im niższą wartość udziału w predykcji danych. Do aktywacji neuronów znajdujących się w warstwie ukrytej zastosowano funkcję Gaussa, a do aktywacji neuronów warstwy wyjściowej zastosowano funkcję liniową.

6.2.3. Analiza danych przy użyciu najkorzystniejszego modelu neuronowego

Po przeprowadzeniu porównania sieci MLP oraz RBF pod kątem możliwości predykcji parametrów wyjściowych przy ich użyciu, zdecydowano, że do dalszej analizy zostanie zastosowana sieć wielowarstwową o architekturze MLP 16-26-2, która w podsumowaniu charakteryzowała się lepszą korelacją wartości zmierzonych i wartości przewidywanych wyrażoną wskaźnikiem jakości testowania oraz mniejszym błędem dla zbioru testowego.

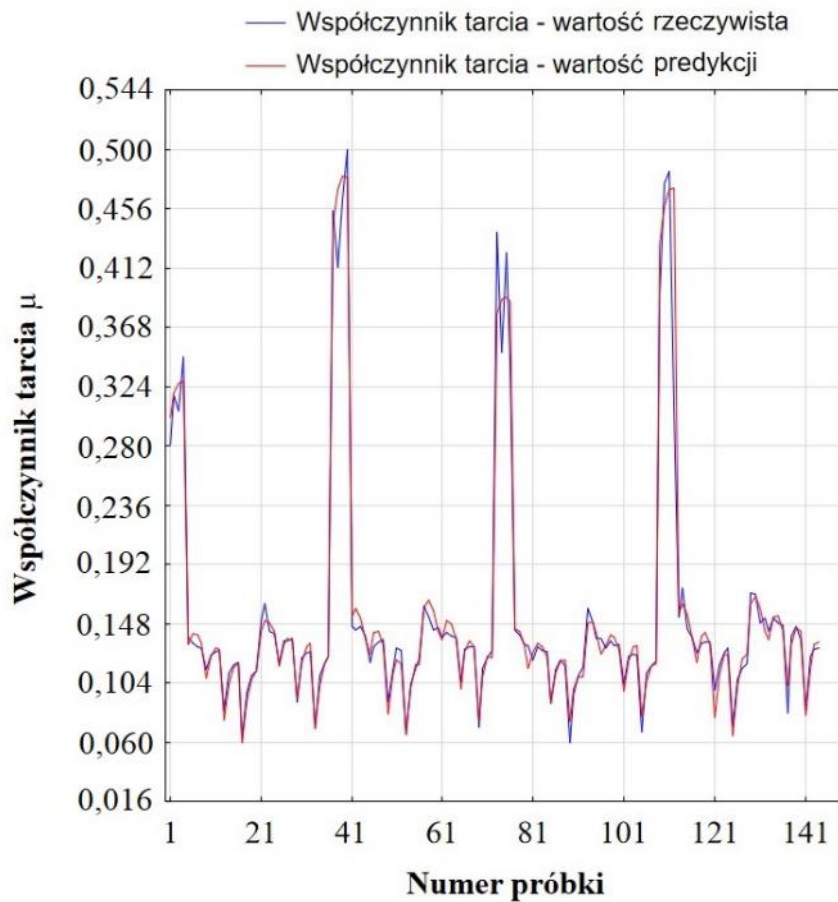
Celem określenia dokładności wartości predykcji w stosunku do wartości zmierzonych, przeanalizowano proces uczenia sieci w oparciu o wykres obrazujący zmianę błędu średniokwadratowego (ang. Mean Squared Error – MSE) w stosunku do kolejnych cykli uczenia (rys. 6.3).



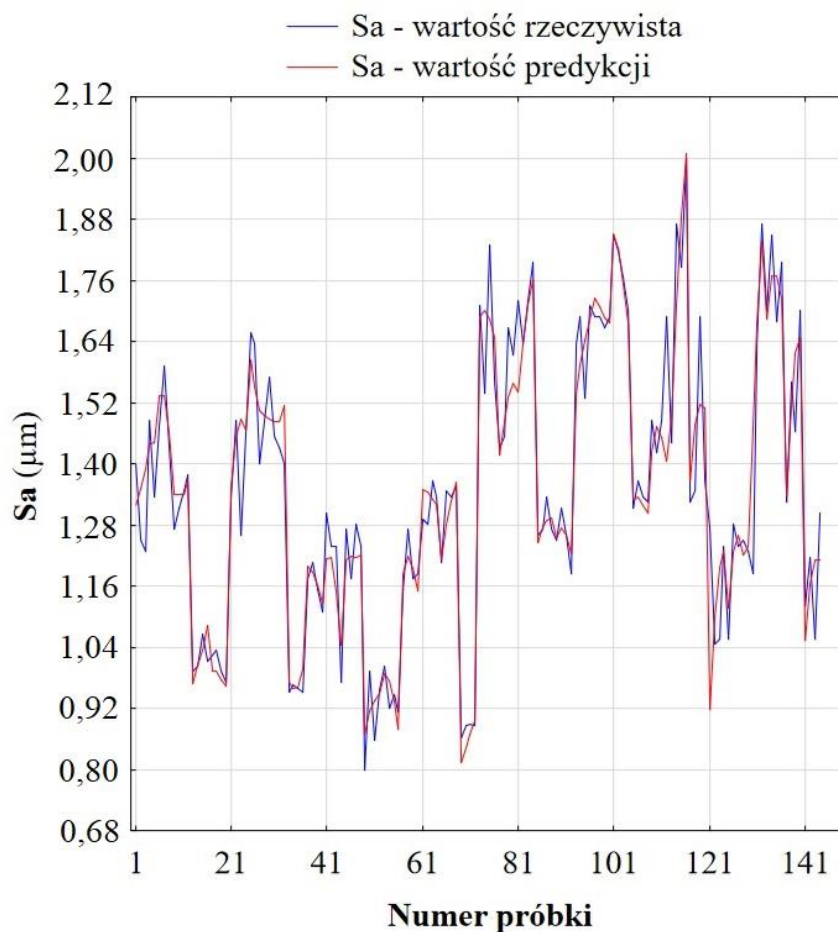
Rys. 6.3. Wykres uczenia sieci MLP 16-26-2

Analizując wykres uczenia sieci przedstawiony na rysunku 6.3, można zaobserwować charakterystyczny przebieg błędu MSE zależnie od cyklu (epoki) uczenia. Z wykresu wynika, że największe wartości błędu predykcji dla wybranego modelu neuronowego można zaobserwować w początkowej fazie uczenia, które następnie systematycznie zmniejszają się wraz z kolejnymi cyklami uczenia. Opisywana tendencja

spadkowa utrzymuje się do około 60. cyklu uczenia, kiedy to wartość błędu przestaje zmniejszać się i utrzymuje się do końca na stałym poziomie. Przedstawiony błąd na wykresie uczenia jest oparty na zależności pomiędzy wartościami rzeczywistymi a wartościami predykcji. Żeby to lepiej zobrazować, porównano wartości rzeczywiste z wartościami predykcji, a wynik tego porównania został przedstawiony na rysunkach 6.4 i 6.5.



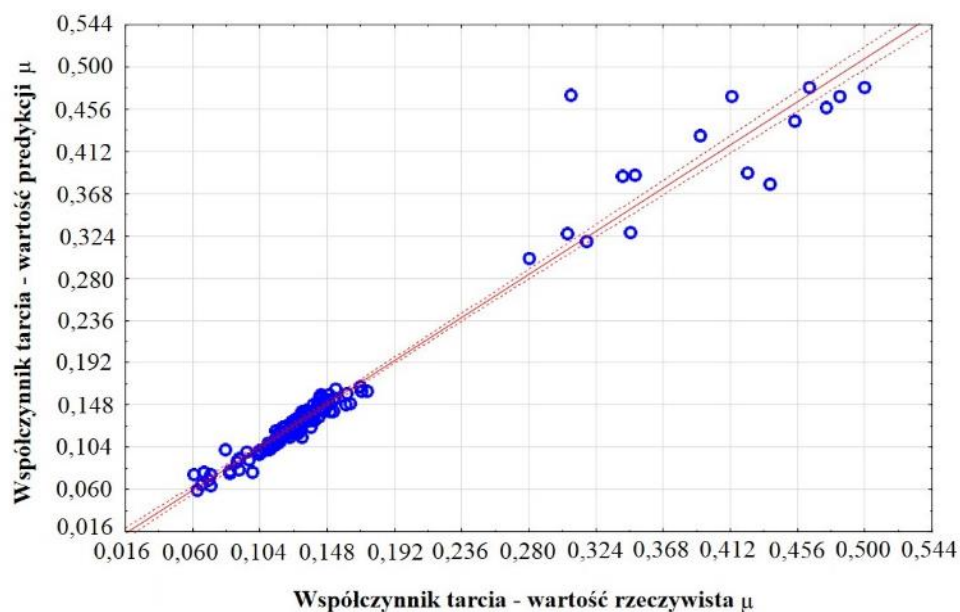
Rys. 6.4. Zestawienie wartości rzeczywistych i predykcji współczynnika tarcia przez sieć MLP 16-26-2



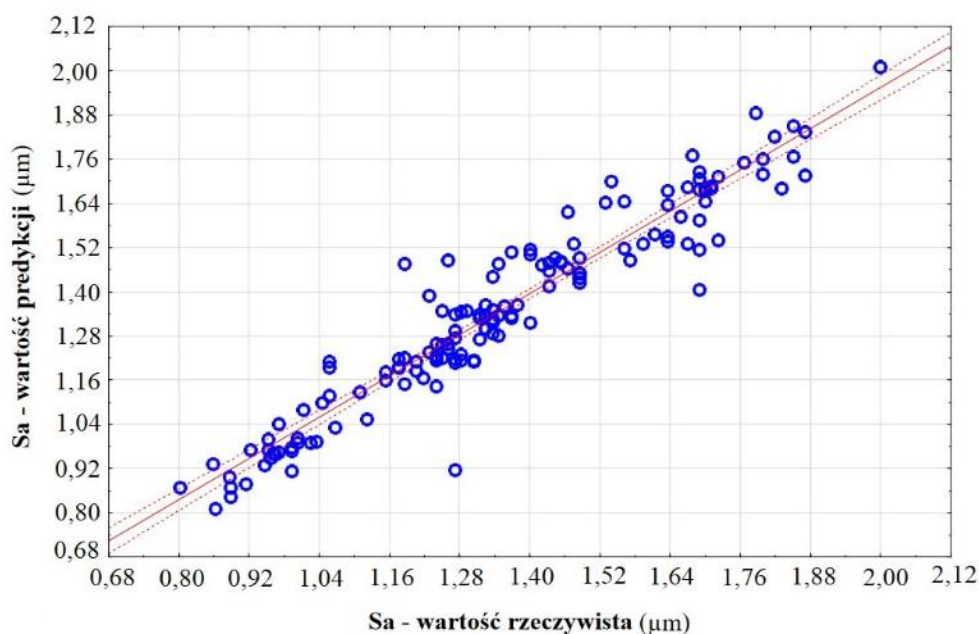
Rys. 6.5. Zestawienie wartości rzeczywistych i predykcji parametru Sa chropowatości powierzchni przez sieć MLP 16-26-2

Przedstawione wykresy na rysunkach 6.4 i 6.5 obrazują dopasowanie wartości rzeczywistych i predykcji dla parametrów, takich jak: współczynnik tarcia (rys. 6.4) i parametr Sa chropowatości powierzchni (rys. 6.5). Na podstawie przeprowadzonej analizy przebiegów poszczególnych parametrów można zaobserwować, że wartości przewidywane są obarczone błędem w stosunku do wartości zmierzonych, jednakże zarówno wartości zmierzone, jak i przewidywane zachowują podobną charakterystykę. Jest to widoczne w przypadku analizy wartości współczynnika tarcia jak również parametru Sa.

W celu lepszego zobrazowania dopasowania wartości predykcji do wartości zmierzonych sporządzono wykresy rozrzutu przedstawione na rysunkach 6.6-6.7.



Rys. 6.6. Wykres rozrzutu dla współczynnika tarcia

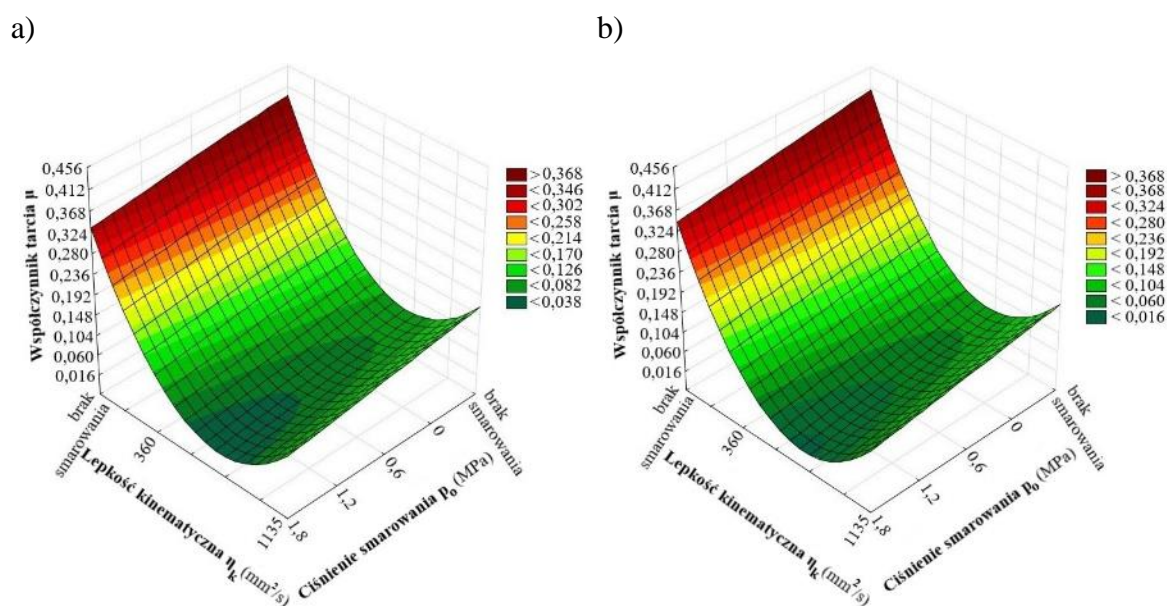


Rys. 6.7. Wykres rozrzutu dla parametru Sa chropowatości powierzchni

Wykresy przedstawione na rysunkach 6.6-6.7 ilustrują rozproszenie wartości rzeczywistych względem wartości predykcji dla współczynnika tarcia (rys. 6.6) oraz parametru Sa (rys. 6.7) dla 95 % poziomu ufności. Patrząc na specyfikę przedstawionych wykresów, widać, że analizowane wartości są rozmieszczone prawidłowo, równomiernie wzdłuż przekątnej. Analizując strukturę danych przedstawionych na wykresach, można zaobserwować różnice w dopasowaniu wartości współczynnika tarcia w stosunku do wartości parametru Sa. W przypadku danych przedstawiających rozrzut wartości współczynnika tarcia zmierzonego i przewidzianego widoczny jest wyraźny podział na dwie grupy. Pierwsza z nich skupiona w zakresie od 0,06 do 0,19, gdzie wartości cechują się

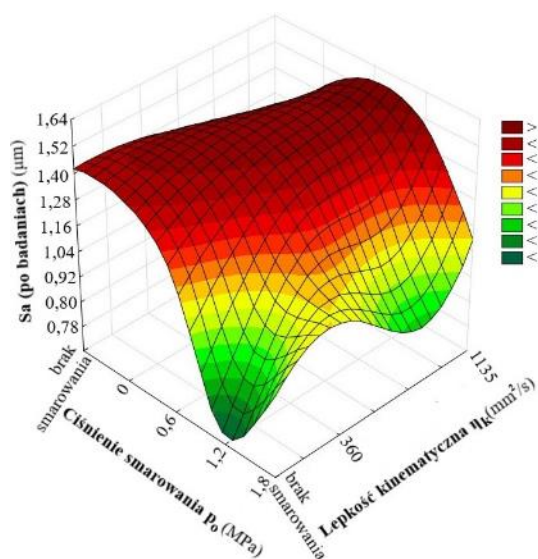
bardzo małym rozrzutem, z kolei druga grupa zawierająca się w przedziale od 0,28 do 0,5 cechuje się stosunkowo większą wartością, różniącą wartości zmierzone i przewidziane. Grupa wartości zawierająca się w przedziale od 0,28 do 0,5 jest to grupa 16 punktów, w skład której wchodzi wartości odpowiadające warunkom tarcia na sucho. Z kolei wykres rozrzutu dla parametru Sa (rys. 6.7) nie przejawia podziału, jak ma to miejsce na wykresie na rysunku 6.6. W przypadku parametru Sa odchylenia wartości przewidzianych w stosunku do wartości zmierzonych są wyraźnie większe i występują w całym analizowanym przedziale.

Za pomocą wykresów powierzchniowych zobrazowano wpływ poszczególnych parametrów procesu tarcia blachy, takich jak: nacisk nominalny p_n , ciśnienia oleju p_o , lepkość kinematyczna zastosowanego środka smarującego oraz chropowatość powierzchni blachy w stanie dostawy wyrażona parametrem Sa, na wartość współczynnika tarcia występującego podczas tarcia blachy oraz chropowatości powierzchni po badaniu. Porównano wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych z wynikami wygenerowanymi na podstawie zbudowanego modelu neuronowego.

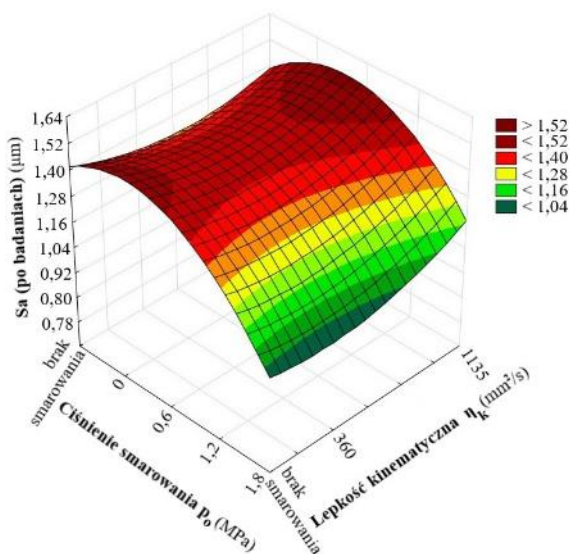


Rys. 6.8. Wpływ lepkości i ciśnienia smarowania na wartość współczynnika tarcia: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

a)



b)



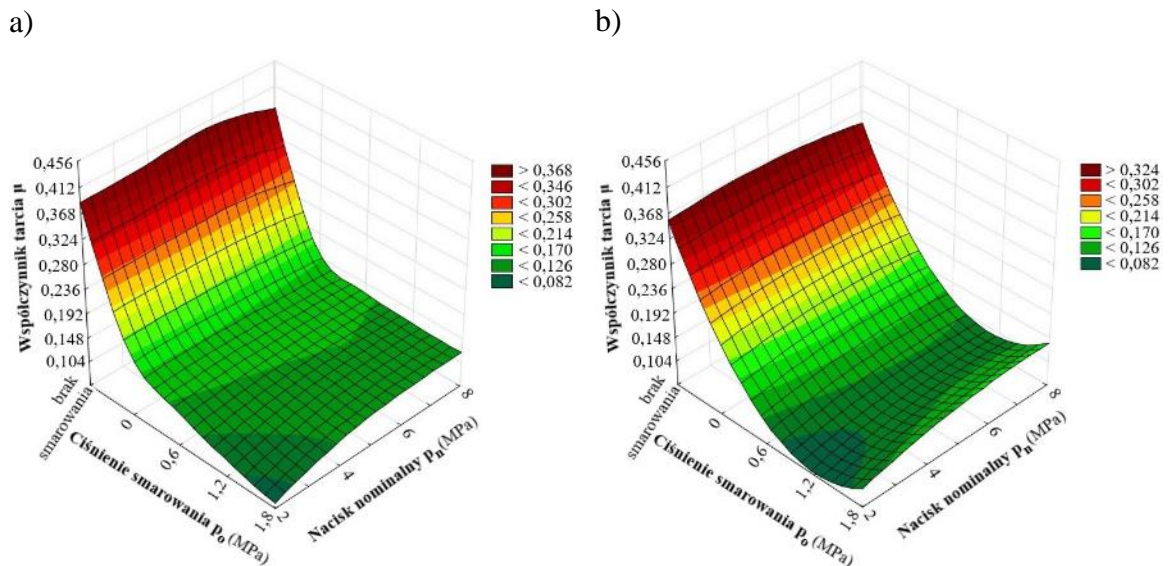
Rys. 6.9. Wpływ lepkości i ciśnienia smarowania na chropowatość, parametr S_a powierzchni blachy po badaniach: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

Na podstawie rysunków 6.8 oraz 6.9, na których przedstawione zostały wykresy wpływu ciśnienia smarowania p_0 oraz lepkości kinematycznej oleju na współczynnik tarcia (rys. 6.8) i chropowatość powierzchni (rys. 6.9), można dostrzec bardzo zbliżoną charakterystykę zachowania wartości parametrów wyjściowych, bez względu na to czy dane zostały otrzymane na podstawie przeprowadzonego doświadczenia, czy predykcji z zastosowaniem sieci typu MLP 16–26–2.

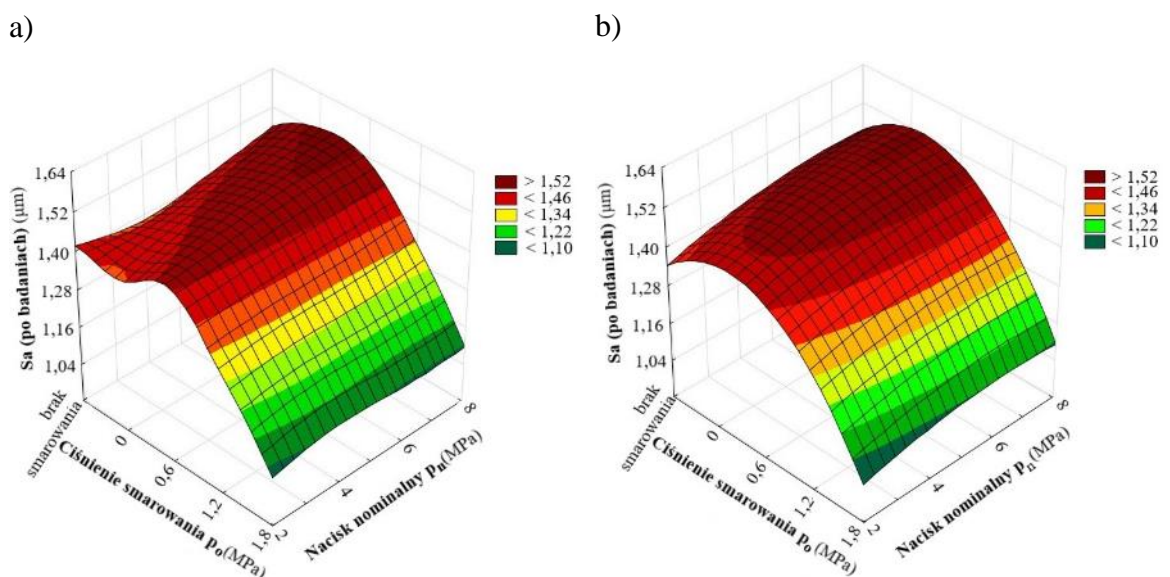
Podczas analizowania przebiegu wartości współczynnika tarcia zależnie od zastosowanego ciśnienia smarowania oraz lepkości kinematycznej (rys. 6.8) dostrzeżono wyraźną różnicę w wartościach współczynnika tarcia zależnie od występującej lepkości. Wykresy na rysunku 6.8 jednoznacznie wskazują, że wzrost lepkości, czyli przejście z tarcia suchego do tarcia z zastosowaniem oleju, ma bardzo duży wpływ na wartość współczynnika tarcia. Wpływ ten jest wyraźny do pewnej wartości, po której przekroczeniu można dostrzec spłaszczenie powierzchni, a nawet miejscowy wzrost wartości współczynnika tarcia. Na rysunku 6.8 można również wskazać wpływ ciśnienia smarowania w zestawieniu z zastosowaną lepkością kinematyczną. W tym przypadku wyraźna jest tendencja zmniejszenia się wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem ciśnienia oleju. Porównując wpływ ciśnienia smarowania i lepkości na parametr S_a chropowatości powierzchni, widoczna jest przeważająca rola ciśnienia smarowania. Niskie wartości ciśnienia smarowania oraz brak smarowania powoduje pogorszenie jakości powierzchni próbki po teście. Z kolei zastosowanie większych wartości ciśnienia smarowania powoduje

sukcesywnie zmniejszanie się wartości parametru Sa. Wpływ drugiego parametru testu, czyli lepkości (rys. 6.9), nie jest możliwy do jednoznacznej interpretacji.

