



mgr Katarzyna Dyja

Tribologiczne aspekty kształtowania blach stosowanych w lotnictwie

Promotor:

dr hab. inż. Janina Adamus

prof. Politechniki Częstochowskiej

Promotor pomocniczy:

dr inż. Wojciech Więckowski

ROZPRAWA DOKTORSKA

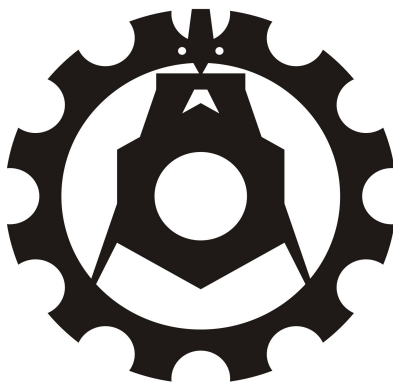
*Pragnę serdecznie podziękować Promotorom niniejszej dysertacji
Pani dr hab. inż. Janinie Adamus prof. Politechniki Częstochowskiej oraz
Panu dr inż. Wojciechowi Więckowskiemu za wszechstronną pomoc,
cenne uwagi i poświęcony czas, bez których praca nie mogłaby powstać.*

*Składam szczególne podziękowania Pani prof. dr hab. inż. Romanie Śliwie
za podzielenie się ideą leżącą u źródeł powstania pracy, inspirację oraz
wyznaczanie kierunków badań.*

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin

mgr Katarzyna Dyja

Tribologiczne aspekty kształtowania blach stosowanych w przemyśle lotniczym

Promotor:

dr hab. inż. Janina Adamus,
prof. Politechniki Częstochowskiej

Promotor pomocniczy:

dr inż. Wojciech Więkowski



Politechnika Lubelska
Lublin 2015

*Pracę realizowano w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08
w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG).
Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków
Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*



PROGRAM OPERACYJNY INNOWACYJNA GOSPODARKA

Priorytet 1. Badania i rozwój nowoczesnych technologii: Działanie 1.1. Wsparcie badań naukowych dla budowy gospodarki opartej na wiedzy

Poddziałanie 1.1.2 Strategiczne programy badań naukowych i prac rozwojowych; PK pn.: „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”

Spis treści

1. Przegląd literatury.....	8
1.1. Charakterystyka materiałów metalowych stosowanych w przemyśle lotniczym	8
1.1.1. Stopy na bazie niklu, kobaltu i żelaza.....	9
1.1.2. Aluminium i jego stopy	10
1.1.3. Tytan i jego stopy	11
1.2. Technologiczne problemy tłoczenia blach trudnoodkształcalnych.....	12
1.3. Rola i zadania smarów technologicznych w procesach kształtowania blach	17
1.4. Metody badań tribologicznych w odniesieniu do tłoczenia blach	27
1.5. Podsumowanie przeglądu literatury	29
2. Teza badawcza i cel rozprawy. Zakres badań.....	31
3. Badania własne	34
3.1. Tribologiczna charakterystyka kształtowania blach	34
3.2. Wymagania stawiane smarom technologicznym	38
3.3. Receptury smarów wytypowanych do badań.....	40
3.4. Metody badania smarów technologicznych oraz powłok antyadhezyjnych.....	46
3.5. Określenie właściwości fizykochemicznych smarów technologicznych	53
3.6. Wyznaczenie współczynników tarcia dla analizowanych par trących.....	57
3.7. Wpływ smaru technologicznego na proces tłoczenia	76
3.7.1. Analiza numeryczna	78
3.7.2. Doświadczalna weryfikacja obliczeń numerycznych	85
3.7.3. Badania korozyjne	89
3.7.4. Badanie zmywalności	90
3.8. Wnioski wynikające z badań własnych.....	91
4. Podsumowanie pracy	93
5. Literatura.....	120
STRESZCZENIE	127
ABSTRACT.....	128

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ STOSOWANYCH W PRACY

d – średnica wytłoczki
 f/f_0 – stosunek powierzchni pokrytej nacięciami do powierzchni całkowitej
 g, g_{sr} – grubość, grubość średnia
 h – wysokość
 h_1 – głębokość nacięć
 m – współczynnik wytłaczania
 m_{gr} – graniczny współczynnik wytłaczania
 n – wykładnik umocnienia
 p – naciski kontaktowe
 r, R – promień
 r_m – promień zaokrąglenia matrycy
 r_s – promień zaokrąglenia stempla
 $\bar{r}$ – współczynnik anizotropii normalnej
 t – czas
 v – prędkość
 v_s – względna prędkość poślizgu
 v_{sr} – średnia prędkość
 w – szerokość nacięć
 A – powierzchnia wytłoczki lub wydłużenie
 A_o – powierzchnia wykrojki
 A_s – rzeczywista powierzchnia ścinanej warstewki smaru
 D – średnica krążka wyjściowego (wykrojki)
 E – moduł Young’a
 F_c – siła ciągnięcia
 $F_{bezwł}$ – siła bezwładności
 F_d – siła docisku
 F_g – siła gięcia,
 F_{gr} – graniczna siła kształtowania
 F_{op} – siła odkształcania plastycznego
 F_s – siła stempla (siła kształtowania)
 $F_t, F_{t1÷6}$ – siły tarcia
 K – stała materiałowa
 L – długość obwodu kształtowanej wytłoczki
 R_a, R_z – parametry chropowatości powierzchni
 R_e – fizyczna granica plastyczności
 $R_{p0,2}$ – umowna granica plastyczności
 R_m – granica wytrzymałości materiału na rozciąganie
 S_T – system tribologiczny
 T – temperatura

X_i – zbiór właściwości systemu tribologicznego (rodzaj materiału pary trącej, mikro- i makrogeometria styku, rodzaj ruchu, sposób smarowania itp.)
 Y_j – zbiór parametrów procesu obróbki plastycznej (prędkość robocza narzędzia, temperatura w strefie tarcia, naciski jednostkowe)
 W_w – zbiór właściwości opisujących wyrób, tj. cechy techniczne, ergonomiczne, estetyczne itp.
 $\Delta h, \Delta h_1, \Delta h_2$ – niepewność systematyczna pomiaru głębokości wytłoczenia
 $\Delta F, \Delta F_1, \Delta F_2$ – niepewność systematyczna pomiaru siły wytłaczania
 $\Delta \mu$ – niepewność systematyczna pomiaru współczynnika tarcia
 Δr – współczynnik anizotropii płaskiej ε – odkształcenie plastyczne
 $\delta \mu$ – niepewność względna pomiaru współczynnika tarcia
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – maksymalne i minimalne odkształcenia w płaszczyźnie blachy
 ε_r – odkształcenie równomierne
 η – lepkość dynamiczna
 θ – kąt zwilżania
 μ – współczynnik tarcia
 ν – współczynnik Poissona, lepkość kinematyczna
 ρ – gęstość
 σ – naprężenie
 φ – funkcja opisująca współzależność zbiorów X_i, Y_j .
 $\bar{\mu}$ – średnia
 Me – mediana
 SD – odchylenie standardowe
 P – przedział ufności

1. PRZEGLĄD LITERATURY

1.1. Charakterystyka materiałów metalowych stosowanych w przemyśle lotniczym

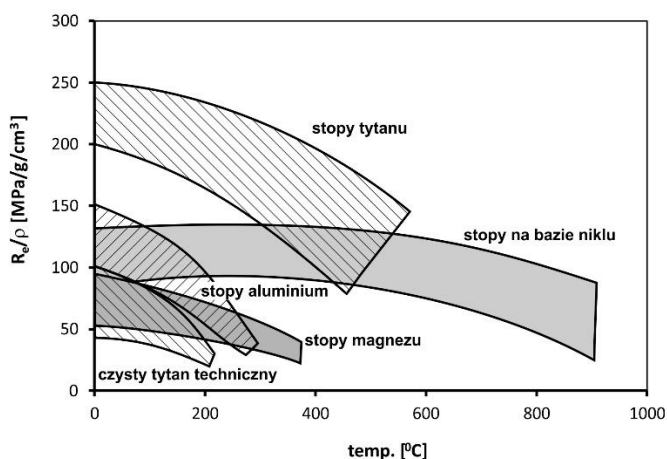
Przemysł lotniczy do budowy samolotów potrzebuje materiałów lekkich, wytrzymałych i odpornych na korozję. Spośród materiałów metalowych najczęściej wykorzystuje się wysokowytrzymałe stopy aluminium, w tym zaawansowane stopy aluminium-lit, materiały tytanowe oraz stopy na bazie żelaza, niklu i kobaltu. Około 70% masy elementów konstrukcyjnych Boeinga 777 stanowią stopy aluminium (głównie stop 7075). Tytan i jego stopy stanowiły aż 85% masy zaprojektowanego na przełomie lat 50. i 60. ubiegłego wieku samolotu zwiazdowczego Lockheed SR-71 Blackbird. Do konstrukcji samolotu F-14 Tomcat użyto około 40% stopów aluminium, 25% tytanu i 17% stali. A w konstrukcji wielozadaniowego samolotu F16 stosunek materiałów metalowych przedstawia się następująco: stopy aluminium – 80%, stal – 4%, tytan – 3,7%.

Rodzaj użytych materiałów zależy od warunków eksploatacyjnych w jakich pracują poszczególne elementy strukturalne, głównie od obciążeń mechanicznych, termicznych oraz oddziaływania środowiska. Dla przykładu dźwigary samolotu muszą być wykonane z materiałów o dużej sztywności i wytrzymałości statycznej, łopatki turbin ze stopów żaroodpornych, a poszycie samolotu z materiałów odpornych na działanie warunków atmosferycznych oraz różnicę ciśnień panujących wewnątrz i na zewnątrz samolotu.

Z uwagi na konieczność zmniejszenia poziomu emisji zanieczyszczeń i stale rosnące koszty paliwa istnieje tendencja do obniżania masy konstrukcji lotniczych poprzez stosowanie materiałów wysokowytrzymałych i lekkich. Chociaż ze względu na tą tendencję gwałtownie rośnie procentowy udział materiałów kompozytowych, to nowoczesne stopy aluminium i tytanu nadal pozostają w kręgu zainteresowań przemysłu lotniczego. Jednakże kryterium stosowania materiałów o małej gęstości nie zawsze jest możliwe, jak choćby w przypadku najbardziej obciążonych podzespołów silnika, gdzie w komorze spalania panują wysokie temperatury i jedynymi możliwymi do zastosowania materiałami są stale.

W samolotach można wyróżnić trzy podstawowe grupy elementów: konstrukcje nośne, poszycie i silnik, których specyfika pracy wymaga stosowania odpowiednich materiałów. I tak na elementy poszycia najczęściej wykorzystywane są stopy aluminium i materiały kompozytowe. Również mniej obciążone elementy konstrukcyjne samolotu oraz elementy wyposażenia wewnątrz wykonuje się ze stopów aluminium. Natomiast wysoko obciążone podzespoły, od których wymaga się dużej niezawodności, jak to ma miejsce w przypadku elementów podwozia przenoszących znaczne obciążenia podczas startów i lądowań, stosuje się stopy tytanu. Stopy tytanu mają najkorzystniejszy wskaźnik wytrzymałości do gęstości spośród wszystkich metalowych materiałów konstrukcyjnych aż do temperatury 600°C. Powyżej tej temperatury mogą pracować tylko nadstopy

niklu i żelaza, dlatego wykorzystuje się je do budowy silników, będących najbardziej wymagającym podzespołem samolotu (rys. 1). W pierwszych sekcjach silnika stosuje się stopy aluminium i tytanu, natomiast w komorze spalania, tj. „gorącej” sekcji pracy silnika stosuje się stopy na bazie niklu, gdyż zachowują one swoją wytrzymałość i odporność na pełzanie nawet w temperaturze 1093°C. Stopy na bazie kobaltu i niklu wykorzystuje się do budowy łopatek wirników oraz zewnętrznych elementów silników.



Rys. 1. Stosunek wytrzymałości do gęstości różnych materiałów w zależności od temperatury [oprac. wg materiałów reklamowych Kobelco, Kobe Steel Group]

Oprócz ciągłego rozwoju lekkich i wytrzymałych materiałów do zastosowań lotniczych, istnieje również tendencja do projektowania i wytwarzania struktur lotniczych z blach. Wynika to z faktu, że spośród różnych technik wytwarzania (obróbka skrawaniem, odlewanie itp.) tylko obróbka plastyczna (m.in. tłoczenie) zapewnia wytwarzanym elementom największą wytrzymałość. Dotychczas stosowane zespoły monolityczne (odlewy) cechujące się dużą masą, zastępowane są coraz częściej zespołami cienkościennymi, spawanymi z wcześniej ukształtowanych blach. Zmiany w rozwiązaniach konstrukcyjnych wymuszają konieczność kształtowania elementów z wysokowytrzymałych blach ze stopów trudnoodkształcalnych, takich jak nadstopy niklu i żelaza oraz stopy tytanu [5, 14, 15, 83, 88].

1.1.1. *Stopy na bazie niklu, kobaltu i żelaza*

Ważną grupę wśród materiałów stosowanych w lotnictwie stanowią materiały żaroodporne i żarowytrzymałe. Stopy żarowytrzymałe wykorzystywane są do budowy silników samolotowych, gdyż zapewniają zdolność do przenoszenia obciążeń mechanicznych w zakresie wysokich temperatur eksploatacji (powyżej 550°C) i jednocześnie zachowują dobrą odporność na korozję. Stopy te można

podzielić na trzy podgrupy: stopy na bazie niklu, kobaltu i żelaza. Żarowytrzymałe stopy na bazie niklu zawierają dodatki chromu (do 20%) lub molibdenu (do 20%) i żelaza (do 10%), a także niewielkie ilości siarki, manganu, tytanu, niobu, wolframu lub wanadu. Są stosowane w końcowych sekcjach silnika, tam gdzie występują wysokie temperatury i niekorzystne korozyjne środowisko gazowe związane z procesami spalania.

Od stopów żaroodpornych wymagana jest jedynie odporność na wysokie temperatury, a ich rola ograniczona jest do stosowania na obudowy silników i układy wydechowe. W tych elementach nie ma już tak restrykcyjnych wymagań jak w przypadku elementów silnie obciążonych. Często nadstopy posiadają równocześnie właściwości żaroodporne i żarowytrzymałe. O ich zastosowaniu decyduje ich wytrzymałość w maksymalnych temperaturach pracy oraz czynniki ekonomiczne.

Stopy na osnowie żelaza stosuje się tam, gdzie temperatura pracy nie przekracza 482°C. Głównie stosowane są jako zamiennik, gdy producentom zależy na obniżeniu kosztów wytwarzania. Stopy na bazie żelaza oprócz tego, że są tańsze są łatwiejsze w obróbce.

Przemysł lotniczy wykorzystuje głównie stopy z grupy Inconeli, Alvac i Waspalloy. W polskich zakładach branży lotniczej na elementy tłoczone stosuje się m.in. blachy ze stali: 1H13 (AMS 5504), 17-4PH (5604), Inconeli 718 (AMS 5596) i 625 (AMS 5599).

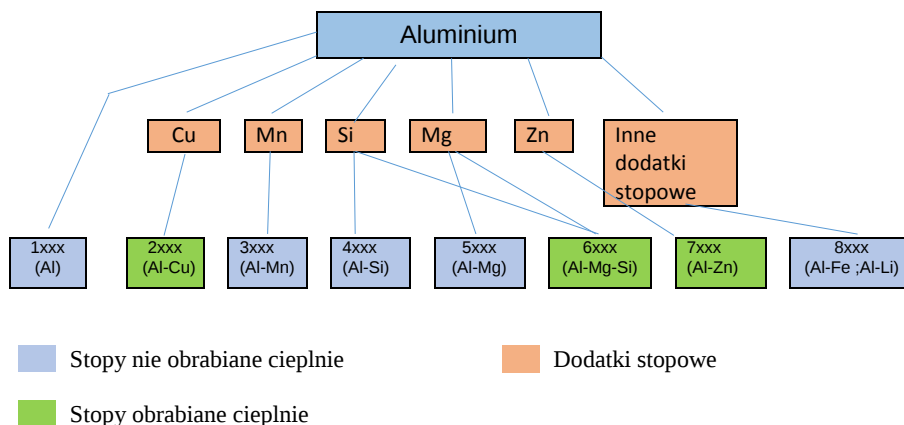
1.1.2. *Aluminium i jego stopy*

Aluminium jest trzecim najpowszechniej występującym w skorupie ziemskiej pierwiastkiem, który w stanie czystym powoli utlenia się w powietrzu, ulegając pasywacji. Swą odporność na korozję zawdzięcza cienkiej warstewce Al_2O_3 , którą można zwiększyć w procesie anodowania. Chociaż stopy aluminium nie posiadają tak dobrej odporności korozyjnej jak czyste aluminium, to niska cena, łatwość kształtowania oraz korzystny stosunek gęstości do wytrzymałości powodują, że stopy te znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle transportowym na elementy konstrukcyjne w postaci wytłoczek – począwszy od części karoserii samochodowych, przez poszycia i elementy konstrukcyjne samolotów, po części statków kosmicznych. Średnio około 50% materiałów stosowanych w budowie samolotu to stopy aluminium [96].

Stosunkowo niskie właściwości wytrzymałościowe aluminium, którego wytrzymałość w stanie wyżarzonym wynosi $R_e=20\div40$ MPa, a $R_m=70\div120$ MPa, można zwiększyć wielokrotnie poprzez wprowadzenie pierwiastków stopowych oraz obróbkę cieplną stopów. Stopy aluminium charakteryzują się też „pozytywnym parametrem konstrukcyjnym”, tzn. stosunkiem wytrzymałości do ciężaru właściwego, który jest większy niż dla stali.

Ze względu na sposób wytwarzania stopy aluminium dzielimy na stopy do obróbki plastycznej i stopy odlewnicze (rys. 2). Stopy aluminium przeznaczone do obróbki plastycznej zawierają zazwyczaj do około 5% pierwiastków stopo-

wych, najczęściej magnezu, miedzi, manganu, jak również cynku, krzemu, chromu, niklu, litu lub tytanu. Stosowane są stopy po wyżarzaniu rekrystalizującym lub w stanie umocnionym, a niektóre są poddawane obróbce cieplnej polegającej na utwardzaniu wydzieleniowym.



Rys. 2. Podział stopów aluminium wg głównego pierwiastka stopowego [opracowano wg. L. A. Dobrzański] [33]

Najnowszą generacją stopów aluminiowych są stopy aluminium z litem jako głównym składnikiem stopowym. Lit jest najlżejszym metalem, którego gęstość w temperaturze pokojowej wynosi 536 kg/m^3 . Atrakcyjność tych stopów polega na tym, że każdy procent litu wprowadzony do aluminium obniża gęstość stopu o 3%. Te właściwości powodują, iż zainteresowanie stopami Al-Li stale rośnie i znajdują zastosowanie przede wszystkim do wytwarzania nowoczesnych samolotów oraz w kosmonautyce.

Najczęściej stosowanymi stopami wykorzystywanymi w lotnictwie są stopy aluminium z serii 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx i 7xxx, a ze stopów aluminiowo-litowych są to: 2090 [AlCu_{2,5}Li_{2,5}], EN-AW 2091 [AlCu₂Li₂Mg_{1,5}] i EN-AW 8090 [AlLi-_{2,5}Cu_{1,5}Mg₁]. Polskie firmy lotnicze najczęściej stosują blachy aluminiowe 2024, 6065 i 7075.

1.1.3. Tytan i jego stopy

Cechą charakterystyczną tytanu i jego stopów jest mały ciężar właściwy i wysoka wytrzymałość. Gęstość stopów tytanu waha się w granicach od 4430 do 4850 kg/m^3 , a wytrzymałość na rozciąganie zmienia się od około 240 MPa dla technicznie czystego tytanu Gr 1 do około 1750 MPa dla obrabianych cieplnie stopów tytanu [22]. Gęstość czystego tytanu w temperaturze pokojowej wynosi 4507 kg/m^3 . Ponadto tytan cechuje się doskonałą odpornością na korozję, spowodowaną naturalną skłonnością tego metalu do tworzenia cienkiej ($\sim 3\div 7 \text{ nm}$), ale trwałej, ochronnej warstewki tlenków, głównie TiO_2 . Dzięki temu tytan jest odporny na działanie czynników atmosferycznych, wody morskiej i wielu

chemikaliów [18, 85, 86, 90]. Tytan występuje w dwóch odmianach alotropowych. Do temperatury 882,5°C krystalizuje w układzie heksagonalnym $Ti\alpha$, natomiast po jej przekroczeniu krystalizuje w układzie regularnym $Ti\beta$ [23].

Mimo tych zalet szersze stosowanie tytanu jest ograniczone z uwagi na wysokie koszty wytwarzania i przetwarzania tytanu, skomplikowaną produkcję wyrobów i półwyrobów tytanowych, w odniesieniu do innych materiałów konstrukcyjnych, skłonność do pochłaniania gazów z otoczenia, zwłaszcza w podwyższonych temperaturach i niskie właściwości tribologiczne [16, 52]. Mimo to tytan, a zwłaszcza jego stopy wypierają materiały stalowe w tych przypadkach, gdzie nie jest potrzebna duża wytrzymałość na obciążenia w wysokiej temperaturze, jak również w skojarzeniach z kompozytami na podstawie włókien węglowych, gdyż stopy tytanu w przeciwieństwie do stopów aluminium i stali nisko-stopowych są odporne na korozję „galwaniczną” w kontakcie z tego typu materiałami.

W polskim przemyśle lotniczym najczęściej stosowane są blachy z czystego tytanu technicznego Gr 2 i stopu tytanu Gr 5 (Ti6Al4V).

1.2. Technologiczne problemy tłoczenia blach trudnoodkształcalnych

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zapotrzebowania na wyroby wytwarzane niemal na gotowo (near net shape forming), o odpowiednich właściwościach wytrzymałościowych, dobrej jakości (gładkiej) powierzchni zewnętrznej i dużej dokładności wymiarowej, czyli wyroby niewymagające dodatkowych operacji wykańczających. Przemysł transportowy, a zwłaszcza samochodowy i lotniczy stawiają dodatkowe wymagania odnośnie obniżania ciężaru elementów strukturalnych pojazdów. Oznacza to wzrost zapotrzebowania na wyroby tłoczone (wytłoczki), czyli elementy uzyskiwane w procesach kształtowania blach. Wytłoczki zapewniają bowiem dużą wytrzymałość i sztywność elementów przy zachowaniu stosunkowo niskiej ich wagi. Ponadto procesy tłoczenia należą do tzw. obróbki bezubytkowej, która pozwala na bardzo dobre wykorzystanie materiału, co jest istotne w przypadku kształtowania blach z drogich materiałów, jakimi są materiały stosowane w lotnictwie.

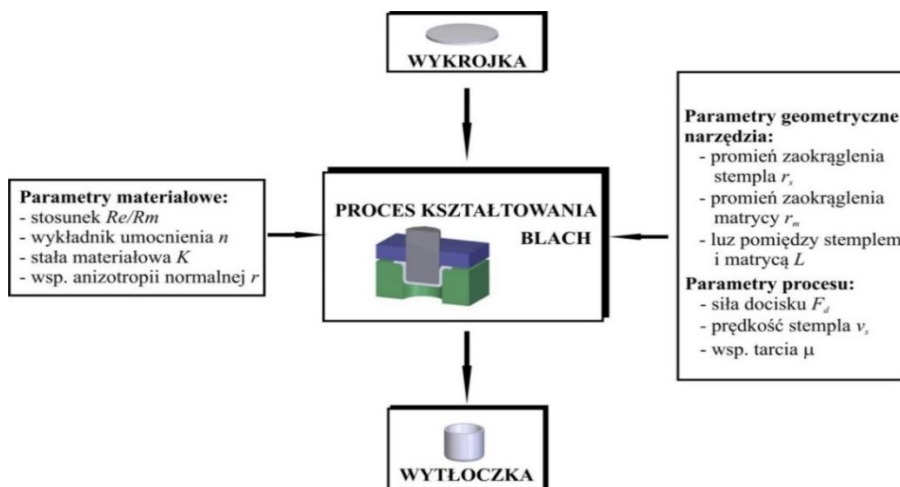
W przemyśle stosowanych jest wiele operacji kształtowania blach, które można sklasyfikować jako operacje cięcia, gięcia i tłoczenia. Cięcie bądź wykrawanie to zazwyczaj operacje poprzedzające zasadnicze kształtowanie, jakimi są gięcie i tłoczenie. Ilość i rodzaj operacji kształtowania zależą od geometrii wykonywanego elementu.

Podczas kształtowania blach materiał doznaje odkształceń plastycznych, których wielkość jest limitowana utratą stateczności materiału. Wyróżnia się dwa

wiodące zjawiska, ograniczające prawidłowy przebieg procesu kształtowania blach. Są to:

- utrata stateczności materiału (fałdowanie) w obszarze kołnierзовym wytłoczki bądź w jej obszarach swobodnych (tj. niepodpartych przez elementy kształtujące narzędzia), będąca pewną formą wyboczenia blachy, zachodzącego pod wpływem działania naprężeń ściskających,
- utrata spójności materiału (pękanie) wskutek lokalizacji odkształceń i przekroczenia odkształceń dopuszczalnych dla danego materiału.

W celu zapobieżenia tym zjawiskom należy przede wszystkim określić przydatność blach do poszczególnych procesów kształtowania i określić bezpieczną granicę odkształceń. Najbardziej istotnymi parametrami określającymi przydatność blach do kształtowania plastycznego są wykładnik krzywej umocnienia n , współczynnik anizotropii plastycznej r , parametr będący stosunkiem granicy plastyczności materiału do granicy wytrzymałości na rozciąganie R_e/R_m oraz wartości wydłużenia i przewężenia, które najczęściej są określane w statycznej próbie rozciągania. W celu uzyskania wysokiej jakości wytłoczek oprócz stosowania dobrych jakościowo materiałów wyjściowych (blach), konieczne jest poprawne zaprojektowanie narzędzi i procesu technologicznego, przestrzeganie reżimów produkcyjnych i odpowiednie kwalifikacje pracowników. Jest to szczególnie ważne w przypadku wytłoczek produkowanych seryjnie i masowo, gdyż powstałe w czasie produkcji braki znacznie podnoszą koszty wytwarzania. Dlatego tak ważna jest umiejętność analizy zjawisk ograniczających procesy kształtowania, ich ocena i właściwy dobór środków zaradczych. Na rysunku 3 pokazano czynniki determinujące przebieg kształtowania blach. Każdy z wymienionych czynników determinuje proces kształtowania blach i ma wpływ na zjawiska ograniczające prawidłowy przebieg procesu.

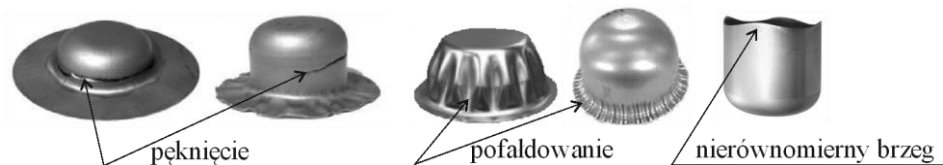


Rys. 3. Czynniki wpływające na proces kształtowania blach

Zjawisku fałdowaniu kołnierza wytłoczki można zapobiegać poprzez stosowanie tłoczników, wyposażonych w elementy dociskowe (dociskacze). Siła docisku musi być tak dobrana, by nie zwiększała zbyt wiele oporów tłoczenia, wynikających ze wzrostu siły tarcia na styku: „pierścień ciągowy – blacha – dociskacz”. Jednocześnie siła docisku nie może być też zbyt mała, gdyż dociskacz nie spełni swojej roli i wystąpi fałdowanie kołnierza wytłoczki. W przypadku wytłoczek o nieregularnych kształtach, w celu zapobieżenia fałdowaniu materiału blachy, stosowane są tzw. żebra lub progi ciągowo-ściągowe. Ich zadaniem jest wywołanie dodatkowych naprężeń rozciągających w miejscach narażonych na fałdowanie blachy. Oczywiście opory kształtowania powstałe w wyniku działania tych elementów nie mogą być zbyt duże, aby nie doszło do rozdzielenia materiału.