Wpływ ciśnienia smarowania p_o i nacisku nominalnego p_n na wartość współczynnika tarcia i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni przedstawiono na rysunkach 6.10 i 6.11.



Rys. 6.10. Wpływ ciśnienia smarowania i nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

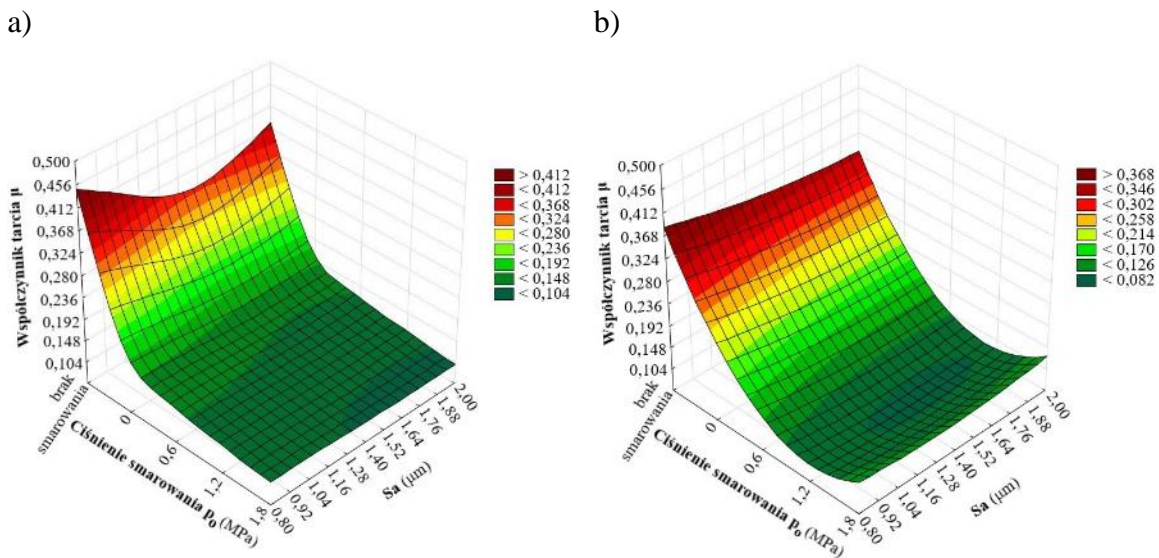


Rys. 6.11. Wpływ ciśnienia smarowania i nacisku nominalnego na chropowatość powierzchni blachy (parametr Sa) po badaniach: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP sieci 16–26–2

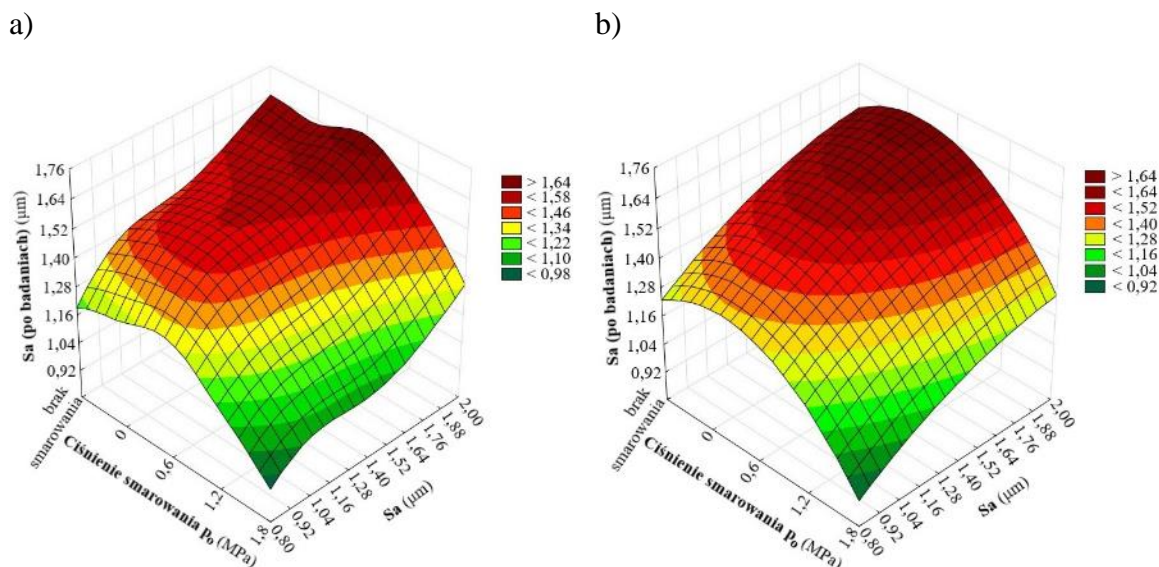
Przedstawione wykresy na rysunkach 6.10 i 6.11 zachowują podobną tendencję jak w przypadku wykresów przedstawionych na rysunkach 6.8 i 6.9. Parametrem przodującym,

którego zmiana bardzo silnie wpływa na wyniki, jest ciśnienie smarowania. Jego wpływ na wartość współczynnika tarcia jest widoczny przede wszystkim w zakresie przejścia z tarcia suchego do tarcia z zastosowaniem smarowania, w którym dalszy wzrost ciśnienia smarowania powoduje zmniejszenie wartości współczynnika tarcia. Wpływ zwiększającego się ciśnienia smarowania nie jest tak widoczny, jak ma to miejsce w przypadku przejścia pomiędzy tarciami suchym i z zastosowaniem oleju. Drugim parametrem analizowanym na rysunku 6.10 jest nacisk nominalny, którego wartość również wpływa na współczynnik tarcia, powodując wzrost współczynnika tarcia wraz ze zwiększaniem się nacisku. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że wpływ ciśnienia smarowania jest zależny od zastosowanego nacisku, jest to szczególnie widoczne dla nacisków o małej wartości, dla których wzrost ciśnienia smarowania skutkuje wyraźnym obniżeniem wartości współczynnika tarcia w stosunku do większych wartości nacisków.

Analizując rysunek 6.11, można dostrzec, że wzrost ciśnienia smarowania skutkuje poprawieniem jakości powierzchni, co opisuje wartość wskaźnika Sa, na którego wpływa również nacisk nominalny, którego wzrost powoduje jednoczesny wzrost chropowatości powierzchni blachy.



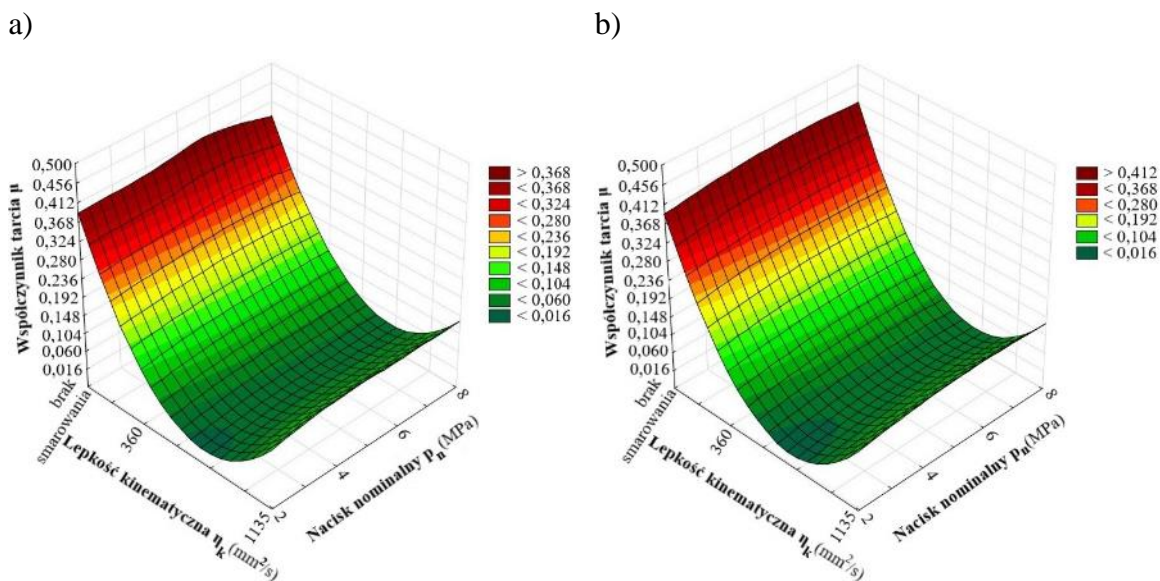
Rys. 6.12. Wpływ ciśnienia smarowania i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy na wartość współczynnika tarcia: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2



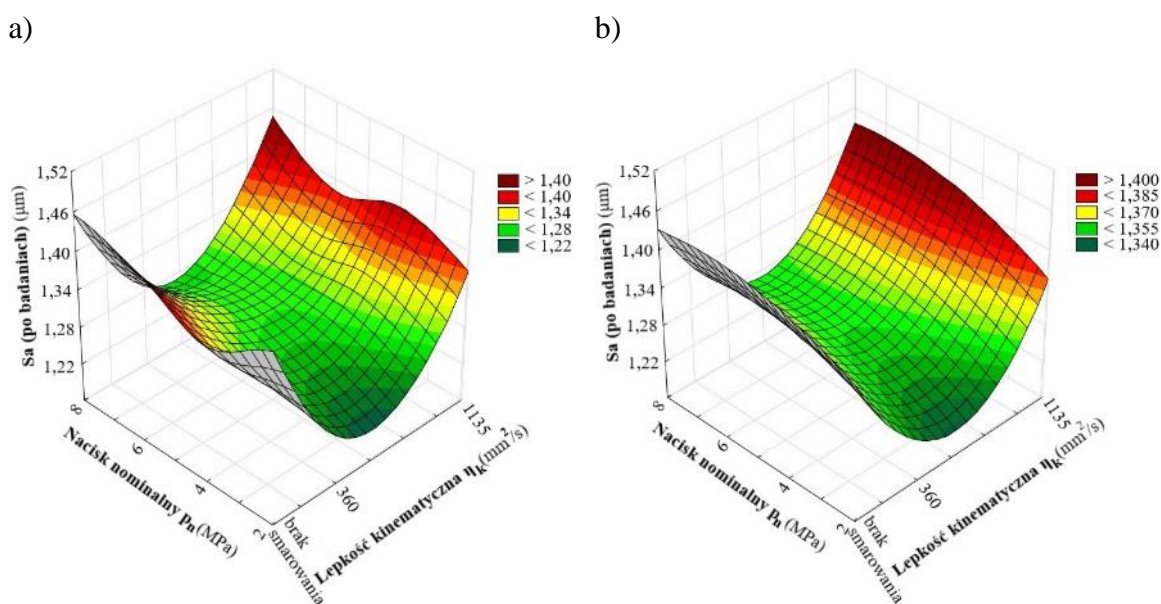
Rys. 6.13. Wpływ ciśnienia smarowania i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy na chropowatość powierzchni blachy (parametr Sa) po badaniach:

a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

Wykresy przedstawione na rysunkach 6.12 i 6.13 ilustrują wpływ ciśnienia smarowania i chropowatości blach w stanie dostawy na współczynnik tarcia i chropowatość powierzchni blach po badaniach tarcia. Charakter przedstawionych wykresów ponownie potwierdza wpływ parametrów wejściowych, których zwiększenie skutkuje wyraźnym zmniejszeniem się wartości współczynnika tarcia. W zakresie zwiększającej się wartości ciśnienia smarowania do wartości maksymalnej skutkuje nieprzerwanym zmniejszaniem się współczynnika tarcia, na którego wartość wpływa dodatkowo wskaźnik Sa, którego wzrost pozytywnie wpływa na tarcie, obniżając współczynnik tarcia. Z kolei analizując zmianę jakości powierzchni wskutek przeprowadzonych badań z zastosowaniem różnego ciśnienia smarowania, można dostrzec, że charakter zmiany chropowatości jest przede wszystkim zależny od ciśnienia smarowania, które ogranicza zużycie powierzchni wraz ze wzrostem ciśnienia oleju.



Rys. 6.14. Wpływ lepkości oleju i nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia:
 a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

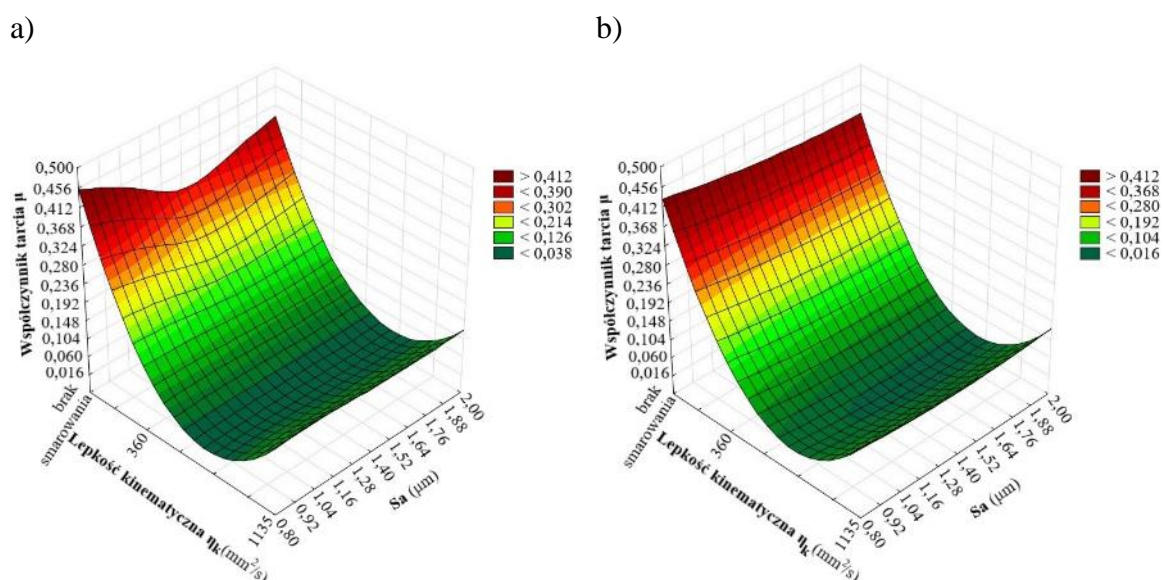


Rys. 6.15. Wpływ lepkości oleju i nacisku nominalnego na chropowatość powierzchni blachy (parametr Sa) po badaniach: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

Wpływ zestawienia lepkości kinematycznej i nacisku nominalnego na współczynnik tarcia oraz chropowatość powierzchni po badaniach przedstawiono na rysunkach 6.14 oraz 6.15. Na ich podstawie można stwierdzić, że parametrem wejściowym mającym większy wpływ na zmienne wyjściowe jest lepkość kinematyczna, której zmiana generuje wyraźne zmiany w kształcie powierzchni wykresu. Opisując przebieg wykresu na rysunku 6.14, można stwierdzić, że wzrost lepkości powoduje zmniejszenie się współczynnika tarcia do

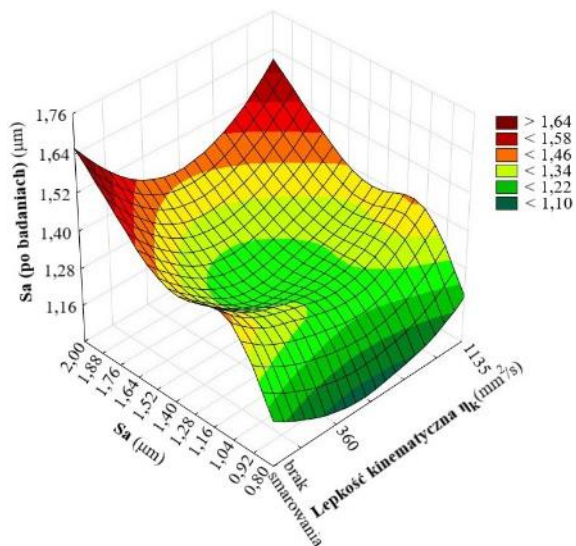
momentu granicznej wartości lepkości, od której wartość współczynnika tarcia ponownie się zwiększa. Wpływ lepkości na jakość powierzchni opisaną parametrem Sa (rys. 6.15) wykazuje podobną tendencję. A mianowicie, analizując wpływ lepkości od jej minimalnej wartości, zaobserwowano spadek chropowatości w zakresie do połowy skali, po której przekroczeniu jakość powierzchni powtórnie stopniowo zaczęła ulegać pogorszeniu. W przypadku wpływu nacisku nominalnego na rysunkach 6.14 oraz 6.15 widoczna jest zależność jedynie w zakresie małych wartości współczynnika tarcia (rys. 6.14) oraz małych wartości wskaźnika Sa (rys. 6.15), gdzie wzrost wartości nacisku spowodował wzrost współczynnika tarcia oraz parametru Sa chropowatości powierzchni blachy po badaniach.

W kolejnej analizie zobrazowano wpływ lepkości kinematycznej oleju i parametru Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy na wartość współczynnika tarcia (rys. 6.16) i chropowatość powierzchni blachy (parametr Sa) po badaniach (rys. 6.17).

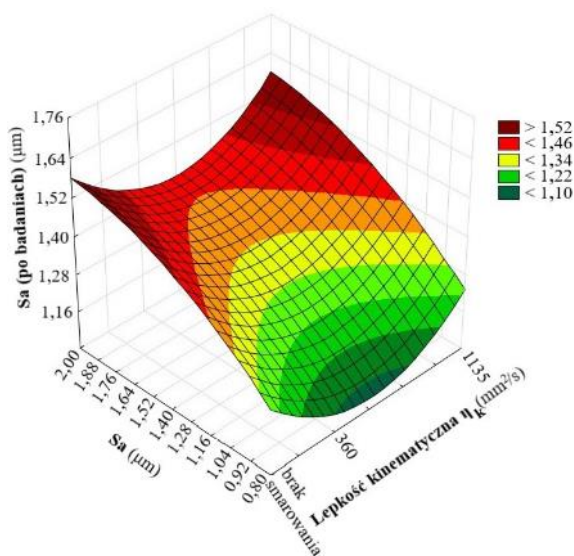


Rys. 6.16. Wpływ lepkości oleju i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy na wartość współczynnika tarcia: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

a)



b)



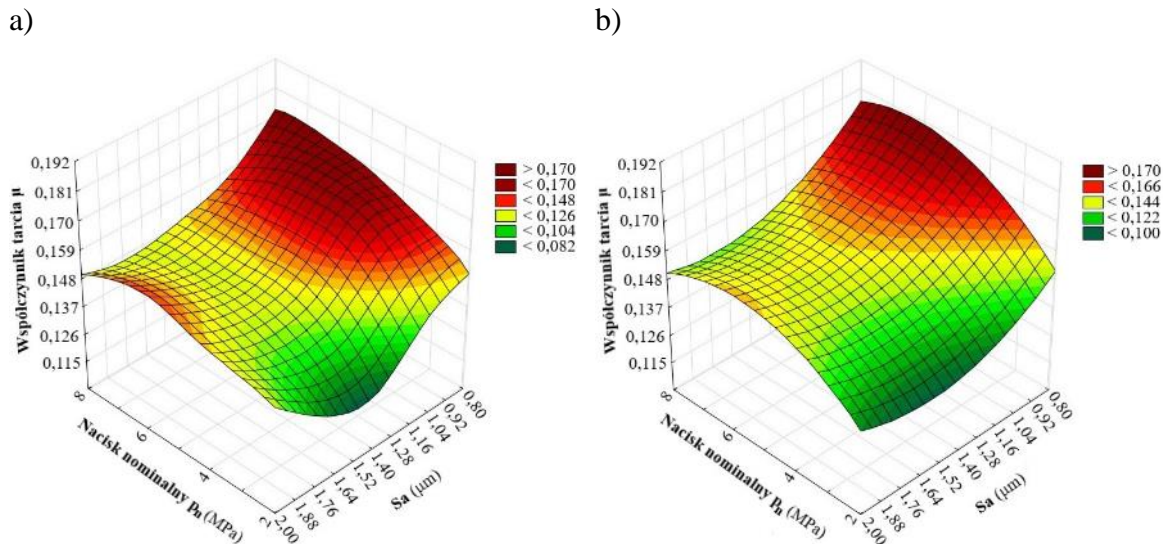
Rys. 6.17. Wpływ lepkości oleju i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy na chropowatość powierzchni blachy (parametr Sa) po badaniach:

a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

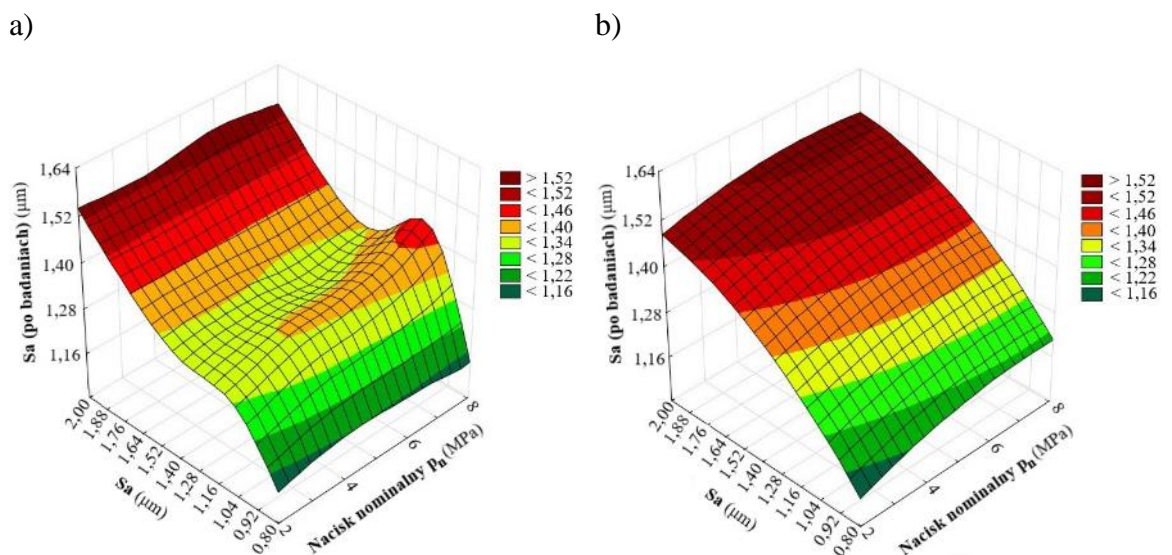
Na rysunku 6.16 przedstawiającym zależność współczynnika tarcia od lepkości kinematycznej oleju i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy, widoczna jest różnica wartości współczynnika tarcia zależnie od lepkości, której przejście z tarcia suchego do tarcia z zastosowaniem smarowania powoduje zmniejszenie się wartości współczynnika tarcia do granicznej minimalnej wartości, po której osiągnięciu, dalszy wzrost lepkości skutkuje wzrostem współczynnika tarcia. W przypadku parametru Sa jego udział nie jest tak wyraźny, lecz można dostrzec pewną regułę, polegającą na zmniejszaniu się wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem wartości parametru Sa chropowatości powierzchni blach.

Z kolei wykresy ilustrujące wpływ parametru Sa i lepkości kinematycznej oleju na wartość wskaźnika Sa blachy po badaniach (rys. 6.17) potwierdzają bezpośredni wpływ tych parametrów na analizowaną jakość powierzchni, a mianowicie duża wartość parametru Sa blachy przed poddaniem jej procesowi tarcia skutkuje stosunkowo dużą wartością parametru Sa blachy po badaniach, zmniejszenie się wartości początkowej parametru Sa odpowiada zmniejszeniu wartości tego parametru po tarcu. Przy czym zastosowanie smarowania olejem skutkuje zmniejszeniem się wartości parametru Sa zmierzonego po teście wraz ze wzrostem lepkości oleju. Tendencja ta nie jest stała, gdyż po osiągnięciu wartości granicznej lepkości, wartość parametru Sa przestaje się zmniejszać, a wręcz przeciwnie, można zaobserwować jego wzrost, co przedstawiono na rysunku 6.17.

Kolejne porównanie wpływu parametrów wejściowych na wartości wyjściowe przedstawia wpływ nacisku nominalnego i parametru Sa chropowatości powierzchni, na wartość współczynnika tarcia (rys. 6.18) i parametru Sa chropowatości powierzchni po badaniach (rys. 6.19).



Rys. 6.18. Wpływ nacisku nominalnego i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy na wartość współczynnika tarcia: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2



Rys. 6.19. Wpływ nacisku nominalnego i wskaźnika Sa chropowatości powierzchni blachy w stanie dostawy na chropowatość powierzchni blachy (parametr Sa) po badaniach: a) dane doświadczalne, b) predykcja sieci MLP 16–26–2

Wykresy przedstawione na rysunku 6.18 wykazują tendencję zmiany współczynnika tarcia zarówno od nacisku, jak parametru Sa. Wartość nacisku nominalnego niezmiennie, tak jak miało to miejsce w poprzednich analizach, powoduje zwiększenie wartości współczynnika tarcia. Na przykładzie tego samego rysunku można dostrzec również, że w celu obniżenia wartości współczynnika tarcia należy zastosować określoną wartość parametru Sa, będącą wartością najbardziej optymalną dla zachodzącego procesu tarcia.

Porównując te same parametry wejściowe, czyli nacisk nominalny i parametr Sa, pod kątem ich wpływu na wartość parametru Sa po badaniach (rys. 6.19), stwierdzono, że zmieniająca się wartość parametru Sa chropowatości powierzchni po badaniach jest przede wszystkim związana z początkową wartością tego parametru. Parametrem, który powoduje zmiany w charakterze wyznaczonych wartości, jest nacisk nominalny, którego wartości wpływają na jakość powierzchni, pogarszając jej jakość wraz ze wzrostem nacisku. Wpływ nacisku nominalnego jest szczególnie widoczny dla charakterystycznej wartości wskaźnika Sa, którego wartość została wcześniej wskazana jako najlepsza pod kątem uzyskania najniższej wartości współczynnika tarcia.

Podsumowując, przedstawione wykresy na rysunkach 6.8-6.19 obrazują wpływ wybranych parametrów wejściowych na współczynnik tarcia i parametr Sa chropowatości powierzchni. Na ich podstawie można w łatwy i szybki sposób określić charakter zachodzących zmian, które odzwierciedlają tendencję całego procesu, a nie wyłącznie poszczególnych wartości dla zadanych parametrów. Dodatkowo każdy rysunek od 6.8 do 6.19 przedstawiał porównanie wartości zmierzone (rzeczywiste) z wartościami przewidzianymi (predykcji). Wykresy predykcji stworzono na podstawie modelu neuronowego, który został wybrany z grupy analizowanych modeli na podstawie największej jakości i najmniejszego błędu korelacji dla zbioru testującego. Wybrana sieć neuronowa o konstrukcji MLP 16–26–2, jak przedstawiono na rysunkach, świetnie sobie radzi w analizie danych wprowadzanych oraz umożliwia przedstawianie wyników swojej analizy w postaci wykresów, które swoim kształtem odpowiadają rzeczywistemu charakterowi i wartościom zarejestrowanym w czasie prowadzonych badań.

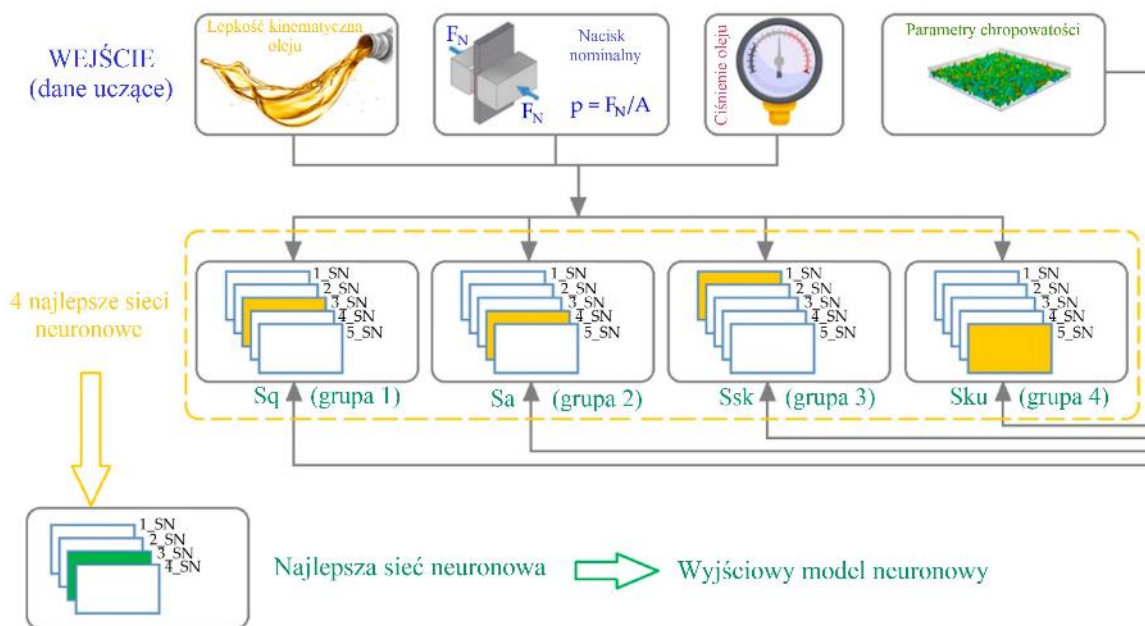
7. Dodatkowe badania przeprowadzone w celu zbadania możliwości stosowania sieci neuronowych w modelowaniu zjawisk tarcia

Prowadząc badania nad zastosowaniem sieci neuronowych w modelowaniu zjawisk tarcia, postanowiono sprawdzić jakość uczenia się sieci neuronowej na podstawie zastosowanych zmiennych parametrów wejściowych oraz funkcji aktywacji budowanego modelu neuronowego. Wyniki przeprowadzonych analiz zostały opisane i opublikowane w czasopismach naukowych [102, 113].

7.1. Zmienne parametry wejściowe

W tej części badań postanowiono przeanalizować wpływ zmieniających się parametrów wejściowych na jakość uczenia modelu neuronowego służącego do przewidywania wartości współczynnika tarcia, ze względu na fakt, iż podstawowym ograniczeniem sieci neuronowych jest możliwość przewidywania parametrów wyjściowych jedynie w zakresie parametrów wejściowych wykorzystywanych do uczenia sieci.

Analiza została przeprowadzona z zastosowaniem sieci o radialnych funkcjach bazowych, w których parametrami wejściowymi były parametry procesu ciągnięcia pasa blachy, takie jak: nacisk nominalny, lepkość kinematyczna oleju oraz ciśnienie smarowania. Dodatkowo w budowanych modelach neuronowych uwzględniono topografię powierzchni próbek po teście dla analizowanego gatunku blachy DC06. Badając wpływ uwzględnianych parametrów topografii powierzchni na zjawisko tarcia blach, wybrano parametry, takie jak: S_a , S_q , S_{ku} i S_{sk} . Schemat przeprowadzonej analizy został przedstawiony na rysunku 7.1. Na jego podstawie można poznać metodę wyboru najlepszego modelu neuronowego, który został wyznaczony z grupy 4 najlepszych modeli, będących wyznaczonymi wcześniej jako najlepiej opisujące modele z grup od 1 do 4.



Rys. 7.1. Schemat przeprowadzonej analizy

Dane pomiarowe sporządzone zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.1, w czasie analizy zostały podzielone na trzy zbiory: uczący, walidacyjny i testowy, w proporcji 70 procent dla zbioru uczącego i po 15 procent dla zbioru walidacyjnego i testującego. Każda z grup została poddana analizie, na podstawie której z 20 zbudowanych modeli neuronowych dla każdej z grup, program zachował 5 sieci charakteryzujących się największą dokładnością (Tabele 7.1-7.4), z których, na podstawie najmniejszego błędu uczenia i walidacji, wyznaczono najlepsze modele do dalszego porównania.

Tabela 7.1. Wybrany model neuronowy dla grupy 1

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	RBF 8-9-1	0,978036	0,989737	0,089184	0,000162	0,000292	0,000204	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
2	RBF 8-8-1	0,912376	0,898732	0,519752	0,000623	0,001936	0,000446	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
3	RBF 8-8-1	0,622464	0,704487	0,774165	0,002278	0,006728	0,000407	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
4	RBF 8-7-1	0,307466	0,772568	0,454893	0,003367	0,009136	0,000272	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
5	RBF 8-8-1	0,719541	0,907828	0,518341	0,001794	0,004651	0,001069	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa

Tabela 7.2. Wybrany model neuronowy dla grupy 2

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	RBF 8-9-1	0,871618	0,803771	0,438966	0,000894	0,003857	0,000901	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
2	RBF 8-9-1	0,783536	0,771894	0,335256	0,001436	0,004312	0,000897	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
3	RBF 8-8-1	0,553045	0,601645	0,753373	0,002582	0,007471	0,000725	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
4	RBF 8-8-1	0,596346	0,903178	0,332278	0,002405	0,006046	0,000817	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
5	RBF 8-8-1	0,937774	0,986012	0,487998	0,000448	0,000507	0,000141	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa

Tabela 7.3. Wybrany model neuronowy dla grupy 3

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	RBF 8-8-1	0,894587	0,974533	0,627975	0,000743	0,002112	0,000280	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
2	RBF 8-9-1	0,934342	0,974127	0,323185	0,000472	0,000778	0,000374	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
3	RBF 8-8-1	0,874248	0,987826	0,782566	0,000878	0,003250	0,000074	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
4	RBF 8-8-1	0,925234	0,982205	0,579015	0,000535	0,001283	0,000071	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
5	RBF 8-7-1	0,591974	0,710101	0,346976	0,002416	0,006794	0,000429	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa

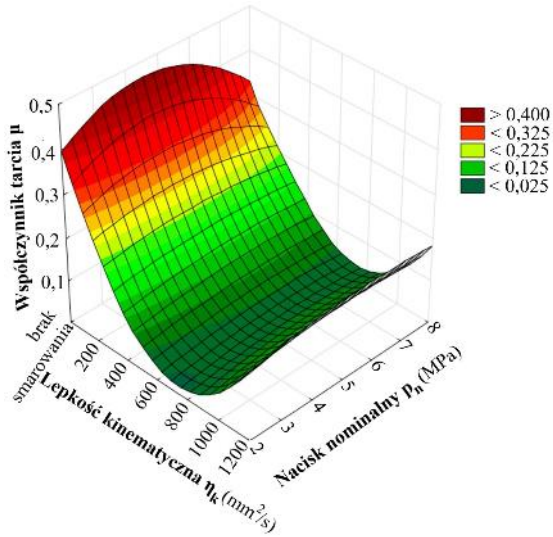
Tabela 7.4. Wybrany model neuronowy dla grupy 4

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	RBF 8-7-1	0,747877	0,697086	0,796668	0,001639	0,005628	0,000335	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
2	RBF 8-9-1	0,809854	0,866648	0,635650	0,001280	0,003743	0,000738	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
3	RBF 8-8-1	0,397396	0,188642	0,670846	0,003132	0,009617	0,000299	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
4	RBF 8-7-1	0,847235	0,987671	0,889200	0,001050	0,001670	0,000087	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa
5	RBF 8-8-1	0,965571	0,980861	0,521025	0,000250	0,000435	0,000256	RBFT	SOS	Gaussa	Liniowa

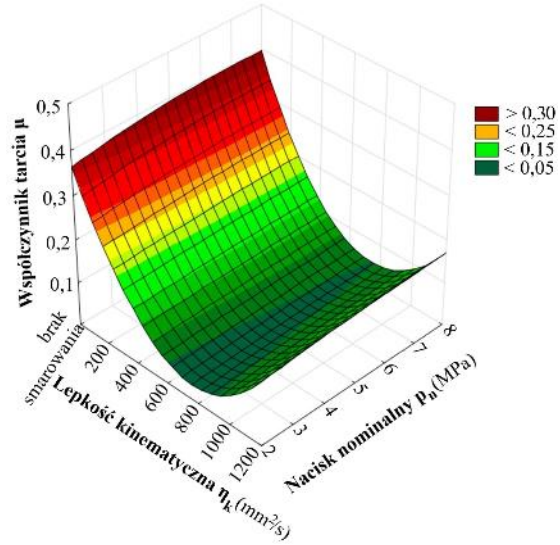
Przetestowanie kombinacji parametrów wejściowych przy użyciu sieci RBF, spośród branych pod uwagę parametrów chropowatości powierzchni blachy (S_a , S_q , S_{sk} i S_{ku}), wykazało, że średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia S_q jest najbardziej wrażliwe w przewidywaniu wartości współczynnika tarcia. Na tej podstawie do dalszej analizy wybrano sieć neuronową o strukturze RBF-8-9-1 wygenerowaną z uwzględnieniem parametru S_q .

W kolejnym kroku użyto wybranej sieci neuronowej do przeprowadzenia porównania wartości współczynnika tarcia zmierzonego i przewidzianego, przedstawiając wyniki za pomocą wykresów na rysunkach 7.2, 7.3 i 7.4.

a)

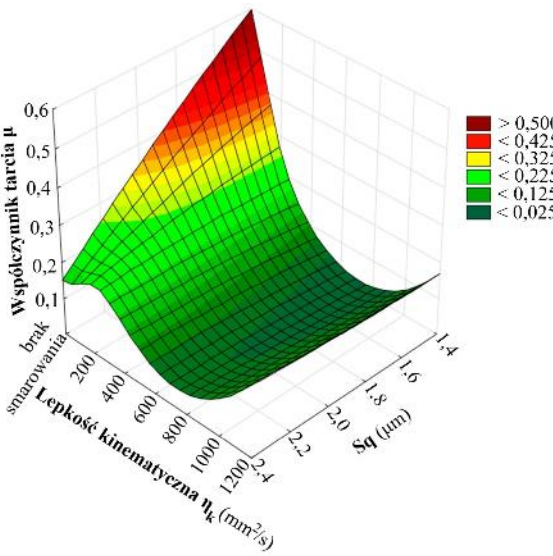


b)

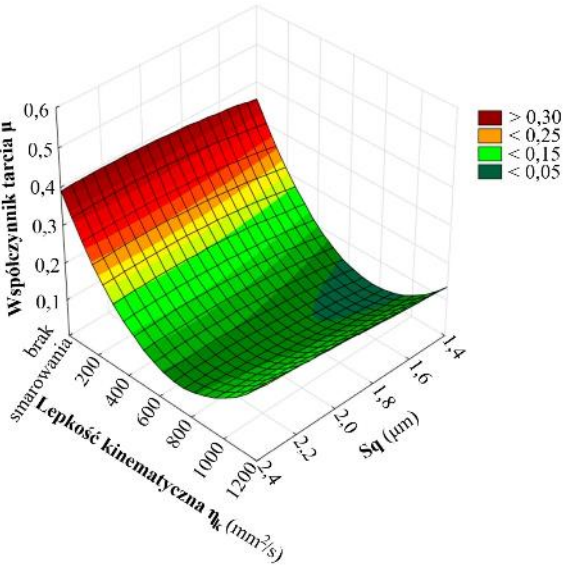


Rys. 7.2. Wpływ lepkości kinematycznej oleju i nacisku nominalnego na współczynnik tarcia: a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć RBF 8-9-1

a)

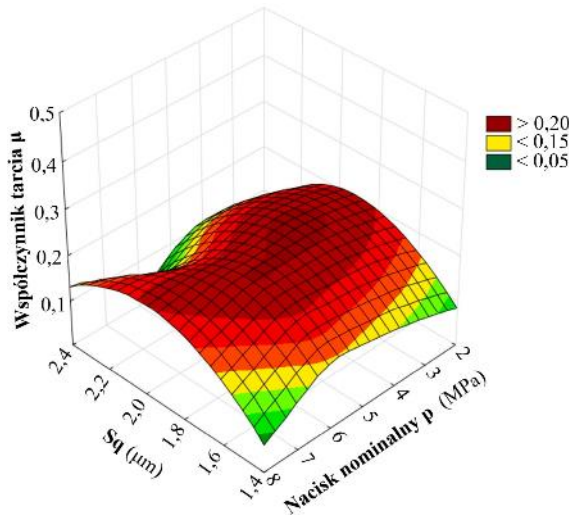


b)

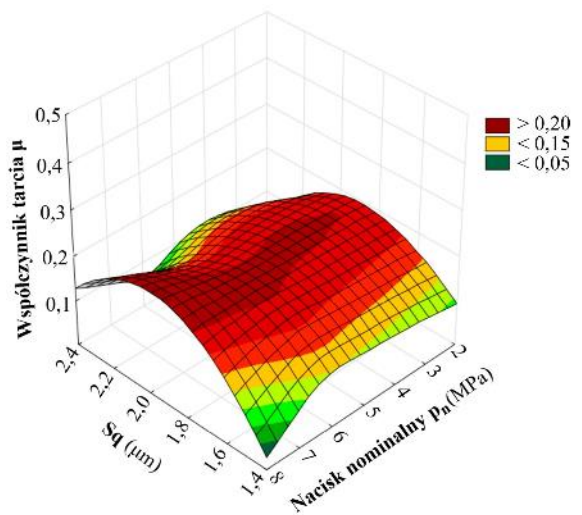


Rys. 7.3. Wpływ lepkości kinematycznej oleju i parametru Sq powierzchni blach na współczynnik tarcia: a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć RBF 8-9-1

a)



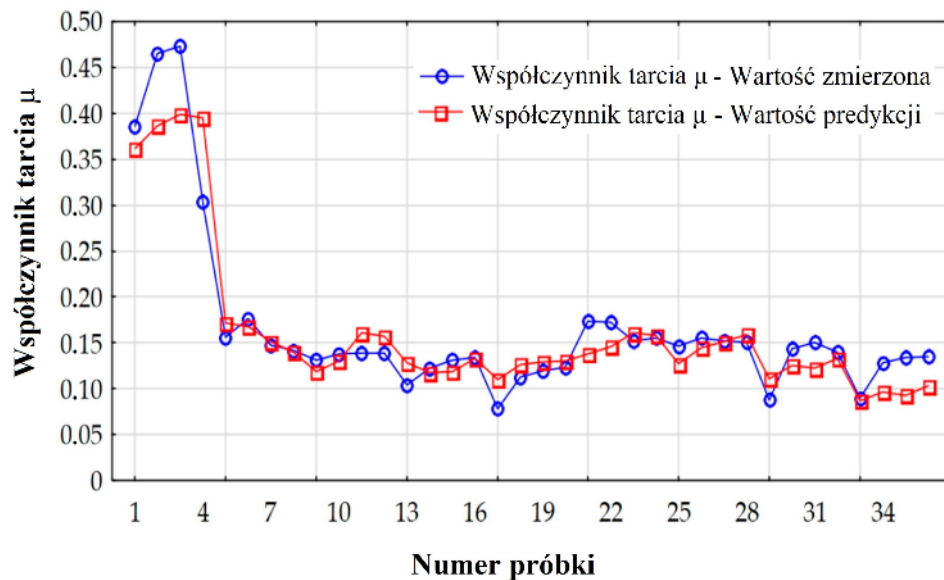
b)



Rys. 7.4. Wpływ parametru Sq i nacisku nominalnego na współczynnik tarcia:

a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć RBF 8-9-1

Wykresy wpływu wybranych parametrów wejściowych na wartość współczynnika tarcia wygenerowane przy zastosowaniu najkorzystniejszego modelu neuronowego wykazały bardzo dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi, co dodatkowo zostało potwierdzone za pomocą wykresu porównującego rzeczywiste zmierzone wartości współczynnika tarcia z wartościami przewidywanymi przez zbudowany model neuronowy (rys. 7.5).



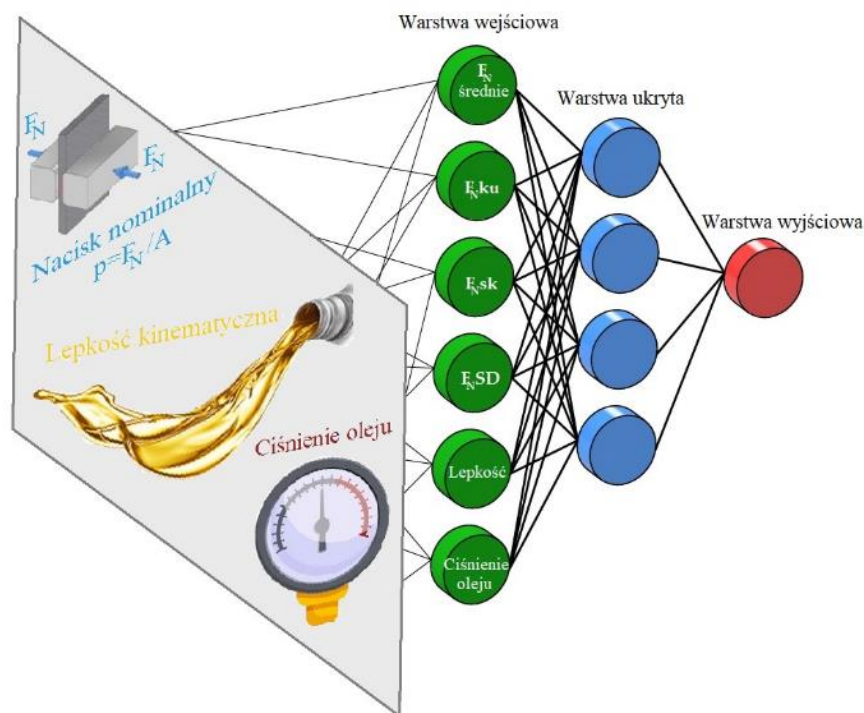
Rys. 7.5. Porównanie rzeczywistych i przewidzianych wartości współczynnika tarcia

Wykres na rysunku 7.5 przedstawia porównanie współczynnika tarcia rzeczywistego z oszacowanym na podstawie sieci RBF-8-9-1. Pierwsze cztery punkty odpowiadają tarcia

w warunkach bez smarowania. Zatem początkowo współczynnik tarcia ma znacznie większą wartość niż w warunkach smarowania. Prowadząc ogólne porównanie widać że prognozy są dobrze dopasowane do danych eksperymentalnych.

7.2. Badanie wpływu funkcji aktywacji neuronów na uzyskiwane wyniki

W tej części rozważań na temat możliwości zastosowania sieci neuronowych w analizowaniu zjawisk tarcia zbadano, jaki wpływ na jakość uczenia sieci neuronowych mają zastosowane funkcje aktywacyjne [113]. Analiza została przeprowadzona z zastosowaniem perceptronu wielowarstwowego, a parametrami wejściowymi były: lepkość kinematyczna oleju, ciśnienie smarowania oraz miary statystyczne siły nacisku (F_N), takie jak: średnia wartość nacisku (F_{Nmean}), odchylenie standardowe (F_{NSD}), kurtoza (F_{Nku}) i skośność (F_{Nsk}) zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 7.6. Parametrem wyjściowym była chropowatość powierzchni blachy DC03 po teście ciągnięcia, wyrażona parametrami S_a , S_{sk} oraz S_{ku} . Biorąc za cel zbadanie wpływu funkcji aktywacji na jakość generowanych modeli neuronowych, przeprowadzono analizę dla 36 zestawów parametrów wejściowych, uwzględniając trzy typy funkcji aktywacji neuronów (liniowa, wykładnicza, tanh).



Rys. 7.6. Schemat sieci neuronowej

Prowadząc badania na temat wpływu funkcji aktywacji neuronów na jakość budowanych modeli neuronowych, wygenerowano 20 sieci dla konkretnej funkcji aktywacji i parametru chropowatości, z których do dalszej analizy zachowano trzy charakteryzujące się najlepszą jakością. Parametry jakościowe wygenerowanych sieci neuronowych dla konkretnych parametrów chropowatości i funkcji aktywacji neuronów przedstawiono w tabelach od 7.5 do 7.13.