Jeśli chodzi o pękanie, to w celu jego uniknięcia proces musi być realizowany przy sile tłoczenia mniejszej od siły zrywającej. W przypadku wytłoczek cylindrycznych warunek ten jest spełniony wówczas, gdy współczynnik tłoczenia $m=d/D$ jest większy od granicznego współczynnika tłoczenia m_{gr} , gdzie: d – średnica wytłoczki, D – średnica krążka wyjściowego (tzw. wykrojki). W przypadku zachowania optymalnych warunków kształtowania, dotyczących doboru geometrii narzędzia, siły docisku i prędkości kształtowania oraz smarowania, procesy tłoczenia blach można realizować stosując najmniejsze dopuszczalne wartości współczynników tłoczenia. Wartości te są tym większe im mniejsza jest tak zwana grubość względna wykrojki, tj. stosunek grubości blachy do średnicy krążka wyjściowego. Ze zmniejszeniem grubości względnej blachy rośnie średnica i maleje wysokość możliwej do uzyskania wytłoczki. Praktycznie oznacza to, że kształtowanie blach cienkich jest trudniejsze aniżeli blach grubych. W przypadku kształtowania wytłoczek o złożonej geometrii, tj. wytłoczek o nieregularnych kształtach z dużymi miejscowymi przetłoczeniami (o bardzo dużym stopniu odkształcenia) do oceny tłoczności blach wykorzystuje się krzywe odkształceń granicznych – KOG (ang. Forming Limit Diagram – FLD). Istotą tej metody jest porównanie stanu odkształcenia w projektowanej wytłoczce z krzywą odkształceń granicznych blachy, przedstawianą w układzie maksymalnych ε_1 i minimalnych ε_2 odkształceń mierzonych w płaszczyźnie blachy. Ocena taka informuje czy odkształcenia maksymalne w wytłoczce są mniejsze, czy też większe od odkształceń granicznych jakie może przenieść kształtowana blacha, to znaczy informuje nas czy leżą w strefie odkształceń bezpiecznych, czy w strefie niebezpiecznej, co może prowadzić do pękania blachy. Znajomość krzywej odkształceń granicznych pozwala poprzez umiejętne dobór parametrów procesu kształtowania (np.: promień zaokrąglenia stempla i matrycy, siła docisku, warunki tarcia) zmniejszyć ryzyko pękania wytłoczek już na etapie projektowania procesu. Pękanie wytłoczek jest wadą nienaprawialną, której nie można usunąć w dalszych etapach kształtowania. Szczególnie niebezpieczne jest pękanie wytłoczek po upływie pewnego czasu od zakończenia procesu kształtowania. Występuje ono wskutek działania naprężeń własnych, związanych z występowaniem nierównomiernych odkształceń

w poszczególnych obszarach wytłoczki. Wówczas konieczne jest zastosowanie wyżarzania odprężającego. Na rysunku 4 przedstawiono typowe wady wyrobów tłoczonych.



Rys. 4. Wady wyrobów tłoczonych

Pokazana po prawej stronie rysunku wytłoczka charakteryzuje się nierównomierną, pofałdowaną krawędzią górną wytłoczki, co nie tyle stanowi jej wadę, ale jest konsekwencją zastosowania blachy o dużej anizotropii płaskiej Δr , co oznacza zróżnicowanie właściwości plastycznych w płaszczyźnie blachy. Jest to rezultat niejednakowego płynięcia metalu w różnych kierunkach. Ucha nie tworzą się w przypadku materiałów izotropowych, gdy $\Delta r = 0$. Blachy cienkie są jednak wytwarzane w procesie walcowania na zimno w wyniku, czego powstaje uprzywilejowana orientacja ziaren, która objawia się m.in. anizotropią właściwości plastycznych. Jeżeli Δr jest dodatnie to ucha tworzą się w kierunku 0° i 90° w stosunku do kierunku walcowania, gdy Δr jest ujemne to ucha tworzą się w kierunku 45° w stosunku do kierunku walcowania [64]. Idealną blachą, zwłaszcza do procesów głębokiego tłoczenia w jednej operacji byłaby blacha o wysokim współczynniku anizotropii normalnej $\bar{r}$ i zerowej anizotropii płaskiej Δr , co jest niestety niemal niemożliwe. Większość blach posiadających wysoką anizotropię normalną posiada również dużą anizotropię płaską, prowadzącą do powstawania wspomnianych uch. Jest to zjawisko niepożądane ze względu na konieczność wprowadzenia dodatkowej operacji okrawania nierówności brzegu wytłoczki. Prowadzi to do strat materiałowych, obniżenia wydajności i wzrostu kosztów produkcji. W celu uniknięcia strat materiałowych na skutek operacji okrawania uch, prowadzone są prace nad optymalizacją kształtu materiału wyjściowego tak, aby w wyniku procesu tłoczenia można było otrzymać wytłoczkę o równej krawędzi górnej z minimalnym naddatkiem na okrawanie [64].

Innym ważnym problemem, z uwagi na technologię kształtowania blach, zwłaszcza tych stosowanych w lotnictwie, jest zjawisko sprężynowania powrotnego (tzw. springback). Zjawisko to istotnie wpływa na dokładność wymiarową, a ponieważ w lotnictwie obowiązują bardzo wąskie tolerancje wymiarowe to staje się ono kluczowym czynnikiem, decydującym o jakości kształtowanych wyrobów. Sprężynowanie powrotne jest wywołane relaksacją części sprężystej naprężeń wewnętrznych po odciążeniu materiału [9]. Z uwagi na wysoki stosunek granicy plastyczności tych materiałów do wytrzymałości na rozciąganie (R_e/R_m) w porównaniu z typowymi blachami stosowanymi w tłocznictwie bardzo ważnym staje się proces projektowania narzędzi kształtujących. Musi on

uwzględniać korektę kształtu narzędzi o tzw. „kącie wyprzedzenia” równy kątowi sprężynowania. Wielkość tego kąta uzależniona jest między innymi od rodzaju i grubości materiału, stosunku promienia gięcia do grubości materiału, siły nacisku stemplu gnącego oraz kształtu wyrobu giętego. Podczas rozkroju większości blach charakteryzujących się dużą anizotropią płaską, należy zwracać szczególną uwagę na kierunek ułożenia wykrojek w stosunku do kierunku linii walcowania blachy.

Kolejnym problemem mającym znaczący wpływ na jakość wyrobów tłoczonych są zarysowania powierzchni wytłoczek. Powstają one na skutek tworzenia się nalepień (narostów) kształtowanego materiału na narzędziach tj. stemplu i matrycy. Nalepienia powodują uszkodzenie powierzchni wytłoczki objawiające się powstawaniem lokalnych wgnieceń i zarysowań. Biorąc pod uwagę metalowe materiały konstrukcyjne, stosowane w lotnictwie, największą skłonność do tworzenia nalepień mają blachy aluminiowe i tytanowe. Zjawisku temu można zapobiegać, bądź całkowicie je wyeliminować poprzez stosowanie odpowiednich smarów technologicznych bądź powłok przeciwadhezyjnych, które zabezpieczają przed bezpośrednim kontaktem obrabianego materiału z narzędziem [2, 4, 6, 12, 33, 82]. Smary technologiczne powinny równocześnie obniżać opory tarcia pomiędzy odkształcanym metalem a narzędziem i zapewnić tymczasową ochronę przed korozją. Dlatego często mówi się o tzw. smarach dwufunkcyjnych.

Rozpatrując blachy stosowane w przemyśle lotniczym, należy brać pod uwagę wszystkie z omówionych zjawisk, ponieważ poza blachami wykonanymi z czystego tytanu technicznego, pozostałe blachy cechują się bardzo małą plastycznością. Mimo, iż blachy z czystego tytanu technicznego – głównie Gr 1 i Gr 2 - mają znacznie mniejszą tłoczność od typowych blach stalowych stosowanych w tłocznictwie, to można je kształtować na zimno za pomocą typowych technik i tłoczników stosowanych podczas kształtowania blach stalowych. [3, 5, 8, 10, 11, 16, 81].

Należy jednak pamiętać, że [25, 103]

- w związku z mniejszą tłocznością należy stosować większe promienie zaokrąglenia narzędzi kształtujących (matryc i stempli),
- zjawisko sprężynowania powrotnego, tzw. „springback” jest znaczące i należy je uwzględnić już na etapie projektowania procesu kształtowania,
- występuje duża tendencja do tworzenia „narostów” kształtowanego materiału na stalowym narzędziu (stempel, matryca, dociskacz), w związku z tym należy stosować odpowiednie smary technologiczne, skutecznie oddzielające powierzchnie trące.

Blachy wykonane ze stopów aluminium i tytanu oraz blachy stalowe nierdzewne, żaroodporne i żarowytrzymałe cechują się wyjątkowo niską tłocznością w temperaturze otoczenia. Zwłaszcza blachy ze stopów tytanu oraz stalowe typu Inconel wymagają specjalnych technik kształtowania, zazwyczaj jest to kształtowanie w podwyższonych temperaturach. Materiały te w temperaturze otoczenia mogą być odkształcane plastycznie tylko w niewielkim zakresie ze

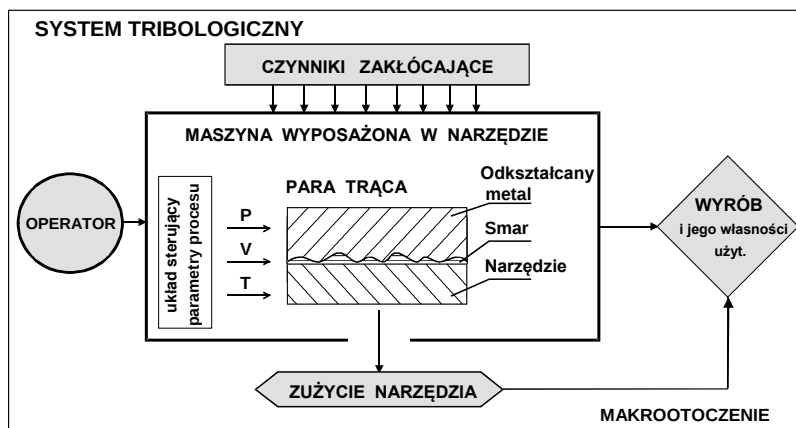
względnie na mały zapas plastyczności (R_0/R_m wynosi przeważnie ponad 0,9). Dopiero powyżej temperatury 500°C zapas plastyczności zwiększa się i dlatego stopy te są przeważnie kształtowane na półgorąco lub gorąco. Jednakże kształtowanie blach w podwyższonych temperaturach wymaga zabezpieczenia ich powierzchni przed utlenianiem, szczególnie tytan charakteryzuje się dużą podatnością do pochłaniania gazów z otoczenia. Procesy tego typu należy zatem prowadzić w próżni lub z zastosowaniem atmosfer ochronnych.

Większość wymienionych problemów można w dzisiejszej dobie rozwiązywać dzięki połączeniu nowoczesnej techniki komputerowej z badaniami eksperymentalnymi. Wnikliwa analiza uzyskanych wyników symulacji numerycznych pozwala na dobór niemal wszystkich parametrów tłoczenia, mających decydujący wpływ na jakość uzyskiwanych wyłoczek. Problemy związane z małą tłocznością blach, a taką cechują się stosowane w lotnictwie blachy, mogą być wyeliminowane dzięki właściwie dobranej metodzie kształtowania, geometrii narzędzi tłocznych i materiału wyjściowego, sile docisku oraz zapewnieniu odpowiednich warunków tarcia. Wydaje się, że ostatnim czynnikiem, który może znacząco ułatwić przebieg procesu kształtowania jest zastosowanie odpowiedniego smaru technologicznego, dającego możliwość uzyskania większych odkształceń w jednej operacji tłoczenia (możliwość zmniejszenia liczby operacji przy tłoczeniu wielooperacyjnym) lub gotowego wyrobu bez wad.

1.3. Rola i zadania smarów technologicznych w procesach kształtowania blach

Każdy proces kształtowania blach (cięcie i wykrawanie, gięcie bądź tłoczenie) można rozpatrywać jako system tribologiczny (rys. 5) składający się z:

1. pary trącej, którą stanowi narzędzie i odkształcany materiał (blacha),
2. smaru technologicznego, wprowadzanego pomiędzy powierzchnie trące narzędzia i blachy w celu zmniejszenia oporów tarcia,
3. maszyny (prasy), na której realizowany jest proces tłoczenia,
4. środowiska, tj. mikro- i makrootoczenia systemu,
5. układu sterującego, integralnie związanego z maszyną.



Rys. 5. Proces obróbki plastycznej metali – tłoczenie blach jako system tribologiczny [34]

Jednym z ważniejszych elementów tego systemu jest narzędzie, które w głównej mierze decyduje o kształcie wyrobu i jakości jego powierzchni. Niestety w wyniku realizacji procesu technologicznego następuje zużycie narzędzia, które najczęściej objawia się wzrostem chropowatości powierzchni, co z kolei niekorzystnie wpływa na stan powierzchni wyrobu.

Według [46, 47] system tribologiczny można opisać zależnością:

$$S_T = f((X_i, Y_j), \varphi) \quad (1)$$

gdzie: S_T – system tribologiczny,

X_i – zbiór właściwości systemu tribologicznego (rodzaj materiału pary trącej, mikro- i makrogeometria styku, rodzaj ruchu, sposób smarowania itp.)

Y_j – zbiór parametrów procesu obróbki plastycznej (prędkość robocza narzędzia, temperatura w strefie tarcia, naciski jednostkowe)

φ – funkcja opisująca współzależność zbiorów X_i, Y_j .

Właściwości końcowe wyrobu są determinowane parametrami pracy systemu tribologicznego:

$$W_w = f(S_T) \quad (2)$$

gdzie: W_w – zbiór właściwości opisujących wyrób, tj. cechy techniczne, ergonomiczne, estetyczne itp.

Szczególną rolę w pracy systemu tribologicznego odgrywa smar technologiczny. O ile dobór materiałów na elementy pary trącej jest zazwyczaj podyktowany wymaganiami wytrzymałościowymi, o tyle skład chemiczny smaru technologicznego może być dowolnie dobrany. Materiał kształtowanej blachy jest narzucany z góry i rzadko się zdarza by można go było zastąpić innym materiałem. Z kolei materiał narzędzia jest determinowany funkcją jaką narzędzie spełnia w systemie tribologicznym i warunkami pracy, a zwłaszcza odpowiednią

trwałością. W przypadku tłoczników do pracy na zimno stosuje się stale stopowe do hartowania w oleju, o dużej zawartości węgla (czasami ponad 2,0%) oraz chromu od 1% do 13%. Mogą to być stale: NC10, NC11, NWC, NWM, NC6 czy NC4, charakteryzujące się niewielkimi odkształceniami podczas hartowania i wysoką odpornością na zużycie cierne.

Skład chemiczny smarów technologicznych jest dobierany w zależności od funkcji jaką mają spełniać w systemie tribologicznym. Specyficzne warunki panujące podczas procesów tłoczenia, takie jak:

- wysokie naciski jednostkowe ($1\div 100\text{MPa}$) [101],
- duże odkształcenia jednego z elementów pary trącej, tj. blachy i odslanianie czystych powierzchni metali pozbawionych tlenków,
- otwarty węzeł tarcia

sprawiają, że smarom technologicznym do tłoczenia stawia się dużo większe wymagania aniżeli smarom stosowanym w ciernych węzłach maszyn.

Podstawowym wymaganiem stawianym smarom technologicznym do tłoczenia jest odporność na działanie dużych nacisków powierzchniowych i zachowanie ciągłości filmu smarnego. Wysokie naciski występujące w procesach obróbki plastycznej wymagają stosowania dodatków smarnościowych typu Extreme Pressure (EP) [79, 89,]. Dodatki te, zazwyczaj związki fosforowe, siarkowe lub chlorowe, wchodzi w reakcję z podłożem metalicznym, zwłaszcza w podwyższonej wskutek tarcia temperaturze. Dzięki dyfuzji dodatków do warstwy wierzchniej materiału narzędzia tworzy się trwała, graniczna warstewka smaru (głównie dzięki chemisorpcji) dająca dodatkowe zabezpieczenie w postaci niskotarciowej warstewki dyfuzyjnej. Powstała graniczna warstewka smaru ma zdolność do odtwarzania się po zużyciu, dzięki ponownemu wejściu w reakcję chemiczną metalu narzędzia z dodatkami EP. Mimo, iż dodatki te pozwalają na kontrolę procesu zużycia, to nie zapobiegają całkowicie zużyciu narzędzia. Stosując je, należy również mieć na uwadze fakt, że aktywność chemiczna niektórych dodatków EP może inicjować mechanizmy korozyjne, tj. przyspieszać uszkodzenie narzędzi lub blachy. Podobną funkcję jak dodatki EP spełniają dodatki Anti-Wear (AW), czyli dodatki przeciwużyciowe. Ich rolą jest również ułatwienie rozdzielenia współpracujących metali. Mimo, iż z tego powodu często nie rozróżnia się dodatków EP i AW to jednak mechanizm ich działania jest nieco inny. Dodatki AW tworzą warstwę ochronną, która przylega do powierzchni, ale nie wchodzi z nią w reakcję chemiczną.

Opracowując smary do procesów obróbki plastycznej należy pamiętać, że w przeciwieństwie do smarowania maszyn, gdzie smar pracuje w obiegu zamkniętym, w obróbce plastycznej występuje tzw. otwarty węzeł tarcia, co wiąże się z dużo większym zużyciem smaru technologicznego. W procesach tłoczenia blach nowy smar musi być każdorazowo (tzn. po każdej operacji) wprowadzony w węzeł tarcia. Spora jego część jest zużywana bezpowrotnie, a mianowicie jest „zabierana” przez odkształcany materiał i pozostaje na wytłoczce. Następnie, smar zazwyczaj jest usuwany z powierzchni wytłoczki. Wymagają tego wszystkie procesy obróbki powierzchniowej, mające związek z nanoszeniem powłok

lakierowych. Taka sytuacja sprawia, że smarom technologicznym stawia się kolejne wymagania:

- łatwość nanoszenia na narzędzie lub blachę,
- łatwość usuwania z wyrobu, (wytłoczki),
- łatwość utylizacji odpadów posmarowych.

Przytoczone aspekty i specyfika procesów tłoczenia blach sprawiają, że do kwestii smarowania należy podchodzić kompleksowo, zarówno podczas komponowania składu chemicznego smaru technologicznego, jak i opracowywania metod jego nanoszenia i usuwania z wyrobu oraz sposobów utylizacji.

Z analizy wykonanej w ramach projektu badawczego „Smarowanie w procesach obróbki plastycznej” realizowanego w Politechnice Częstochowskiej pod kierownictwem prof. M. Gierzyńskiej-Dolnej wynika, że smary technologiczne stosowane w przemyśle krajowym można podzielić na dwie grupy:

- smary handlowe (oferowane obecnie przez ORLEN OIL, „NAFTOCHEM” Kraków, Mobil, Rafineria Jedlicze),
- smary sporządzane w zakładach przemysłowych według własnej receptury.

Okazuje się, że mimo możliwości wyboru smarów spośród oferty firm krajowych i zagranicznych, krajowe tłocznie często stosują smary wykonywane specjalnie na potrzeby produkcyjne danego wyrobu. Wynika to z faktu, że wraz z rozwojem techniki, przy rosnących wymaganiach odnośnie dokładności kształtowo-wymiarowej wyrobów, rośnie zapotrzebowanie na wytłoczki z trudnoodkształcalnych stopów metali, dotąd rzadko stosowanych w tłocznictwie, dla których brak jest odpowiednich, komercyjnych smarów technologicznych. Historia uszlachetniania olejów jest stosunkowo krótka. Sięga początków XX wieku, kiedy to w 1922 r. Francuzi Maureau i Düfraise stwierdzili, że niektóre związki chemiczne zwiększają trwałość użytkową olejów. Pierwsze dodatki do olejów na skalę przemysłową wyprodukowano w 1935 r. Według [76] dodatki smarnościowe, tj. przeciwzużyciowe i przeciwwzartarciowe, powodują przesunięcie granicy rodzajów tarcia w stronę większych wartości nacisków jednostkowych i mniejszych wartości prędkości w porównaniu z olejem bazowym nie zawierającym aktywnych substancji. Wynika to z chemisorpcji lub reakcji chemicznych zachodzących pomiędzy aktywnymi dodatkami do olejów z powierzchniowymi atomami metalu. Dobór dodatków smarnościowych musi zatem uwzględniać nie tylko rodzaj procesu technologicznego, ale i gatunek materiałów pary trącej.

Zróznicowana gama materiałów [6, 7, 46, 59] stosowanych w przemyśle oraz charakter produkowanych elementów i rodzaj ich obróbki wykańczającej - malowania - sprawiają, że poza oczywistym wymogiem stawianym smarom tech-

nologicznym, jakim jest zmniejszenie oporów tarcia, oczekuje się spełnienia szeregu dodatkowych funkcji takich jak:

- zdolność zapobiegania powstawaniu narostów kształtowanego materiału na narzędziach (dotyczy to zwłaszcza kształtowania materiałów aluminiowych i tytanowych),
- zwiększenie trwałości narzędzi,
- zabezpieczenie przed sklejaniem się wykrojek, a także ich przyklejaniem do powierzchni roboczych stempli,
- ochrona antykorozyjna w czasie magazynowania i transportu wytłoczek,
- dobra zmywalność.

W związku z tym zagadnienie doboru smarów technologicznych do procesów obróbki plastycznej na zimno należy traktować wielopłaszczyznowo z uwzględnieniem różnych jego aspektów.

Już w końcu XV wieku, o czym świadczą prace Leonarda da Vinci, zdawano sobie sprawę, że tarcie powoduje straty energetyczne i jest przyczyną zużycia współpracujących ze sobą elementów. W Raporcie Josta z 1966 roku [60], przygotowanym w przez Komitet Brytyjskiego Ministerstwa Nauki i Edukacji, w którym po raz pierwszy użyto terminu „tribologia”, podkreślono, że głównym czynnikiem powodującym straty, ponoszone przez brytyjską gospodarkę, wskutek zużycia maszyn jest niewłaściwe smarowanie ruchomych węzłów tarcia. Oceniono wówczas, że około 50% całkowitej energii, wytwarzanej przez maszynę lub przenoszonej przez mechanizmy, zużywana jest na pokonanie oporów tarcia trących części maszyn. Podobnie ocenia się zużycie energii wytwarzanej przez prasę na pokonanie oporów występujących podczas tłoczenia blach [21]. W wielu pracach podkreśla się, że prawidłowy dobór smaru technologicznego i odpowiednia automatyzacja smarowania zwiększa nie tylko efektywność procesu tłoczenia, ale również poprawia jakość uzyskiwanych wyrobów. Jest to szczególnie istotne w przypadku wytłoczek, których zewnętrzna powierzchnia jest pokrywana powłokami malarskimi [4].

Smary technologiczne stosowane w operacjach tłoczenia można podzielić na cztery podstawowe grupy:

- smary na bazie wody (np. emulsje mydlane),
- smary na bazie olejów mineralnych i roślinnych,
- smary syntetyczne,
- smary stałe, zwłaszcza o budowie warstwowej, takie jak grafit czy dwusiarczek molibdenu.

W pracy [45] wyróżniono dodatkowo powłoki konwersyjne (fosforanowe, szczawianowe) poprawiające adhezję smarów do podłoża. Dobór smaru technologicznego zależy przede wszystkim od materiałów pary trącej (narzędzia i odkształcanego metalu), chropowatości powierzchni, temperatury pracy i prędkości ślizgania.

Do najczęściej stosowanych należą smary technologiczne na bazie olejów. Prace badawcze z tego zakresu dotyczą głównie optymalizacji doboru napędzających, których zadaniem jest regulowanie właściwości reologicznych smarów

i zwiększanie odporności warstwy smarnej na działanie dużych nacisków powierzchniowych. Najczęściej stosowane dodatki to: talk, grafit, siarczek cynku, kreda, proszki metali kolorowych. W pracy [1] przedstawiono wyniki badań skuteczności działania smarów na bazie oleju mineralnego z dodatkiem kwasów tłuszczowych w procesie tłoczenia blach stalowych. Analizowano wpływ różnej zawartości napelniacza w postaci talku na graniczny współczynnik tłoczenia i głębokość uzyskiwanych wytłoczek. Stwierdzono, że z uwagi na konsystencję smaru optymalna zawartość napelniacza (talku) wynosi $7\div 15\%$. Podobne wyniki otrzymano dla napelniaczy w postaci siarki i kredy. Zauważono, że dodatek kwasów tłuszczowych do smaru aktywizuje działanie napelniaczy i poprawia właściwości smarne. W pracy [29] analizowano efektywność smarów plastycznych: smaru Litomos EP25, oraz smaru wapniowego (smar Maszynowy 2) z napelniaczami w postaci smaru stałego: MoS_2 , Sn, Sb_2O_3 oraz proszku brązu heksagonalnego o nazwie MIX w ilości 4% wagowych. Stwierdzono większą efektywność smarów technologicznych w porównaniu z olejami technologicznymi (olej LAN-10 stosowany w procesach tłoczenia) oraz to, że modyfikacja smaru Maszynowego 2 napelniaczami powoduje wyraźny wzrost efektywności smarowania w procesie tłoczenia blach. Analizowano wpływ rodzaju i stężenia dodatków smarnościowych w oleju na właściwości przeciwzużyciowe, przeciwzatarciowe i trwałość zmęczeniową węzła tarcia również w pracy [87].

W pracach, [57, 58, 84, 93, 106,] opisano możliwość poprawy właściwości tribologicznych olejów poprzez wprowadzenie nanocząstek tlenków metali takich jak: miedź, cynk, cyrkon i tytan oraz borków i siarczków np. dwusiarczku molibdenu, dwusiarczku wolframu czy heksagonalnego azotku boru. Stwierdzono, że na właściwości tribologiczne substancji smarujących wpływ mają takie parametry jak: rozmiar, kształt i koncentracja nanocząstek. Według [27] dobrą efektywność smarowania uzyskuje się dla nanocząstek wielkości kilku dziesiątych nanometra i koncentracji 1-5%. Gdy wielkość cząstek przekroczy kilka nanometrów efektywność smarowania spada.

W przypadku tłoczenia wyrobów na prasach szybkobieżnych przeważnie stosowane są emulsje olejowo-wodne, które nie tylko zmniejszają opory tarcia, ale również spełniają rolę chłodziwa. W pracy [22] stwierdzono, że w przypadku tłoczenia blach stalowych i mosiężnych emulsje olejowe dają lepsze wyniki niż oleje z dodatkami EP.

Autor pracy [35] wskazuje na skuteczność tzw. smarów „białych”, których ogromną zaletą jest to, że nie brudzą powierzchni wytłoczek i w przeciwieństwie do smarów zawierających MoS_2 są łatwe do usuwania z powierzchni wyrobu. Są to zazwyczaj olejowe zawiesiny wodorotlenków, węglanów, siarczanów lub pirofosforanów metali alkalicznych.

Jeszcze jednym ważnym aspektem odnośnie smarowania w procesach tłoczenia blach jest oddziaływanie smaru technologicznego na człowieka i otaczające go środowisko [63, 72, 97, 101]. Gwałtowne zmiany środowiskowe, które ujawnił dwudziesty pierwszy wiek zmuszają nas do zwiększenia wysiłku na rzecz ochrony środowiska. Każdy proces wytwarzania, który wiąże się z pro-

dukcją masową powinien być ponownie rozważony pod względem oddziaływania na środowisko. W zakresie tribologii oczekuje się zmniejszenia dużych ilości odpadów posmarowych, zawierających niebezpieczne dla środowiska pierwiastki aktywne takie jak chlor, siarka czy fosfor. Ponadto usuwanie pozostałości smarów z wytłoczek często wymaga stosowania lotnych rozpuszczalników organicznych. Z reguły czyszczenie i utylizacja odpadów posmarowych są kłopotliwe i kosztowne. Dlatego rozpatrując tribologiczne aspekty smarowania w procesach tłoczenia blach należy skoncentrować badania nad możliwością kształtowania blach bez udziału smarowania bądź z zastosowaniem smarów przyjaznych otoczeniu, występujących w naturze, jak chociażby smarów na bazie wody. Niestety trudne warunki tribologiczne panujące w procesach tłoczenia blach (tab.1) sprawiają, że na chwilę obecną niemal niemożliwy jest satysfakcjonujący przebieg procesu bez smarowania. W tej sytuacji należy poszukiwać substancji smarowych, które nie powodowałyby zanieczyszczenia środowiska.