Tabela 7.5. Parametry jakościowe sieci MLP z liniową funkcją aktywacji do predykcji parametru Sa

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-6-1	0,848561	0,799852	0,456798	0,006260	0,005392	0,007145	BFGS 9	SOS	Liniowa	Liniowa
2	MLP 10-9-1	0,848783	0,790019	0,457024	0,006246	0,005529	0,007192	BFGS 18	SOS	Liniowa	Liniowa
3	MLP 10-7-1	0,848783	0,790019	0,457024	0,006246	0,005529	0,007192	BFGS 19	SOS	Liniowa	Liniowa

Tabela 7.6. Parametry jakościowe sieci MLP z wykładniczą funkcją aktywacji do predykcji parametru Sa

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-5-1	0,964086	0,966114	0,962563	0,001618	0,001729	0,001357	BFGS 71	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
2	MLP 10-10-1	0,969939	0,977829	0,943718	0,001385	0,000794	0,002179	BFGS 18	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
3	MLP 10-4-1	0,965439	0,991373	0,971247	0,001553	0,000574	0,000816	BFGS 36	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza

Tabela 7.7. Parametry jakościowe sieci MLP z funkcją aktywacji tanh do predykcji parametru Sa

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-7-1	0,961718	0,961872	0,936167	0,001681	0,001342	0,001421	BFGS 35	SOS	Tanh	Tanh
2	MLP 10-11-1	0,949534	0,989222	0,931313	0,002200	0,001625	0,001367	BFGS 20	SOS	Tanh	Tanh
3	MLP 10-7-1	0,980119	0,990977	0,949637	0,000880	0,001272	0,000859	BFGS 32	SOS	Tanh	Tanh

Tabela 7.8. Parametry jakościowe sieci MLP z liniową funkcją aktywacji do predykcji parametru Ssk

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-8-1	0,642631	0,234950	0,754865	0,004041	0,018242	0,007486	BFGS 5	SOS	Liniowa	Liniowa
2	MLP 10-4-1	0,657397	0,232405	0,787614	0,003797	0,017681	0,005741	BFGS 5	SOS	Liniowa	Liniowa
3	MLP 10-6-1	0,614863	0,243348	0,756677	0,004418	0,016229	0,005429	BFGS 7	SOS	Liniowa	Liniowa

Tabela 7.9. Parametry jakościowe sieci MLP z wykładniczą funkcją aktywacji do predykcji parametru Ssk

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-3-1	0,686226	0,262450	0,780858	0,003634	0,017766	0,005997	BFGS 5	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
2	MLP 10-3-1	0,681380	0,255007	0,783729	0,003593	0,017347	0,005152	BFGS 5	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
3	MLP 10-6-1	0,655258	0,298071	0,844212	0,003844	0,016428	0,004866	BFGS 4	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza

Tabela 7.10. Parametry jakościowe sieci MLP z funkcją aktywacji tanh do predykcji parametru Ssk

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-7-1	0,632725	0,233232	0,869024	0,003965	0,018361	0,006852	BFGS 5	SOS	Tanh	Tanh
2	MLP 10-8-1	0,613228	0,407401	0,847233	0,004429	0,016867	0,005412	BFGS 3	SOS	Tanh	Tanh
3	MLP 10-9-1	0,659507	0,268853	0,818048	0,003788	0,017803	0,005567	BFGS 5	SOS	Tanh	Tanh

Tabela 7.11. Parametry jakościowe sieci MLP z liniową funkcją aktywacji do predykcji parametru Sku

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-8-1	0,891092	0,925749	0,392733	0,002065	0,004704	0,008775	BFGS 8	SOS	Liniowa	Liniowa
2	MLP 10-3-1	0,891206	0,920480	0,409767	0,002062	0,004854	0,008590	BFGS 13	SOS	Liniowa	Liniowa
3	MLP 10-4-1	0,889840	0,922791	0,489860	0,002144	0,004079	0,007595	BFGS 7	SOS	Liniowa	Liniowa

Tabela 7.12. Parametry jakościowe sieci MLP z wykładniczą funkcją aktywacji do predykcji parametru Sku

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-4-1	0,983367	0,940394	0,924044	0,000331	0,003057	0,002618	BFGS 56	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
2	MLP 10-3-1	0,967260	0,902881	0,923602	0,000650	0,003811	0,003660	BFGS 35	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
3	MLP 10-11-1	0,990302	0,969133	0,955919	0,000196	0,001395	0,001561	BFGS 39	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza

Tabela 7.13. Parametry jakościowe sieci MLP z funkcją aktywacji tanh do predykcji parametru Sku

Lp	Struktura sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Błąd uczenia	Błąd testowania	Błąd walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Funkcja aktywacji (warstwa ukryta)	Funkcja aktywacji (warstwa wyjściowa)
1	MLP 10-9-1	0,993754	0,954898	0,837398	0,000129	0,003025	0,002892	BFGS 36	SOS	Tanh	Tanh
2	MLP 10-11-1	0,990686	0,952943	0,839915	0,000195	0,003630	0,003490	BFGS 38	SOS	Tanh	Tanh
3	MLP 10-5-1	0,976751	0,951792	0,880115	0,000470	0,003789	0,002757	BFGS 24	SOS	Tanh	Tanh

Biorąc pod uwagę najmniejsze błędy uczenia zarówno dla zbioru uczącego, jak i walidacyjnego, do dalszej analizy wybrano sieć MLP-10-7-1 (tabela 7.7) do predykcji parametru Sa, MLP-10-6-1 (tabela 7.9) do predykcji parametru Ssk oraz MLP-10-9-1 (tabela 7.13) do predykcji parametru Sku. Dodatkowo zaobserwowano, że sieci neuronowe wygenerowane przy użyciu liniowych funkcji aktywacji, charakteryzują się najmniejszą jakością w porównaniu do pozostałych funkcji.

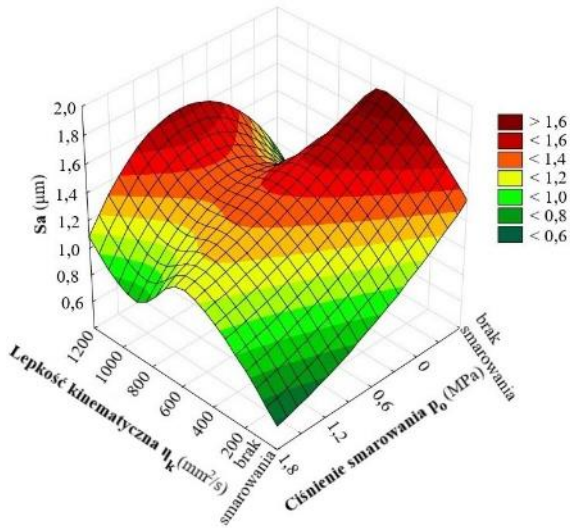
Poszukiwanie najlepszej struktury modelu neuronowego polega na losowym budowaniu struktury sieci na podstawie zmiennych zestawów wag, dzięki którym różne struktury mogą wykazywać podobne właściwości predykcji. Dlatego wybrane modele posiadają różne ilości warstw ukrytych i różne rodzaje funkcji aktywacji neuronów, takie jak: funkcja tangens hiperboliczny dla predykcji wartości parametrów Sa i Sku oraz funkcja wykładnicza do predykcji parametru Ssk. Celem zobrazowania dokładności predykcji wybranych modeli neuronowych w tabeli 7.14 przedstawiono wyniki analizy wrażliwości wybranych modeli neuronowych.

Tabela. 7.14. Analiza wrażliwości zmiennych wejściowych

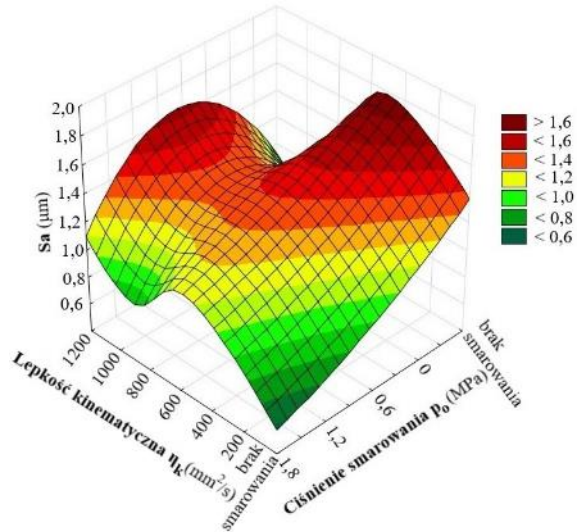
	MLP 10-7-1 (predykcja parametru Sa)	MLP 10-6-1 (predykcja parametru Ssk)	MLP 10-9-1 (predykcja parametru Sku)
Ciśnienie smarowania	57.811	1.402	12.277
Lepkość kinematyczna	7.620	1.112	2.152
Średnia wartość sygnału F_{Nmean}	2.099	1.180	13.215
Odchylenie standardowe sygnału F_{NSD}	4,377	1.015	2.526
Skośność sygnału F_{Nsk}	1,277	1.008	1,702
Kurtoza sygnału F_{Nku}	2,978	1.000	3,045

Na podstawie przeprowadzonej analizy wrażliwości widać, że parametrem istotnym w tworzeniu sieci neuronowych jest ciśnienie smarowania i dodatkowo lepkość kinematyczna dla predykcji parametru Sa oraz średnia wartość siły docisku dla predykcji parametru Ssk i Sku. Celem sprawdzenia jakości predykcji wybranych modeli na rysunkach od 7.7 do 7.12 przedstawiono zależności parametrów chropowatości (Sa, Ssk, Sku) od zastosowanych parametrów wejściowych, czyli ciśnienia smarowania, lepkości kinematycznej i średniej wartości siły docisku F_{Nmean} .

a)

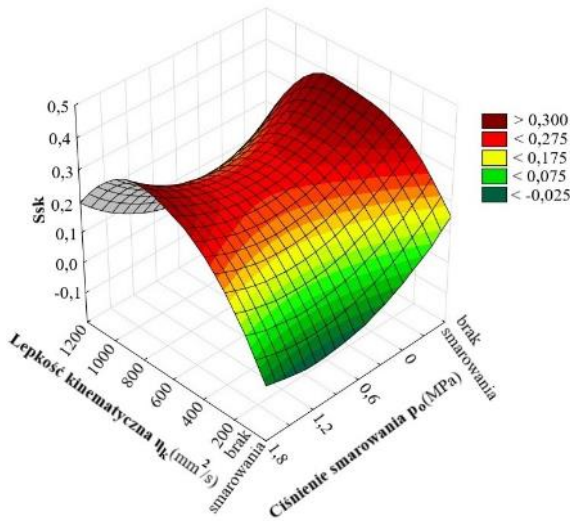


b)

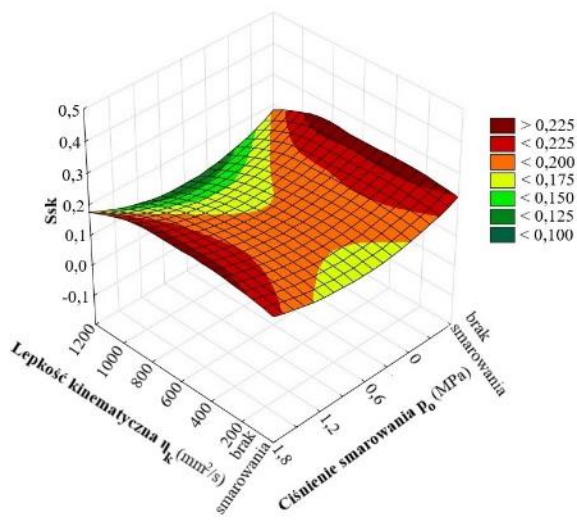


Rys. 7.7. Wpływ lepkości kinematycznej oleju i ciśnienia smarowania na wartość parametru Sa: a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć MLP 10-7-1

a)

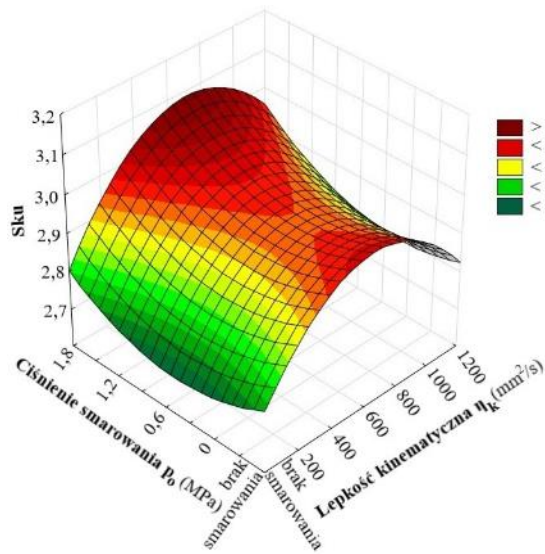


b)

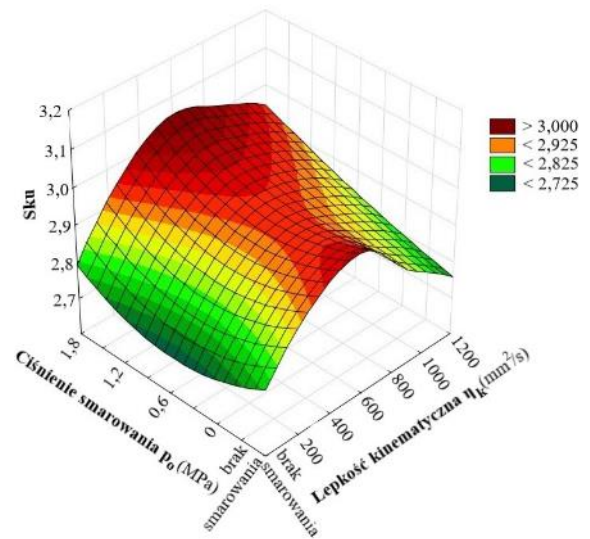


Rys. 7.8. Wpływ lepkości kinematycznej oleju i ciśnienia smarowania na wartość parametru Ssk: a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć 10-6-1

a)

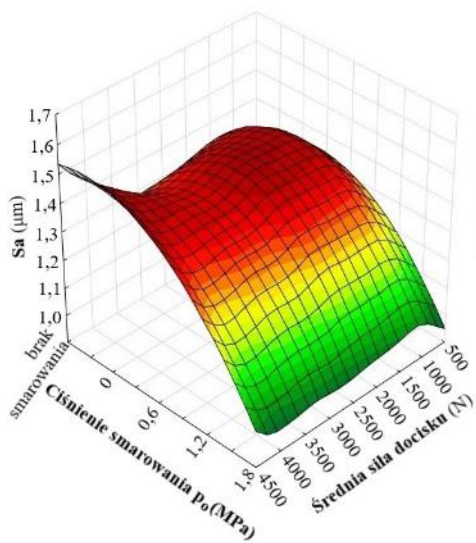


b)

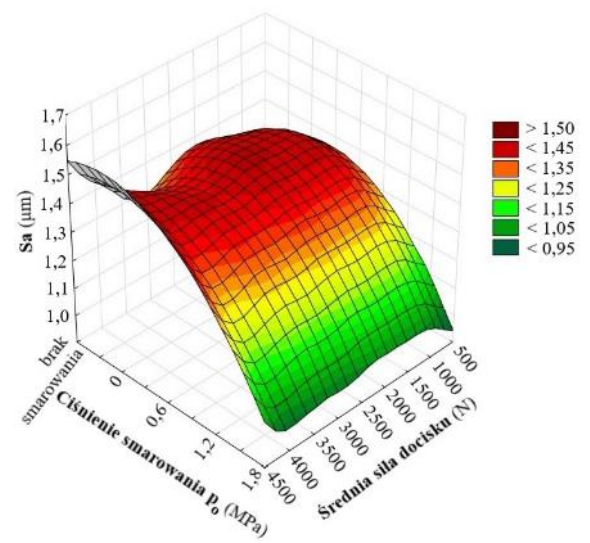


Rys. 7.9. Wpływ lepkości kinematycznej oleju i ciśnienia smarowania na wartość parametru S_{ku} : a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć 10-9-1

a)



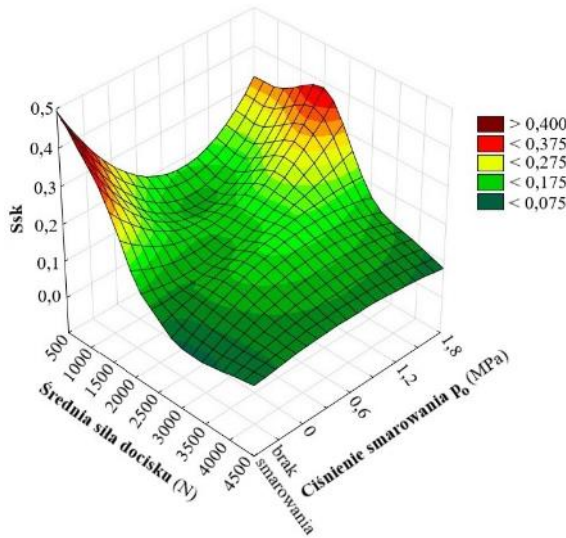
b)



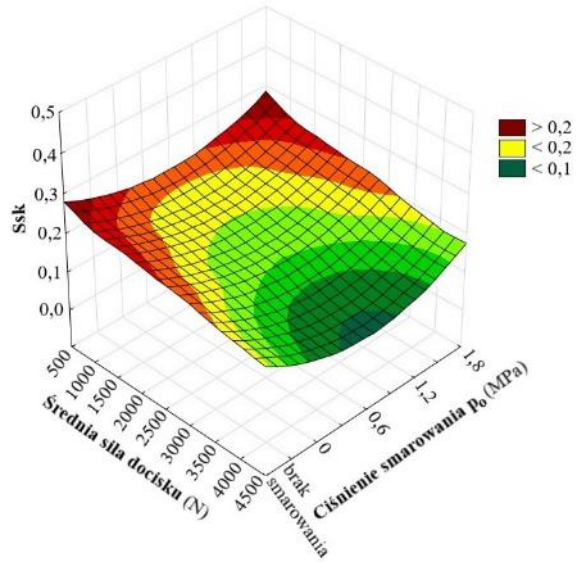
Rys. 7.10. Wpływ średniej siły docisku i ciśnienia smarowania na wartość parametru S_a :

a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć MLP 10-7-1

a)

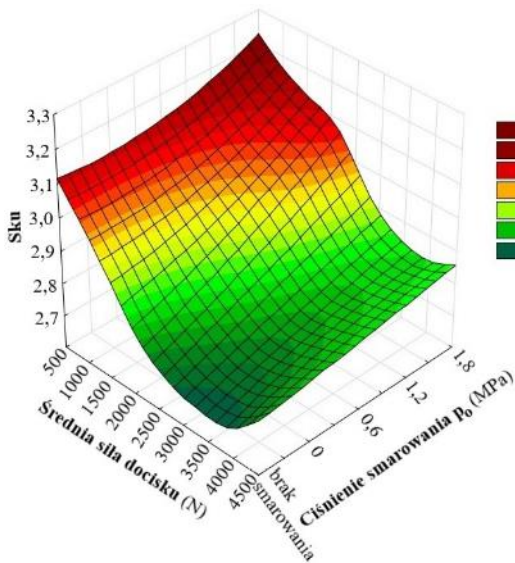


b)

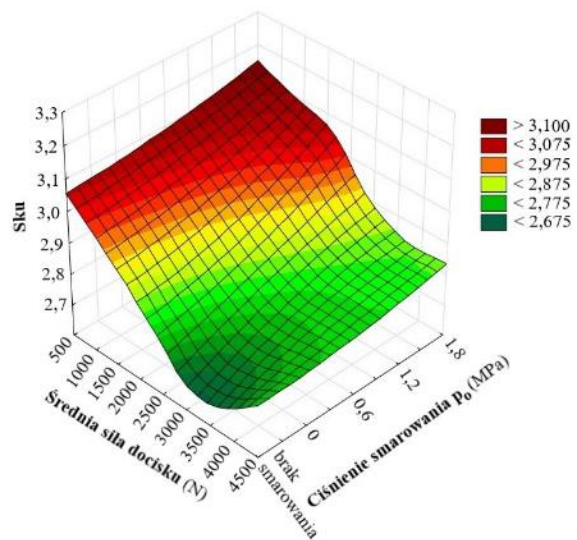


Rys. 7.11. Wpływ średniej siły docisku i ciśnienia smarowania na wartość parametru Ssk:
a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć 10-6-1

a)



b)



Rys. 7.12. Wpływ średniej siły docisku i ciśnienia smarowania na wartość parametru Sku:
a) dane eksperymentalne, b) dane przewidywane przez sieć 10-9-1

Za pomocą wykresów na rysunkach od 7.7 do 7.12 przedstawiono wpływ parametrów procesu tarcia na wartość wybranych parametrów chropowatości powierzchni (S_a , S_{sk} i S_{ku}). Na ich podstawie stwierdzono, że:

- ciśnienie smaru i jego lepkość kinematyczna to zmienne, które w istotnym stopniu wpływają na wartość parametru chropowatości S_a blachy po procesie tarcia,

- najbardziej niekorzystne warunki tarcia ze względu na minimalizację parametru chropowatości S_a występują przy największej średniej wartości sygnału siły nacisku oraz w warunkach tarcia suchego,
- zmiana warunków tarcia z tarcia suchego na smarowanie olejowe prowadzi do wzrostu wartości kurtozy S_{ku} .

Ogólnie rzecz biorąc, kształt przewidywanej powierzchni odpowiedzi modelu neuronowego dla wartości skośności S_{sk} odbiega znacznie bardziej od powierzchni eksperymentalnych w porównaniu do sieci służących do predykcji parametrów S_a i S_{ku} . Przyczyn takiego zjawiska należy szukać w różnych typach funkcji aktywacji neuronów, które do przewidywania wartości parametrów S_{sk} są wykładnicze, a ich wartości wyjściowe mieszczą się w zakresie od 0 do ∞ . Optymalny model sieci do modelowania jakości powierzchni wyrażonej parametrem S_a i S_{ku} zawiera neurony z hiperboliczną funkcją aktywacji o wartościach wyjściowych w zakresie od -1 do $+1$. Zatem, dzięki możliwości uwzględnienia zarówno ujemnych, jak i dodatnich wartości wyjściowych, sieci te mają tendencję do lepszego dopasowania do danych eksperymentalnych niż sieć MLP 10-6-1 (S_{sk}).

8. Podsumowanie i wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz wykonanych analiz sprawdzono wpływ zmiennych warunków wymuszonego smarowania ciśnieniowego oraz poszczególnych parametrów procesu tarcia na wartość współczynnika tarcia i chropowatości powierzchni blachy po tym procesie. Przeprowadzone testy ciągnięcia pasa blachy symulujące zjawisko tarcia pomiędzy powierzchnią dociskacza a powierzchnią wytłaczanej blachy na podstawie wykazanych rzeczywistych skutków zjawiska tarcia w procesie kształtowania blach, potwierdziły słuszność postawionej tezy.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych, można stwierdzić, że stosowany nacisk w procesie, ma bezpośredni wpływ na wartość współczynnika tarcia. Pierwszą charakterystyczną zależnością, którą udało się zaobserwować, jest zmniejszenie wartości współczynnika tarcia wraz ze zwiększaniem wartości nacisku. Zjawisko to jest widoczne dla tarcia z zastosowaniem smarowania bez wymuszonego ciśnienia i jest związane z występowaniem mechanizmu spłaszczania nierówności oraz zmniejszeniem się roli mechanizmu zazębienia. Drugim zjawiskiem jest zmiana wartości współczynnika tarcia w sposób nieproporcjonalny do zastosowanego nacisku i ciśnienia smarowania. Powoduje to, że największe różnice w wartości współczynnika tarcia, zależnie od zastosowanego ciśnienia smarowania są widoczne dla nacisku wynoszącego 2 MPa, dla którego wzrost ciśnienia smarowania, skutkuje dużym zmniejszeniem się wartości współczynnika tarcia. Zjawisko to również występuje dla nacisków 4, 6 oraz 8 MPa, lecz tendencja zmniejszania się wartości współczynnika tarcia zmniejsza się wraz ze zwiększaniem wartości nacisku. Opisane zjawisko powoduje tym samym, że wartość współczynnika tarcia dla nacisku 4, 6 i 8 MPa jest stosunkowo większa aniżeli dla nacisku 2 MPa.

Analizując zebrane wyniki testów pod kątem wpływu strategii smarowania na zmianę wartości współczynnika tarcia, najintensywniejszą zależnością, którą udało się zaobserwować, jest wpływ stosowania smarowania na wartość współczynnika tarcia, którego wartość w stosunku do tarcia bez zastosowania smarowania zmniejszyła się od około 47 do 71%, w zależności od zastosowanych parametrów tarcia i gatunku blachy. Dodatkowo porównując wyniki przeprowadzonych analiz efektywności smarowania, zaobserwowano dwie charakterystyczne zależności. Pierwsza z nich przedstawia brak wyraźnej zależności zastosowanego środka smarnego na wartość efektywności smarowania dla małych wartości nacisku. Jest to szczególnie widoczne dla nacisku 2 MPa i ciśnienia smarowania 1,2 i 1,8 MPa, dla których wartości efektywności smarowania były na bardzo

zbliżonym poziomie. Efektywność smarowania dla zastosowanego nacisku nominalnego o wartości 8 MPa jednoznacznie wykazała, że olej o większej lepkości kinematycznej wykazuje lepszą efektywność smarowania.