Tabela 1. Warunki tribologiczne w procesach tłoczenia [101]

Stosunek nacisku do granicy plastyczności, p/Re [-]	0,1-1
Naciski kontaktowe, p [MPa]	1-100
Prędkość, v [ms^{-1}]	10^{-3} to 10^{-1}
Względna prędkość poślizgu, v_s [-]	0 to 10^{-2}
Temperatura, T [$^{\circ}C$]	20- 150
Stosunek powierzchni wytłoczki do powierzchni wykrojki, A/A_0 [-]	0,5-1,5

Biorąc pod uwagę adhezyjną teorię tarcia Bowdena i Tabora tarcie jest wynikiem tworzenia i niszczenia (ścianania i rozrywania) połączeń adhezyjnych między mikronierównościami pary trącej, to współczynnik tarcia jest zależny od stosunku wytrzymałości na ścinanie do twardości bardziej miękkiego materiału. Dlatego, by uzyskać małą wartość współczynnika tarcia, należy pomiędzy trące się powierzchnie wprowadzać miękkie materiały. Jak dotąd takie warunki tarcia mogą skutecznie zapewnić jedynie smary technologiczne albo powłoki konwersyjne, a zatem należy dążyć do tego, aby proces tworzenia i usuwania filmu smarnego z wytłoczek był jak najmniej szkodliwy dla środowiska.

W pracach [78, 99, 100, 50, 80, 19, 37, 39, 91] analizowano zagadnienia dotyczące stopniowego zmniejszania stosowania środków smarnych zawierających chlor i aminy oraz takich, które wymagają uprzedniego bonderyzowania. W pracach tych przedstawiono również wyniki badań nad możliwością wprowadzania zamkniętych systemów smarowania i oczyszczania oraz upraszczania i ograniczania operacji mycia wytłoczek.

W prostych operacjach tłoczenia blach przeważnie stosowane są oleje mineralne o małej lepkości oraz oleje syntetyczne i smary wodne. W trudnych przypadkach stosowane są oleje z dodatkami EP. Autor pracy [26] uważa, że alternatywę dla olejów mineralnych i syntetycznych mogą stanowić oleje roślinne. Przede wszystkim oleje te należą do substancji biodegradowalnych, a dzięki obecności długich łańcuchów kwasów tłuszczowych zapewniają dobre smaro-

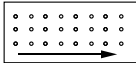
wanie w warunkach tarcia granicznego. W pracy [26] badano wpływ zastosowania jadalnych olejów roślinnych (m.in. czystej oliwy z oliwek, oleju słonecznikowego, oleju z kukurydzy i soi) na opory tarcia podczas kształtowania blach stalowych bez powłok i blach stalowych ocynkowanych. Wartości otrzymanych współczynników tarcia wahały się w granicach $0,11 \pm 0,13$ dla blach stalowych, $0,10 \pm 0,13$ dla blach stalowych ocynkowanych i $0,09 \pm 0,12$ dla blach typu galvanized. Stwierdzono, że wyniki te są porównywalne, a nawet lepsze od smarów technologicznych na bazie olejów mineralnych. Lepsze wyniki uzyskiwano dzięki dodatkom lub modyfikacji chemicznej, np. zmianie struktury trójglicerydów lub wytwarzaniu kwasów tłuszczowych. Ponieważ do celów porównawczych wykorzystano szeroko stosowany w tłocznictwie Ferrocote 6130, który, jak wskazuje producent jest głównie środkiem zabezpieczającym przed korozją, a nie smarującym, to trudno jest jednoznacznie stwierdzić, czy rzeczywiście oleje roślinne mają lepsze właściwości smarne od olejów mineralnych.

W pracach [38, 71, 72, 91, 92] analizowano możliwość poprawy warunków tarcia dzięki zastosowaniu przyjaznych środowisku smarów na bazie olejów roślinnych z dodatkiem kwasu borowego. Erdemir, Fenske [37, 38] zaobserwowali, że kwas borowy (H_3BO_3) dobrze przylega do powierzchni aluminiowych, daje bardzo niski współczynnik tarcia, tj. $\sim 0,04$ i może być stosowany bezpośrednio lub jako dodatek do olejów. Podczas głębokiego tłoczenia blach aluminiowych (1100, 5052 i 6111) w obecności kwasu borowego nie obserwowano występowania rys na powierzchni wytłoczek.

Autor pracy [104, 105] zauważa, że analiza warunków tarcia na styku: „narzędzie – obrabiany materiał” jest wyjątkowo trudna z uwagi na ciągłą zmianę topografii powierzchni, zachodzącą w wyniku odkształcania się materiału. Ma to istotny wpływ na tworzenie się filmu smarnego i transport smaru podczas procesu tłoczenia. Chociaż najkorzystniejszym ze względu na mały współczynnik tarcia byłby mechanizm smarowania hydrodynamicznego, to z uwagi na trudne warunki występujące w trakcie procesu tłoczenia blach najczęściej mamy do czynienia z mieszanym mechanizmem smarowania. Według [92] w celu niedopuszczenia do całkowitego wyciśnięcia smaru pomiędzy trących powierzchni i zapewnienia przynajmniej tarcia granicznego, najkorzystniejsze jest przygotowanie powierzchni o chropowatości $0,4 \mu m$. Smarowanie w warunkach tarcia granicznego pozwala na utrzymanie współczynnika tarcia w granicach $0,1 \pm 0,4$ dzięki fizycznemu przyleganiu smaru do powierzchni trących za pomocą molekularnych sił typu van der Waalsa lub sorpcji chemicznej. Zazwyczaj tworzenie warstwy granicznej na czystych powierzchniach metalicznych jest dość łatwe. W pracach [28, 35] badano wpływ sposobu przygotowania powierzchni narzędzi na efektywność smarowania. Autor pracy [28] analizował 3 rodzaje „nacięć” wykonanych na powierzchniach roboczych narzędzi (tab.2) w celu wytworzenia tzw. „kieszeni smarowych”. Korzystne obniżenie oporów tarcia zaobserwowano jedynie w przypadku prostopadłego usytuowania nacięć w stosunku do kierunku ciągnięcia blachy. W pozostałych przypadkach objętość samaru w powstałych

„kieszeniach smarowych” była niewystarczająca do skutecznego rozdzielenia powierzchni trących.

Tabela 2. Charakterystyka „kieszeni smarowych” [28]

Nr wkładki matrycowej	Kształt nacięć	Szerokość nacięć w [μm]	Głębokość nacięć h_1 [μm]	Stosunek pow. pokrytej nacięciami do pow. całkowitej f/f_0	Stosunek h_1/w	Położenie nacięć w stosunku do kierunku ciągnięcia
ST1	Kołowe zagłębienia	130 $\pm$ 10	3,6 $\pm$ 0,3	0,03	0,03	
ST2	Podłużne kanaliki	30 $\pm$ 5	3,0 $\pm$ 0,3	0,24	0,10	
ST3	Podłużne kanaliki	30 $\pm$ 5	3,0 $\pm$ 0,3	0,22	0,10	

W pracy [107] badano wpływ elektroiskrowego teksturowania (electrical discharge texturing – EDT) powierzchni blach aluminiowych na opory tarcia podczas ich kształtowania. Zaobserwowano zmniejszenie współczynnika tarcia przy zastosowaniu stosunkowo dużego nacisku jednostkowego, tj. powyżej 62 MPa. Poniżej tej wartości obserwowano wzrost współczynnika tarcia. Autorzy tej pracy zaobserwowali również wpływ ukierunkowania tekstury i prędkości ślizgania na wartość oporów tarcia. Wpływ chropowatości i lepkości smaru na wielkość współczynnika tarcia analizowano także [29, 69]. Stwierdzono, że najniższy współczynnik tarcia występuje w przypadku powierzchni o chropowatości 0,5 i 1,0 μm i jest odwrotnie proporcjonalny do lepkości smaru. A. Eleöd z kolei stwierdza, że z uwagi na oddziaływanie smaru najkorzystniejszą obróbką powierzchniową jest dogładzanie kulkami szklanymi.

Autorzy prac [42, 43, 44, 73,] wskazują na wzrost chropowatości powierzchni narzędzi wskutek postępującego zużycia adhezyjnego, jakie zachodzi w wyniku tworzenia i przenoszenia się „narostów” odkształcanego metalu na powierzchniach narzędzi. Zjawisku temu sprzyjają znaczne zbliżenie powierzchni trących i małe prędkości względne podczas tłoczenia. Początkowo występuje ślizganie się odkształcanego materiału po powierzchni narzędzia, w wyniku czego powstają mikroskopowe zarysowania na powierzchni blachy oraz wywołane adhezją lokalne przenoszenie się odkształcanego materiału na powierzchnie narzędzia. Następnie dochodzi do kumulacji i wzrostu narostów, a potem do ich wykruszania, co inicjuje zużycie ściernie. Dalsze ślizganie się trących powierzchni prowadzi do ponownego przenoszenia się odkształcanego materiału na powierzchnię narzędzia i powtarzaniu się cyklu zużycia ściernego. Kumulacja licznych mikrouszkodzeń powierzchni powoduje w efekcie uszkodzenie dużych obszarów powierzchni zarówno narzędzia, jak i wytłoczki. Prowadzi to do zmiany geometrii narzędzi i wzrostu siły tłoczenia, a to z kolei może wywo-

łać przedwczesne pękanie wytłoczek. Taki mechanizm zużycia ma miejsce w przypadku niewystarczającego smarowania bądź w chwili przzerwania filmu smarnego wskutek dużych nacisków powierzchniowych. Tworzenie narostów jest szczególnie intensywne w przypadku kształtowania blach aluminiowych [91] i tytanowych [7, 102]

Zatem jednym z kierunków badań mających na celu zwiększenie odporności na zacieranie jest poszukiwanie nowych materiałów narzędziowych. Przykładem mogą być proszkowe azotowe stale narzędziowe (nitrogen alloyed PM tool steels) [55, 56, 60, 95], których wysoką odporność na zacieranie przypisuje się dyspersji drobnych węglikoazotków posiadających niską adhezję do materiału kształtowanych blach. Część prac naukowych poświęcona jest badaniu powłok antyadhezyjnych. W pracy [17] badano wpływ powłok nakładanych na matryce, m.in. powłok węgla wolframu, azotku tytanu i ceramiki cyrkonowej (TTZ) na współczynnik tarcia podczas kształtowania blach stalowych i stalowych ocynkowanych. Najlepsze wyniki, tj. najniższy współczynnik tarcia uzyskano dla pokryć z węgla wolframu i powłoki cyrkonowej. Powłoka węgla wolframu charakteryzowała się również najlepszą odpornością na zużycie. W pracy [2] analizowano wpływ powłok antyadhezyjnych, takich jak: azotek tytanu, chrom, brąz aluminiowy oraz powłok wielowarstwowych na przebieg procesu tłoczenia blach tytanowych. Skutecznymi powłokami jeśli chodzi o zmniejszenie współczynnika tarcia okazały się powłoki brązu aluminiowego i chromu. Według [51] dobre wyniki podczas kształtowania blach aluminiowych wykazuje stosowanie powłoki CrN o grubości 3 μm .

W pracy [62] jako jedną z metod eliminujących stosowanie smarów technologicznych w procesach głębokiego tłoczenia zaproponowano zastosowanie narzędzi ceramicznych. Badano wpływ stosowania matryc wykonanych z SiC, Si₃N₄, Al₂O₃ i ZrO₂ na warunki tarcia występujące podczas tłoczenia blach aluminiowych, miedzianych, tytanowych oraz stalowych, w tym ze stali nierdzewnych i stali z powłoką cynku. Oceny warunków tarcia dokonywano na podstawie pomiaru siły tłoczenia i granicznego współczynnika tłoczenia (limiting draw ratio – LDR). Badania wykazały, że ceramiczne narzędzia dają pozytywne rezultaty w przypadku kształtowania stali miękkich i czystej miedzi. W obu przypadkach szczególnie korzystne było zastosowanie matryc z azotku bądź węgla krzemu. Korzystne oddziaływanie matryc ceramicznych, zwłaszcza z ceramiki tlenkowej Al₂O₃, zaobserwowano w przypadku kształtowania blach ocynkowanych i blach ze stali nierdzewnej w gatunku SUS304. W przypadku aluminium korzyści z zastosowania matryc ceramicznych były niewielkie, a w przypadku blach tytanowych nie zaobserwowano żadnej poprawy. Oznacza to, że w celu tłoczenia blach bez smarowania konieczne jest dobranie odpowiedniego rodzaju ceramiki do danego gatunku blachy.

Oprócz odpowiedniego doboru materiału na narzędzia, ewentualnej powłoki i składu chemicznego smaru technologicznego istotne jest również miejsce i sposób jego nanoszenia, na co zwrócono uwagę m.in. w pracy [16, 21]. Sposób nanoszenia smaru za pomocą pędzla, wałka bądź poprzez natrysk wpływa na

grubość i równomierność warstwy filmu smarnego, co jak wskazują prace [21, 30] ma wpływ na przebieg procesu tłoczenia blach. W pracy [21] analizowano zależność współczynnika ciążnienia od miejsca nanoszenia smaru na wytłoczkę. Z pracy [4] wynika, że korzystnym jest:

- zmniejszenie oporów tarcia na styku: „matryca - odkształcana blacha – dociskacz” dzięki zastosowaniu polerowania roboczych powierzchni narzędzi i odpowiedniego smarowania,
- zwiększanie oporów tarcia na styku: „odkształcana blacha – stempel”, zwykle powoduje odciążenie przekroju wytłoczki zagrożonego pękaniem.

Często do określenia wpływu warunków tarcia na przebieg procesu tłoczenia wykorzystuje się analizy numeryczne. W symulacjach numerycznych procesów tłoczenia najczęściej wykorzystywanym modelem tarcia jest klasyczny model tarcia Coulomba. Jednak stosowanie stałego współczynnika tarcia w modelach jest znacznym uproszczeniem, z uwagi na ciągłe zmiany warunków tarcia. W pracy [41] przedstawiono metodę wyznaczania współczynnika tarcia, pozwalającą na bardziej efektywne modelowanie zjawisk tarcia podczas tłoczenia blach. Autorzy prac [67, 68] również zwracają uwagę na konieczność uwzględnienia w modelu tarcia temperatury i względnej prędkości trących powierzchni. Według [77] najważniejszymi czynnikami mającymi wpływ na współczynnik tarcia w procesie tłoczenia blach stalowych są prędkość ślizgania, warunki tarcia i wielkość nacisków powierzchniowych.

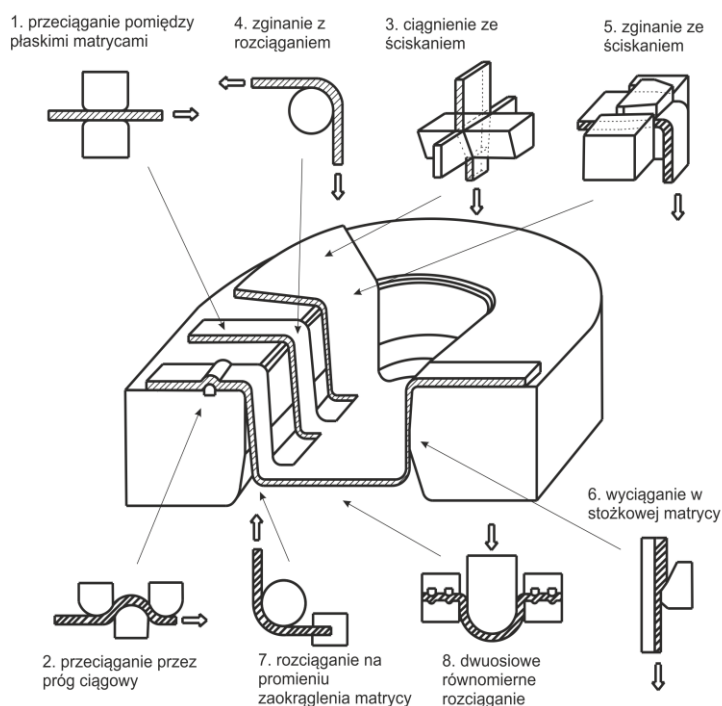
1.4. Metody badań tribologicznych w odniesieniu do tłoczenia blach

Dotychczas w zakresie badań tribologicznych związanych z procesami tłoczenia blach nie ma norm dotyczących metod badania tarcia i zużycia materiałów, ani znormalizowanych kształtów i wymiarów próbek do badań. W celu określenia współczynnika tarcia dla poszczególnych par trących oraz intensywności zużycia materiałów stanowiących te pary przeprowadza się próby technologiczne modelujące rzeczywiste warunki kształtowania blach. Ważne jest by dana próba technologiczna w jak najlepszy sposób odzwierciedlała warunki eksploatacyjne, tj. zapewniała odpowiedni rodzaj ruchu skojarzenia (ślizgowy, toczny), prędkość i obciążenie (stałe lub zmienne), temperaturę pracy itp. Najczęściej nie jesteśmy w stanie wiernie odwzorować rzeczywistych warunków tarcia i zużycia. Wówczas należy dążyć do zamodelowania przynajmniej istotnego parametru mającego dominujący wpływ na badany rodzaj tarcia i zużycia.

Liczba proponowanych w literaturze technicznej testów jest dość duża, a uzyskane podczas badań wyniki służą zazwyczaj do porównywania jakości stosowanych smarów technologicznych, bądź obróbek powierzchniowych. Wybór testu jest zazwyczaj podyktowany geometrią styku i wymiarami kojarzonych elementów trących, rodzajem tarcia, obciążeniem itp. Można wyróżnić 3 grupy testów:

- testy prowadzone według dowolnie wybranych warunków np. w próżni, w atmosferze ochronnej lub w podwyższonej czy obniżonej temperaturze, co pozwala na przeprowadzenie badań podstawowych, informujących o wpływie poszczególnych czynników na wartość oporów tarcia i intensywność zużywania materiałów elementów trących,
- testy uniwersalne do badania tarcia i zużycia w dowolnych warunkach, umożliwiające programowanie obciążeń, prędkości i atmosfery otaczającego środowiska,
- testy prowadzone w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków tłoczenia.

W pracy [20] dokonano przeglądu najczęściej stosowanych metod badawczych tzw. tribotestów do odtwarzania warunków tarcia podczas tłoczenia blach (rys. 6).



Rys.6. Schematy tribotestów do odtwarzania warunków tarcia podczas tłoczenia blach [20]

Trzy próby: przeciągania pasa blachy pomiędzy płaskimi matrycami (1), przeciągania przez próg ciągowy (2) oraz ciągnięcie ze ściskaniem (3) symulują warunki kształtowania panujące w obszarze kołnierзовym wytłoczki. Warunki kształtowania, panujące w obszarze wytłoczki na przejściu kołnierza w pobocznice wytłoczki (tj. na promieniu zaokrąglenia matrycy) symulują próby badawcze (4) i (5). Są to warunki tribologiczne występujące podczas zginania z rozciąganiem i zginania ze ściskaniem. Próba badawcza (6) modeluje proces wyciągania

nia w matrycy stożkowej, podczas gdy test (7) reprezentuje kształtowanie (rozciąganie) na promieniu zaokrąglenia matrycy, a test (8) reprezentuje proces dwuosiowego równomiernego rozciągania, tj. włączania półkulistego stempla w blachę bez możliwości jej wysuwania spod dociskacza. Wszystkie te próby mają za zadanie określić wpływ smaru technologicznego na proces tłoczenia blach, bez konieczności testowania smaru w warunkach przemysłowych.

1.5. Podsumowanie przeglądu literatury

Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że:

- głównymi materiałami stosowanymi na elementy tłoczone w lotnictwie są stopy aluminium, tytan i jego stopy oraz stale nierdzewne. Stopy aluminium i tytanu stosowane są z uwagi na dobrą odporność korozyjną, mały ciężar właściwy i stosunkowo dobrą wytrzymałość. Natomiast stale stopowe na bazie niklu, mimo dużo większej gęstości, są jak dotąd jedynymi materiałami utrzymującymi zadowalającą wytrzymałość w temperaturach pracy „gorącej” części silników lotniczych,
- niestety większość wymienionych materiałów cechuje się niską tłocznością i niekorzystnymi właściwościami tribologicznymi; spośród tych materiałów najgorsze właściwości tribologiczne posiadają stopy aluminium i stopy tytanu – obie grupy cechują się dużą skłonnością do przenoszenia się na narzędzia (tworzenia nalepień kształtowanego materiału na narzędziach) i zacierania, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia procesy kształtowania blach,
- w celu poprawy warunków tribologicznych konieczne jest skuteczne rozdzielanie materiałów pary trącej: „narzędzie - kształtowany materiał blachy”, np. poprzez **stosowanie smarów technologicznych, bądź powłok antyadhezyjnych**,
- pośród dotychczas stosowanych smarów technologicznych w tłocznictwie wyróżnia się 4 główne grupy smarów: smary na bazie olejów mineralnych, emulsje olejowo-wodne, smary syntetyczne i smary stałe,
- mimo wielu opracowań na temat smarowania w procesach tłoczenia blach, z uwagi na fakt, że wraz z rozwojem techniki rośnie zapotrzebowanie na wytłoczki z trudnoodkształcalnych stopów metali, dotąd rzadko stosowanych w tłocznictwie, oraz nowe zagadnienia związane z ochroną środowiska, istnieje szereg nierozwiązanych problemów technologicznych, które nie znajdują należytego odzwierciedlenia w literaturze naukowo-technicznej. Są to m.in.: uzyskanie odpowiedniej trwałości i wytrzymałości filmu smarnego bez stosowania szkodliwych dla środowiska dodatków EP, możliwość wyeliminowania smarowania np. poprzez zastosowanie obróbki powierzchniowej narzędzi kształtujących. Chociaż znane są prace prowadzone nad tego typu rozwiązaniami, to jednak stanowią one tylko badania na skalę laboratoryjną, tymczasem przemysł oczekuje na rozwiązania możliwe do zastosowania w skali przemysłowej.

2. TEZA BADAWCZA I CEL ROZPRAWY. ZAKRES BADAŃ

Materiały stosowane na elementy tłoczone w lotnictwie, tj. stopy aluminium, tytan i jego stopy oraz stale nierdzewne na bazie niklu, żelaza i kobaltu należą do materiałów o niewielkiej tłoczności, które dodatkowo charakteryzują się niskimi właściwościami tribologicznymi. *Na szczególne trudności, z uwagi na tribologię, napotyka się przy kształtowaniu wyrobów z blach aluminiowych i tytanowych.* Zatem podjęcie pracy w celu zbadania możliwości ograniczenia negatywnych skutków tarcia poprzez zastosowanie:

- smarów na bazie olejów roślinnych, nie zawierających w swym składzie szkodliwych dla środowiska dodatków typu EP

oraz

- powłok antyadhezyjnych na narzędziach

wydaje się celowe i oczekiwane przez przemysł związany z tłoczeniem blach.

W wyniku przeprowadzonej analizy stanu literatury z zakresu kształtowania blach trudnoodkształcalnych metodami obróbki plastycznej na zimno, zwłaszcza tłoczenia, przyjęto następujące tezy:

Istnieje możliwość skutecznego zmniejszenia oporów tarcia oraz ograniczenia, a nawet całkowitego wyeliminowania przenoszenia odkształcanego materiału na powierzchnie robocze narzędzi formujących dzięki zastosowaniu smarów na bazie olejów roślinnych, nie zawierających szkodliwych dla środowiska dodatków smarnościowych.

Stosowanie powłok antyadhezyjnych wzmacnia działanie smarów technologicznych, dodatkowo zabezpieczając narzędzia kształtujące przed bezpośrednim kontaktem z obrabianym materiałem w przypadku przerwania filmu smarnego wskutek wysokich nacisków powierzchniowych, występujących podczas tłoczenia blach trudnoodkształcalnych.

Krytyczna ocena aktualnego stanu literatury i techniki w zakresie ograniczania negatywnych skutków tarcia podczas kształtowania na zimno blach aluminiowych, tytanowych i ze stali nierdzewnej sprawia, że jako *główny cel pracy* przyjęto opracowanie:

- *taniej i prostej receptury smaru ekologicznego,*
- *sposobu skutecznego nanoszenia środka smarnego na materiał w celu ułatwienia płynięcia materiału podczas formowania i możliwości osiągnięcia większych, równomiernie rozłożonych w całej objętości materiału odkształceń w jednej operacji tłoczenia,*
- *wykazanie korzystnego działania powłok antyadhezyjnych.*

Dążąc do ograniczenia stosowania środków smarnych, które zawierają szkodliwe dla środowiska substancje, część badawcza pracy obejmuje:

- analizę możliwości wykorzystania jako substancji bazowych olejów roślinnych, a jako dodatków smarnościowych nietoksycznych substancji o budowie krystalicznej zbliżonej do struktury cząsteczki grafitu, który jest powszechnie wykorzystywany jako dodatek zmniejszający współczynnik tarcia, oraz kwasów tłuszczowych należących do niejonowych związków powierzchniowo czynnych, mających zdolność adsorbowania się na powierzchni metalu
- analizę możliwości wykorzystania powłok antyadhezyjnych na narzędziach, jako dodatkowe zabezpieczenie przed bezpośrednim stykiem kształtowanego materiału z narzędziem w chwili przerwania filmu smarnego wskutek działania wysokich nacisków powierzchniowych towarzyszących kształtowaniu blach z materiałów trudnoodkształcalnych.

Badania eksperymentalne smarów technologicznych i powłok antyadhezyjnych obejmowały:

- analizę wpływu rodzaju, ilości i wielkości cząstek dodatku smarnościowego,
- analizę sposobu nanoszenia substancji smarującej na materiał,
- analizę wpływu rodzaju powłoki na opory tarcia.

Badania prowadzono w oparciu o tzw. próbę przeciągania pasa blachy pomiędzy płaskimi matrycami.

Studia teoretyczne obejmują analizę wpływu smarowania na rozkład naprężeń i odkształceń w procesie kształtowania wytłoczek z wykorzystaniem symulacji numerycznej programem PAMStamp 2G [116], specjalnie dedykowanym do analizy procesów tłoczenia blach.

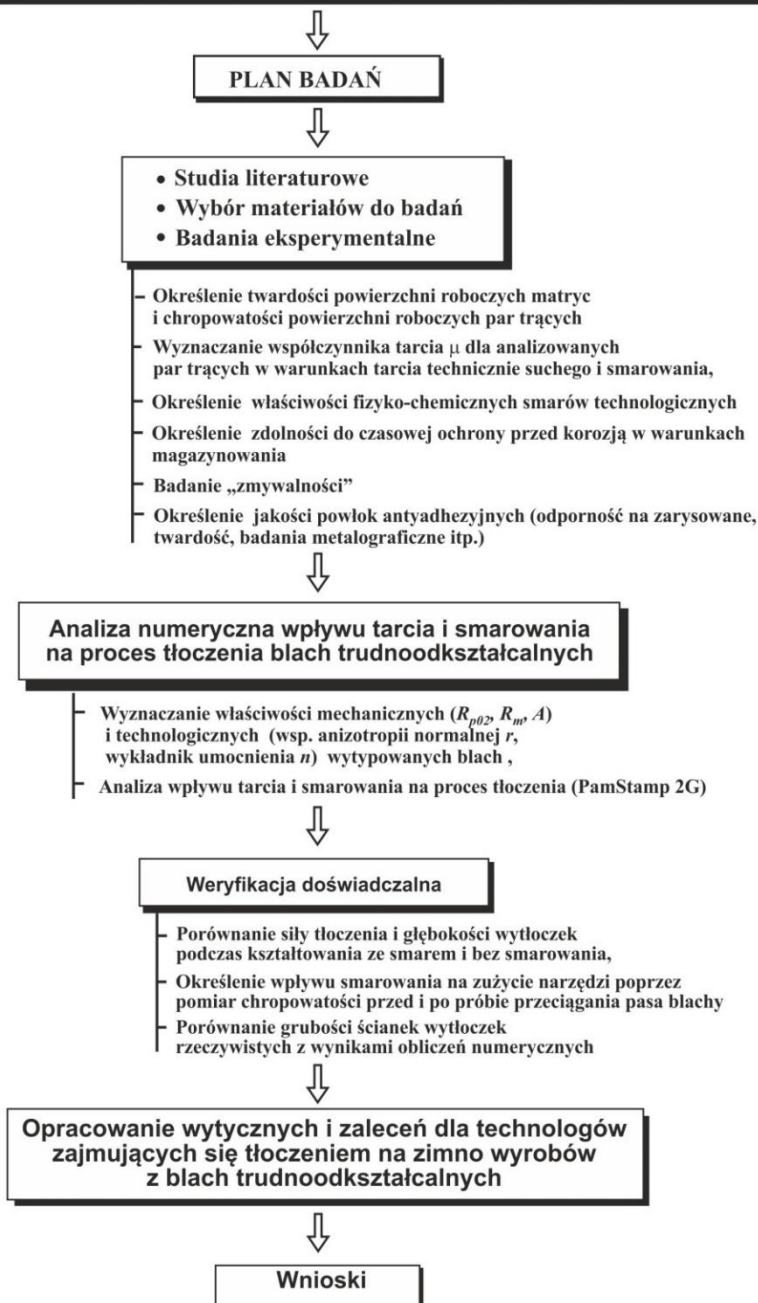
Celem użytecznym rozprawy jest opracowanie ekologicznego smaru technologicznego oraz sposobu jego nanoszenia, aby osiągnąć wyniki przynajmniej takie same jak przy dotychczas stosowanych komercyjnych smarach na bazie olejów mineralnych lub syntetycznych.