Przeprowadzenie analizy wpływu parametrów procesu tarcia na jakość powierzchni blach wyrażonej wartościami parametrów chropowatości (S_a , S_{sk} , S_{ku}) dowiodły, że nie można jednoznacznie określić wpływu wybranego parametru tarcia na wartości parametrów chropowatości. Zmierzone wartości chropowatości powierzchni blach po teście z zastosowaniem zmiennych parametrów sugerują, że uzyskane wyniki są efektem składowym wszystkich parametrów, uniemożliwiając tym samym jednoznaczne określenie i wykazanie wpływu któregoś z parametrów.

Celem sprawdzenia wpływu istotności parametrów procesu tarcia na wartość współczynnika tarcia i wartości analizowanych parametrów chropowatości, wykonano analizę wariancji, w rezultacie której stwierdzono, że wszystkie parametry procesu, takie jak: gatunek blachy, lepkość kinematyczna, nacisk i ciśnienie smarowania wykazują poziom istotności poniżej wartości prawdopodobieństwa $p = 0,05$, co świadczy o ich istotnym wpływie na wartość współczynnika tarcia. W drugiej kolejności wykonując analizę istotności parametrów procesu tarcia na wartości parametrów chropowatości, wykazano, że jedynie gatunek blachy jest parametrem istotnym i wpływającym na parametry chropowatości S_a , S_{sk} oraz S_{ku} . Analizując parametry chropowatości oddzielnie, zaobserwowano, że dla parametru S_a istotny jest gatunek blachy, lepkość kinematyczna oleju oraz ciśnienie smarowania, na parametr S_{sk} największy wpływ wywiera gatunek blachy i nacisk, a na parametr S_{ku} gatunek blachy, lepkość kinematyczna oleju i nacisk.

Przeanalizowane klasyczne sieci wielowarstwowe i sieci o radialnych funkcjach bazowych wykazały lepszą przydatność sieci MLP w zastosowaniu do modelowania zjawiska tarcia. Zastosowana do analizy sieć MLP umożliwiła zbudowanie sieci neuronowej o strukturze MLP 16-26-2, której jakość testowania wynosiła około 0,965591 a błąd testowania 0,006906. Przeprowadzone analizy cyklu uczenia wybranej sieci pozwoliły zaobserwować szybkość uczenia sieci na podstawie zmiany generowanego błędu, którego wartość ustabilizowała się już przy około 60. cyklu uczenia. Porównując wartości zmierzone z wygenerowanymi przy pomocy wybranego modelu neuronowego, można zaobserwować, że uzyskane wyniki w pełni oddają zmienny charakter procesu tarcia. Z kolei wykresy powierzchniowe, stworzone celem zbadania wpływu parametrów procesu na uzyskiwane wyniki, pozwoliły na odzwierciedlenie tendencji całego procesu a nie wyłącznie dla poszczególnych wartości zmieniających się parametrów. Jednakże można zaobserwować, że użyte parametry procesu tarcia, takie jak: ciśnienie smarowania, lepkość kinematyczna

oleju oraz nacisk nominalny wpływają w istotny sposób zarówno na wartość współczynnika tarcia, jak również parametr Sa chropowatości powierzchni po procesie tarcia.

Stosowanie smarowania olejem z wymuszonym ciśnieniem umożliwia zmniejszenie wartości współczynnika tarcia i poprawę jakości powierzchni blachy, co jest szczególnie widoczne wraz ze zwiększaniem się wartości ciśnienia smarowania. Natomiast wpływ nacisku nominalnego na wartość współczynnika tarcia i wartość parametru Sa chropowatości powierzchni po procesie tarcia jest odwrotny w porównaniu z ciśnieniem smarowania. Analizując wpływ zmiennej wartości nacisku nominalnego, można dostrzec zależność polegającą na zwiększaniu się wartości współczynnika tarcia i parametru Sa wraz ze wzrostem nacisku nominalnego użytego w teście tarcia. Trzeci parametr procesu, czyli lepkość kinematyczna oleju, nie powoduje stałej tendencji zmiany wartości współczynnika tarcia oraz parametru Sa chropowatości powierzchni wraz ze zmianą lepkości oleju. Wpływ lepkości kinematycznej oleju zmienia się w zakresie analizowanej lepkości, powodując zmniejszenie wartości współczynnika tarcia i parametru Sa wraz ze wzrostem lepkości do momentu osiągnięcia najkorzystniejszej wartości, powyżej której można zaobserwować zmianę tendencji i ponowne zwiększanie się wartości analizowanych parametrów.

Literatura

- [1] Gierzyńska M. Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne: Warszawa 1983.
- [2] Jonasson M., Wihlborg A., Gunnarsson L., Analysis of surface topography changes in steel sheet strips during bending under tension friction test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, Volume 38, 459-467, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00090-4)
- [3] Ludema K. C., Ajayi O. O., Friction, wear, lubrication. A textbook in tribology, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2019
- [4] Matuszak A. Factors influencing friction in steel sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 106, 250-253, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00625-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00625-7)
- [5] Schey J.A., Tribology in metalworking: Friction, lubrication, and wear. *Journal of Applied Metalworking*, 1984, 3, 173, <https://doi.org/10.1007/BF02833697>
- [6] Kim H., Heo Y., Kim N., Kim H. Y., Seo D., Forming and drawing characteristics of tailor welded sheets in a circular drawbead, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 105, 294-301, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00647-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00647-6)
- [7] Trzepieciński T., Wybrane aspekty oceny tribologicznej blach odkształcanych plastycznie,; Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej: Rzeszów, 2013
- [8] Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact. *Tribology*, 1998, 4, 1–35, <https://doi.org/10.1023/A:1019186601445>
- [9] Masters I. G., Williams D. K., Roy R., Friction behaviour in strip draw test of pre-stretched high strength automotive aluminium alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 73, 17-24, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.05.002>
- [10] Bruschi S., Altan T., Banabic D., Bariani P. F., Brosius A., Cao J., Ghiotti A., Khraisheh M., Merklein M., Tekkaya A. E., Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming, *CIRP Annals*, 2014, 63, 727-749, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.005>
- [11] Nielsen C. V., Bay N., Overview of friction modelling in metal forming processes, *Procedia Engineering*, 2017, 207, 2257-2262, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.991>

- [12] Groche P., Resch F., Dry forming of aluminum alloys – Wear mechanisms and influencing factors, *Materials Science & Engineering Technology*, 2015, 46, 813-828, <https://doi.org/10.1002/mawe.201500429>
- [13] Buckley D.H., Johnson R.L., The influence of crystal structure and some properties of hexagonal metals on friction and adhesion, *Wear*, 1968, 11, 405-419, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(68\)90550-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(68)90550-4)
- [14] Trzos, M., Badania eksperymentalne w rozwiązywaniu problemów tribologicznych, *Tribologia*, 2007, 3-4, 285-302
- [15] Dübler H., Feller H. G., Hack K., Matschat E., Trockengleitreibung und Verschleiß von reinen Metallen im Vakuum von $5 \cdot 10^{-6}$ Torr, *International Journal of Materials Research*, 1970, 61, 861-865, <https://doi.org/10.1515/ijmr-1970-611114>
- [16] Czichos H., *Tribology, A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear*, Elsevier, Amsterdam 1978
- [17] Buckley D. H., *Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication*, Elsevier, Amsterdam, 1981
- [18] Hol J., Meinders V. T., De Rooij M. B., Van den Boogaard A. H., Multi-scale friction modeling for sheet metal forming: The boundary lubrication regime, *Tribology International*, 2015, 81, 112-128, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.07.015>
- [19] Trzepieciński T., Fejkiel R., On the influence of deformation of deep drawing quality steel sheet on surface topography and friction, *Tribology International*, 2017, 115, 78–88 <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.007>
- [20] Trzepieciński T., Fejkiel R., Kubit A., Experimental evaluation of value of friction coefficient in the drawbead region. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Mechanika*, 2018, 35, 77–85, <https://doi.org/10.7862/rm.2018.07>
- [21] Sulaiman M. H., Farahana R. N., Bienk K., Nielsen C. V., Bay N., Effects of DLC/TiAlN-coated die on friction and wear in sheet-metal forming under dry and oil-lubricated conditions: Experimental and numerical studies, *Wear*, 2019, 438-439, 203040, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203040>
- [22] Ghiotti A., Simonetto E., Bruschi S., Influence of process parameters on tribological behaviour of AA7075 in hot stamping, *Wear*, 2019, 426-427, 348-356, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.031>
- [23] Merklein M., Andreas K., Steiner J., Influence of tool surface on tribological conditions in conventional and dry sheet metal forming, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2015, 2, 131-137, <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0017-8>

- [24] Sulaiman M. H., Christiansen P., Bay N., Influence of tool texture on friction and lubrication in strip reduction, *Procedia Engineering*, 2017, 207, 2263-2268, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.992>
- [25] Brinksmeier E., Riemer O., Twardy S., Tribological behavior of micro structured surfaces for micro forming tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50, 425-430, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.11.006>
- [26] Matuszak A., Gładysz K., Definiowanie warunków tarcia podczas symulacji komputerowej procesów tłoczenia blach, *Przegląd Mechaniczny*, 2001, 4, 31-35
- [27] Bech J., Bay N., Eriksen M., Entrapment and escape of liquid lubricant in metal forming, *Wear*, 1999, 232, 134-139, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00136-2)
- [28] Wihlborg A., Crafoord R., Steel sheet surface topography and its influence on friction in a bending under tension friction test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41, 1953-1959, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00060-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00060-8)
- [29] Emmens W.C., Tribology of flat contacts and its application in deep drawing, PhD Thesis-University of Twente, Enschede, 1997
- [30] Flegler F., Neuhäuser S., Groche P., Influence of sheet metal texture on the adhesive wear and friction behaviour of EN AW-5083 aluminum under dry and starved lubrication, *Tribology International*, 2020, 141, 105956, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105956>
- [31] Figueiredo L. Ramalho A., Oliveira M. C., Menezes L. F., Experimental study of friction in sheet metal forming, *Wear*, 2011, 271, 1651-1657, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.020>
- [32] Han S. S., The influence of tool geometry on friction behavior in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63, 129-133, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02612-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02612-X)
- [33] Wanheim T., Bay N. , Petersen A.S., A theoretically determined model for friction in metal working processes, *Wear*, 1974, 28, 251-258, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(74\)90165-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(74)90165-3)
- [34] Sedlaček M., Podgornik B., Vižintin J., Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear, *Wear*, 2009, 266, 482-487, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.017>
- [35] Sigvant M., Pilthammar J., Hol J., Wiebenga J. H., Chezan d T., Carleer B., Van den Boogaard T., Friction in sheet metal forming: influence of surface roughness and

- strain rate on sheet metal forming simulation results, *Procedia Manufacturing*, 2019, 29, 512-519, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.169>
- [36] Yue T., Wahab M.A., Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction and different contact regimes, *Tribology International*, 2017, 107, 274-282, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.044>
- [37] Meine K., Schneider T., Spaltmann D., Santner E., The influence of roughness on friction: Part I: The influence of a single step, *Wear*, 2002, 253, 725-732, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00159-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00159-X)
- [38] Zdravecka E., Suchanek J., Lubiščak J., Greškovič F., Spišak E., Examination of surface characteristics in tribological systems by AFM, *Tribologia*, 2002, 6, 1713-1722
- [39] Mahrenholtz O., Bontcheva N., Iankov R., Influence of surface roughness on friction during metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 159, 9-16, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.009>
- [40] Menezes P. L., Kishore, Kailas S.V., Studies on friction and transfer layer: role of surface texture, *Tribology letters*, 2006, 24, 265-273, <https://doi.org/10.1007/s11249-006-9129-1>
- [41] Menezes P. L., Kishore, Kailas S. V., Effect of roughness parameter and Grinding angle on coefficient of friction when sliding of Al-Mg alloy over EN8 steel, *Journal of Tribology*, 2006, 128, 697-704, <https://doi.org/10.1115/1.2345401>
- [42] Matuszewski, M., Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni jako charakterystyczna cecha eksploatacyjna, *Tribologia*, 2008, 3, 105-114
- [43] Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M., Soliman H.H., Roughness parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 123, 133-145, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2)
- [44] Świątkowski, K., Sposoby oceny wielkości tarcia na powierzchniach kontaktu niemetalicznego materiału modelowego i narzędzia, *Obróbka Plastyczna Metali*, 2000, 11, 21-30
- [45] Matuszak, A., Kręcisz, D., Badanie oporów przejścia blachy przez progi ciąagowe, *Obróbka Plastyczna Metali*, 2003, 14, 17-25
- [46] Trzepieciński T., A study of the coefficient of friction in steel sheets forming, *Metals*, 2019, 9, 988, <https://doi.org/10.3390/met9090988>
- [47] Jurkovic M., Jurkovic Z., Buljan S., The tribological state test in metal forming processes using experiment and modelling, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, 18, 383-386

- [48] Roizard X., Pothier J.M., Hihn J.Y., Monteil G., Experimental device for tribological measurement aspects in deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, 1220–1230, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.023>
- [49] Wang W., Zhao Y., Wang Z., Hua M., Wei X., A study on variable friction model in sheet metal forming with advanced high strength steels, *Tribology International*, 2016, 93, 17-28, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.011>
- [50] Dou S., Xia J., Analysis of Sheet Metal Forming (Stamping Process): A study of the variable friction coefficient on 5052 aluminum alloy, *Metals*, 2019, 9, 853, <https://doi.org/10.3390/met9080853>
- [51] Gil I., Mendiguren J., Galdos L., Mugarra E., Saenz de Argandoña E., Influence of the pressure dependent coefficient of friction on deep drawing springback predictions, *Tribology International*, 2016, 103, 266-273, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.004>
- [52] Schwingenschlögl P., Niederhofer P., Merklein M., Investigation on basic friction and wear mechanisms within hot stamping considering the influence of tool steel and hardness, *Wear*, 2019, 426-427, 378-389, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.018>
- [53] Wang C., Ma R., Zhao J., Zhao J., Calculation method and experimental study of coulomb friction coefficient in sheet metal forming, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 27, 126-137, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.016>
- [54] Dilmec M., Arap M., Effect of geometrical and process parameters on coefficient of friction in deep drawing process at the flange and the radius regions, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86, 747-759, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8225-5>
- [55] Lee B. H., Keum Y.T., Wagoner R.H., Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 130-131, 60-63, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00784-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00784-7)
- [56] Guo B., Gong F., Wang C., Shan D., Size effect on friction in scaled down strip drawing, *Journal of Materials Science*, 2010, 45, 4067-4072, <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4492-6>
- [57] Guillon O., Roizard X., Belliard P., Experimental methodology to study tribological aspects of deep drawing — application to aluminium alloy sheets and tool coatings, *Tribology International*, 2001, 34, 757-766, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00069-X)

- [58] Adamus, J., Tribologiczne problemy kształtowania blach tytanowych, *Tribologia*, 2008, 2, 15-23
- [59] Roizard X., Stebut J., Surface asperity flattening in sheet metal forming — A 3-D relocation stylus profilometric study, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35, 169-175, [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)P2369-Q](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)P2369-Q)
- [60] Roizard X., Pothier J. M., Hihn J. Y., Monteil G., Experimental device for tribological measurement aspects in deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, 1220-1230, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.023>
- [61] Roizard X., Raharijaona F., Stebut J., Belliard P., Influence of sliding direction and sliding speed on the micro-hydrodynamic lubrication component of aluminium mill-finish sheets, *Tribology International*, 1999, 32, 739-747, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00008-6)
- [62] Zabala A., Galdos L., Childs C., Llavori I., Aginagalde A., Mendiguren J., Saenz de Argandoña E., The interaction between the sheet/tool surface texture and the friction/galling behaviour on aluminium deep drawing operations, *Metals*, 2021, 11, 979, <https://doi.org/10.3390/met11060979>
- [63] Evin E., Daneshjo N., Mareš A., Tomáš M., Petrovčiková K., Experimental assessment of friction coefficient in deep drawing and its verification by numerical simulation, *Applied Sciences*, 2021, 11, 2756, <https://doi.org/10.3390/app11062756>
- [64] Miguel V., Martínez A., Coello J., Avellaneda F. J., Calatayud A., A new approach for evaluating sheet metal forming based on sheet drawing test. Application to TRIP 700 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213, 1703-1710, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.010>
- [65] Więckowski W., Dyja K., The effect of the use of technological lubricants based on vegetable oils on the process of titanium sheet metal forming. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62, 489–494, <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0070>
- [66] Godfrey D., Friction oscillations with a pin-on-disc tribometer, *Tribology International*, 1995, 28, 119-126, [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)92701-6](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)92701-6)
- [67] Okonkwo P. C., Kelly G., Rolfe B. F., Pereira M. P., The effect of sliding speed on the wear of steel–tool steel pairs, *Tribology International*, 2016, 97, 218-227, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.030>
- [68] Le H. R., Sutcliffe M. P. F., Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication, *Tribology International*, 2002, 35, 123-128, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00104-9](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00104-9)

- [69] Costa H. L., Hutchings I. M., Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, 1175-1180, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.026>
- [70] Matuszak A., Determination of the frictional properties of coated steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 106, 107-111, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00599-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00599-9)
- [71] Bay N., Olsson D.D., Andreassen J.L., Lubricant test methods for sheet metal forming, *Tribology International*, 2008, 41, 844–853, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.11.017>
- [72] Szakaly E. D., Lenard J. G., The effect of process and material parameters on the coefficient of friction in the flat-die test, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210, 868-876, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.019>
- [73] Guo B., Gong F., Wang C., Shan D., Size effect on friction in scaled down strip drawing, *Journal of Materials Science*, 2010, 45, 4067-4072, <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4492-6>
- [74] Karthik A. V. Vegetable oil as a forming lubricant for deep drawing of AA6061, *International Journal of Engineering Science and Computing*, 2016, 6, 1580–1582
- [75] Carcel A.C., Palomares D., Rodilla, E., Pérez Puig M.A., Evaluation of vegetable oils as pre-lube oils for stamping, *Materials & Design*. 2005, 26, 587–593, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.08.010>
- [76] Trzepieciński T., **Szewczyk M.**, Szwajka K., The use of non-edible green oils to lubricate DC04 steel sheets in sheet metal forming process, *Lubricants*, 2022, 10, 210, <https://doi.org/10.3390/lubricants10090210>
- [77] Dyja K., Adamus J., Badania nad doborem smarów technologicznych do tłoczenia blach aluminiowych i tytanowych, 2014, 3, 19-28
- [78] Rogoś E., Wpływ dodatków AW/EP na właściwości smarne ekologicznych kompozycji smarowych, *Tribologia*, 2013, 6, 109-120
- [79] Schell L., Emele M., Holzbeck A., Groche P., Investigation of different lubricant classes for aluminium warm and hot forming based on a strip drawing test, *Tribology International*, 2022, 168, 107449, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107449>
- [80] Masters L.G., Williams D.K., Roy R., Friction behaviour in strip draw test of pre-stretched high strength automotive aluminium alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 73, 17–24, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.05.002>

- [81] **Szewczyk M.**, Szwajka K., Trzepieciński T., Frictional characteristics of deep-drawing quality steel sheets in the flat die strip drawing test, *Materials*, 2022, 15, 5236, <https://doi.org/10.3390/ma15155236>
- [82] **Szewczyk M.**, Szwajka K., Analysis of the friction mechanisms of DC04 steel sheets in the flat strip drawing test, *Advances in Mechanical and Materials Engineering*, 2022, 94, 51-61, <https://doi.org/10.7862/rm.2022.4>
- [83] Żaba K., Kuczek Ł., Puchlerska S., Wiewióra M., Góral M., Trzepieciński T., Analysis of tribological performance of new stamping die composite inserts using strip drawing test, *Advances in Mechanical and Materials Engineering*, 2023, 40, 55–62, <https://doi.org/10.7862/rm.2023.7>
- [84] Slota J., Trzepieciński T., Kaščák L., Gajdoš I., Vojtko M., Friction behaviour of 6082-T6 aluminium alloy sheets in a strip draw tribological test. *Materials*, 2023, 16, 2338, <https://doi.org/10.3390/ma16062338>
- [85] Groche P., Christiany M., Wu Y., Load-dependent wear in sheet metal forming, *Wear*, 2019, 422-423, 252-260, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.071>
- [86] Domitner J., Silvayeh Z., Shafiee Sabet A., Öksüz K. I., Pelcastre L., Hardell J., Characterization of wear and friction between tool steel and aluminum alloys in sheet forming at room temperature, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64, 774-784, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.007>
- [87] Venema J., Matthews D. T. A., Hazrati J., Wörmann J., Van den Boogaard A. H., Friction and wear mechanisms during hot stamping of AlSi coated press hardening steel, *Wear*, 2017, 380-381, 137-145, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.014>
- [88] Kondratiuk J., Kuhn P., Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming, *Wear*, 2011, 270, 839-849, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.011>
- [89] Domitner J., Silvayeh Z., Sabet A.S., Öksüz K.I., Pelcastre L., Hardell J., Characterization of wear and friction between tool steel and aluminum alloys in sheet forming at room temperature, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64, 774–784, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.007>
- [90] Shisode M., Hazrati J., Mishra T., Rooij M., Horn C., Beck J., Boogaard T., Modelling boundary friction of coated sheets in sheet metal forming, *Tribology International*, 2021, 153, 106554, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106554>
- [91] Kim H., Han S., Yan Q., Altan T., Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS), *CIRP Annals*, 2008, 57, 299–304, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.029>

- [92] Groche P., Christiany M., Evaluation of the potential of tool materials for the cold forming of advanced high strength steels, *Wear*, 2013, 302, 1279-1285, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.001>
- [93] Trzepieciński T., Sz wajka K., **Szewczyk M.**, Pressure-assisted lubrication of DC01 steel sheets to reduce friction in sheet-metal-forming processes, *Lubricants*, 2023, 11, 169, <https://doi.org/10.3390/lubricants11040169>
- [94] Severo V., Vilhena L., Silva P.N., Dias J.P., Becker D., Wagner S., Cavaleiro A., Tribological behaviour of W–Ti–N coatings in semi-industrial strip-drawing tests, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209, 4662–4667, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.040>
- [95] Guillon O., Roizard X., Belliard P., Experimental methodology to study tribological aspects of deep drawing application to aluminium alloy sheets and tool coatings, *Tribology International*, 2001, 34, 757–766, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00069-X)
- [96] Holmberg K., Erdemir A., Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, *Friction*, 2017, 5, 263–284
- [97] Zhao R., Steiner J., Andreas K., Merklein M., Tremmel S., Investigation of tribological behaviour of a-C:H coatings for dry deep drawing of aluminium alloys, *Tribology International*, 2018, 118, 484-490, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.031>
- [98] Tenner J., Andreas K., Radius A., Merklein M., Numerical and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces, *Procedia Engineering*, 2017, 207, 2245-2250, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.989>
- [99] Çavuşoğlu O., Gürün H., Statistical evaluation of the influence of temperature and surface roughness on aluminium sheet metal forming, *Transactions of Famena*, 2017, 41, 57–64, <https://doi.org/10.21278/TOF.41305>
- [100] Trzepieciński T., Luiz V. D., Sz wajka K., **Szewczyk M.**, Szpunar M., Analysis of the lubrication performance of low-carbon steel sheet in the presence of pressurised lubricant, *Advances in materials science*, 2023, 23, 64-76, <https://doi.org/10.2478/adms-2023-0011>
- [101] Jivan R.B., Eskandarzade M., Bewsher S.R., Leighton M., Mohammadpour M., Saremi-Yarahmadi S., Application of solid lubricant for enhanced frictional efficiency of deep drawing process, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 236, 624–634, <https://doi.org/10.1177/0954406221994886>

- [102] Trzepieciński T., Szwajka K., **Szewczyk M.**, An investigation into the friction of cold-rolled low-carbon DC06 steel sheets in sheet metal forming using radial basis function neural networks, *Applied Sciences*, 2023, 13, 9572, <https://doi.org/10.3390/app13179572>
- [103] Lee B. H., Keum Y. T., Wagoner R. H., Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 130-131, 60-63, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00784-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00784-7)
- [104] Henn M., Reichardt G., Weber R., Graf T., Liewald M., Dry metal forming using volatile lubricants injected into the forming tool through flow-optimized, laser-drilled microholes, *JOM*, 2020, 72, 2517-2524, <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04169-6>
- [105] Nowak P., Kucharska K., Kamiński M., Ecological and health effects of lubricant oils emitted into the environment, *Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment*, 2019, 16, 3002, <https://doi.org/10.3390/ijerph16163002>
- [106] **Szewczyk M.**, Szwajka K., Assessment of the tribological performance of bio-based lubricants using analysis of variance, *Advances in Mechanical and Materials Engineering*, 2023, 40, 31-38, <https://doi.org/10.7862/rm.2023.4>
- [107] Trzepieciński T., Tribological performance of environmentally friendly biodegradable lubricants based on a combination of boric acid and bio-based oils, *Materials*, 2020, 13, 3892, <https://doi.org/10.3390/ma13173892>
- [108] Prakash V., Kumar D.R., Performance evaluation of bio-lubricants in strip drawing and deep drawing of an aluminium alloy, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, 8, 1044-1057, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1838134>
- [109] Shashidhara Y.M., Jayaram S.R., Deep drawing of 304 L steel sheet using vegetable oils as forming lubricants, *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 2012, 1, 1–5
- [110] Seshacharyulu K., Bandhavi C., Naik B.B., Rao S.S., Singh S.K., Understanding Friction in sheet metal forming-A review, *Materials Today*, 2018, 5, 18238–18244, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.160>
- [111] Nielsen C.V., Bay N., Overview of friction modelling in metal forming processes, *Procedia Engineering*, 2017, 207, 2257–2262, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.991>

- [112] Wang C., Ma R., Zhao J., Zhao J., Calculation method and experimental study of coulomb friction coefficient in sheet metal forming, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 27, 126–137, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.016>
- [113] Trzepieciński T., Szwajka K., **Szewczyk M.**, Analysis of surface topography changes during Friction testing in cold metal forming of DC03 steel samples, *Coatings*, 2023, 13, 1738, <https://doi.org/10.3390/coatings13101738>
- [114] Vollertsen F., Hu Z., Tribological size effects in sheet metal forming measured by a strip drawing test, *CIRP Annals*, 2006, 55, 291–294, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60419-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60419-3)
- [115] Evin E., Tomáš M., Výrostek M., Verification the numerical simulation of the strip drawing test by its physical model, *Acta Mechanica Slovaca*, 2016, 20, 14–21
- [116] Azushima A., Kudo H., Direct observation of contact behaviour to interpret the pressure dependence of the coefficient of friction in sheet metal forming, *CIRP Annals*, 1995, 44, 209–212, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62309-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62309-9)
- [117] Śliwa M., Wyznaczenie krzywej umocnienia plastycznego na podstawie statycznej próby rozciągania, *Mechanik*, 2018, 10, 859-861, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.144>
- [118] Trzepieciński T., Szwajka K., **Szewczyk M.**, Przyrząd do wyznaczania współczynnika tarcia, zwłaszcza blach, Zgłoszenie wynalazku P.444834, (data zgłoszenia 10.05.2023 r.)
- [119] Singh R., Melkote S.N., Hashimoto F., Frictional response of precision finished surfaces in pure sliding, *Wear*, 2005, 258, 1500–1509, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.071>
- [120] Djordjević M., Aleksandrović S., Djačić S., Sedmak A., Lazić V., Arsić D., Mutavdžić M., Simulation of flat die deep drawing process by variable contact pressure sliding model, *Tehnički Vjesnik*, 2019, 26, 1199–1204, <https://doi.org/10.17559/TV-20161215205553>
- [121] Wang W.Z., Che H., Hu Y.Z., Wang H., Effect of surface roughness parameters on mixed lubrication characteristics, *Tribology International*, 2006, 39, 522–527, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.018>
- [122] Sedlaček M., Vilhena L.M.S., Podgornik B., Vižintin J., Surface topography modelling for reduced friction, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 57, 674–680, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.140>
- [123] Zamanlooy B., Mirhassani M., Efficient VLSI implementation of neural networks with hyperbolic tangent activation function, *IEEE Transactions on Very Large Scale*

Integration (VLSI) Systems, 2014, 22, 39–48,
<https://doi.org/10.1109/TVLSI.2012.2232321>

- [124] Ercanlı I., Günlü A., Şenyurt M., Keleş S., Artificial neural network models predicting the leaf area index: A case study in pure even-aged Crimean pine forests from Turkey, *Forest Ecosystems*, 2018, 5, 29, <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0149-8>
- [125] Snelick R., Uludag U., Mink A., Indovina M., Jain A., Large-scale evaluation of multimodal biometric authentication using state-of-the-art systems, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27, 450-455, <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.57>
- [126] Xiang C., Ding S.Q., Lee T.H., Geometrical interpretation and architecture selection of MLP, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16, 84-96, <https://doi.org/10.1109/TNN.2004.836197>
- [127] Erol F. S., Uysal H., Ergün U., Barışçı N., Serhatlıoğlu S., Hardalaç F., Prediction of minor head injured patients using logistic regression and MLP neural network, *Journal of Medical Systems*, 2005, 29, 205-215, <https://doi.org/10.1007/s10916-005-5181-x>
- [128] Shymkovych V., Telenyk S., Kravets P., Hardware implementation of radial-basis neural networks with Gaussian activation functions on FPGA, *Neural Computing and Applications*, 2021, 33, 9467–9479, <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05706-3>
- [129] Savitha R., Suresh S., Sundararajan N., A fully complex-valued radial basis function network and its learning algorithm, *International Journal of Neural Systems*, 2009, 19, 253–267, <https://doi.org/10.1142/S0129065709002026>
- [130] Chen J.C., Wang Y.M., Comparing activation functions in modelling shoreline variation using multilayer perceptron neural network, *Water*, 2020, 12, 1281, <https://doi.org/10.3390/w12051281>

Normy

- [131] PN-EN ISO 1302:2004. Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS) – Oznaczenie struktury geometrycznej powierzchni w dokumentacji technicznej wyrobu
- [132] PN-EN 10130:2009. Wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali niskowęglowych do obróbki plastycznej na zimno – Warunki techniczne dostawy
- [133] PN-EN ISO 6892-1:2020. Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej

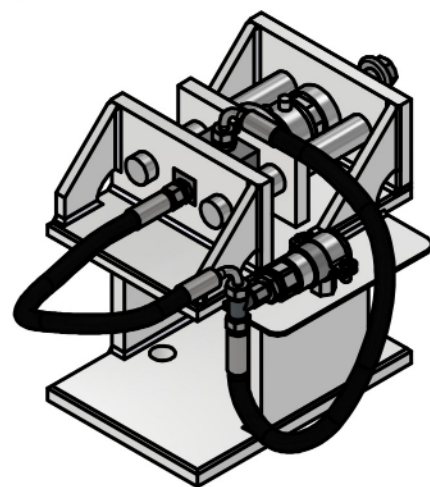
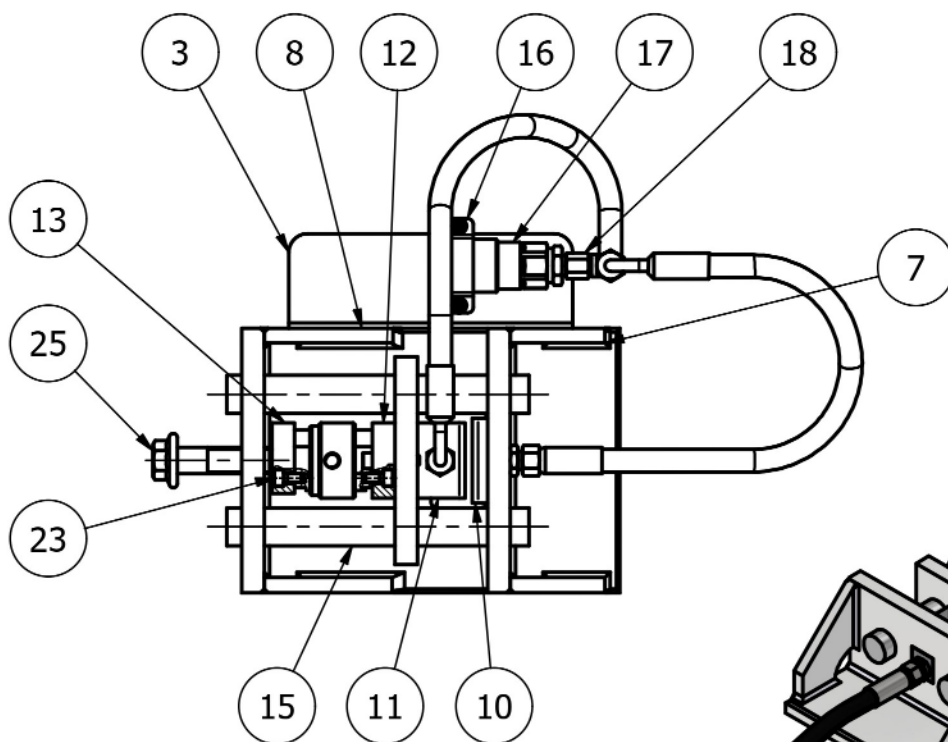
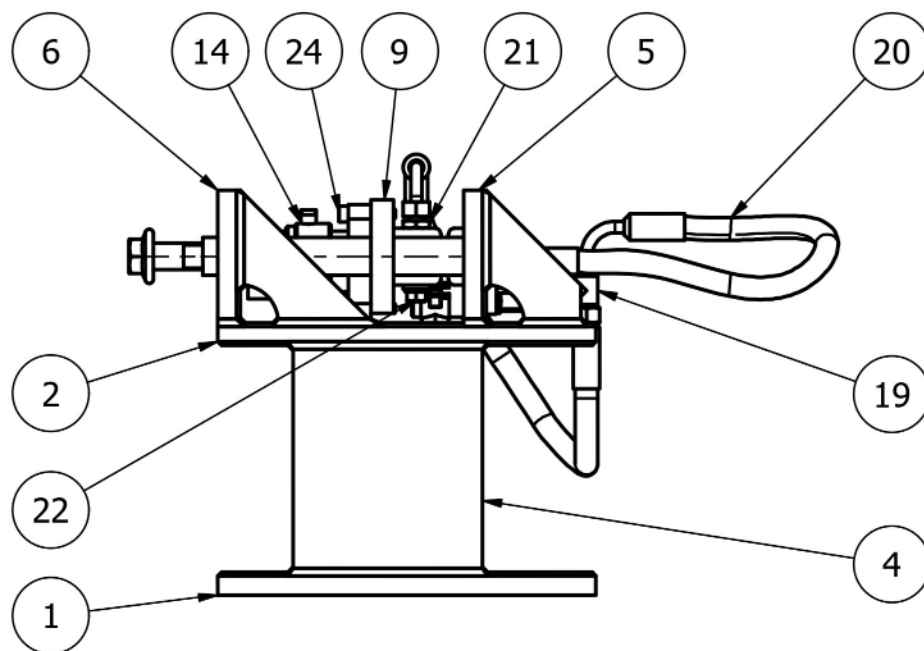
- [134] PN-EN ISO 25178-2:2022. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje I parametry struktury geometrycznej powierzchni
- [135] PN-EN ISO 4957:2018. Stale narzędziowe

Netografia


- [136] <https://isofinishing.com/surface-roughness-chart/> (dostęp: 18.10.2023 r.)
- [137] <https://www.baeldung.com/cs/normalizing-inputs-artificial-neural-network> (dostęp: 18.10.2023 r.)


Załączniki

- 1 MS – TWT – 00 – rysunek złożeniowy „Tester współczynnika tarcia”
- 2 MS – TWT – 01 – rysunek wykonawczy „Podstawa 1”
- 3 MS – TWT – 02 – rysunek wykonawczy „Podstawa 2”
- 4 MS – TWT – 03 – rysunek wykonawczy „Podstawa 3”
- 5 MS – TWT – 04 – rysunek wykonawczy „Płyta 1”
- 6 MS – TWT – 05 – rysunek wykonawczy „Płyta 2”
- 7 MS – TWT – 06 – rysunek wykonawczy „Płyta 3”
- 8 MS – TWT – 07 – rysunek wykonawczy „Żebro 1”
- 9 MS – TWT – 08 – rysunek wykonawczy „Żebro 2”
- 10 MS – TWT – 09 – rysunek wykonawczy „Wspornik”
- 11 MS – TWT – 10 – rysunek wykonawczy „Przeciwpróbka 1”
- 12 MS – TWT – 11 – rysunek wykonawczy „Przeciwpróbka 2”
- 13 MS – TWT – 12 – rysunek wykonawczy „Dystans mocujący czujnik”
- 14 MS – TWT – 13 – rysunek wykonawczy „Dystans”



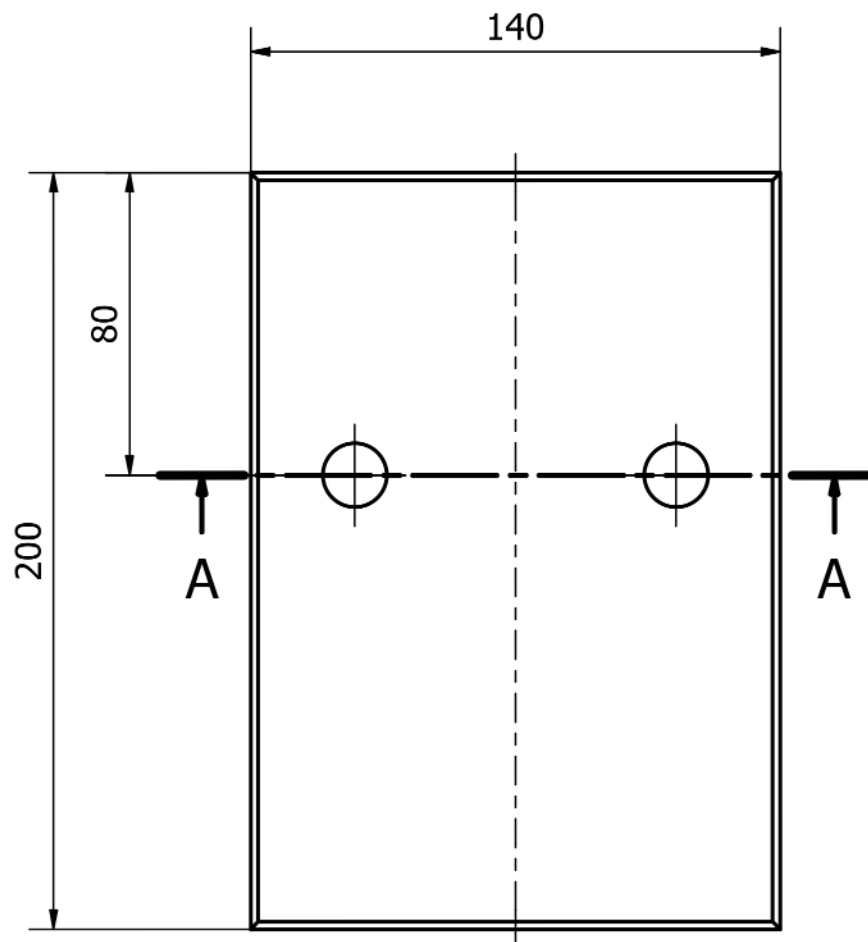
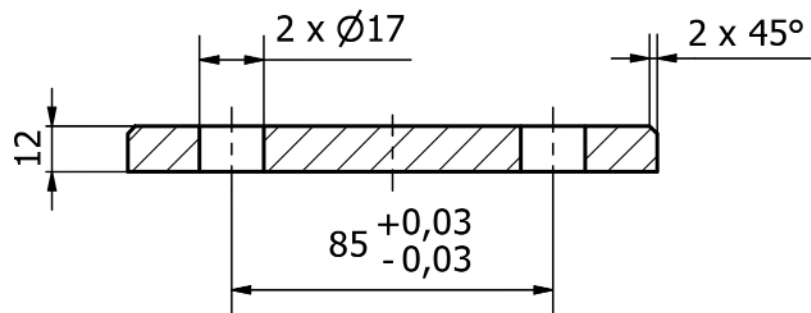
Podziałka 1:4	Format A4	Arkusz 1	Materiał -	Masa 12,5 kg	Data	06.09.2023
					Rysował	Marek Szewczyk
					Zatwierdził	

 POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA	Nazwa części	Nr rysunku
	Tester współczynnika tarcia	MS - TWT - 00


25	Śruba z łbem wieńcowym sześciokątnym - M14 x 50	1	E295	ISO 4162		
24	Śruba z łbem z gniazdem sześciokątnym - M5 x 25	2	S235JR	BS EN ISO 4762		
23	Śruba z łbem z gniazdem sześciokątnym - M5 x 10	8	S235JR	BS EN ISO 4762		
22	Śruba z łbem wieńcowym sześciokątnym - M10 x 1	1	E295	DIN 910		
21	Złącze redukujące gwint 1/4" - M10 x 1	2	304L	PN-EN ISO 228-1:2005		
20	Przewód hydrauliczny Ø6 x 50 mm zakuty dwustronnie gwint wew. 1/4"	2	guma/304L	PN-EN ISO 1307:2008		
19	Rozdzielacz hydrauliczny - trójnik gwint zew. 1/4"	1	304L	PN-EN ISO 228-1:2005		
18	Złącze redukujące gwint zew. 1/2" - 1/4"	1	304L	PN-EN ISO 228-1:2005		
17	Szybkozłącze suchoodcinające - gniazdo - przyłącze gwint wew. 1/2"	1	304L	ISO 16028		
16	Uchwyt metalowy 25 - 30 mm	1	S235JR	DIN 3567		
15	Trzpień prowadzący	2	C45	ISO 15552		
14	Czujnik piezoelektryczny	1	-	-		
13	Dystans	1	AW - 2017A	MS - TWT - 13		
12	Dystans mocujący czujnik	1	AW - 2017A	MS - TWT - 12		
11	Przeciwpróbka 2	1	145Cr6	MS - TWT - 11		
10	Przeciwpróbka 1	1	145Cr6	MS - TWT - 10		
9	Wspornik	1	316L	MS - TWT - 09		
8	Żebro 2	2	316L	MS - TWT - 08		
7	Żebro 1	2	316L	MS - TWT - 07		
6	Płyta 3	1	316L	MS - TWT - 06		
5	Płyta 2	1	316L	MS - TWT - 05		
4	Płyta 1	2	316L	MS - TWT - 04		
3	Podstawa 3	1	316L	MS - TWT - 03		
2	Podstawa 2	1	316L	MS - TWT - 02		
1	Podstawa 1	1	316L	MS - TWT - 01		
NUMER CZĘŚCI	NAZWA CZĘŚCI	ILOŚĆ	MATERIAŁ	NR NORMY / RYSUNKU		
Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023
1:4	A4	2	-	12,5 kg	Rysował	Marek Szewczyk
					Zatwierdził	
		Nazwa części			Nr rysunku	
		Tester współczynnika tarcia			MS - TWT - 00	

Ra 10 (✓)

A-A

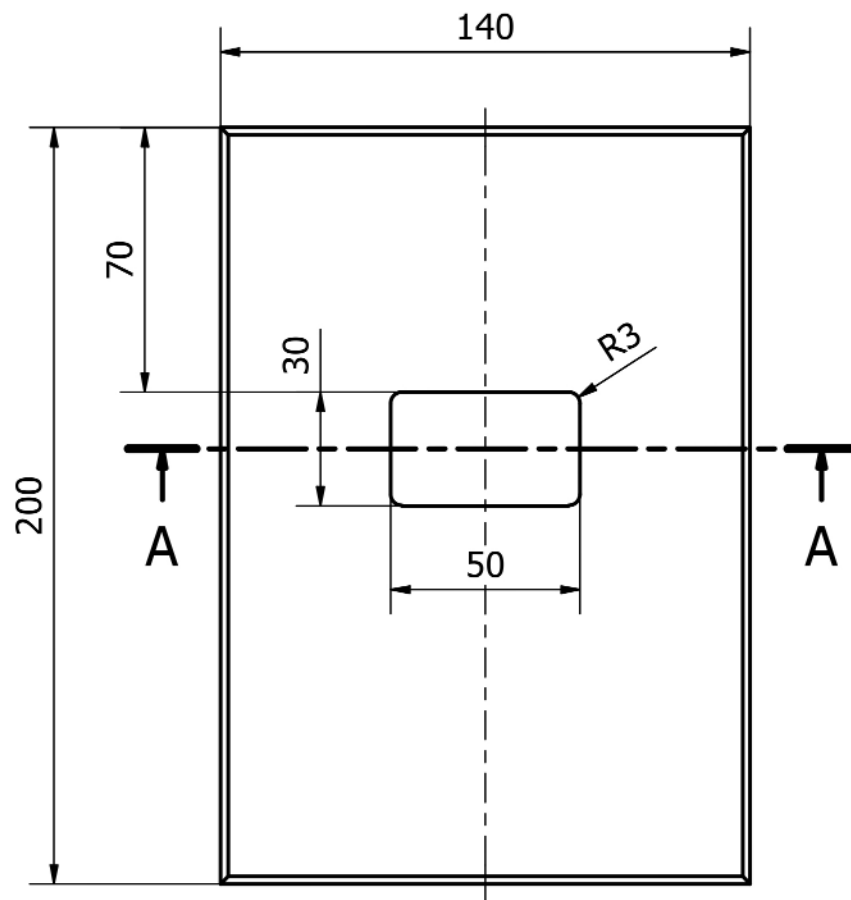
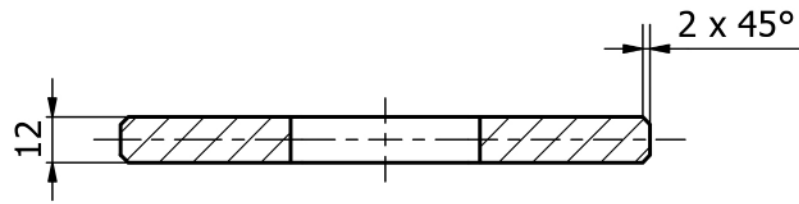


Uwaga!
Ostre krawędzie stępić


Podziałka 1 : 2	Format A4	Arkusz 1	Materiał 316L	Masa 2,634 kg	Data	06.09.2023
					Rysował	Marek Szewczyk
Zatwierdził						
 POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA		Nazwa części Podstawa 1				Nr rysunku MS - TWT - 01

$\sqrt{\text{Ra } 10}$ (✓)

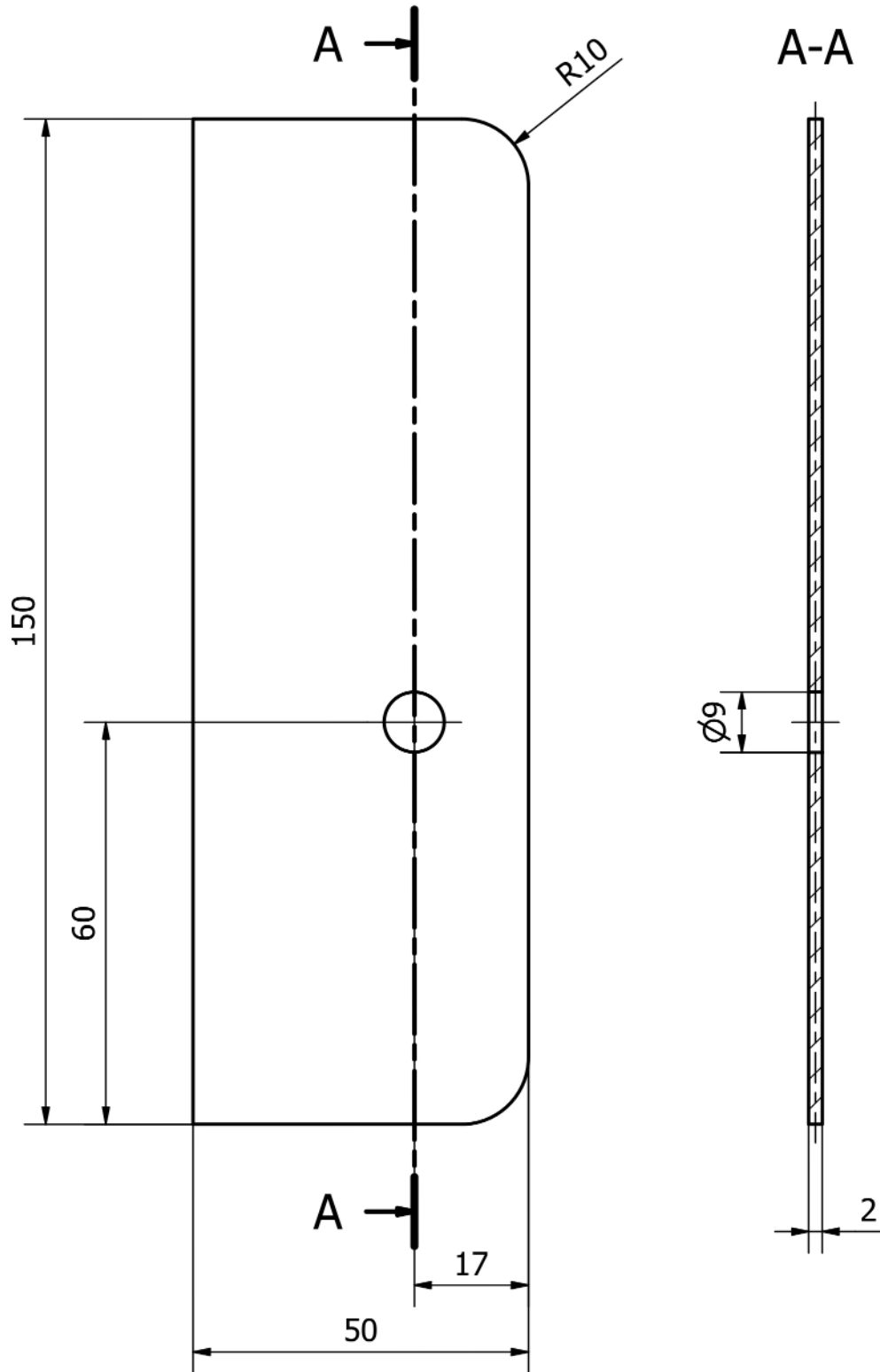
A-A




Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka 1 : 2	Format A4	Arkusz 1	Materiał 316L	Masa 2,523 kg	Data	06.09.2023
					Rysował	Marek Szewczyk
Zatwierdził						
		Nazwa części Podstawa 2				Nr rysunku MS - TWT - 02