Opracowanie własne składa się z dwóch zasadniczych części:

1. doświadczalnej mającej na celu określenie skutecznych metod ograniczania negatywnych skutków tarcia podczas tłoczenia blach trudnoodkształcalnych,
2. analizy numerycznej procesu kształtowania wybranych blach stosowanych w lotnictwie w celu wyznaczenia wpływu tarcia i smarowania na rozkład naprężeń i odkształceń w wytłoczce.

Szczegółowy plan badań pokazano na rysunku 7.

TRIBOLOGICZNE ASPEKTY KSZTAŁTOWANIA BLACH STOSOWANYCH W PRZEMYŚLE LOTNICZYM



Rys.7. Plan badań

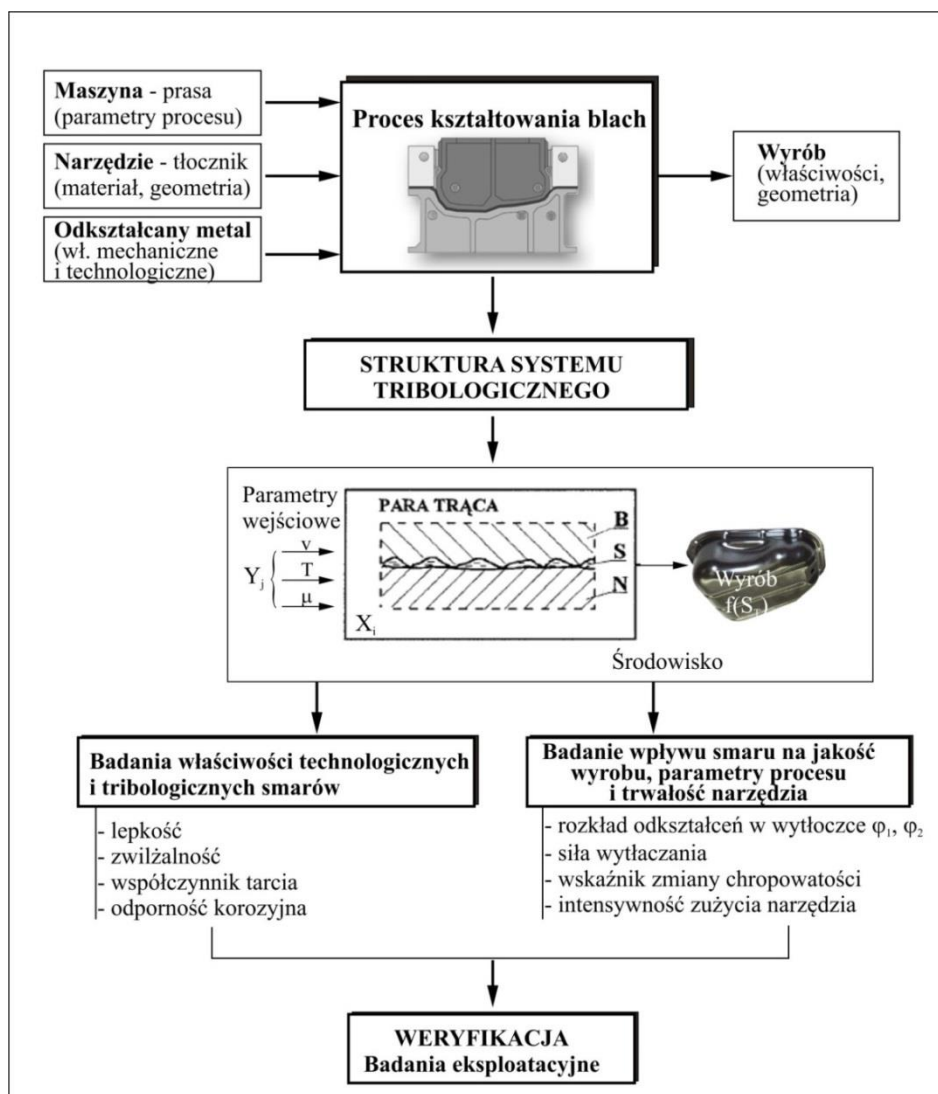
3. BADANIA WŁASNE

3.1. Tribologiczna charakterystyka kształtowania blach

Procesy kształtowania blach należą do najczęściej stosowanych technologii wytwarzania metalowych wyrobów cienkościennych, z uwagi na to, iż pozwalają na produkcję wysokiej jakości elementów o złożonych kształtach, przy stosunkowo niskich kosztach wytwarzania. Szeroka gama elementów tłoczonych obejmuje zarówno drobną galanterię metalową, jak i duże elementy karoserii samochodowych, czy elementów poszyciowych samolotów. Czasami wytłoczki spełniają tylko rolę ozdobną, ale w większości przypadków są to odpowiedzialne elementy strukturalne, gdzie od dokładności i jakości ich wykonania zależy stabilność i bezpieczeństwo pracy urządzeń. Ponadto wytłoczki w większości wypadków są poddawane obróbce powierzchniowej, takiej jak malowanie, czy nanoszenie powłok galwanicznych, co oznacza, że powinny posiadać gładką powierzchnię, nie wykazującą śladów po kontakcie z narzędziem. W zasadzie, uzyskanie takiej powierzchni jest możliwe tylko w przypadku stosowania odpowiedniego smarowania, pozwalającego na skuteczne rozdzielenie trących się powierzchni. Na rysunku 8 przedstawiono proces kształtowania blach jako system tribologiczny i wynikający stąd zakres badania smarów technologicznych. Parę trącą tego systemu stanowi odkształcana plastycznie blacha i narzędzie. Uwzględniając różnorodność materiałów stosowanych na elementy tłoczone w lotnictwie i narzędzia kształtujące, do dalszych badań wytypowano trzy grupy par trących: „stal – aluminium”, „stal – stal” i „stal – tytan”. Spośród wymienionych par najwięcej problemów, wymagających pilnego rozwiązania, przysparzają pary trące: „stal – aluminium” i „stal – tytan”. W obu przypadkach występuje duża skłonność do tworzenia szepień i zrostów tarcowych, w wyniku których na powierzchni stalowego narzędzia tworzą się, odpowiednio, aluminiowe lub tytanowe nalepienia.

Procesowi powstawania szepień i zrostów tarcowych podczas procesów tłoczenia, będących przejawem zużycia adhezyjno-dyfuzyjnego, sprzyjają:

- stosunkowo mała prędkość poślizgu odkształcanego metalu po powierzchni narzędzia,
- duże zbliżenie powierzchni trących,
- znaczny wzrost powierzchni wytłoczki występujący w procesie odkształcania.

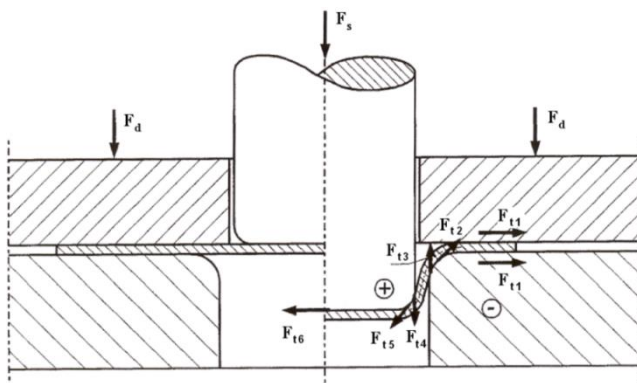


Rys. 8. Struktura systemu tribologicznego procesu kształtowania blach

Powierzchnia wytłoczki jest zazwyczaj od 2 do 5 razy większa od powierzchni materiału wyjściowego, co wiąże się z odsłanianiem nowych, niepokrytych tlenkami powierzchni blachy. Prowadzi to do bezpośredniego styku powierzchni kształtowanego metalu („in situ”) z powierzchnią roboczą narzędzia, przy stosunkowo dużych naciskach jednostkowych, sięgających od 1 do 100 MPa. Wielkość nacisków jednostkowych zależy głównie od rodzaju kształtowanego materiału, grubości blachy i rodzaju operacji. W celu niedopuszczenia do bezpośredniego kontaktu odształcanego materiału z narzędziem stosuje się smary technologiczne, które nanosi się bezpośrednio przed operacją kształtowa-

nia na narzędzie lub blachę. Niestety podczas kształtowania wielooperacyjnego ilość smaru naniesiona na blachę maleje z każdą, kolejną operacją, tak że często dochodzi do kształtowania w warunkach tarcia granicznego i mieszanego. Niebagatelną rolę w tym względzie odgrywa ciepło tarcia, które powoduje wzrost temperatury w procesie tłoczenia z 20°C do około 80°C, co sprawia zmniejszenie lepkości smaru technologicznego i zwiększenie ryzyka całkowitego wyciśnięcia spomiędzy trących się powierzchni.

Siły tarcia występujące w klasycznym procesie tłoczenia blach za pomocą sztywnego narzędzia przedstawiono na rysunku 9. Wyróżnia się siłę tarcia pomiędzy odkształcanym materiałem blachy i narzędziem (matrycą, dociskaczem) – F_{t1} , siłę tarcia na krawędzi ciągowej matrycy F_{t2} , siłę tarcia występującą w szczelinie tłoczni F_{t3} oraz siłę tarcia pomiędzy odkształcaną blachą i stemplem – F_{t4} , F_{t5} i F_{t6} .



Rys. 9. Siły tarcia w procesie tłoczenia za pomocą sztywnego narzędzia

Sumaryczną siłę kształtowania, przenoszoną przez stempel, F_s można wyrazić jako sumę sił składowych:

$$F_s = F_{op} + F_g + F_t + F_{bezwł} \quad (3)$$

gdzie: F_{op} – siła odkształcania plastycznego materiału wytłoczki (bez tarcia),

F_g – siła gięcia,

F_t – siła tarcia,

$F_{bezwł}$ – siły bezwładności, które są pomijalnie małe.

Siła tarcia F_t jest sumą składowych sił tarcia w poszczególnych obszarach styku kształtowanego materiału z narzędziem:

$$F_t = F_{t1} + F_{t2} + F_{t3} + F_{t4} + F_{t5} + F_{t6} \quad (4)$$

gdzie: F_{t1} – siła tarcia pod dociskaczem,

F_{t2} – siła tarcia na krawędzi ciągowej matrycy,

F_{t3} – siła tarcia w szczelinie ciągowej matrycy,

F_{t4} , F_{t5} , F_{t6} – siły tarcia materiału blachy o stempel, tj. na powierzchni bocznej, na promieniu zaokrąglenia i na krawędzi czołowej stempla.

W zależności od schematu i parametrów technologicznych procesu kształtowania blachy, siły tarcia mogą mieć zarówno dodatnie (F_{t4} , F_{t5} , F_{t6}), jak i ujemne (F_{t1} , F_{t2} , F_{t3}) oddziaływanie, co na rysunku 9 zostało oznaczone schematycznie znakiem „+” lub „-”. Opory tarcia występujące pod dociskaczem mają niekorzystny wpływ na przebieg kształtowania blachy i mogą prowadzić do pęknięcia wytłoczki na przejściu jej dna w część cylindryczną. Ma to istotne znaczenie podczas kształtowania blach o małej grubości, gdyż wraz ze zmniejszeniem grubości blachy maleje czynny przekrój wytłoczki. Podobny, ujemny charakter ma tarcie odkształcanej blachy o powierzchnię matrycy (na powierzchni ciągowej oraz w szczelinie ciągnika). Tarcie powoduje wzrost nacisku wywieranego przez stempel i zwiększa ryzyko oderwania dna wytłoczki. W obu przypadkach tarcie powoduje zwiększenie siły kształtowania F_s , a przez to zwiększenie ryzyka pęknięcia i pogorszenie współczynnika sprawności energetycznej procesu. Jedynie tarcie odkształcanej blachy o powierzchnię stempla ma dodatnie oddziaływanie, gdyż zwiększa siłę konieczną do zerwania wytłoczki, a więc jest czynnikiem ułatwiającym proces kształtowania blachy. Tarcie wywiera znaczący wpływ na rozkład odkształceń w wytłoczce i wielkość pocienienia jej ścianek, co w rezultacie przyczynia się do niejednorodności właściwości wytrzymałościowych po grubości ścianki wytłoczki.

W celu niedopuszczenia do pęknięcia wytłoczek w pobliżu jej dna podczas procesu kształtowania (wytłaczania, przetłaczania i wyciągania) największa siła kształtowania F_s powinna być mniejsza od siły F_{gr} , którą może przenieść niebezpieczny przekrój wytłoczki. Warunek ten można zapisać równaniem (5) [36, 94]:

$$F_s \leq F_{gr} = Lg\sigma_m \quad (5)$$

gdzie: L – długość obwodu kształtowanej wytłoczki (wg średniej średnicy),

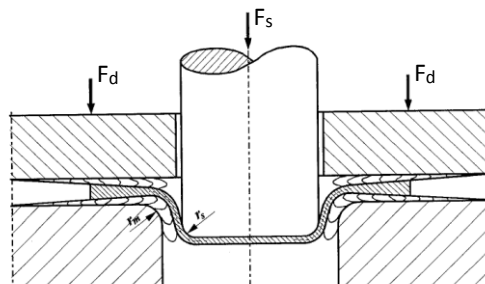
g – grubość ścianki wytłoczki,

$\sigma_m = R_m(1 + \varepsilon_r)$ – rzeczywiste naprężenie rozrywające materiał odkształcanej blachy,

ε_r – odkształcenie równomierne,

R_m – wytrzymałość na rozciąganie.

Z uwagi na duży udział sił tarcia w procesie kształtowania, czasami podejmowane są próby realizacji tłoczenia w warunkach smarowania hydrodynamicznego, co wymaga specjalnego ukształtowania narzędzi, tak by smar „zabierany” przez przemieszczający się materiał był wprowadzany w zbieżną szczelinę, co powoduje wzrost ciśnienia i powstawanie tzw. klina smarowego. Jednym z istotnych warunków do uzyskania smarowania płynnego w strefie odkształcenia jest wytworzenie w smarze ciśnienia równoważącego istniejące siły, a więc o wartości równej lub większej od granicy plastyczności ciągnionego materiału. Na rysunku 10 pokazano schemat ilustrujący możliwości powstawania klina smarującego w procesie tłoczenia.



Rys. 10. Schemat powstawania klina smarnego podczas tłoczenia

W celu wytworzenia warunków do smarowania hydrodynamicznego, należy zapewnić odpowiednio dużą prędkość przemieszczania się blachy względem stempla oraz dobrać właściwą lepkość smaru zgodnie z równaniem (6) [54]:

$$F_t = \eta A_s \frac{v_{sr}}{g_{sr}} \quad (6)$$

gdzie: A_s – rzeczywista powierzchnia ścinanej warstewki smaru,
 η – rzeczywista lepkość dynamiczna smaru,
 v_{sr} – średnia prędkość przemieszczania wytłoczki względem narzędzia,
 g_{sr} – średnia grubość warstwy smaru.

Badania przeprowadzone przez [40] wykazały, że przy niewłaściwie dobranym wskaźniku $K = v \cdot \eta$, może powstawać fałdowanie wytłoczek.

3.2. Wymagania stawiane smarom technologicznym

Spośród licznych operacji składających się na proces technologiczny kształtowania blach, takich jak:

- czyszczenie (np. odtłuszczanie blachy),
- smarowanie blachy lub narzędzia,
- wytłaczanie, przetłaczanie i wyciąganie (ilość i rodzaj operacji zależy od geometrii wytłoczki, jej materiału itp.),
- wyżarzanie międzyoperacyjne (gdy zachodzi konieczność przywrócenia zdolności blachy do dalszych odkształceń plastycznych),
- obróbka powierzchniowa,
- magazynowanie

smarowanie odgrywa bardzo ważną rolę. Jest czynnikiem, który przede wszystkim zmniejsza opory tarcia, a co za tym idzie zmniejsza straty energii niezbędnej do pokonania tarcia i ogranicza intensywność zużycia narzędzi. Tym samym zwiększa ich trwałość i niezawodność oraz poprawia jakość otrzymywanych wytłoczek. Ta funkcja smaru oraz inne, dodatkowe funkcje, które muszą spełniać smary technologiczne, jak chociażby ochrona przed korozją, rzutują na dobór składu chemicznego smaru.

Podstawowe wymagania jakie powinien spełniać smar technologiczny w odniesieniu do narzędzia, wyrobu i środowiska zestawiono w tabeli 3. Wyszczególniono trzy grupy wymagań: technologiczne, eksploatacyjne i ekologiczne.

Tabela 3. Wymagania stawiane smarom technologicznym do tłoczenia blach

	Właściwości smarów technologicznych z uwagi na:	
	narzędzie	wyrób
Wymagania technologiczne	- zmniejszenie oporów tarcia - zmniejszenie intensywności zużycia - zdolność do tworzenia trwałych warstw antyadhezyjnych, zapobiegających nalepianiu się kształtowanego materiału - dobra zwilżalność - brak korozyjnego oddziaływania - zapobieganie nagrzewaniu się narzędzia wskutek wytwarzania znacznej ilości ciepła tarcia przy dużych wartościach nacisków jednostkowych i prędkości względnych	- ułatwienie płynięcia kształtowanego materiału - odporność na działanie wysokich nacisków powierzchniowych - nie pozostawianie plam po wyżarzaniu - brak korozyjnego oddziaływania w warunkach magazynowania, - łatwość usuwania z wyrobu
Wymagania eksploatacyjne	- łatwość sporządzania - łatwość nanoszenia na narzędzie lub blachę (dobre własności reologiczne umożliwiające aplikację smaru poprzez natrysk za pomocą centralnego układu smarowania) - duża wytrzymałość na obciążenia normalne i łatwość płynięcia w kierunku stycznym - stabilność właściwości w czasie, m.in. małe zmiany lepkości wraz ze wzrostem temperatury, brak skłonności do segregacji w trakcie magazynowania - odporność na utlenianie - odporność na działanie niskich temperatur - niski koszt wytwarzania	
Wymagania ekologiczne	- obojętność fizjologiczna - brak zagrożenia dla środowiska - łatwość utylizacji	

Smar technologiczny powinien przede wszystkim skutecznie rozdzielać powierzchnie trące. Przerwanie filmu smarnego zazwyczaj skutkuje powstawaniem nalepień tj. przenoszeniem kształtowanego metalu na narzędzia. Powstałe nalepienia są po pierwsze przyczyną powstawania rys i wgniecień na powierzchniach wytłoczek, których nie można usunąć w kolejnych operacjach obróbki powierzchniowej, a po drugie prowadzą do przedwczesnego zużycia narzędzi. Dlatego film smarny powinien stanowić odpowiednio grubą i trwałą warstwę, odporną na występowanie dużych nacisków jednostkowych. Można to zapewnić poprzez dobór odpowiedniej do panujących nacisków jednostkowych i prędkości względnych lepkości smaru i jego aktywności powierzchniowej. Właściwe smarowanie nie tylko skutecznie rozdziela elementy pary trącej, ale również znacząco ułatwia płynięcie kształtowanego metalu, a przez to zapewnia równomierność odkształceń i jednorodność właściwości mechanicznych wytłoczki.

Ponadto w grupie właściwości technologicznych ważne są takie cechy smaru jak: brak korozyjnego oddziaływania na narzędzie i wytłoczkę podczas jej magazynowania oraz łatwość usuwania smaru z wyrobu z uwagi na to, że większość elementów tłoczonych podlega dalszej obróbce powierzchniowej.

Rozpatrując właściwości eksploatacyjne należy przede wszystkim mieć na uwadze łatwość sporządzania smaru i niski koszt wytwarzania, łatwość nanoszenia smaru na blachę bądź narzędzie oraz trwałość w warunkach magazynowania.

Biorąc pod uwagę przepisy BHP i ochronę środowiska smary technologiczne powinna cechować obojętność fizjologiczna w odniesieniu do skóry i dróg oddechowych człowieka oraz łatwość utylizacji odpadów posmarowych. Dąży się do eliminacji smarów, które są zdolne do tworzenia mgieł olejowych oraz smarów, które zawierają toksyczne składniki, jakimi są niektóre dodatki EP i dodatki antykorozyjne. Właściwy dobór pH smaru jest ważny z uwagi na możliwość wystąpienia niepożądanego reakcji fizjologicznej skóry oraz konieczność zabezpieczenia biologicznego (rozwój grzybów i bakterii). Należy również pamiętać o możliwości wystąpienia zanieczyszczenia gleby i wód pozostałościami smarów.

3.3. Receptury smarów wytypowanych do badań

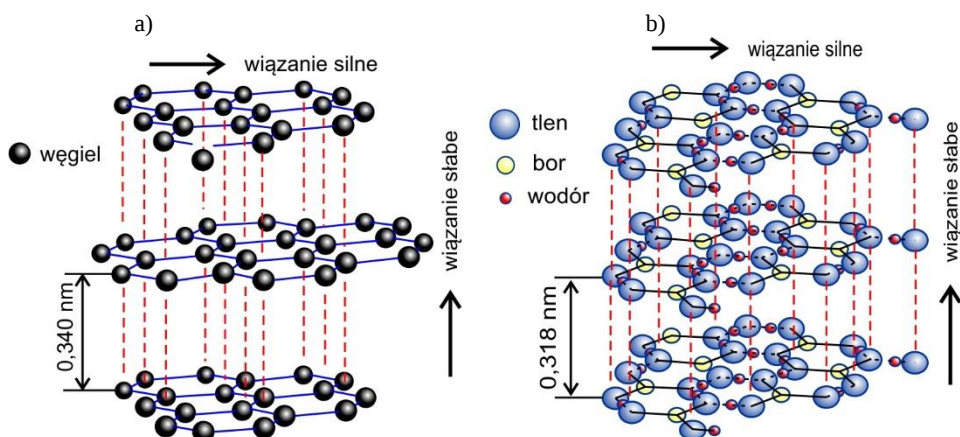
Głównym założeniem przy opracowywaniu smarów technologicznych do procesów tłoczenia blach było opracowanie receptury smaru nieszkodliwego dla środowiska, który jednocześnie pozawalałby na obniżenie oporów kształtowania, przynajmniej w stopniu takim samym jak to ma miejsce w przypadku powszechnie stosowanych smarów olejowych na bazie olejów mineralnych.

W związku z tym za bazę do sporządzania smarów technologicznych przyjęto oleje roślinne. Badaniom poddano 3 oleje roślinne oznaczone następująco:

- olej rzepakowy - nr 1.01,
- oliwę z oliwek - nr 2.01,
- olej słonecznikowy - nr 3.01.

Jako główne dodatki uszlachetniające zastosowano kwas borowy (H_3BO_3) i kwas stearynowy ($\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$).

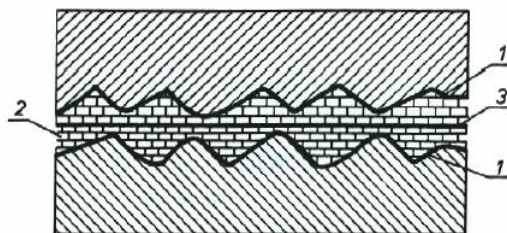
Wybór kwasu borowego był podyktowany tym, iż jego budowa krystaliczna jest zbliżona do struktury cząsteczki grafitu (rys. 11), który będąc substancją o warstwowej budowie siatki krystalicznej, jest wykorzystywany jako smar stały bądź dodatek do mieszanek smarowych. Mimo, iż grafit znacząco obniża współczynnik tarcia, to cały czas podejmowane są próby zastępowania grafitu innymi substancjami z uwagi na fakt, iż powoduje trudne do usunięcia zabrudzenie powierzchni wyrobów. W ramach niniejszej pracy, poprzez analogię, poszukiwano substancji o budowie warstwowej, która pozwoliłaby na zmniejszenie współczynnika tarcia, a przy tym nie powodowałaby zabrudzenia powierzchni wytłoczek.



Rys. 11. Siatka krystaliczna a) grafitu, b) kwasu borowego

W. L. Bragg [24] dobre właściwości smarne grafitu przypisuje charakterystycznej budowie siatki krystalicznej, w której atomy węgla ułożone w płaskiej warstwie są związane pomiędzy sobą silnymi wiązaniami kowalencyjnymi natomiast pomiędzy atomami węgla znajdującymi się w sąsiednich warstwach występują znacznie mniejsze oddziaływania typu van der Waalsa. Odległości między sąsiednimi atomami węgla w warstwie wynoszą 0,142 nm, natomiast między warstwami 0,34 nm. Choć sugestie Bragga stworzyły podstawy strukturalnej teorii tarcia smarów stałych, to nie w pełni wyjaśniają mechanizm ich działania. Niektórzy badacze sugerują, że najważniejsze z uwagi na obniżenie współczynnika tarcia, są zjawiska sorpcyjne. Adsorpcyjna teoria tarcia smarów stałych, nie negując wpływu czynników strukturalnych, zasadniczą rolę przypisuje procesom adsorpcji i utleniania. Ponieważ żadna z tych teorii nie jest w stanie w pełni wyjaśnić zjawisk występujących podczas tarcia smarów stałych, należy przypuszczać, że dobre właściwości smarne uzyskuje się wówczas, gdy jednocześnie występuje warstwowa budowa siatki krystalicznej (płaszczy-

zny poślizgu) i adhezja cząsteczek substancji smarowej do powierzchni metalu. Mechanizm działania smarnego grafitu przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Mechanizm smarowania za pomocą grafitu [69]:
1 – przyscienne warstewki grafitu, 2 – wypełnienie grafitem wgłębień nierówności powierzchni, 3 – ślizgowa powierzchnia warstw grafitowych

Cząsteczki grafitu zawarte w oleju bazowym w wyniku adsorpcji fizycznej tworzą na powierzchniach narzędzia i odkształcanego metalu cienki film grafitowy (grafoid), do którego przyciągane są następne cząsteczki grafitu, aż do wypełnienia wszystkich nierówności powierzchni. Od tego momentu przemieszczanie wzajemne trących się powierzchni odbywa się w warstwie grafitowej wzdłuż płaszczyzn łatwego poślizgu. Warstwa ta charakteryzuje się dobrymi właściwościami adsorpcyjnymi, w wyniku czego przyciągane są kolejne cząstki oleju, tworzące film smarny zmniejszający opory tarcia.