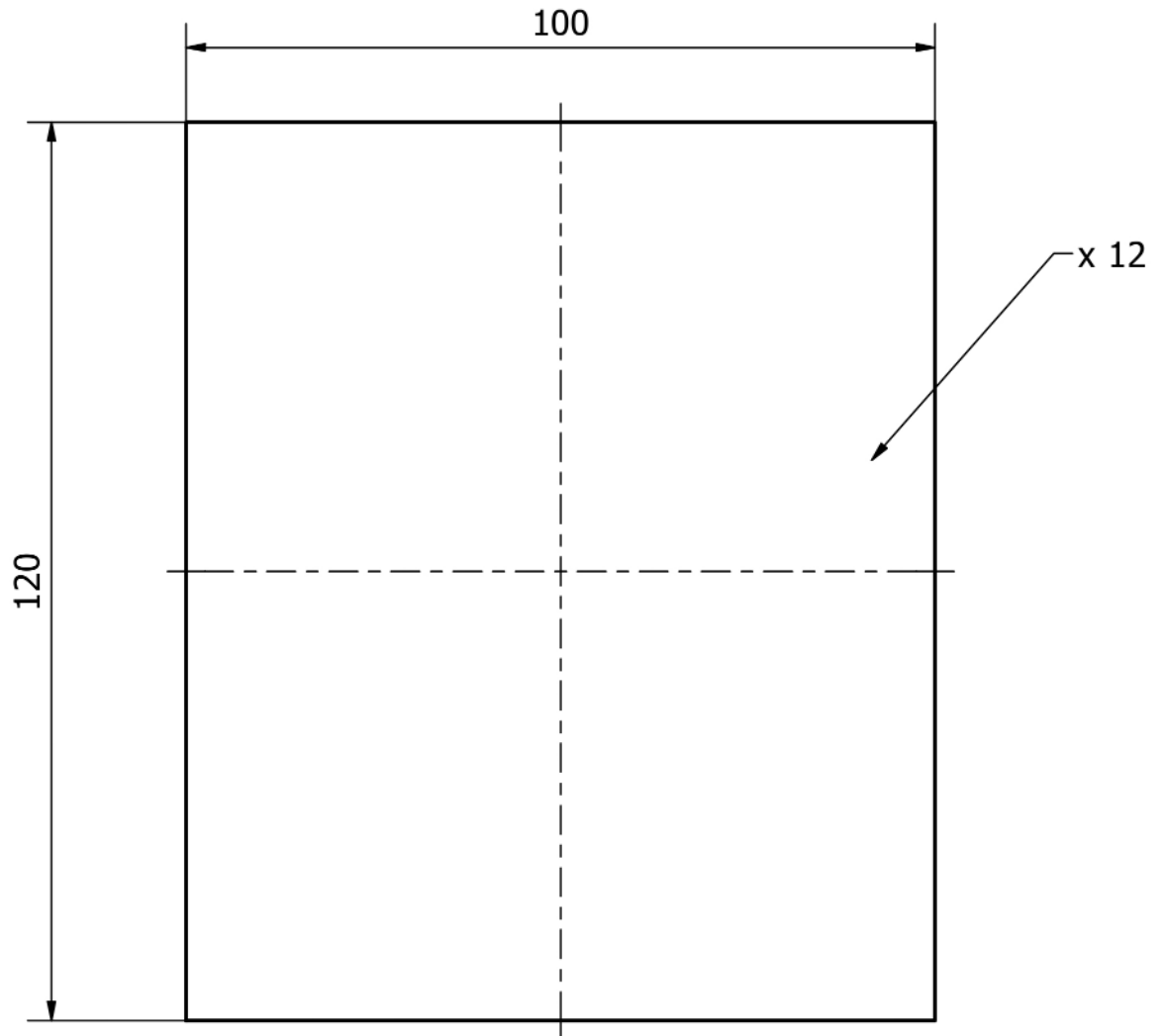
Ra 10 (✓)




Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023	
1 : 1	A4	1	316L	0,118 kg	Rysował	Marek Szewczyk	
					Zatwierdził		
 POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA		Nazwa części				Nr rysunku	
		Podstawa 3				MS - TWT - 03	

Ra 10 (✓)

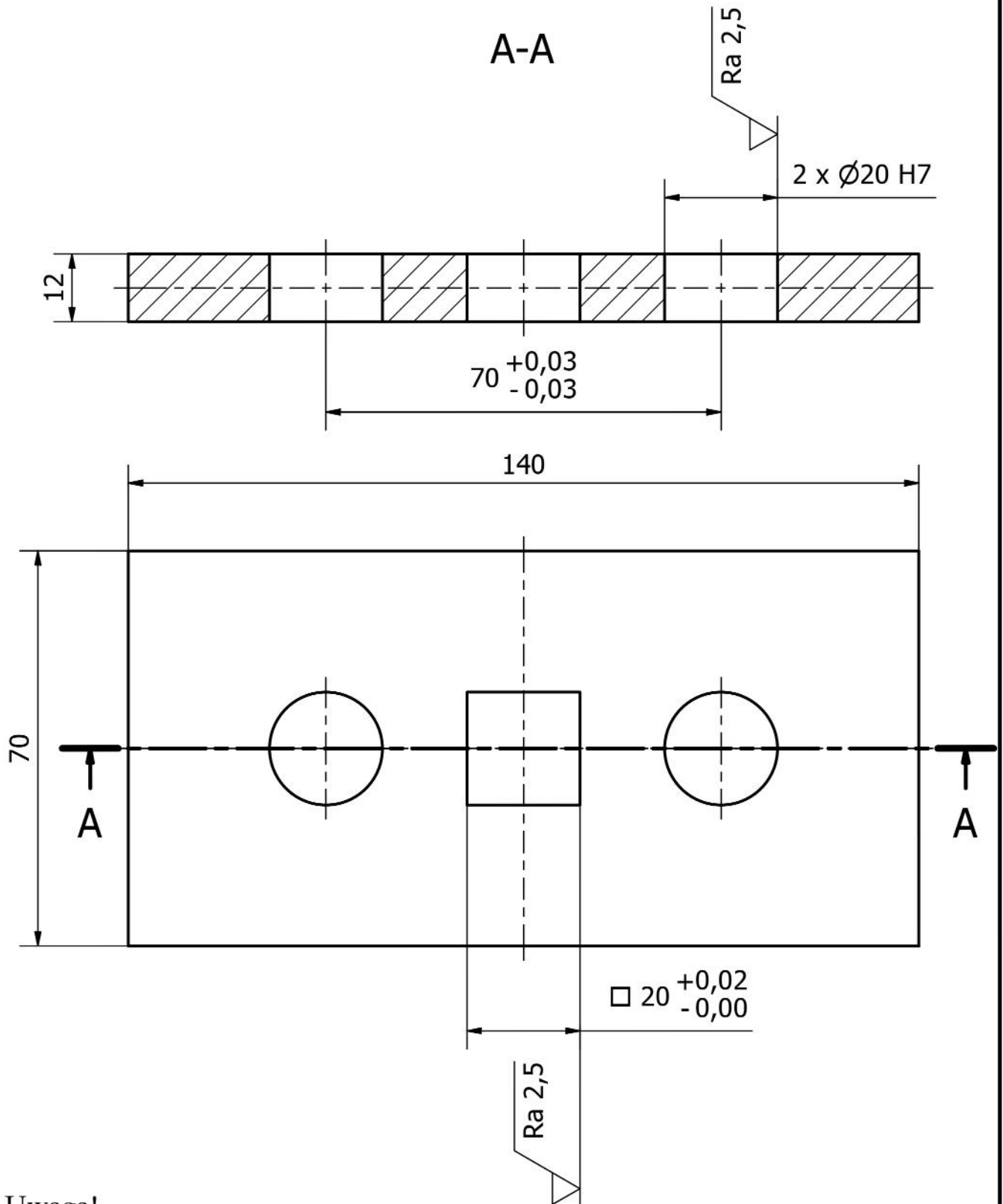


Uwaga!
Ostre krawędzie stępić


Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023	
1 : 1	A4	1	316L	1,152 kg	Rysował	Marek Szewczyk	
					Zatwierdził		
		Nazwa części				Nr rysunku	
		Płyta 1				MS - TWT - 04	

Ra 10 (✓)

A-A

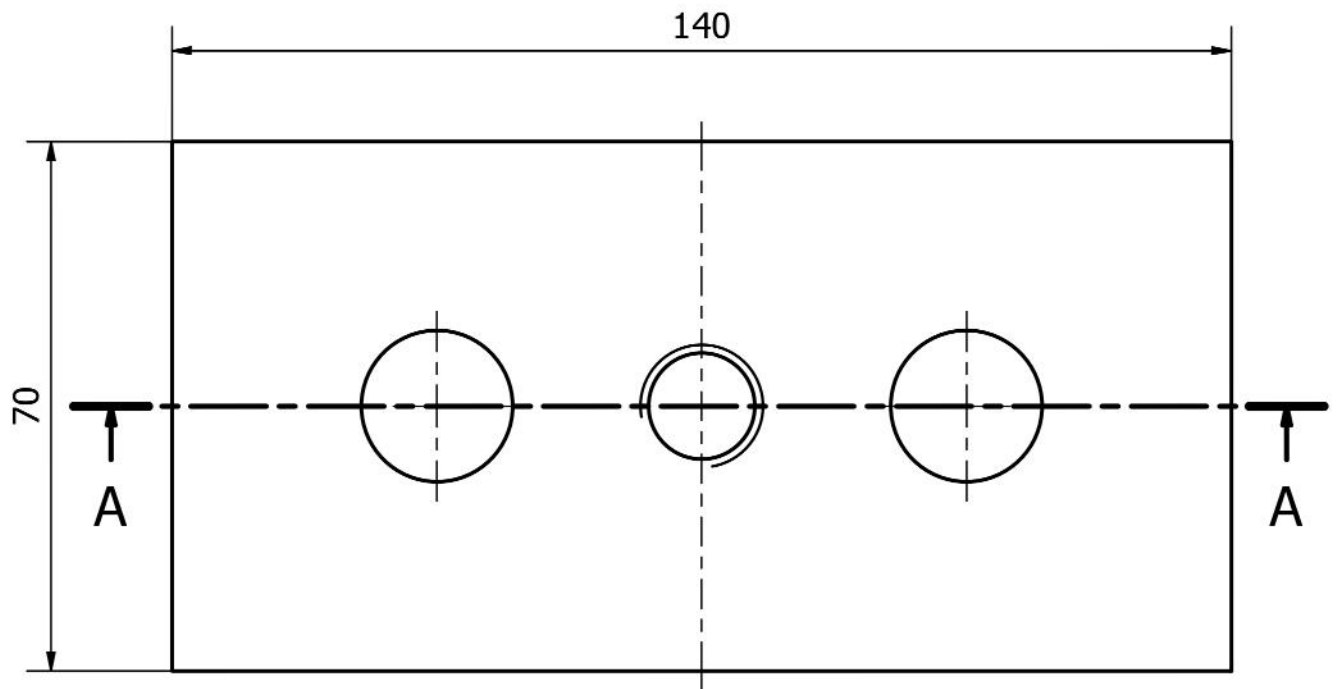
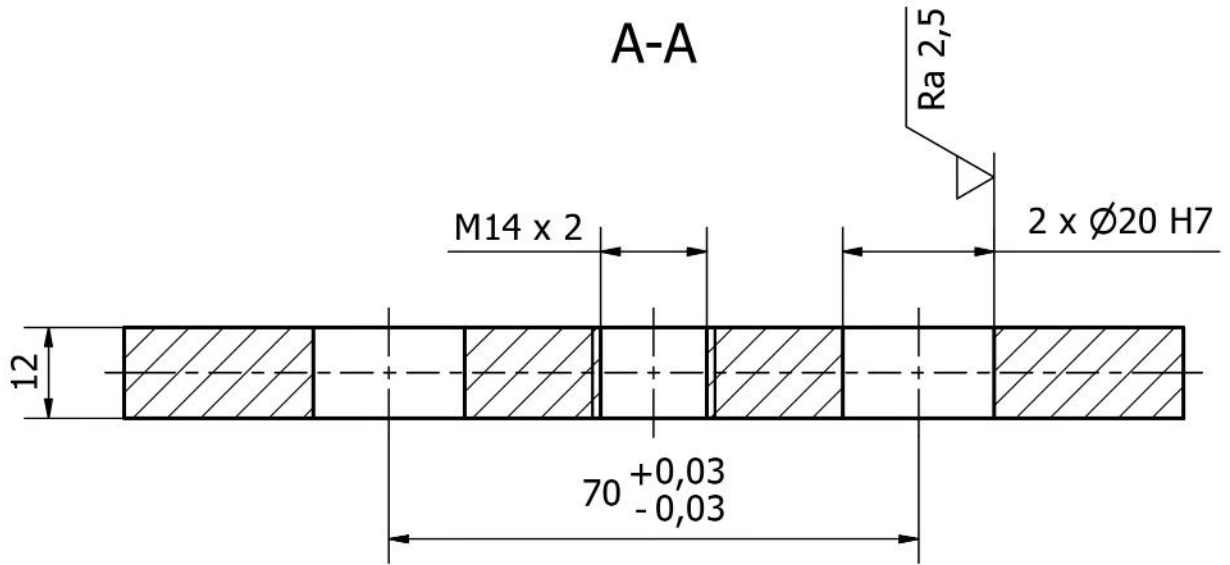


Uwaga!
Ostre krawędzie stępić


Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023
1 : 1	A4	1	316L	0,842 kg	Rysował	Marek Szewczyk
					Zatwierdził	
		Nazwa części			Nr rysunku	
		Płyta 2			MS - TWT - 05	

Ra 10 (✓)

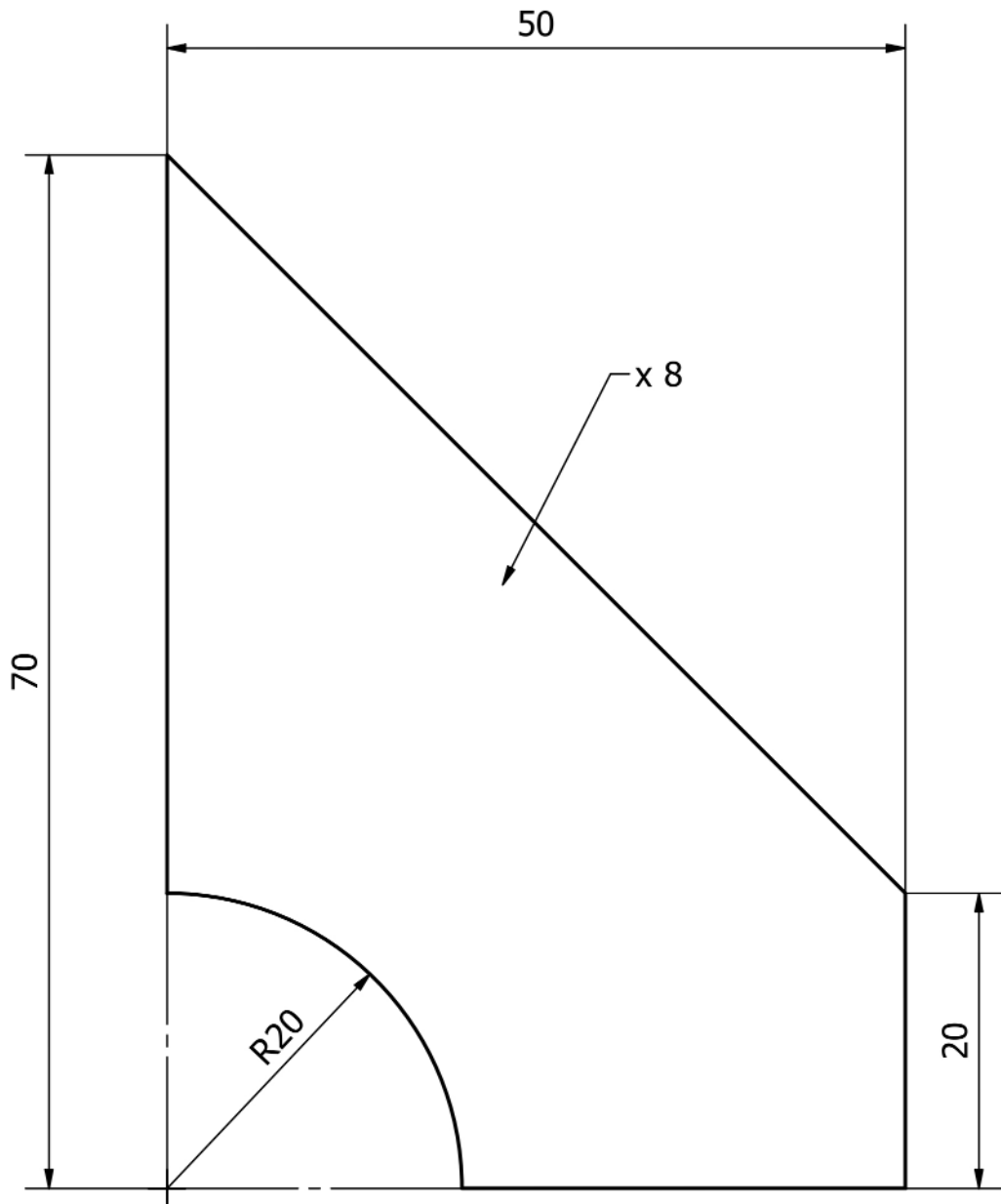
A-A




Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023	
1 : 1	A4	1	316L	0,866 kg	Rysował	Marek Szewczyk	
					Zatwierdził		
		Nazwa części				Nr rysunku	
		Płyta 3				MS - TWT - 06	

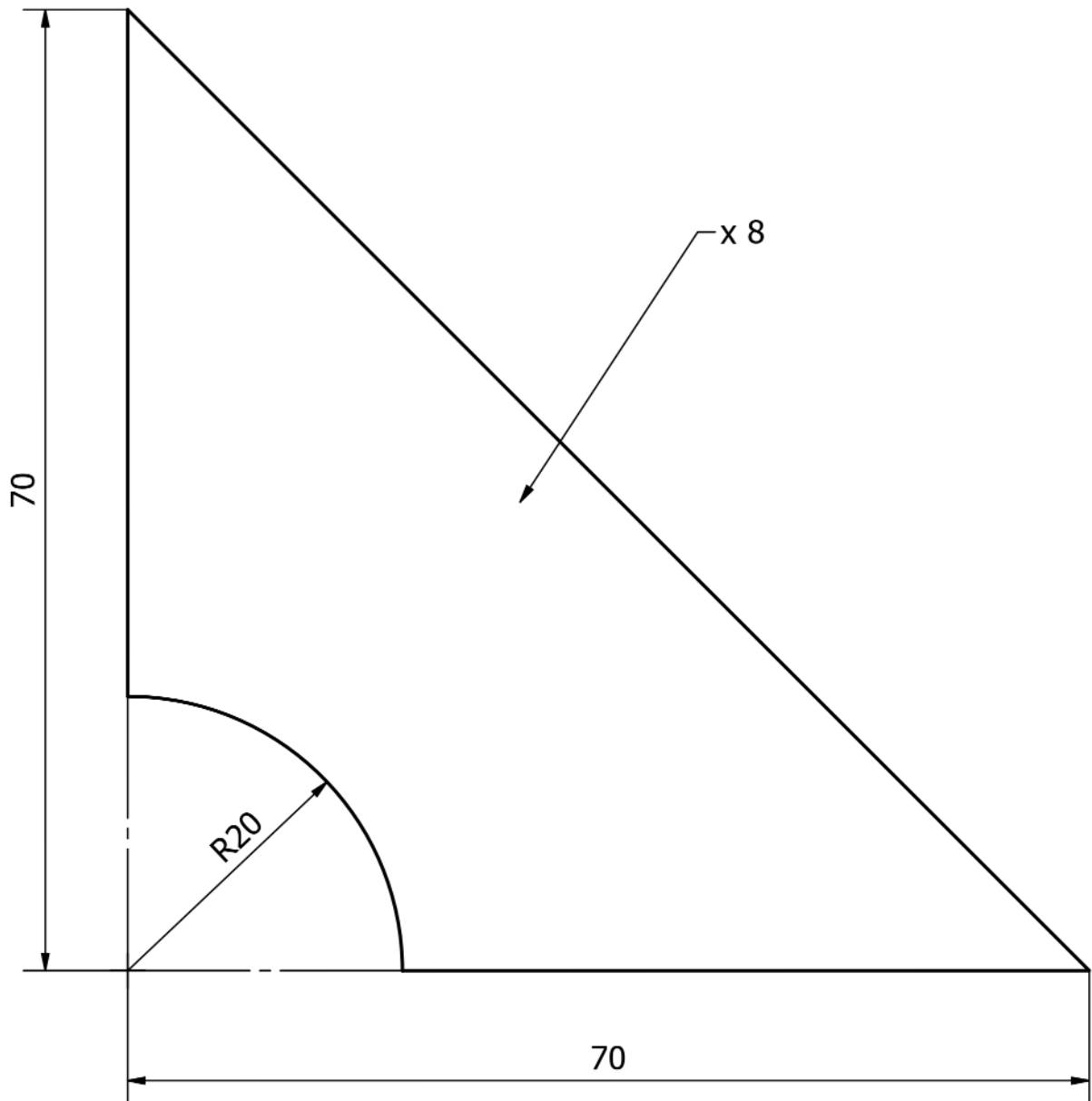
Ra 10 (✓)




Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka 2 : 1	Format A4	Arkusz 1	Materiał 316L	Masa 0,124 kg	Data	06.09.2023
					Rysował	Marek Szewczyk
					Zatwierdził	
		Nazwa części Żebro 1			Nr rysunku MS - TWT - 07	