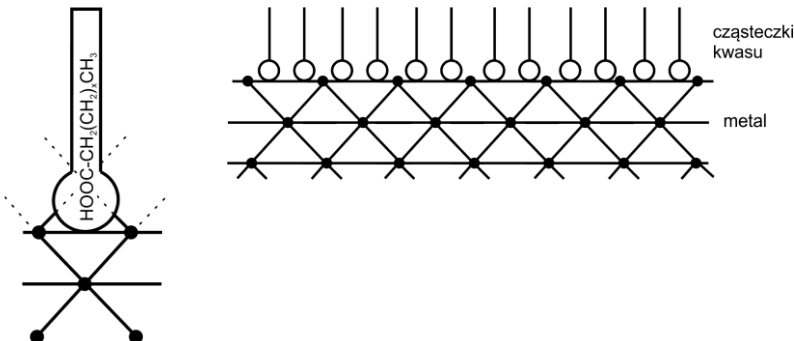
Kwas borowy - H_3BO_3 , podobnie jak grafit, tworzy sieć warstwową (rys. 11), w której cząsteczki kwasu połączone są ze sobą wiązaniami wodorowymi. Jest substancją mało toksyczną. Tylko w niewielkim stopniu wchłania się przez nieuszkodzoną skórę, a ponieważ wykazuje działanie antybakteryjne często jest stosowany w medycynie. Kwas borowy stanowi bezbarwną substancję stałą o postaci heksagonalnych, prześwitujących łusek. Kwas borowy jest kwasem słabej mocy ($pK_a = 9,24$), trudno rozpuszczalnym w zimnej wodzie. Jego rozpuszczalność w wodzie rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Należy podkreślić, że jest związkiem łatwo dostępnym i niedrogim.

Kwas stearynowy - $CH_3(CH_2)_{16}COOH$ (rys. 13) wybrano jako dodatek do smarów z uwagi na doniesienia literaturowe mówiące o dodatnim wpływie kwasów tłuszczowych na właściwości smarne. Jest on jednym z nasyconych kwasów karboksylowych (kwasów tłuszczowych) i jako organiczny związek chemiczny występuje w tłuszczach zwierzęcych oraz roślinnych w postaci estru z gliceryną. Kwas stearynowy jest słabo rozpuszczalny w wodzie, a w przemyśle kosmetycznym oraz farmaceutycznym jest stosowany jako stabilizator konsystencji.

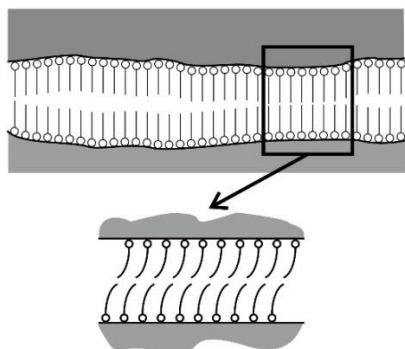


Rys. 13. Budowa cząsteczki kwasu stearynowego

Działanie kwasu stearynowego jako dodatku smarnościowego można wyjaśnić na najprostszym modelu tworzenia warstwy granicznej pokazanym na rysunku 14 [54], w którym pałeczka stanowi umowny symbol kwasu tłuszczowego. Główkę pałeczki tworzy polarna grupa kwasowa COOH, a pałeczkę łańcuch węglowodorowy, składający się z członu $(CH_2)_{16}$ i zakończenia CH_3 . W momencie znalezienia się cząsteczki kwasu w obrębie działania niewysyconych sił międzycząsteczkowych powierzchni metalu, zostają one zatrzymane i zorientowane prostopadłe do tej powierzchni. W. Hardy [54] wyjaśnia działanie smarujące warstwy granicznej tzw. szczotką molekularną (rys. 15). Uważa, że im dłuższe cząsteczki zostają zaadsorbowane na współpracujących powierzchniach tym większy odstęp między nimi i tym silniejsza redukcja wzajemnego oddziaływania metali, dlatego następuje wyraźne zmniejszenie współczynnika tarcia przy długołańcuchowych kwasach tłuszczowych.

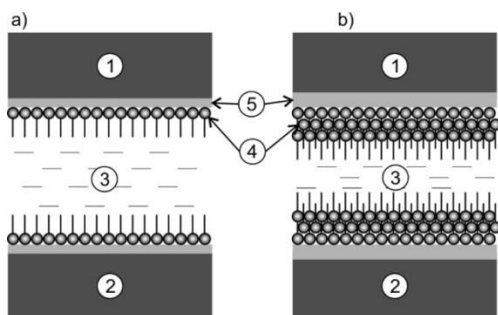


Rys. 14. Orientacja cząsteczki kwasu tłuszczowego na powierzchni metalu



Rys. 15. Model Hardy'ego tworzenia warstw granicznych [opracowano wg 54]

W pracy [65] stwierdzono również, że obecność dodatków smarowniczych, takich jak kwasy tłuszczowe zwiększa adsorpcję fizyczną cząsteczek o długich łańcuchach z polarnymi grupami na ich końcach, tworząc cienką warstwę graniczną na trących się powierzchniach (rys. 16a) oraz to, że grubość i trwałość tej warstwy można zwiększać poprzez dodatek związków mogących wchodzić w reakcje chemiczne z materiałem bazowym narzędzia (rys. 16b). Najczęściej stosowane w tym celu związki to związki siarki i fosforu. Chociaż związki te na stali tworzą ochronną warstwę siarczków i fosforanów, pozwalającą na zwiększenie temperatury pracy i obciążenia, z jednoczesnym obniżeniem zużycia narzędzi, to klasyfikowane są jako szkodliwe dla środowiska naturalnego.



Rys. 16. Model warstwy granicznej wytworzonej w warunkach tarcia w obecności substancji smarującej bez (a) i z (b) dodatkami uszlachetniającymi: 1, 2 – elementy pary trącej, 3 – substancja smarująca, 4 – warstwa graniczna wytworzona w wyniku adsorpcji fizycznej, 5 – warstwa graniczna wytworzona w wyniku chemisorpcji [66]

Autorzy pracy [98] zwracają uwagę, że działanie pola niewysyconych sił powierzchni smarowanej powoduje polaryzację indukowaną cząsteczek smaru i związaną z tym ich orientację równoległą do linii działania tych sił. W wyniku tego zmienia się lepkość i gęstość cieczy smarującej w warstwie przypowierzchniowej, a zatem jej właściwości są inne w warstwie przypowierzchniowej niż

w pozostałej objętości. Należy również pamiętać, że zdolność do tworzenia warstw granicznych zależy od stanu energetycznego powierzchni smarowanej.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano także takie dodatki jak: lano-
linę, stearynian cynku i wazelinę. Przy doborze wymienionych dodatków kie-
rowano się długoletnimi doświadczeniami zespołu badawczego Politechniki
Częstochowskiej, kierowanego przez prof. dr hab. inż. M. Gierzyńska-Dolną,
w zakresie badań nad doбором smarów technologicznych do procesów obróbki
plastycznej. W tabeli 4 zestawiono oznaczenia i receptury analizowanych sma-
rów.

Tabela 4. Oznaczenia i receptury smarów technologicznych własnej kompozycji

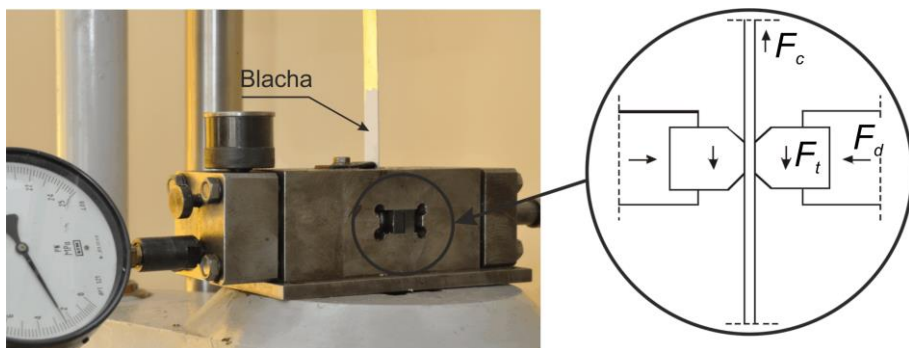
Lp.	Oznaczenie (nr) smaru	Skład chemiczny	
		Nazwa składnika	Zawartość [%]
Smary na bazie oleju rzepakowego			
1	1.01	olej rzepakowy	100
2	1.01a	olej rzepakowy kwas borowy	97 3
3	1.01b	olej rzepakowy kwas borowy	95 5
4	1.01c	olej rzepakowy kwas borowy	93 7
5	1.01d	olej rzepakowy kwas borowy	85 15
6	1.01e	olej rzepakowy kwas borowy	80 20
7	1.02	olej rzepakowy stearynian cynku	90 10
8	1.03	olej rzepakowy kwas borowy stearynian cynku	75 15 10
9	1.03a	olej rzepakowy kwas borowy stearynian cynku	70 20 10
10	1.11	warstwa stearynianu cynku nasyconego na film oleju rzepakowego	
11	1.11B	warstwa sproszkowanego kw. borowego nasyconego na film oleju rzepakowego	
12	1.11S	warstwa kw. stearynowego nasyconego na film oleju rzepakowego	
13	1.12	warstwa sproszkowanej Cu nasyconej na film oleju rze- pakowego	
14	1.13	olej rzepakowy sproszkowany kwas borowy lanolina	87 3 10
15	1.13a	olej rzepakowy sproszkowany kwas borowy lanolina	70 20 10

16	1.13b	warstwa kw. borowego napyłonego na film oleju rzepakowego, zawierającego lanolinę (10%) i kwas stearynowy (10%)	
17	1.15	roztwór kwasu borowego w etanolu naniesione 2 warstwy na pasek blachy	
<i>Smary na bazie oliwy z oliwek</i>			
18	2.01	Oliwa z oliwek	100
19	2.01B	warstwa oliwy z oliwek warstwa sproszkowanego kw. borowego napyłonego na film olejowy	
20	2.01S	warstwa sproszkowanego kw. stearynowego napyłonego na film oliwy z oliwek	
<i>Smary na bazie oleju słonecznikowego</i>			
21	3.01	olej słonecznikowy	100
22	3.01B	warstwa sproszkowanego kw. borowego napyłonego na film oleju słonecznikowego	
23	3.01S	warstwa kwasu stearynowego napyłonego na film oleju słonecznikowego	
<i>Smary mydlane</i>			
24	6.01	mydło potasowe wazelina biała, woda	20 20 60
25	6.02	mydło potasowe wazelina biała, woda	40 40 20
26	6.03	mydło potasowe kwas stearynowy woda	30 30 40
27	6.04	lanolina mydło potasowe kwas stearynowy woda	60 10 10 20
<i>Smary handlowe użyte do celów porównawczych</i>			
28	4.01	Arterol GT	
29	4.02	ArterolEKO	

3.4. Metody badania smarów technologicznych oraz powłok antyadhezyjnych

Próbie przeciągania pasów blachy pomiędzy płaskimi matrycami wytypowano jako podstawową próbę do oceny smarów technologicznych. Próba ta pozwala na wyznaczenie współczynnika tarcia μ pomiędzy materiałem narzędzia (matrycą), a materiałem odkształcanym w postaci pasa blachy. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia z użyciem smarów oraz w warunkach tarcia technicznie suchego, tj. bez smarowania.

Istota pomiaru współczynnika tarcia μ polega na przeciąganiu pasa blachy, zamocowanego jednym końcem w uchwycie maszyny wytrzymałościowej, pomiędzy dwoma matrycami (przeciwpróbkami), dociśniętymi do próbki (pasa blachy) z określoną siłą docisku F_d , przy jednoczesnej rejestracji siły ciągnięcia F_c . Matryce wykonano ze stali NC10. Schemat próby i widok stanowiska do badań przedstawia rysunek 17.



Rys. 17. Stanowisko do wyznaczania współczynnika tarcia

Współczynnik tarcia w zakresie odkształceń sprężystych obliczano z prawa Amontonsa:

$$\mu = F_t / F_d \quad (7)$$

gdzie: F_t – siła tarcia pomiędzy próbką i przeciwpróbką, F_d – siła docisku.

Ponieważ siła ciągnięcia F_c , rejestrowana przez maszynę wytrzymałościową, równoważy opory tarcia na powierzchniach styku pasa blachy z powierzchniami matryc to $F_c = 2F_t$, stąd $F_t = F_c / 2$, a więc:

$$\mu = \frac{F_c}{2F_d} \quad (8)$$

Jeżeli próba jest prowadzona w zakresie odkształceń plastycznych (czego dowodem jest pocienienie pasa blachy), wówczas:

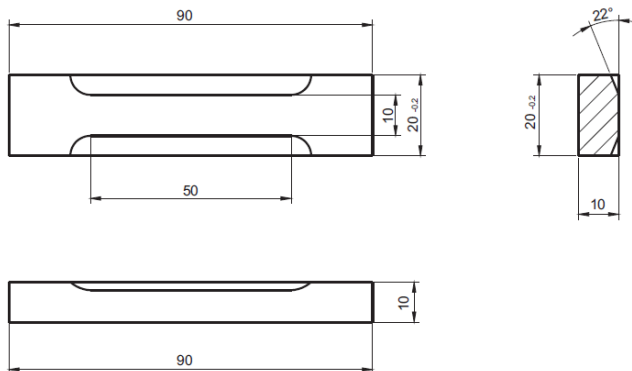
$$F_c = 2F_t + F_{op} \quad (9)$$

gdzie: F_{op} – składowa siły zużywana na odkształcenie plastyczne blachy.

Wyznaczenie współczynnika tarcia w warunkach odkształceń sprężysto-plastycznych wymaga dodatkowo wyznaczenia składowej F_{op} , np. w próbie jednoosiowego rozciągania (bez tarcia). Powyższe zależności nie uwzględniają umocnienia materiału.

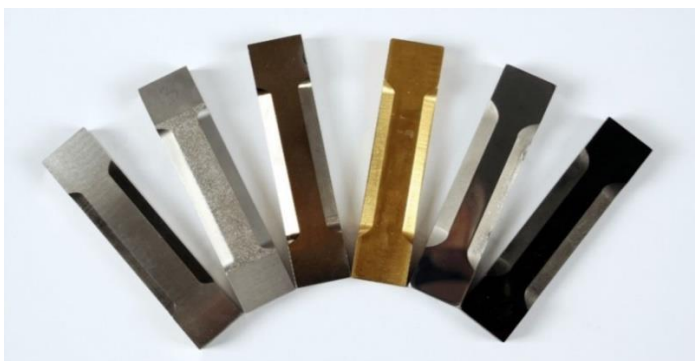
W ramach niniejszej pracy próbę prowadzono przy docisku wywołującym jedynie odkształcenia sprężyste. Próbę prowadzono z prędkością $v = 15$ mm/min.

Próbki stanowiły pasy blachy aluminiowej (2024), tytanowej (Gr 2) i stalowej (ASM 5604) o szerokości 20 mm, grubości 0,8 mm i długości 300 mm. Wymiary wymiennych matryc (przeciwpróbek) przedstawia rysunek 18. Twardość matryc po hartowaniu wynosiła 60HRC. Pomiar twardości wykonano za pomocą uniwersalnego twardościomierza ZWICK/ZHU 187,5.



Rys. 18. Kształt i wymiary matryc (przeciwpróbek)

W przypadku badania powłok na powierzchnie robocze matryc nakładano warstwy antyadhezyjne. Widok próbek z przykładowo naniesionymi powłokami ilustruje rysunek 19.

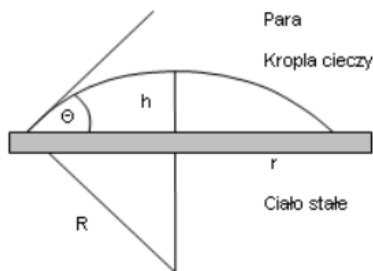


Rys.19. Widok matryc pokrytych powłokami

Przed przystąpieniem do badań wycięte pasy blachy starannie oczyszczano (usuowano z nich wszelkie zadziory powstałe w procesie cięcia, a następnie przemywano je środkiem odtłuszczającym – benzyną ekstrakcyjną). W przypadku określania współczynnika tarcia w obecności środka smarnego próbki (pasy blachy) pokrywano obustronnie badanym smarem. Tak przygotowany pas blachy zamocowywano w górnym uchwycie maszyny wytrzymałościowej. Po ustawieniu żądanej siły docisku F_d , rozpoczynano próbę przeciągania pasa blachy pomiędzy matrycami rejestrując siłę ciągnienia F_c .

Do oceny wpływu smarów technologicznych i powłok antyadhezyjnych na odporność na zużycie narzędzi wykorzystano pomiar chropowatości powierzchni roboczych matryc przed i po próbie przeciągania. Pomiar chropowatości przeprowadzono za pomocą chropowatościomierza – Taylor Hobson-Perfection. Badania uzupełniono o pomiar chropowatości powierzchni analizowanych blach.

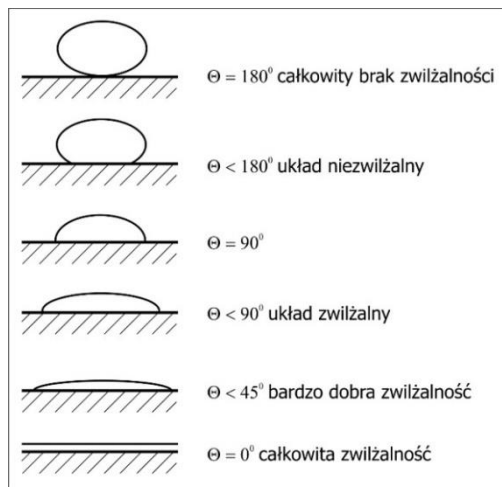
Jedną z ważniejszych właściwości fizyko-chemicznych cieczy smarujących, decydujących o ich jakości jest zwilżalność. Decyduje ona o wielkości adsorpcji smaru do powierzchni kształtowanego materiału lub narzędzia. Zwilżalność zależy od wielu czynników, a najważniejszymi są: napięcie powierzchniowe cieczy smarującej, wzajemne oddziaływanie cząsteczek ciała stałego i cieczy smarującej oraz temperatura. Z reguły stopień zwilżania określany jest na podstawie wymiarów geometrycznych kropli cieczy, np. wielkości kąta zwilżania pomiędzy prostą styczną do kropli wyprowadzoną w punkcie styku z materiałem, a powierzchnią materiału (rys. 20).



Rys. 20. Pomiar kąta zwilżania z geometrii kropli

Powierzchnia kropli najczęściej ma kształt czaszy i wówczas kąt zwilżania oblicza się z pomiaru wysokości czaszy h i promienia powierzchni styku kropli r . Wysokość czaszy jest określona wzorem $h=R(1-\cos\theta)$, a promień styku powierzchni $r=R\sin\theta$. Z tych zależności otrzymuje się kąt zwilżania $\theta=2h/r$. Wartość tego kąta jest determinowana przez wielkość energii powierzchniowej i napięcie powierzchniowe. Kąt zwilżania może być zawarty w przedziale od 0° do 180° . Ciała stałe, które charakteryzują się kątami zwilżania mniejszymi od 90° uważa się za zwilżalne, tj. liofilowe (hydrofilowe, gdy cieczą zwilżającą jest woda), a ciała, które wykazują kąt zwilżania większy od 90° za niezwilżalne, tj. liofobowe (hydrofobowe, gdy cieczą zwilżającą jest woda) (rys. 21). Wysoka energia powierzchniowa materiału i niskie napięcie powierzchniowe roztworu obniżają wielkość kąta zwilżania i niekorzystnie wpływają na proces kształtowania. Dlatego by zwiększyć zwilżalność smarów technologicznych modyfikuje się je poprzez wprowadzenie substancji, które mają zdolność adsorbowania się na powierzchni ciała stałego poprzez utworzenie cienkiej warstwy adsorpcyjnej, która powodując zmianę energii swobodnej powierzchni ciała korzystnie wpływa na zmianę kąta zwilżania. Z reguły na powierzchniach polarnych dobrze

adsorbują się związki polarne lub posiadające polarne grupy w składzie cząsteczki, a na powierzchniach niepolarnych dobrze adsorbują się związki niepolarne.



Rys. 21. Zwilżalność powierzchni w zależności od kąta zwilżania (dla malejącego kąta θ od całkowitego braku po dobre zwilżanie)

W pracy do oceny zwilżalności wykorzystano jedynie pomiar średnicy kropli cieczy smarującej, nanoszonej na powierzchnię badanych blach z wysokości 10 mm. Pomiaru dokonywano w ciągu 1 minuty w odstępach czasowych co 10 sekund. Obserwacje kropli prowadzono przy użyciu mikroskopu stereoskopowego OPTA –TECH NSZ - 606 z kamerą 3MPIS. Im większa średnica naniesionej kropli tym lepsza zwilżalność powierzchni.

Kolejną ważną cechą fizyko-chemiczną cieczy smarujących jest lepkość, która to charakteryzuje tarcie wewnętrzne w płynie, wynikające z przesuwania się względem siebie poszczególnych cząsteczek płynu. W przypadku tłoczenia, w celu zagwarantowania skutecznego rozdzielania powierzchni trących, smar technologiczny musi posiadać odpowiednią lepkość, aby nie dopuścić do wyciśnięcia go pomiędzy współpracujących powierzchni. Z uwagi na wysokie naciśki jednostkowe lepsze warunki smarowania zapewniają smary o dużej lepkości, które dłużej utrzymują się pomiędzy powierzchniami trącymi. Mając na uwadze fakt, że lepkość maleje wraz ze wzrostem temperatury ważne jest również, aby oleje miały stabilną lepkość wraz ze wzrostem temperatury, zwłaszcza, że wskutek tarcia wydzielają się znaczne ilości ciepła i gwałtownie rośnie temperatura procesu. Podczas tłoczenia temperatura może wzrosnąć do około 50-60°C, a to oznacza możliwość wyciśnięcia oleju o małej lepkości pomiędzy trących się powierzchni i powstawania zatarć. Im mniejsze zmiany lepkości substancji smarującej tym wyższa jest jej wartość użytkowa i tym mniejsza możliwość występowania zaburzeń w czasie pracy. Na lepkość substancji smarującej oprócz temperatury ma również wpływ ciśnienie i budowa chemiczna. Wywarce na ciecz

ciśnienia powoduje zbliżanie się jej cząstek do siebie i zwiększanie oddziaływań międzycząsteczkowych, powodując zwiększenie lepkości. Większe oddziaływania międzycząsteczkowe są również wówczas, gdy na ciecz składają się duże cząsteczki, a więc i w tym wypadku lepkość rośnie. Ważne jest również z jakich atomów zbudowana jest cząsteczka i jak wygląda przestrzenne rozmieszczenie atomów w cząsteczce. Zwiększenie rozgałęzienia cząsteczek prowadzi z reguły do zwiększenia lepkości, gdyż przy wzajemnym przemieszczaniu się cząsteczki zaczepiają się rozgałęzieniami, które działają jak przestrzenne przeszkody. W przypadku emulsji lub zawiesin oprócz tarcia wewnętrznego cieczy, dodatkowo występuje tarcie zewnętrzne na granicy rozdziału faz, natomiast w przypadku zawiesin obecność cząsteczek ciała stałego w cieczy powoduje, że ciecz staje się cieczą nienewtonowską.

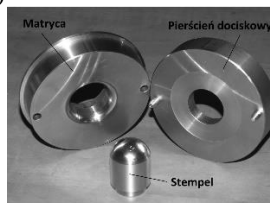
Pomiar lepkości przeprowadzono zgodnie z normą ASTM D 88, według której podstawą pomiaru lepkości jest czas wypływu płynu przez kalibrowaną kapilarę umieszczoną w dolnej części zbiornika pomiarowego o pojemności 60 cm³. W celu przeliczenia jednostek lepkości Saybolt'a (SUS lub SFS) na jednostki bezwzględne (w tym przypadku jednostki lepkości kinematycznej) wykorzystano odpowiednie nomogramy [108].

Jako jeden z testów służących do wstępnej weryfikacji przydatności smarów do procesów kształtowania blach przyjęto próbę tłoczenia półkulistych czasz. Próbę prowadzono na krążkach analizowanych blach o średnicy wyjściowej 60 mm. Prędkość tłoczenia wynosiła 10 mm/min. Analizowano wpływ smaru technologicznego na wielkość siły tłoczenia i głębokość wytłoczenia, uzyskiwaną w momencie pęknięcia wytłoczek. Widok tłocznika i stanowiska badawczego pokazano na rysunku 22.

a)



b)



Rys. 22. Urządzenie do miseczkowania (a), tłocznik (b)

Z uwagi na fakt, iż ważnym kryterium przy ocenie właściwości smarów technologicznych jest zdolność do czasowej ochrony wytłoczek przed korozją w warunkach magazynowania, przeprowadzono również badania odporności na korozję w komorze mgły solnej. W tym celu w wyciętych pasach analizowanych

blach o szerokości 60 mm wykonano po 5 wytłoczeń za pomocą kuliście zakończonego stempla o średnicy 20 mm. Głębokość wytłoczeń dla blachy stalowej 5406 i aluminiowej 2024 wynosiła 6,5 mm, a dla blachy tytanowej Gr 2 12,5 mm. Pasy blach przed tłoczeniem pokryto wybranymi smarami, których selekcji dokonano na podstawie pomiaru wielkości współczynnika tarcia i siły tłoczenia. Tak przygotowane próbki poddano działaniu mgły solnej w komorze do badań korozyjnych firmy ASCOTT (rys. 23).



Rys. 23. Komora solna Ascott CC1000xp

Ponadto badaniom korozyjnym poddano próbki referencyjne nie pokryte smarem. Badania w komorze mgły solnej w temperaturze 35°C prowadzono przez okres 21 dni. Ocenę stopnia skorodowania przyjęto zgodnie z PN-EN ISO 9227 – Badania korozyjne w sztucznych atmosferach – Badania w rozpylonej solance, prowadząc obserwacje powierzchni próbek i ocenę stopnia skorodowania blach wyrażoną w [%] [109, 110].

W przypadku badania jakości powłok antyadhezyjnych i ich wpływu na procesy kształtowania blach oprócz wyznaczenia współczynnika tarcia i pomiaru chropowatości powierzchni, przeprowadzono również:

- badanie mikrotwardości powłok metodą Vickersa przy użyciu diamentowego indentera pod obciążeniem 0,5 N,
- badanie odporności na zarysowanie za pomocą testera REVETEST Xpress w celu określenia adhezji powłoki do podłoża. Badania prowadzono za pomocą diamentowego wgłębnika typu Rockwell o promieniu 200 μm na odcinku pomiarowym $l=15$ mm, przy obciążeniu progresywnym od 0 do 75 N. Diamentowy wgłębnik wywołując naprężenia pomiędzy cienką powłoką i podłożem powoduje delaminację i wykruszanie powłoki. Siłę normalną, przy której następuje uszkodzenie powłoki określa się jako krytyczne obciążenie zarysowujące powłokę.

W celu określenia mikrostruktury powłok przeprowadzono obserwacje metalograficzne, za pomocą transmisyjnego mikroskopu elektronowego Tecnai FEG i FIB Quanta 3 D wyposażonego w system Omniprobe. Badania te przeprowadzono w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie.

3.5. Określenie właściwości fizykochemicznych smarów technologicznych

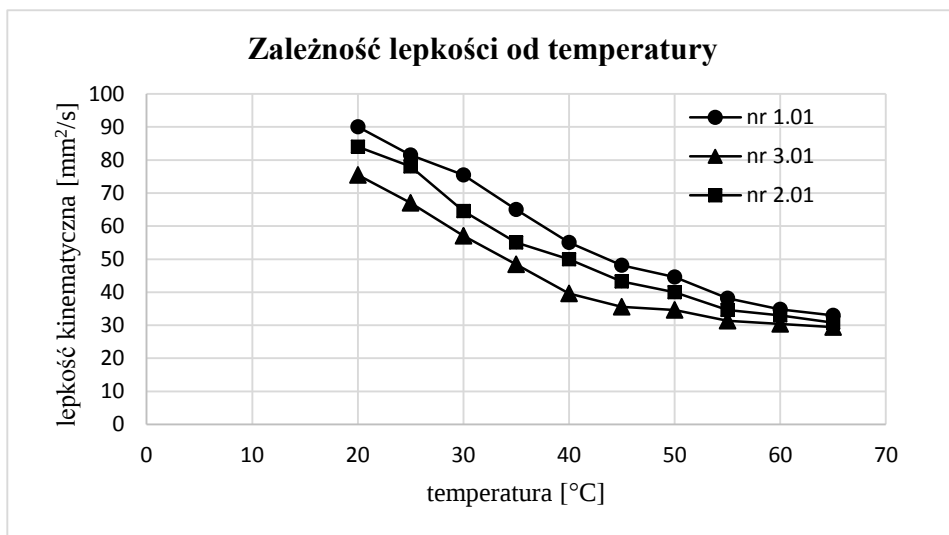
Wyniki pomiaru gęstości bazowych olejów roślinnych przedstawia tabela 5, w której zamieszczono również gęstość oleju handlowego nr 4.01, bazującego na oleju mineralnym.

Tabela 5. Gęstość badanych olejów

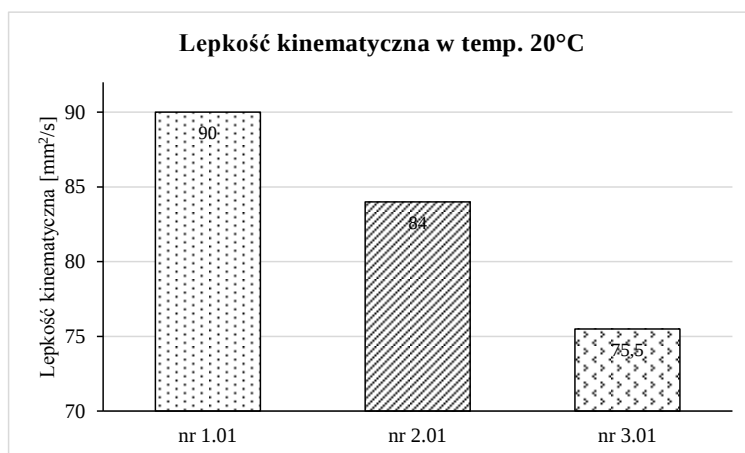
Oznaczenie oleju	Gęstość [kg/m ³]
nr 1.01	911,50
nr 2.01	908,56
nr 3.01	915,70
nr 4.01	888,87

Gęstość badanych olejów jest porównywalna, przy czym nieco większą gęstość posiadają oleje roślinne.

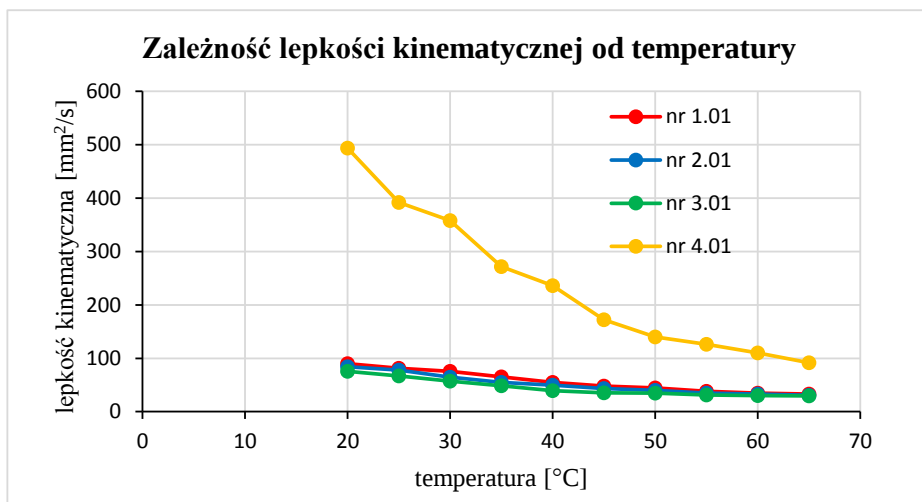
Wyniki badania lepkości bazowych olejów roślinnych w zakresie temperatur 20÷65°C przedstawiono na rysunku 24. Porównanie lepkości olejów bazowych w temperaturze 20°C przedstawia rysunek 25, natomiast odniesienie lepkości olejów roślinnych w stosunku do lepkości oleju handlowego nr 4.01 zamieszczono na rysunku 26. Jak wynika z przeprowadzonych badań zależność lepkości od temperatury dla wszystkich bazowych olejów roślinnych jest podobna, ale znacząco różna od handlowego oleju mineralnego, zwłaszcza w temperaturze otoczenia, w której to temperaturze lepkość oleju handlowego jest 5-krotnie większa od lepkości olejów roślinnych. Wraz ze wzrostem temperatury różnica ta maleje. Spośród analizowanych olejów roślinnych największą lepkość w temperaturze otoczenia ma olej oznaczony nr 1.01 i wynosi $\nu=90 \text{ mm}^2/\text{s}$. Należy zauważyć, że w temperaturze 65°C różnice w lepkości olejów roślinnych są nieznaczące – wszystkie oleje roślinne mają lepkość kinematyczną bliską $\nu=30 \text{ mm}^2/\text{s}$, a lepkość oleju handlowego wynosi $\nu=100 \text{ mm}^2/\text{s}$.



Rys 24. Porównanie lepkości roślinnych olejów bazowych w zakresie temperatur 20÷65°C



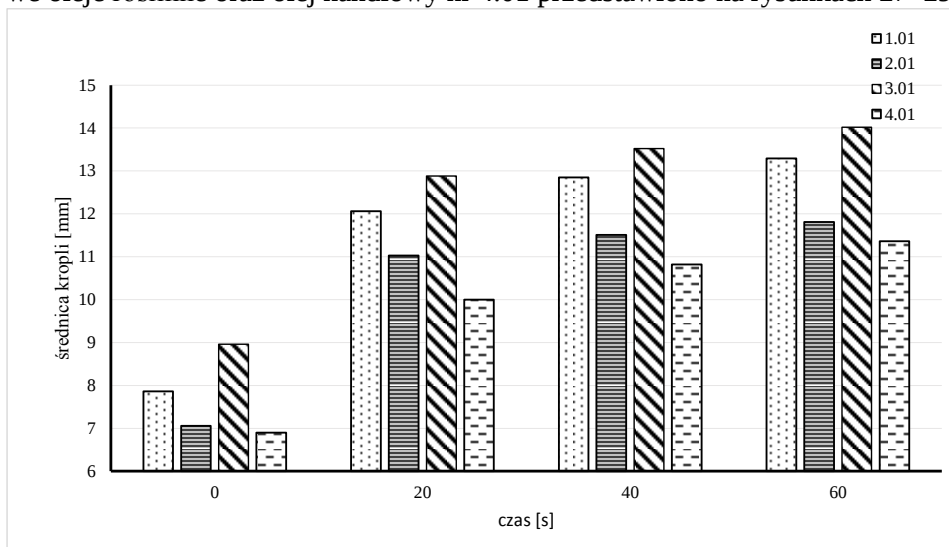
Rys. 25. Porównanie lepkości bazowych olejów roślinnych w temperaturze otoczenia



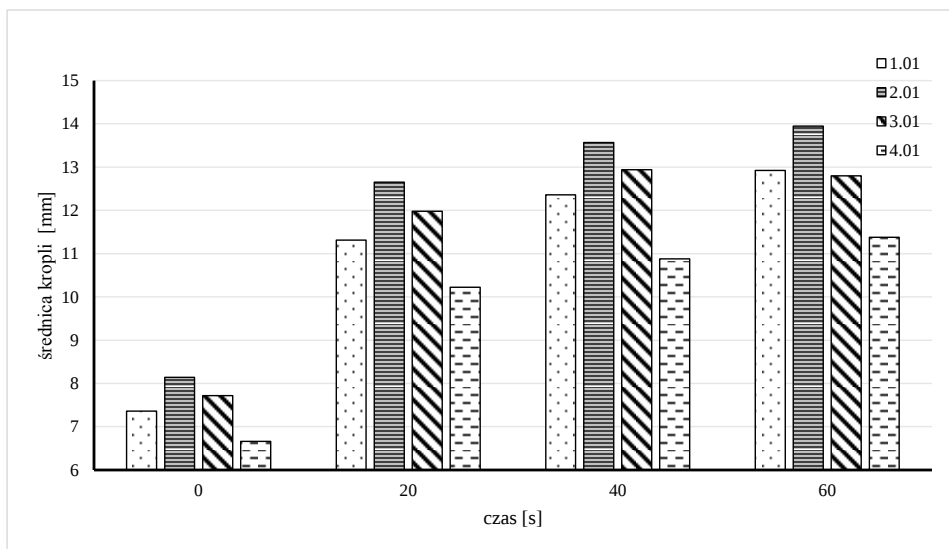
Rys. 26. Zależność lepkości olejów od temperatury

Znacznie mniejsza lepkość olejów roślinnych w porównaniu do lepkości oleju handlowego oraz znaczne obniżenie lepkości wraz ze wzrostem temperatury mogą sugerować niebezpieczeństwo wycisnięcia oleju spomiędzy trących się powierzchni i dojścia do zatarcia, dlatego w dalszych badaniach przeanalizowana będzie również możliwość zastosowania powłok antyadhezyjnych jako dodatkowego zabezpieczenia w przypadku przerwania filmu smarnego.

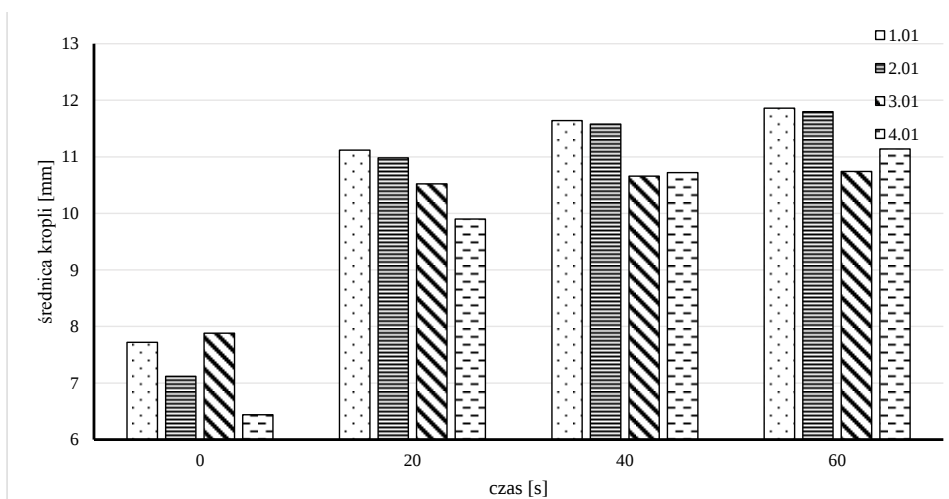
Wyniki pomiaru zwilżalności powierzchni analizowanych blach przez bazowe oleje roślinne oraz olej handlowy nr 4.01 przedstawiono na rysunkach 27–29.



Rys. 27. Średnica kropli w momencie naniesienia na blachę aluminiową 2024 oraz po czasie 20, 40 i 60 sekund



Rys. 28. Średnica kropli w momencie naniesienia na blachę tytanową Gr 2 oraz po czasie 20, 40 i 60 sekund



Rys. 29. Średnica kropli w momencie naniesienia na blachę stalową 5604 oraz po czasie 20, 40 i 60 sekund

We wszystkich przypadkach średnica kropli początkowo mała szybko powiększa się i po upływie 1 minuty jej wielkość stabilizuje się. Z porównania średnic kropli poszczególnych smarów można zauważyć, że w przypadku blachy aluminiowej 2024 (rys. 27) najlepszą zwilżalnością charakteryzuje się olej sło-

necznikowy nr 3.01, w przypadku blachy tytanowej Gr 2 oliwa z oliwek nr 2.01 (rys 28), natomiast w przypadku blachy stalowej olej rzepakowy nr 1.01 i oliwa z oliwek nr 2.01 (rys.29). Najmniejszą zwilżalność wykazywał zawsze olej handlowy oznaczony nr 4.01.

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych zmierzono również twardość matryc – wynosiła ona 60 HRC oraz ich chropowatość. Wyniki pomiaru chropowatości powierzchni roboczych matryc oraz analizowanych blach zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Chropowatość powierzchni roboczych

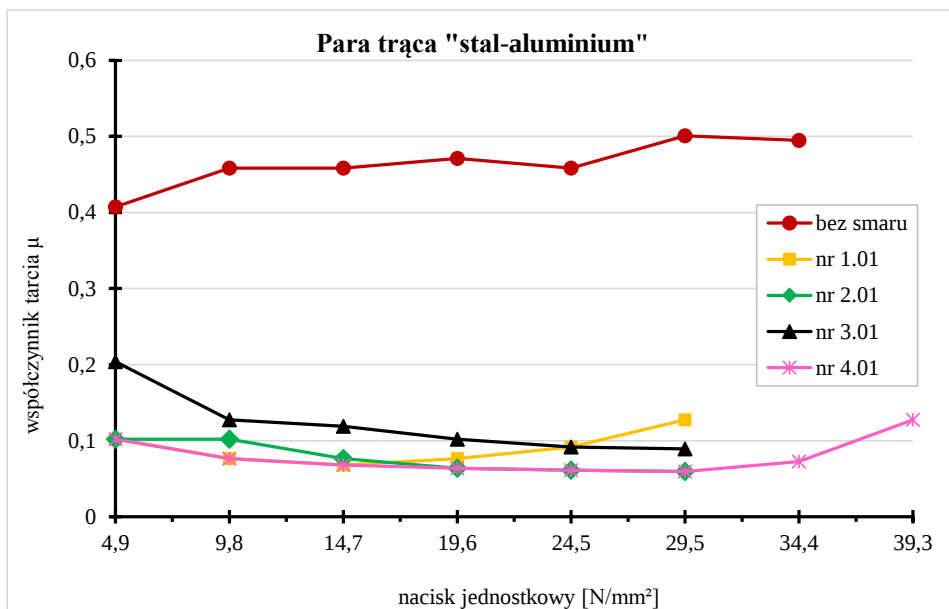
materiał	R _a [μm]	R _z [μm]
Narzędzie - stal NC10	0,08	0,1
Blacha aluminiowa 2024	0,35	2,5
Blacha stalowa 5506	0,33	2,1
Blacha tytanowa Gr 2	0,44	3,1

Spośród badanych blach największą chropowatość miała blacha tytanowa.

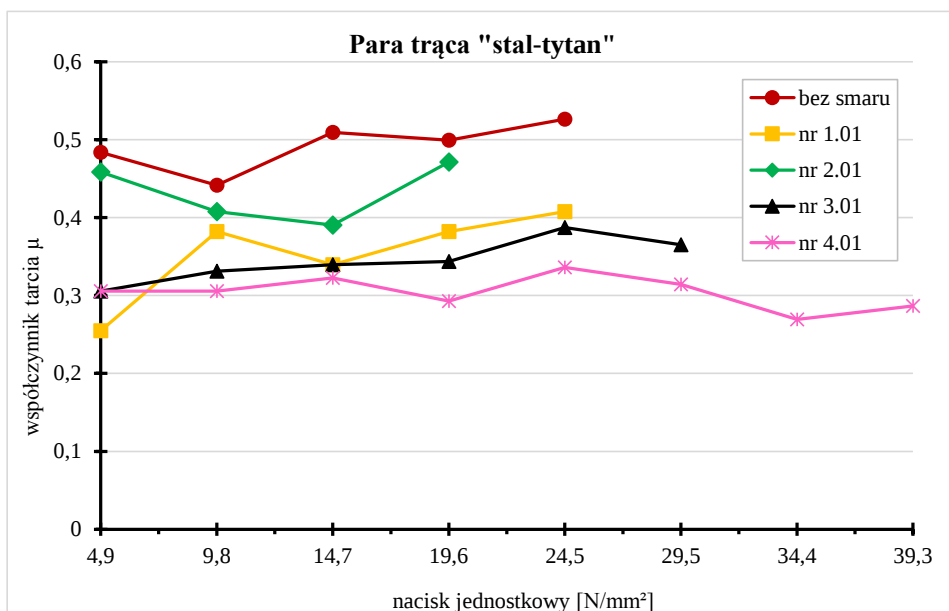
3.6. Wyznaczenie współczynników tarcia dla analizowanych par trących

Wyniki pomiaru współczynnika tarcia dla analizowanych par trących w obecności badanych smarów technologicznych oraz w warunkach tarcia technicznie suchego przedstawiono na rysunkach 30÷41. Rysunki 30÷32 przedstawiają wyniki współczynnika tarcia dla bazowych olejów roślinnych oraz w celu porównania dla smaru handlowego na bazie oleju mineralnego (nr 4.01), odpowiednio dla par trących: „stal – aluminium”, „stal – tytan” i „stal – stal”.

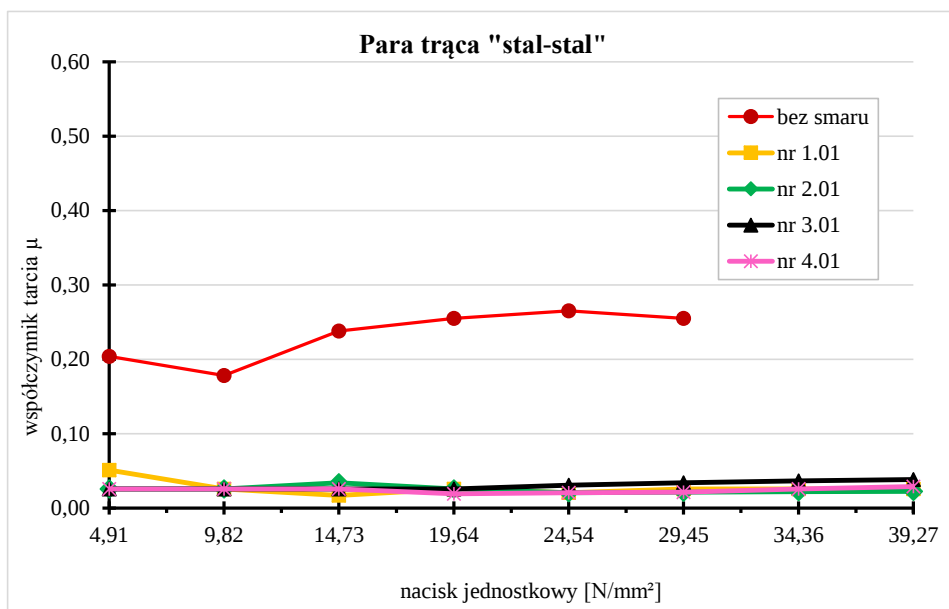
Współczynnik tarcia w warunkach tarcia technicznie suchego dla pary trącej „stal – aluminium” wynosi $\mu \approx 0,46$. Smarowanie powoduje obniżenie tej wartości do $\mu = 0,05 \div 0,08$. W przypadku pary trącej „stal – tytan” opory tarcia przy braku smarowania są podobne jak dla pary trącej „stal – aluminium” - współczynnik tarcia wynosi $\sim 0,49$, ale smarowanie olejami roślinnymi okazuje się dużo mniej skuteczne. Naciski jednostkowe powyżej 19 MPa powodują przerwanie filmu olejowego i prowadzą do zatarcia. Jediną skuteczną cieczą smarującą okazuje się smar handlowy, dla którego współczynnik tarcia wynosi $\mu \approx 0,3$, a warstwa smarna nie ulegała przerwowaniu w badanym zakresie nacisków jednostkowych.



Rys. 30. Współczynniki tarcia dla pary trącej „stal – aluminium” w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w obecności olejów roślinnych (nr 1.01÷3.01) i smaru handlowego na bazie oleju mineralnego (nr 4.01)



Rys. 31. Współczynniki tarcia dla pary trącej „stal – tytan” w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w obecności olejów roślinnych (nr 1.01÷3.01) i smaru handlowego na bazie oleju mineralnego (nr 4.01)



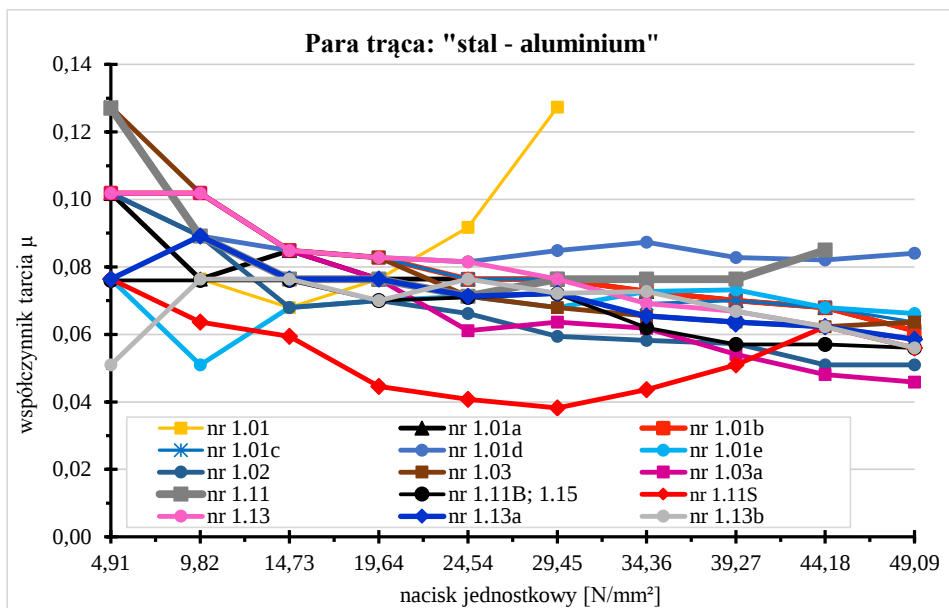
Rys. 32. Współczynniki tarcia dla pary trącej „stal – stal” w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w obecności olejów roślinnych (nr 1.01÷3.01) i smaru handlowego na bazie oleju mineralnego (nr 4.01)

W przypadku pary trącej „stal – stal” współczynnik tarcia jest znacznie mniejszy niż w pozostałych parach trących nawet przy braku smarowania. Smarowanie spowodowało zmniejszenie współczynnika tarcia z wartości $\mu \approx 0,23$ do wartości $\mu \approx 0,03$.

Już na tym etapie badań widać, że oleje roślinne zmniejszają opory tarcia w różnym stopniu i zależy to w dużej mierze od rodzaju badanej pary trącej „metal – metal”.

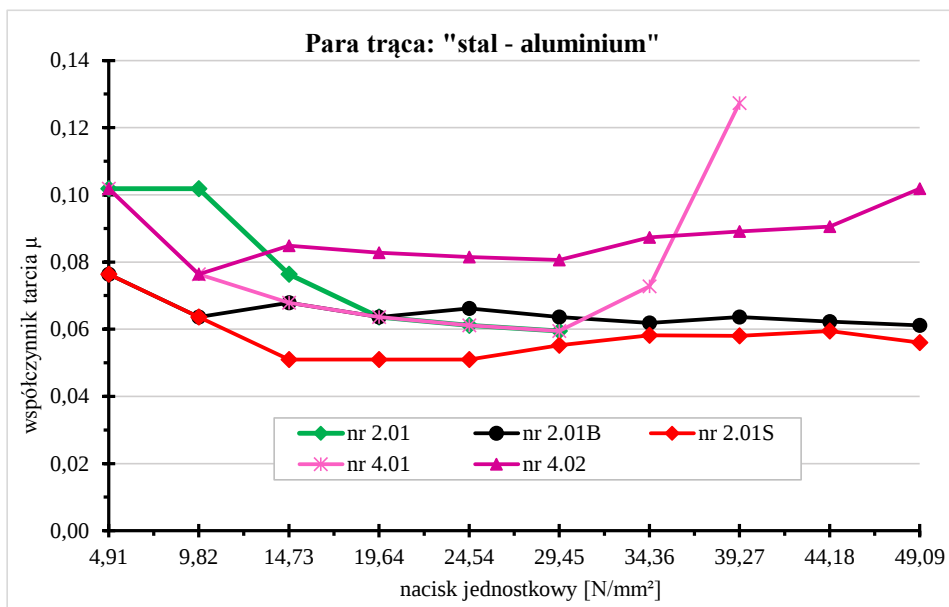
Rysunki 33÷35 przedstawiają wpływ dodatków smarnościowych do olejów bazowych na wartość współczynnika tarcia dla pary trącej „stal – aluminium”. Rysunek 33 przedstawia wpływ dodatków do oleju rzepakowego. Przebadano kilkanaście kompozycji smarowych, z których największe obniżenie współczynnika tarcia daje smar Nr 1.11S, tj. olej rzepakowy z dodatkiem kwasu stearynowego.

Wszystkie analizowane modyfikacje powodują zwiększenie odporności filmu smarnego na przerwanie w porównaniu do trwałości warstwy smarnej, jaką tworzy olej rzepakowy bez dodatków, dla którego zatarcie następuje przy nacisku jednostkowym 30 MPa.



Rys. 33. Wpływ dodatków smarnościowych do oleju rzepakowego (nr 1.01) na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – aluminium”

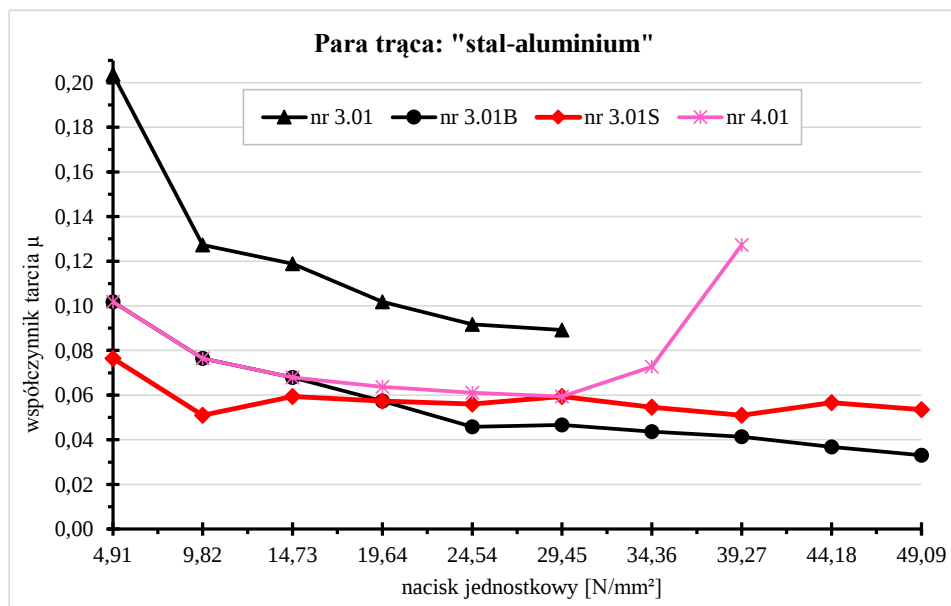
Na rysunku 34 przedstawiono wpływ dodatków smarnościowych do oliwy z oliwek (nr 2.01) na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – aluminium”



Rys. 34. Wpływ dodatków smarnościowych do oliwy z oliwek (nr 2.01) na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – aluminium”

Z rysunku 34 wynika, że dodatek kwasu borowego i kwasu stearynowego poprawia wytrzymałość filmu smarnego na przerwanie, przy czym w przypadku pary trącej „stal – aluminium” nieco skuteczniejszym dodatkiem wydaje się być kwas stearynowy.

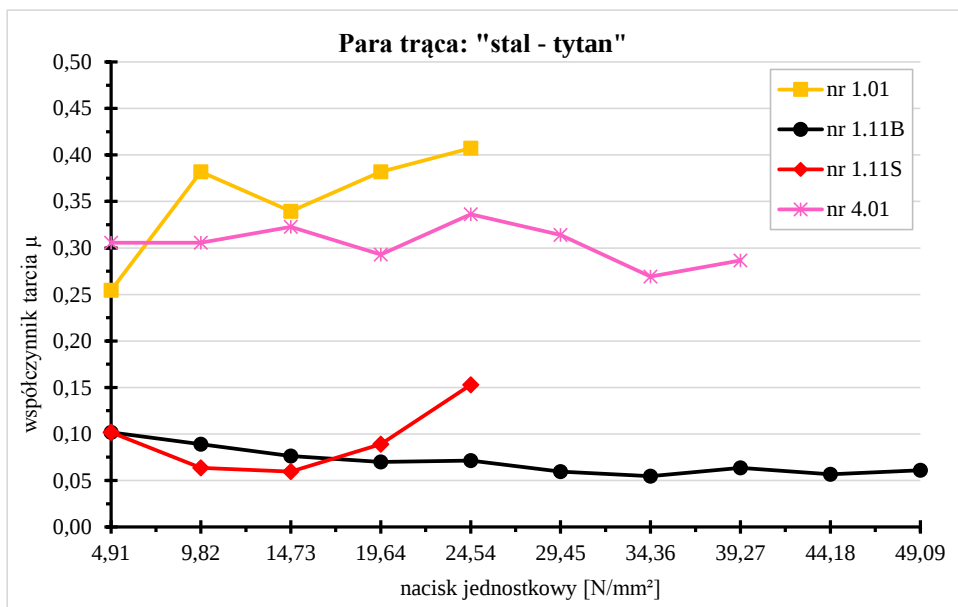
Wpływ obu kwasów, jako dodatków smarnościowych do oleju słonecznikowego, na wartość współczynnika tarcia pary trącej: „stal – aluminium” przedstawiono na rysunku 35.