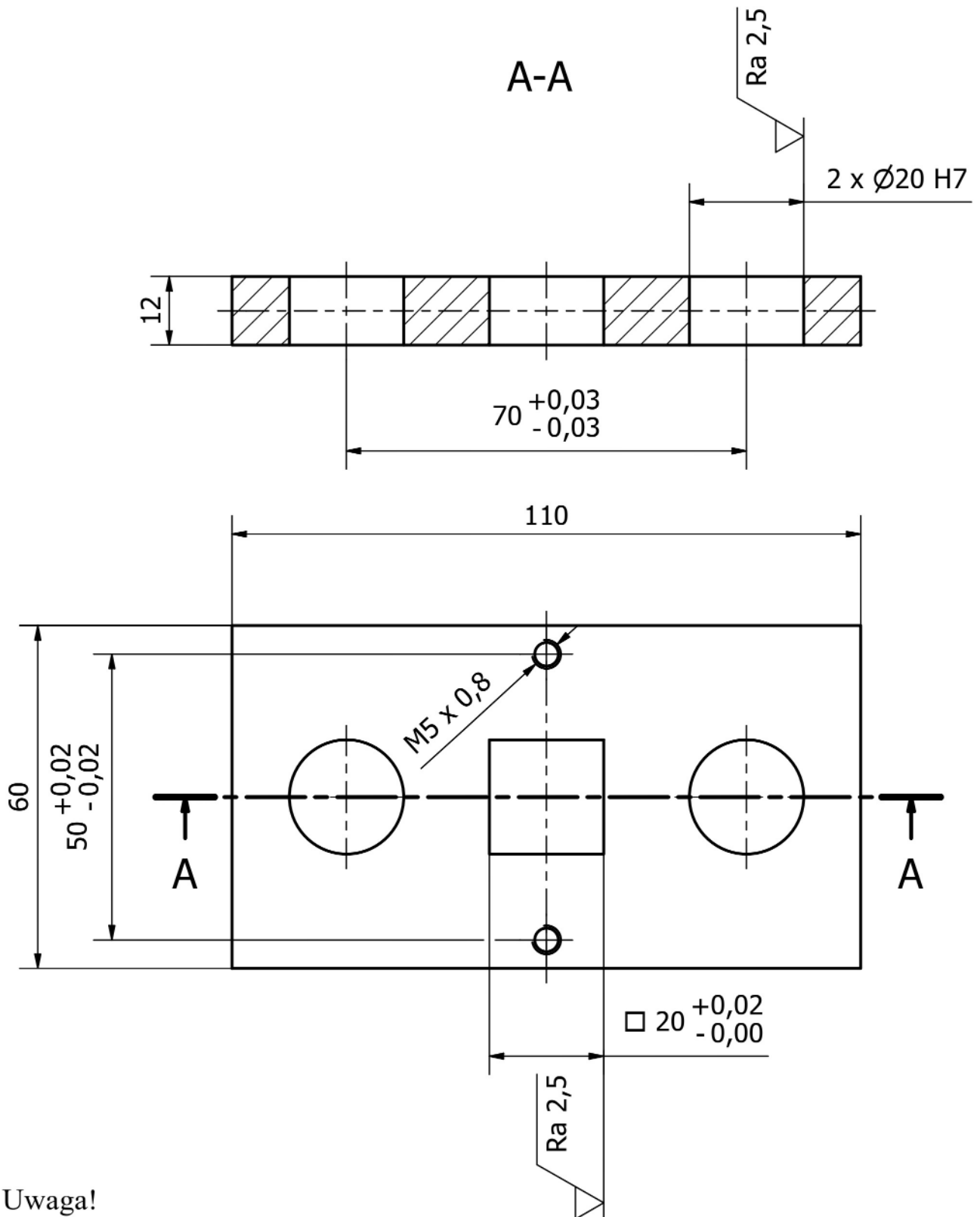
Ra 10 (✓)




Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023	
2 : 1	A4	1	316L	0,137 kg	Rysował	Marek Szewczyk	
					Zatwierdził		
		Nazwa części				Nr rysunku	
		Żebro 2				MS - TWT - 08	

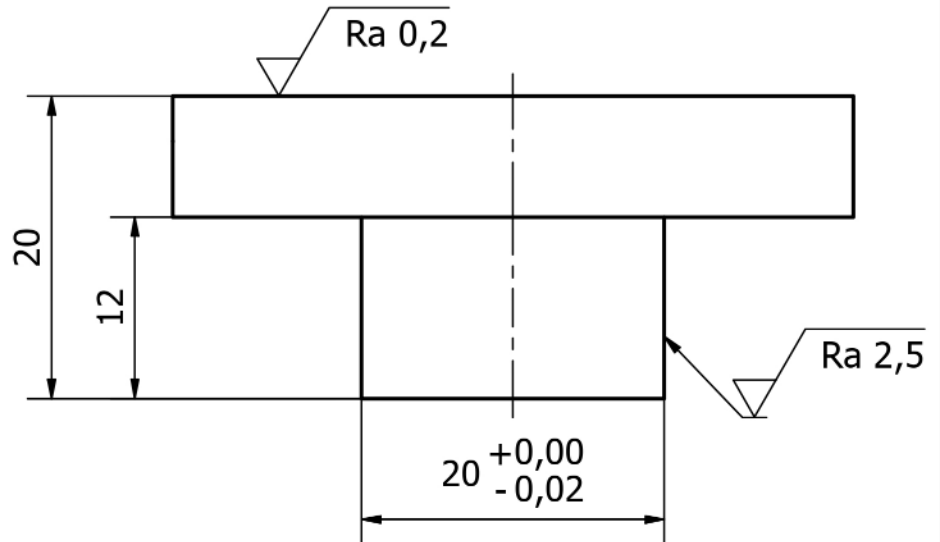
Ra 10 (✓)



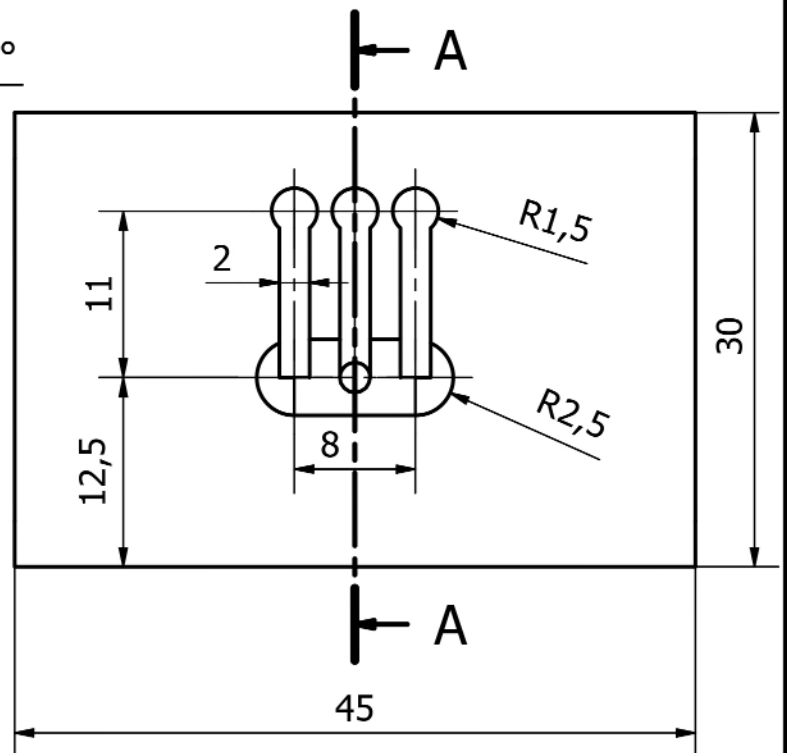
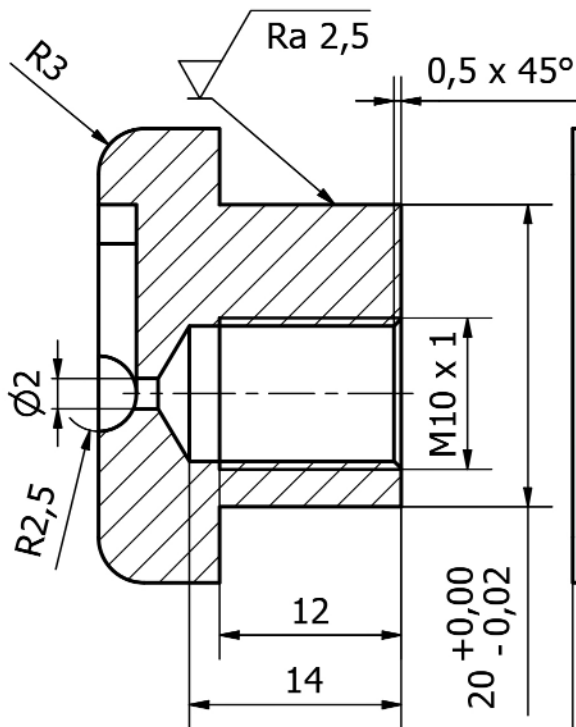
Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023
1 : 1	A4	1	316L	0,532 kg	Rysował	Marek Szewczyk
					Zatwierdził	
		Nazwa części			Nr rysunku	
		Wspornik			MS - TWT - 09	

Ra 10 (✓)



A-A



Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka 2 : 1	Format A4	Arkusz 1	Materiał 145Cr6	Masa 0,110 kg	Data	06.09.2023
					Rysował	Marek Szewczyk
					Zatwierdził	



Nazwa części

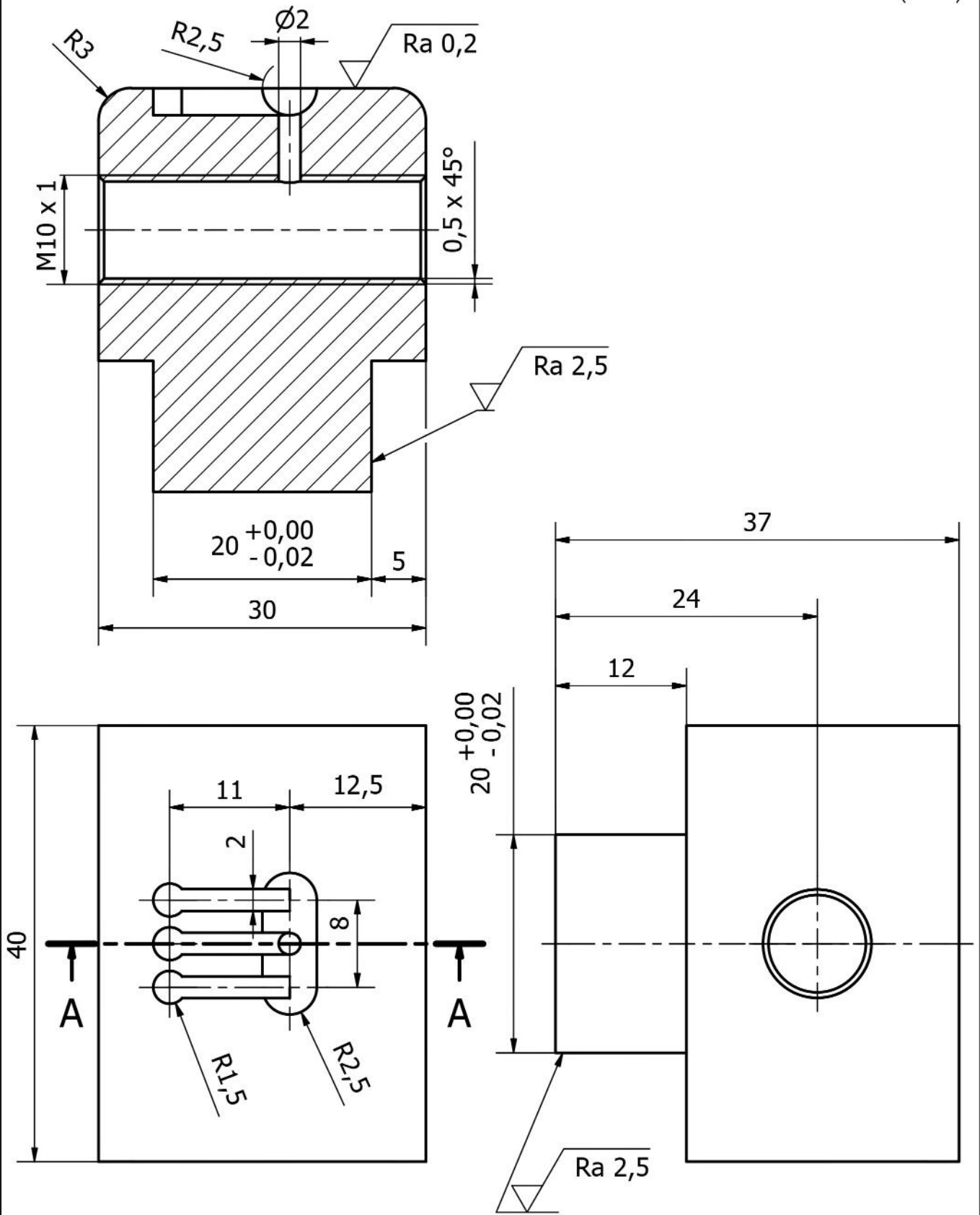
Przeciwpróbka 1

Nr rysunku


MS - TWT - 10

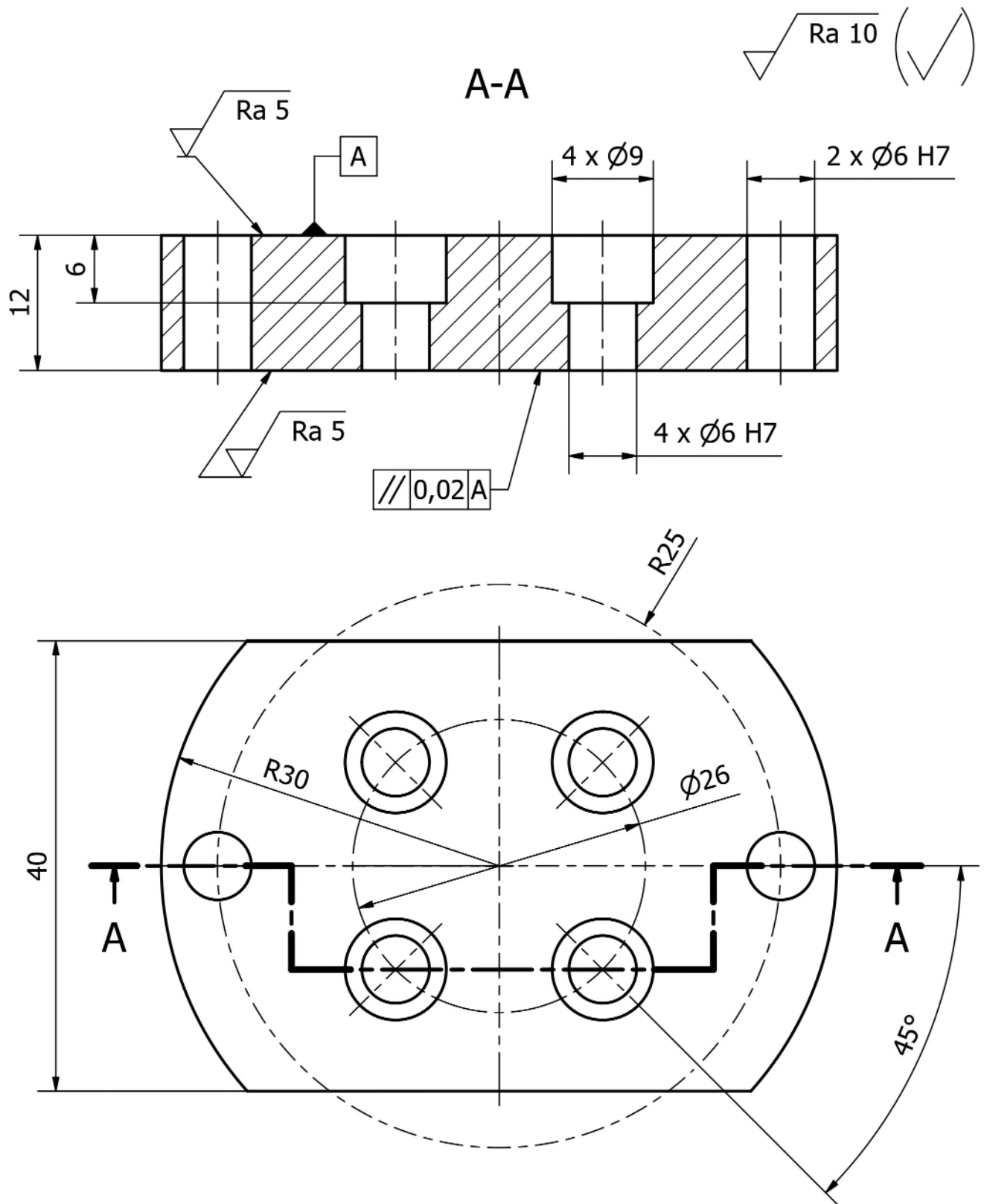
A-A (2 : 1)

Ra 10 (✓)




Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023
2 : 1	A4	2	316L	0,251 kg	Rysował	Marek Szewczyk
					Zatwierdził	

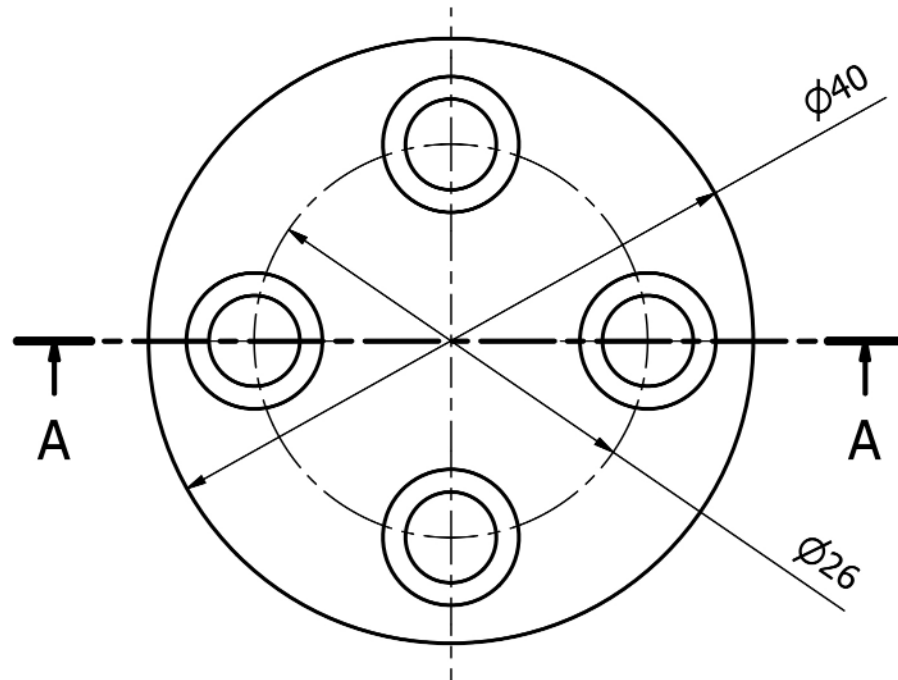
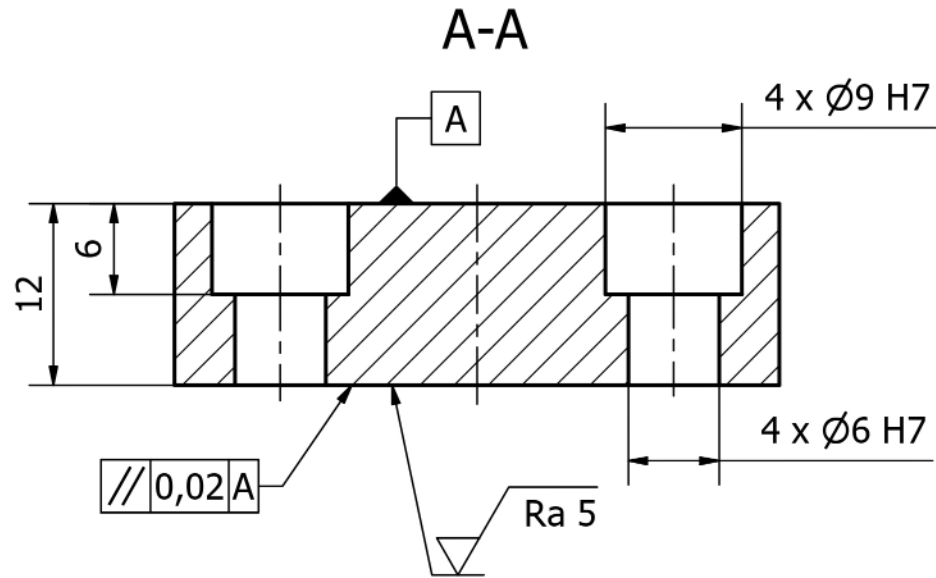
 POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA	Nazwa części	Nr rysunku
	Przeciwpółka 2	MS - TWT - 11




Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023	
2 : 1	A4	1	AW-2017A	0,064 kg	Rysował	Marek Szewczyk	
						Zatwierdził	
		Nazwa części				Nr rysunku	
		Dystans mocujący czujnik				MS - TWT - 12	

Ra 10 (✓)



Uwaga!
Ostre krawędzie stępić

Podziałka	Format	Arkusz	Materiał	Masa	Data	06.09.2023	
2 : 1	A4	1	AW-2017A	0,035 kg	Rysował	Marek Szewczyk	
					Zatwierdził		
		Nazwa części				Nr rysunku	
		Dystans				MS - TWT - 13	

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Tytuł: Analiza wpływu warunków smarowania na opory tarcia i topografię powierzchni blach stalowych głębokotłocznych w procesie wyłaczania

Autor: mgr inż. Marek Szewczyk

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Sz wajka

Słowa kluczowe: blachy stalowe, sztuczne sieci neuronowe, smarowanie, tarcie, topografia powierzchni, współczynnik tarcia, wyłaczanie

Streszczenie:

W pracy przedstawiono analizę wpływu warunków smarowania na opory tarcia i topografię powierzchni blach stalowych głębokotłocznych DC03, DC04, DC05 oraz DC06 stosowanych w procesie wyłaczania. Do badań eksperymentalnych, odzwierciedlających zjawisko tarcia występujące w strefie objętej oddziaływaniem dociskacza w procesie wyłaczania, opracowano tribotester do realizacji testu ciągnięcia pasa blachy. Testy ciągnięcia pasa blachy zostały zrealizowane z zastosowaniem zmiennych parametrów wejściowych, których poziom odzwierciedlał rzeczywiste ich wartości stosowane w procesie wyłaczania blach. Smary do głębokiego tłoczenia były dostarczane bezpośrednio do strefy kontaktu pod określonym ciśnieniem.

Otrzymane wartości współczynnika tarcia i parametrów chropowatości blach po procesie tarcia wykorzystano do przeprowadzenia analiz statystycznych, które były podstawą do poznania charakteru zjawiska tarcia, zależnie od zastosowanego gatunku blachy, nacisku, ciśnienia smarowania, lepkości kinematycznej oleju i początkowej topografii powierzchni blach. Ze względu na złożone interakcje parametrów wejściowych procesu tarcia z wartością współczynnika tarcia i parametrami chropowatości powierzchni blachy, do poznania relacji pomiędzy tymi parametrami zastosowano sztuczne sieci neuronowe wielowarstwowe oraz sieci o radialnych funkcjach bazowych. Zbudowane sieci neuronowe o różnej architekturze i różnych funkcjach aktywacji neuronów pozwoliły na wygenerowanie sieci o wysokiej skuteczności przewidywania wartości współczynnika tarcia oraz zmiany topografii powierzchni w wyniku procesu tarcia.

W warunkach dostarczania smaru do strefy kontaktu pod wymuszonym ciśnieniem zaobserwowano zmniejszanie się efektywności smarowania ze wzrostem nacisku w zakresie 2-8 MPa. Wniosek ten można odnieść do wszystkich stosowanych wartości ciśnienia smaru. W zależności od wartości nacisku, gatunku blachy i lepkości oleju, dostarczanie smaru do strefy kontaktu pod ciśnieniem zapewnia zmniejszenie współczynnika tarcia o około 47 - 71% w porównaniu do warunków tarcia suchego.

Doctoral dissertation abstract

Tytuł: Analysis of the influence of lubrication conditions on resistance to friction and surface topography of deep-drawing steel sheets in the deep drawing process

Author: mgr inż. Marek Szewczyk

Supervisor: dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński

Co-supervisor: dr inż. Krzysztof Szwejka

Keywords: steel sheets, artificial neural networks, lubrication, friction, surface topography, coefficient of friction, deep drawing

Abstract:

The paper presents an analysis of the influence of lubrication conditions on the resistance to friction and surface topography of DC03, DC04, DC05 and DC06 deep-drawing steel sheets used in the sheet metal forming process. For experimental tests reflecting the friction phenomenon occurring in the blankholder area in the sheet metal forming process, a test apparatus was developed to carry out a strip drawing test. The strip drawing tests were carried out using variable input parameters, the level of which reflected real conditions of sheet metal forming process. Deep draw lubricants were delivered directly to the contact zone under specific pressure.

The values of the coefficient of friction and roughness parameters of sheet metal obtained from the friction process were used to perform statistical analyses, which were the basis for understanding the character of the friction phenomenon, depending on the type of sheet metal used, contact pressure, lubrication pressure, kinematic viscosity of oil and initial topography of the sheet metal surface. Owing the complex interactions of the input parameters of the friction process with the value of the coefficient of friction and the roughness parameters of the sheet metal, multilayer artificial neural networks and networks with radial basis functions were used to analyse the relationship between these parameters. The developed neural networks with different architecture and different neuron activation functions allowed the generation of a network with high efficiency in predicting the value of the coefficient of friction and changes in the surface topography as a result of the friction process.

In conditions of pressure-assisted lubrication, a decrease in lubrication efficiency was observed with an increase in lubricant pressure in the range of 2-8 MPa. This conclusion can be applied to all lubricant pressure values used. Depending on the value of contact pressure, grade of sheet metal and oil viscosity, pressure-assisted lubrication reduces the coefficient of friction by approximately 47-71% compared to dry friction conditions.