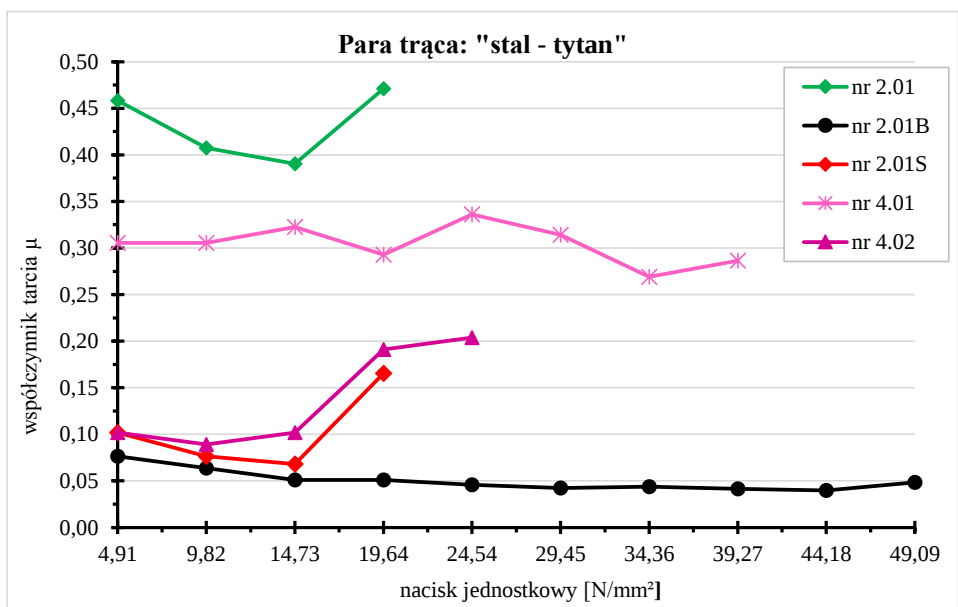
Rys. 35. Wpływ dodatków smarnościowych do oleju słonecznikowego na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – aluminium”

Należy zwrócić uwagę, że wprowadzenie kwasu borowego, jak i kwasu stearynowego do oleju słonecznikowego spowodowało wyraźną poprawę właściwości smarnych nie tylko w stosunku do oleju bazowego roślinnego, ale również w stosunku do oleju handlowego nr 4.01.

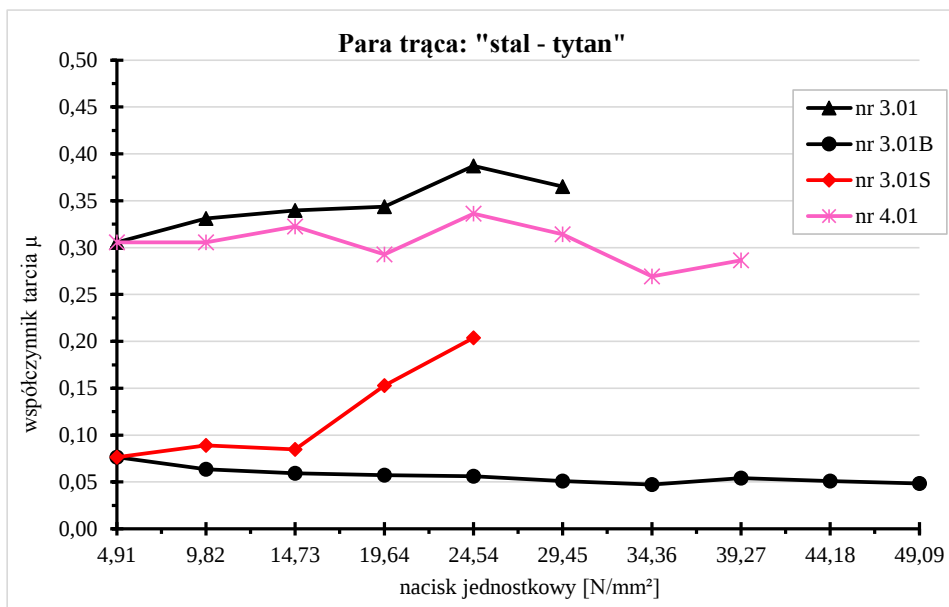
Rysunki 36÷38 przedstawiają wpływ dodatków smarnościowych na wartość współczynnika tarcia dla pary trącej „stal – tytan”. Rysunek 36 przedstawia wpływ dodatków smarnościowych do oleju rzepakowego (nr 1.01), rysunek 37 przedstawia wpływ dodatków smarnościowych do oliwy z oliwek (nr 2.01), a rysunek 38 wpływ dodatków smarnościowych do oleju słonecznikowego (nr 3.01).



Rys. 36. Wpływ dodatków smarnościowych do oleju rzepakowego na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – tytan”



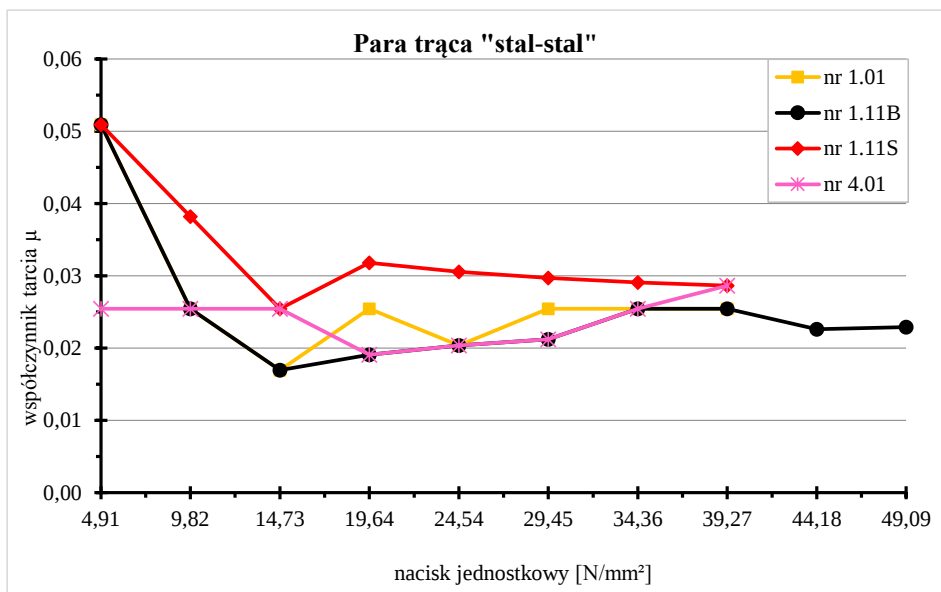
Rys. 37. Wpływ dodatków smarnościowych do oliwy z oliwek na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – tytan”



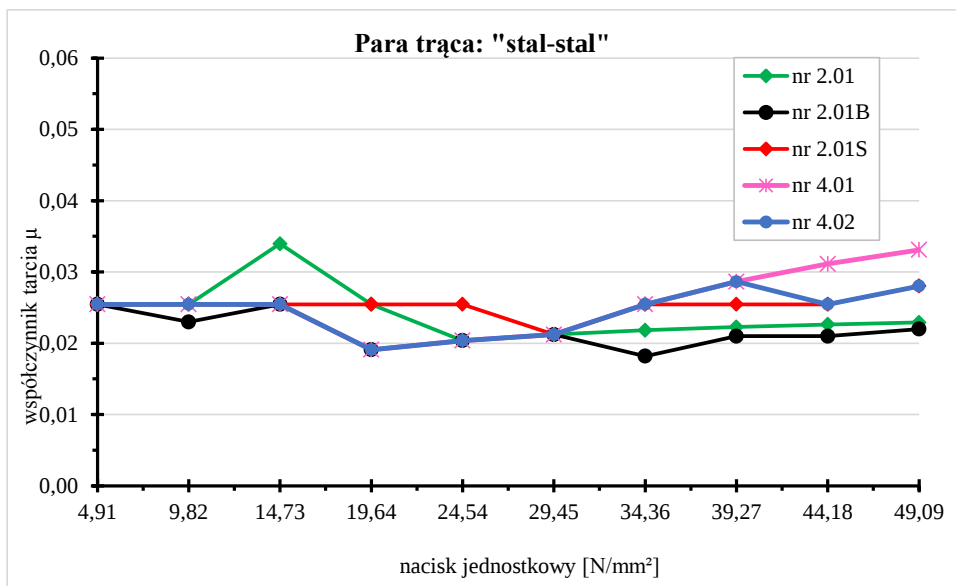
Rys. 38. Wpływ dodatków smarnościowych do oleju słonecznikowego na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – tytan”

W przypadku pary trącej: „stal – tytan” widać wyraźne, pozytywne działanie dodatków smarnościowych do olejów roślinnych, a zwłaszcza kwasu borowego, który powoduje znaczne zwiększenie odporności filmu smarnego na duże naciski jednostkowe. Oddziaływanie dodatków jest dużo bardziej efektywne niż w przypadku pary trącej: „stal – aluminium”.

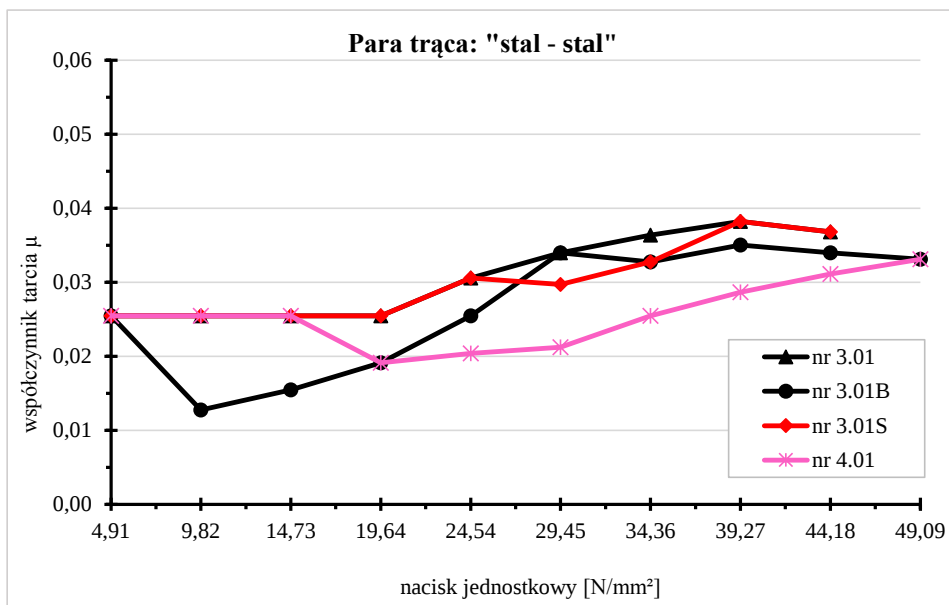
Wpływ dodatków smarnościowych na wartość współczynnika tarcia dla pary trącej „stal – stal” przedstawiają rysunki 39÷41. Wpływ dodatków smarnościowych do oleju rzepakowego (nr 1.01), oliwy z oliwek (nr 2.01) i oleju słonecznikowego (nr 3.01) przedstawiają odpowiednio rysunki 39, 40 i 41.



Rys. 39. Wpływ dodatków smarnościowych do oleju rzepakowego na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – stal”



Rys.40. Wpływ dodatków smarnościowych do oliwy z oliwek na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – stal”



Rys. 41. Wpływ dodatków smarnościowych do oleju słonecznikowego na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – stal”

W przypadku pary trącej „stal – stal” skutecznym dodatkiem do olejów bazowych roślinnych jest dodatek kwasu borowego, zwłaszcza jako dodatek do oleju rzepakowego. W przypadku tej pary trącej dodatek kwasu stearynowego nie polepsza właściwości smarnych olejów bazowych.

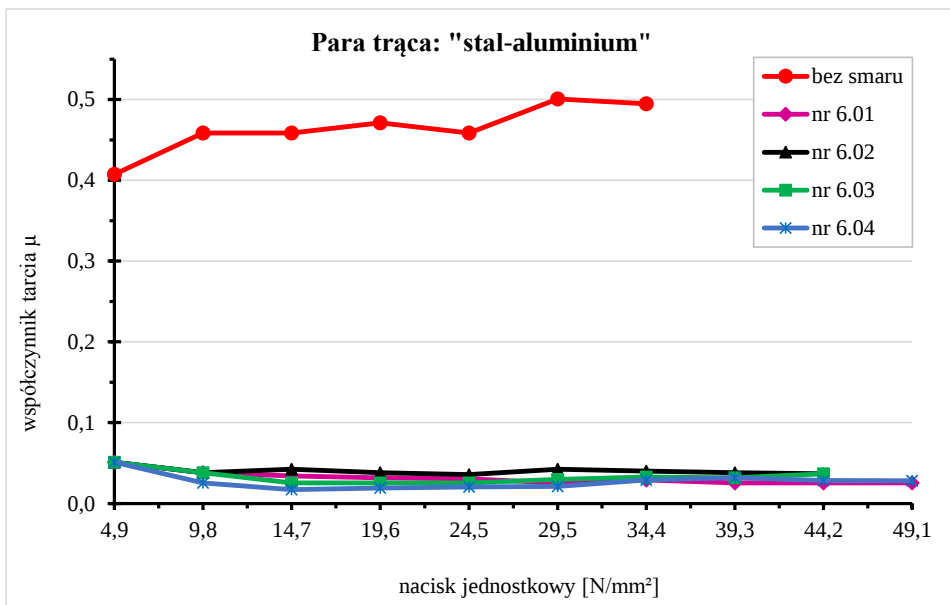
Z uwagi na fakt, że kwas borowy trudno rozpuszcza się w wodzie i olejach roślinnych, przebadano różne metody jego nanoszenia na powierzchnie odkształcanych blach. Najskuteczniejszym okazało się napylenie odpowiednio rozdrobnionego kwasu borowego na cienką warstwę smaru naniesionego na blachę tuż przed operacją tłoczenia. W tym celu zbudowano specjalne stanowisko, pokazane na rysunku 42. Rozdrabnianie kwasu borowego przeprowadzono w sposób mechaniczny w młynku wysokoobrotowym. Sposób nanoszenia mieszanki smarowej na blachę zgłoszono do opatentowania (zgłoszenie patentowe "Sposób nanoszenia smaru na powierzchnię arkusza blachy z materiału trudnoodkształcalnego przed operacją tłoczenia na zimno" nr P.409887 z dnia 21.10.2014 r.).



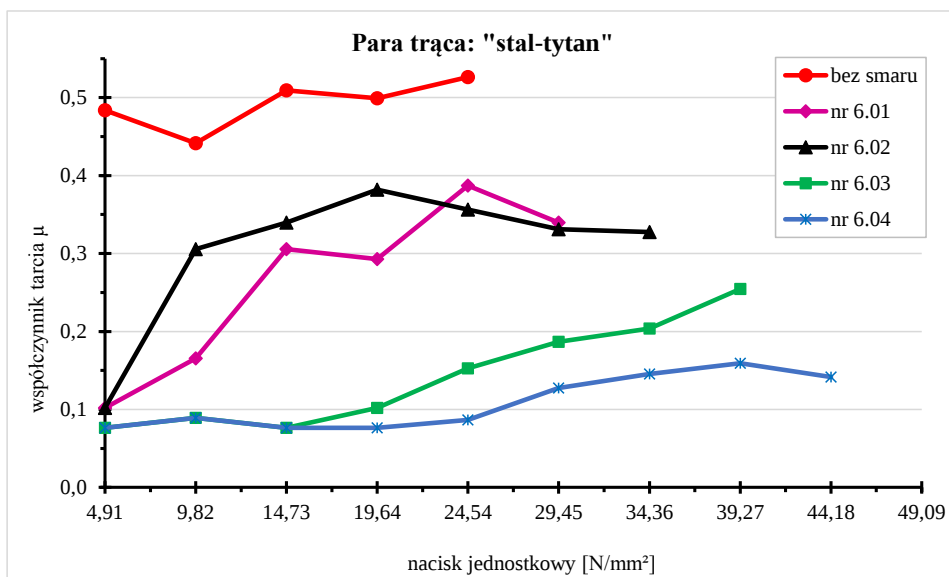
Rys. 42. Widok stanowiska do nanoszenia mieszanki smarowej na blachy

Wyniki badania współczynnika tarcia przeprowadzone dla par trących pokrytych warstwą sproszkowanego kwasu borowego napyłonego na cienki film olejowy oznaczono na rysunkach literą B. Grubość filmu smarnego wynosiła w analizowanych przypadkach od 100 do 180 μm , a wielkość ziaren wahała się w granicach 75÷125 μm .

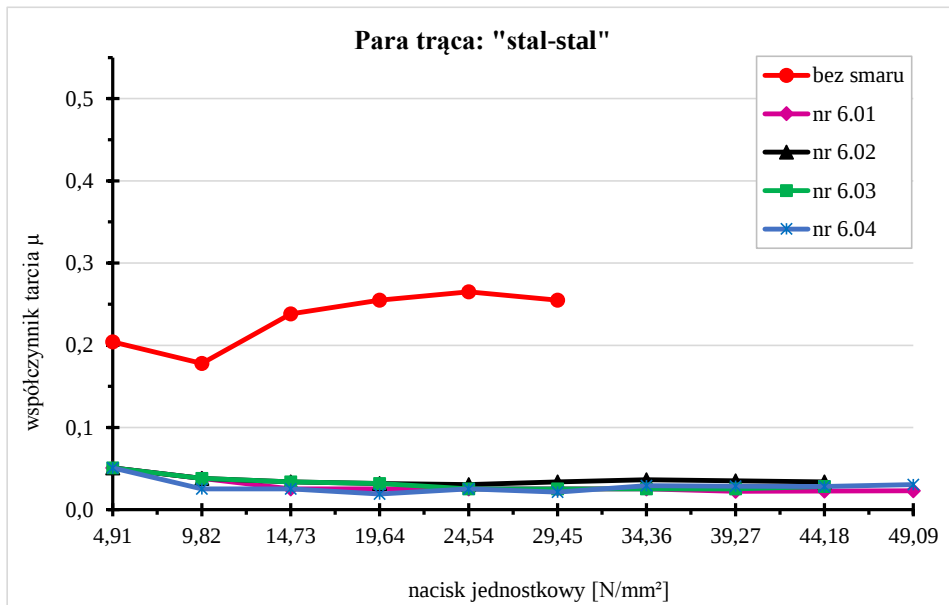
Badania smarów na bazie olejów roślinnych uzupełniono o badania wodorozcieńczalnych smarów na bazie mydeł. Wyniki tych badań przedstawiają rysunki 43÷45, kolejno dla par trących: „stal – aluminium” – rysunek 43, „stal – tytan” rysunek 44 i „stal – stal” – rysunek 45.



Rys. 43. Wpływ smarów mydlanych, wodorozcieńczalnych na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – aluminium”



Rys. 44. Wpływ smarów mydlanych, wodorozcieńczalnych na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – tytan”



Rys. 45. Wpływ smarów mydlanych, wodorozcieńczalnych na wartość współczynnika tarcia; para trąca: „stal – stal”

Z rysunku 43 widać, że w przypadku pary trącej „stal – aluminium” smary mydlane skutecznie obniżają współczynnik tarcia z wartości $\mu=0,4\div0,5$ dla tarcia technicznie suchego do wartości około $\mu\approx0,03$ w zakresie nacisków jednostkowych do ~ 44 MPa. Powyżej tej wartości film smarny nr. 6.02 i nr 6.03 ulega przerwaniu, a dalsze zwiększanie obciążenia powoduje również przerwanie filmu smarnego nr 6.01 i nr 6.04.

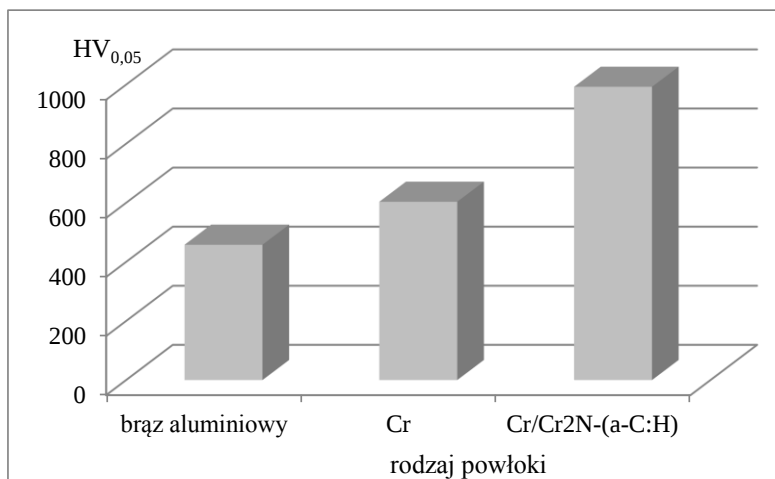
W przypadku pary trącej: „stal – tytan” skuteczność smarów mydlanych jest dużo mniejsza. Najskuteczniejszy spośród smarów mydlanych jest smar oznaczony nr 6.04, ale i w przypadku tego smaru wyższe naciski jednostkowe powodują zatarcie. Również w przypadku pary trącej: „stal – stal”, gdzie podczas tłoczenia z reguły występują duże naciski jednostkowe, można się obawiać o trwałość filmu smarnego. W przypadku tej pary trącej współczynniki tarcia dla smarów mydlanych wahają się w granicach około $\mu\approx0,03$.

W związku z obawą o przerwanie filmu smarnego podczas kształtowania blach, zwłaszcza blach stalowych i tytanowych, zgodnie z sugestią autorów pracy [2], postanowiono sprawdzić czy powłoki niskotarciowe nałożone na narzędzia tłoczne mogą stanowić dodatkowe zabezpieczenie przed zacieraniem. Przeprowadzono badania współczynnika tarcia dla wybranych powłok antyadhezyjnych, tj.:

- brązu aluminiowego nałożonego metodą napawania,
- chromu nałożonego elektrolitycznie,
- wielowarstwowej powłoki napyłonej laserowo w Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Materials - Institute of Surface Technologies and Photonics, Leoben - Austria.

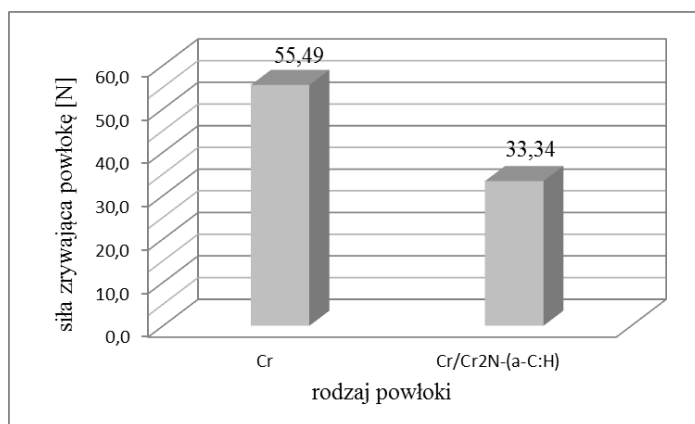
Wszystkie powłoki nakładano na matryce ze stali NC10. Wyboru powłok dokonano w oparciu o wyniki badań prowadzonych w IOPIJiB Politechniki Częstochowskiej [2, 11, 48].

Przed przystąpieniem do badania wpływu powłok na wartość współczynnika tarcia zmierzono twardość i chropowatość powłok oraz ich odporność na zarysowanie. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 46-48. Twardość powłok pokazano na rysunku 46, a odporność powłok na zarysowanie (wyniki „scratch testu”) na rysunku 47.



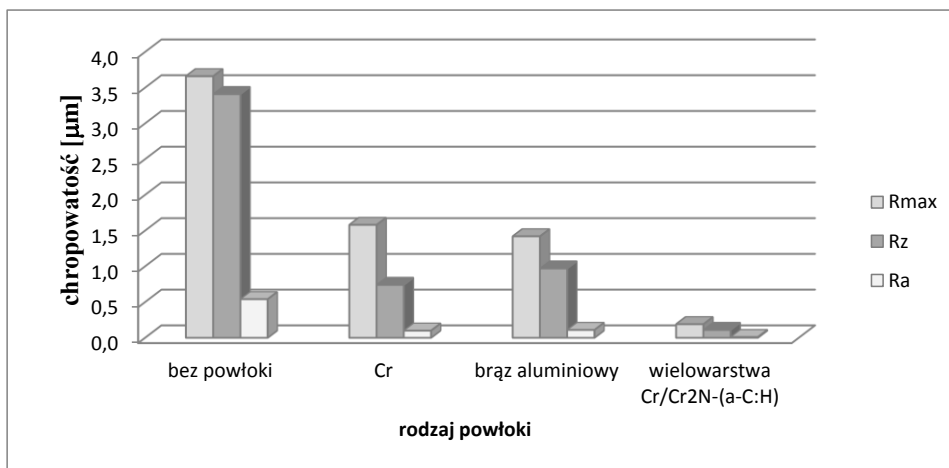
Rys. 46. Wyniki badania mikrotwardości powłok

Jak widać z rysunku 46 najmniejszą twardość miała powłoka brązu aluminiowego – $458HV_{0,05}$, a największą powłoka wielowarstwowa Cr/Cr₂N-(a-C:H) – $990HV_{0,05}$.



Rys. 47. Wyniki badania odporności powłok na zarysowanie

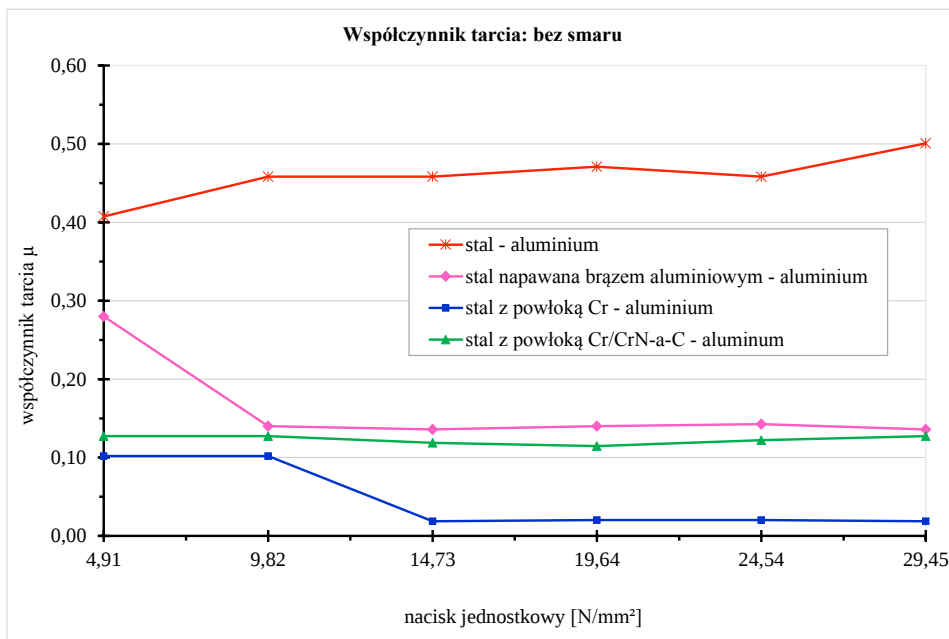
Większą odporność na zarysowanie wykazała powłoka chromu nałożonego elektrolitycznie. Brak wyników „scratch testu” dla powłoki brązu aluminiowego wynika z faktu, że powłoka napawana ma znacznie większą grubość niż pozostałe powłoki i podczas testu nie uległa przerwaniu.



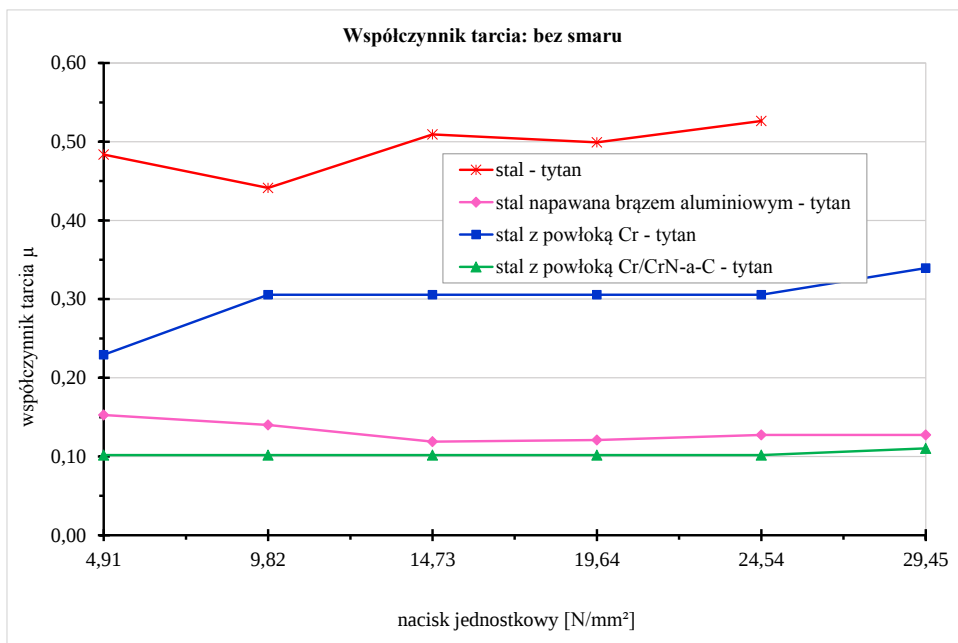
Rys. 48. Wyniki pomiaru chropowatości powłok

Z rysunku 48 wynika, że nałożenie powłok na matryce spowodowało wyraźne obniżenie parametrów chropowatości powierzchni roboczych. Najmniejszą chropowatość wykazywała powłoka wielowarstwowa Cr/Cr₂N-(a-C:H).

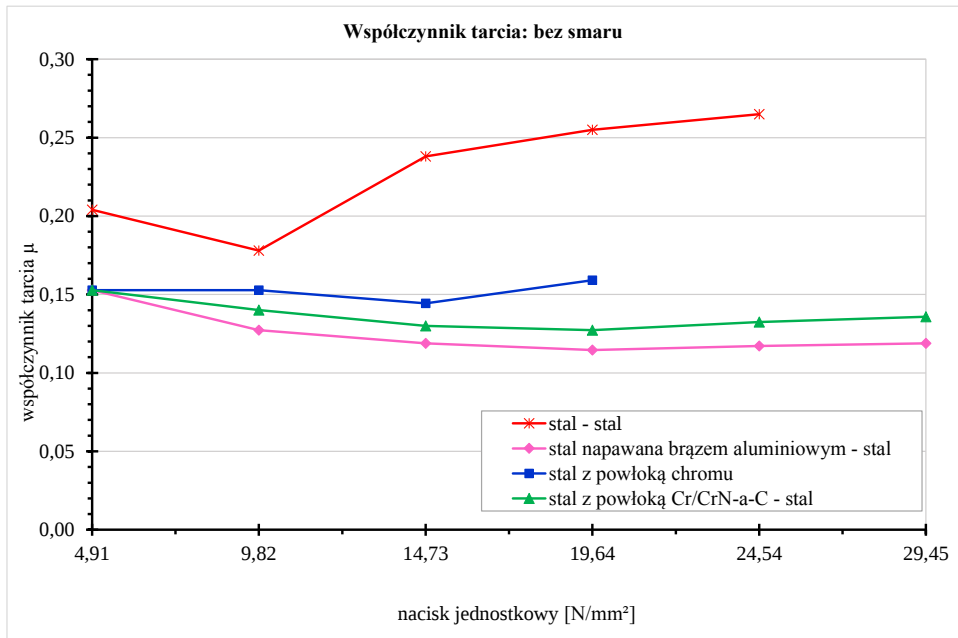
Rysunki 49-51 przedstawiają wyniki badania współczynnika tarcia w warunkach tarcia technicznie suchego podczas przeciągania pasów blachy, odpowiednio, aluminiowej, tytanowej i stalowej przez płaskie, stalowe matryce pokryte powłokami.



Rys. 49. Współczynnik tarcia dla pary trącej „stal – aluminium” w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w obecności powłok antyadhezyjnych

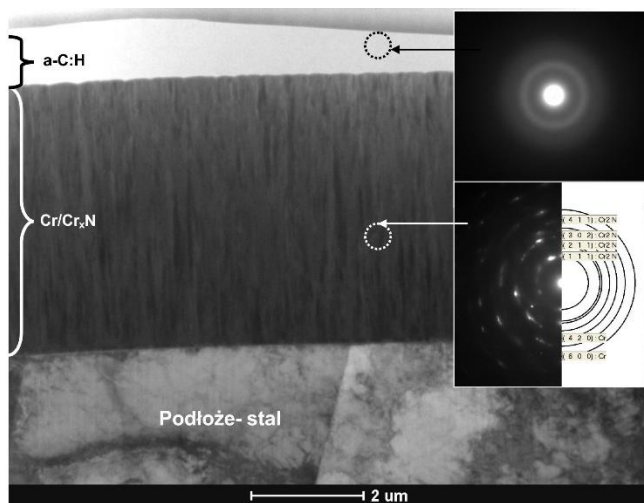


Rys. 50. Współczynnik tarcia dla pary trącej „stal – tytan” w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w obecności powłok antyadhezyjnych



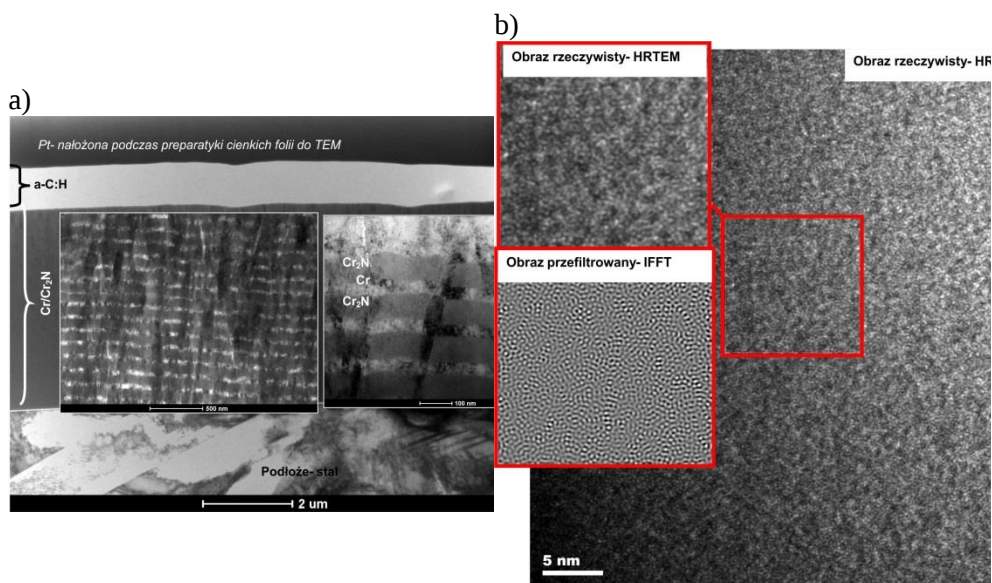
Rys. 51. Współczynnik tarcia dla pary trącej „stal – stal” w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w obecności powłok antyadhezyjnych

W wyniku zastosowania powłok niskotarciowych, podczas przeciągania wszystkich gatunków blach, nastąpiło wyraźne obniżenie współczynnika tarcia. Spośród analizowanych powłok, w przypadku blachy aluminiowej najskuteczniejszą powłoką jest warstwa chromu nakładanego elektrolitycznie, natomiast dla blachy tytanowej i stalowej skutecznymi okazały się powłoka wielowarstwowa $\text{Cr/Cr}_x\text{N-(a-C:H)}$ i napawanie brązem aluminiowym. Na uwagę zasługuje powłoka wielowarstwowa $\text{Cr/Cr}_x\text{N-(a-C:H)}$, gdyż podczas badań nie zauważono skłonności do zacierania i nalepiania się odkształcanych materiałów na powierzchnie narzędzi pokrytych tą powłoką. Powłoki wielowarstwowe, szczególnie opisane w [65, 74, 75] o grubości kilku mikrometrów stanowią nową generację powłok w stosunku do twardych powłok monowarstwowych. Charakteryzują się naprzemiennym ułożeniem twardych warstw ceramicznych i miękkich, odkształcalnych plastycznie warstw metalicznych. Takie ułożenie warstw twardych i miękkich pozwala łączyć ich zalety i eliminować wady. Umieszczenie miękkich warstw pomiędzy warstwami twardymi umożliwia zatrzymanie ewentualnego rozprzestrzeniania się powstających podczas procesu zużycia mechanicznego pęknięć. Na granicy międzywarstwowej, następuje zamiana energii kruchego pęknięcia w warstwach ceramicznych, na odkształcenie plastyczne w warstwach metalicznych. Taka kombinacja materiałów pozwala zwiększyć ogólną twardość powłoki, a hamując wzrost naprężeń wewnętrznych powoduje wyraźnie większą odporność na zużycie. Mikrostrukturę powłoki $\text{Cr/Cr}_x\text{N-(a-C:H)}$ pokazano na rysunku 52. Charakterystykę mikrostruktury przeprowadzono przy wykorzystaniu mikroskopii transmisyjnej elektronowej (TEM) na mikroskopie TECNAI G2 F20 (200kV) (FEG). Analizę przeprowadzono na przekroju poprzecznym powłoki w tzw. jasnym polu obserwacji.



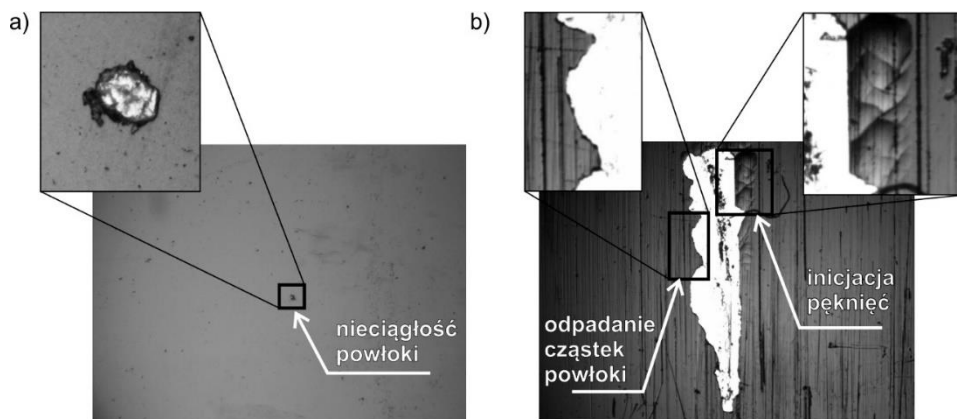
Rys. 52. Charakterystyka mikrostruktury oraz składu fazowego powłoki $\text{Cr/Cr}_2\text{N-(a-C:H)}$

Analiza fazowa przeprowadzona za pomocą dyfrakcji elektronowej, potwierdziła amorficzny charakter warstwy węglowej (a-C:H) – widoczne są dwa rozmyte pierścienie wokół refleksu centralnego oraz obecność faz Cr i Cr₂N pomiędzy warstwą węglową a stalowym podłożem. Całkowita grubość wielowarstwy wynosi ~ 5 μm , z czego grubość amorficznej warstwy węglowej wynosi 1 μm . Większe powiększenie uwidacznia warstwowy charakter powłoki Cr/Cr₂N (rys. 51a). Widoczny jest ten sam kontrast dyfrakcyjny przechodzący przez granice Cr/Cr₂N, co może świadczyć o zależności krystalograficznej pomiędzy tymi fazami. Amorficzny charakter części węglowej powłoki (a-C:H) potwierdzono wykorzystując technikę wysokorozdzielczej mikroskopii transmisyjnej (HRTEM- High Resolution Transmission Electron Microscopy) – rys. 53b.



Rys. 53. Charakterystyka mikrostruktury wielowarstwy Cr/Cr₂N-(a-C:H): a) warstwowy charakter warstwy Cr/Cr₂N – obraz w polu jasnym TEM, b) amorficzny charakter warstwy wierzchniej (a-C:H) – obraz HRTEM

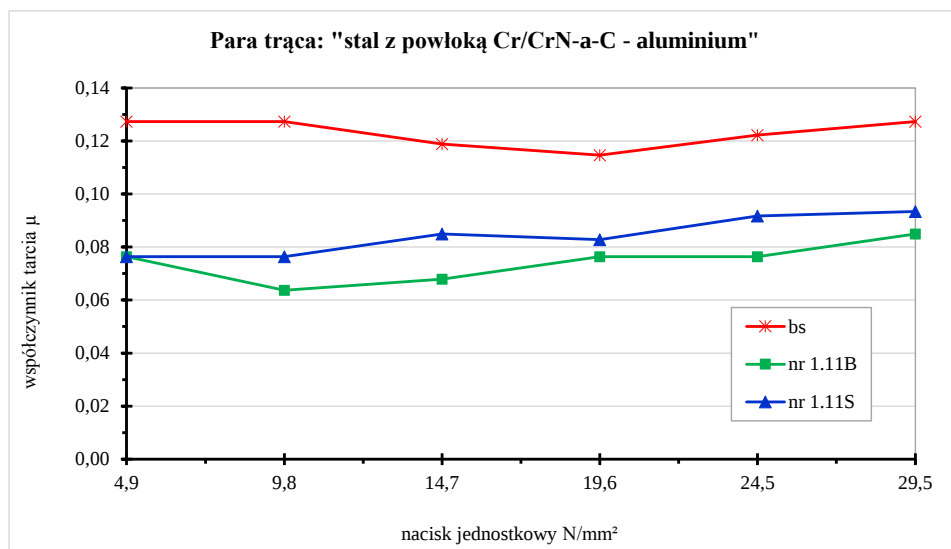
Obserwacje mikroskopowe powierzchni powłoki przed i po próbie przeciągania pasów blachy wykazały, że powodem jej pęknięcia, a następnie wykruszania się przy większych naciskach jednostkowych jest fakt występowania niewielkich nieciągłości, powstałych podczas jej nakładania (rys. 54). W miejscach występowania nieciągłości następowała inicjacja pęknięć.



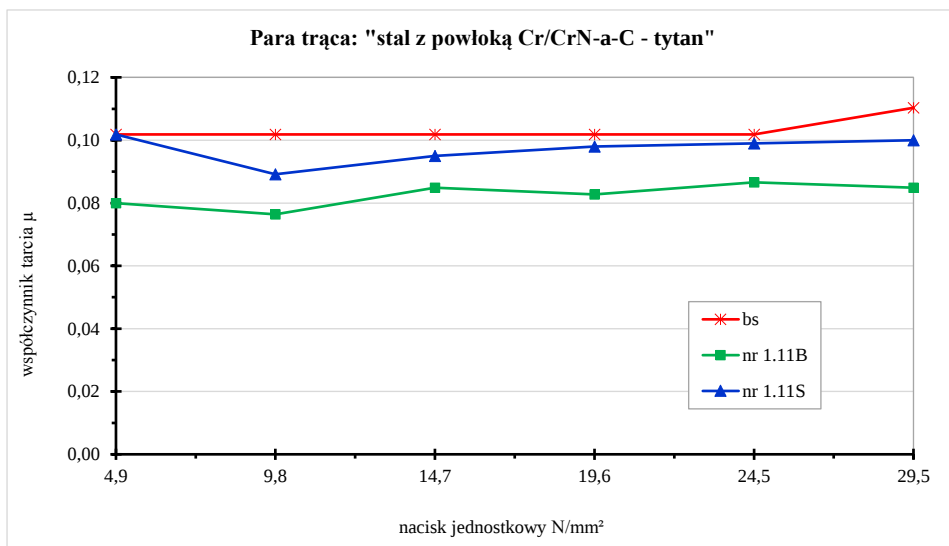
Rys. 54. Widok powłoki wielowarstwowej Cr/Cr₂N-(a-C:H): przed (a) i po (b) próbie przeciągania pasa blachy

Pomimo to powłoka Cr/Cr₂N-(a-C:H) zasługuje na uwagę i być może wytycza nowy kierunek badań, dający możliwość wyeliminowania, a przynajmniej znacznego ograniczenia zużycia smarów technologicznych podczas tłoczenia blach. W ramach współpracy z austriackim centrum laserowym kontynuowane są badania nad zwiększeniem odporności powłoki na duże naciski powierzchniowe.

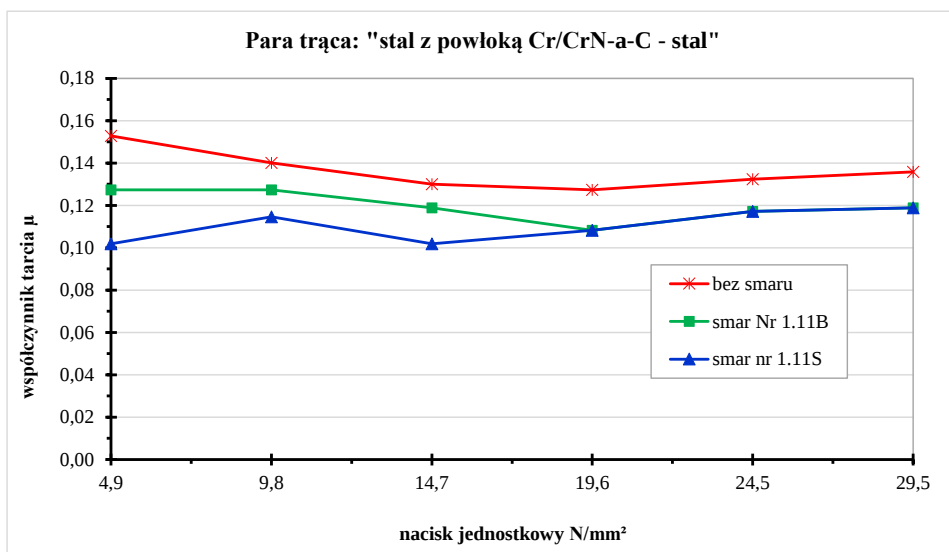
Rysunki 55–57 przedstawiają wpływ dodatków smarnych na wartość współczynnika tarcia w przypadku przeciągania pasów blach przez płaskie matryce pokryte powłokami w obecności kompozycji smarowych nr 1.11B i nr 1.11S.



Rys 55. Wpływ dodatków smarnościowych na wartość współczynnika tarcia w przypadku zastosowania matryc pokrytych powłoką Cr/CrN-(a-C:H) dla pary trącej: „stal – aluminium”



Rys. 56. Wpływ dodatków smarnościowych na wartość współczynnika tarcia w przypadku zastosowania matryc pokrytych powłoką Cr/CrN-(a-C:H) dla pary trącej: „stal – tytan”



Rys. 57. Wpływ dodatków smarnościowych na wartość współczynnika tarcia w przypadku zastosowania matryc pokrytych powłoką Cr/CrN-(a-C:H) dla pary trącej: „stal – stal”

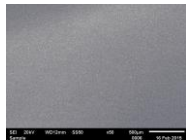
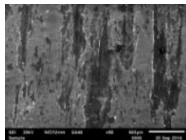
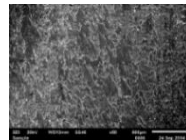
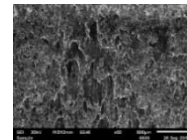
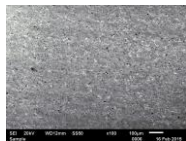
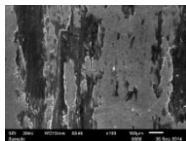
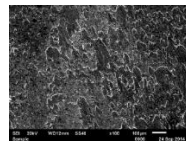
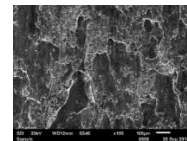
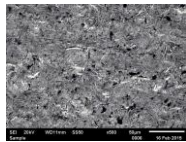
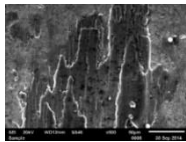
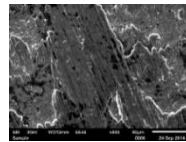
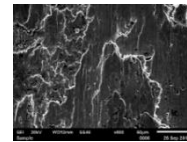
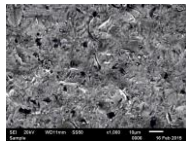
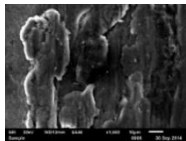
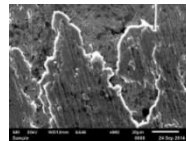
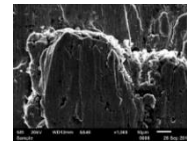
We wszystkich badanych przypadkach zaobserwowano dodatkowe obniżenie oporów tarcia po zastosowaniu smarowania. Na podstawie wyznaczonych w próbie przeciągania pasa blachy współczynników tarcia do dalszych badań wytypowano smar technologiczny nr 1.11B i 1.11S.

3.7. Wpływ smaru technologicznego na proces tłoczenia

Stosowanie smarów technologicznych jest powszechnym zabiegiem zmniejszającym opory tarcia. Niestety ze względu na wysokie naciski jednostkowe w procesach tłoczenia blach, dochodzące nawet do 100 MPa, często występuje przerwanie filmu smarnego. Wówczas wskutek bezpośredniego styku kształtowanej blachy z narzędziem tworzą się narosty kształtowanego materiału na powierzchniach roboczych narzędzi. Narosty te są wynikiem powstających połączeń adhezyjnych, które następnie są niszczone i ulegają wykruszeniu. Produkty zużycia adhezyjnego wraz z zanieczyszczeniami znajdującymi się na powierzchni blachy powodują niemożliwe do usunięcia w kolejnych operacjach zarysowania i wgniecenia na powierzchniach kształtowanych wytłoczek.

Topografię powierzchni stalowych matryc do tłoczenia z widocznymi śladami zużycia adhezyjnego w postaci wyrw i nalepień kształtowanego materiału pokazano w tabeli 7. Obserwacji powierzchni dokonano na elektronowym mikroskopie scanningowym Joel JSM-6610LV.

Tabela 7. Topografia powierzchni stalowych (NC10) matryc współpracujących z blachą aluminium 2024, tytanową Gr 2 i stalową 5604

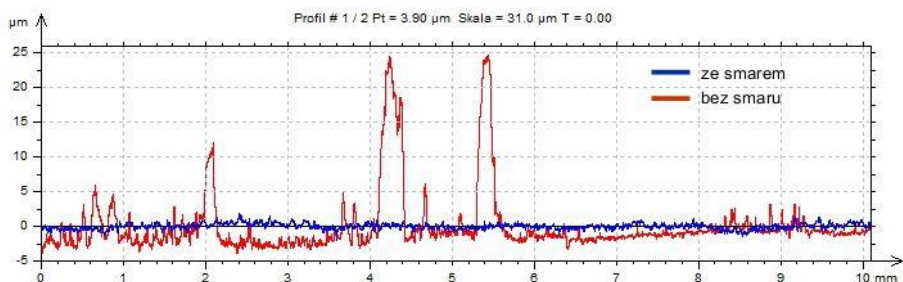
Topografia powierzchni matryc po próbie przeciągania				pow.
w obecności smaru	bez smaru			
	nalepienia alumi niowe	nalepienia tytanowe	nalepienia stalowe	
				50x
				100x
				500x
				1000x

W celu uniknięcia tworzenia się narostów odkształcanego materiału, proponuje się dodatkowe zabezpieczenie w postaci powłok antyadhezyjnych na powierzchniach roboczych matrycy i dociskacza, które chroniłyby narzędzia przed bezpośrednim kontaktem w przypadku przerwania filmu smarnego.

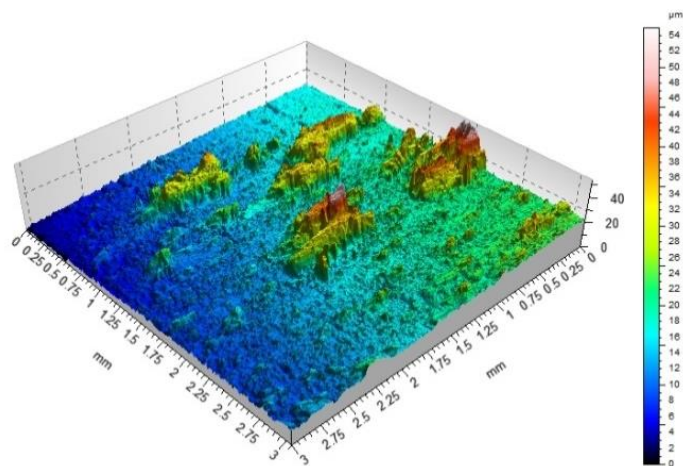
Zmniejszenie intensywności nalepiania kształtowanego materiału na stalowe narzędzia, dzięki zastosowaniu smarów technologicznych i warstw antyadhezyjnych, potwierdzono pomiarami chropowatości powierzchni narzędzi po próbie „przeciągania pasów blachy”. Przykładowe wyniki badań ilustrują: tabela 8 oraz rysunki 58 i 59.

Tabela 8. Chropowatość powierzchni roboczych narzędzi przed i po próbie przeciągania pasa blachy

Para trąca	Chropowatość powierzchni roboczych narzędzi					
	przed próbą		po próbie w warunkach tarcia techn. suchego		po próbie w warunkach smarowania (nr 1.11B)	
	R _a [μm]	R _z [μm]	R _a [μm]	R _z [μm]	R _a [μm]	R _z [μm]
stal – aluminium	0,11	1,7	4,67	24,4	0,23	3,05
stal – tytan	0,16	0,9	1,58	9,54	0,37	2,6
stal – stal	0,13	0,9	2,41	12,6	0,20	2,1



Rys. 58. Chropowatość powierzchni po próbie „przeciągania pasa blachy” – parametr R_a. Para trąca: „stal – tytan”; droga tarcia - 1m, nacisk jednostkowy – 10MPa



Rys. 59. Topografia powierzchni roboczej narzędzia po próbie przeciągania pasa blachy tytanowej

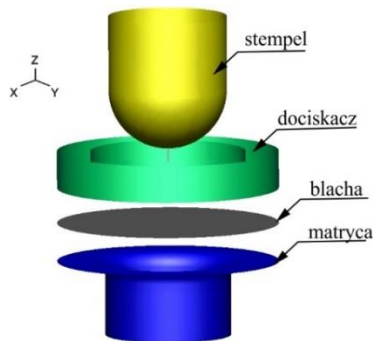
Zarówno stosowanie smarowania, jak i powłok antyadhezyjnych zmniejsza opory tarcia, a w konsekwencji ogranicza intensywność zużycia narzędzi, co widać z przedstawionego porównania chropowatości powierzchni.

Ponadto, oceny skuteczności działania smarów technologicznych dokonano na podstawie teoretyczno-doświadczalnej analizy procesu tłoczenia półkulistych czasz.

3.7.1. Analiza numeryczna

W ramach analiz numerycznych wpływu smaru technologicznego na proces tłoczenia blach przeprowadzono symulacje kształtowania półkulistych czasz przy wykorzystaniu programu ADINA, bazującego na metodzie elementów skończonych (MES). Trójwymiarowy model geometryczny narzędzia opracowano na podstawie wymiarów narzędzia rzeczywistego zastosowanego w badaniach eksperymentalnych. Narzędzie składa się z półkulistego stempla o promieniu 14 mm, matrycy ciągowej o średnicy wewnętrznej 30 mm i promienia zaokrąglenia ciągowego 5 mm oraz dociskacza o średnicy wewnętrznej 34 mm. Model numeryczny przedstawia rysunek 60.

Przygotowaną w programie Catia v.5 geometrię narzędzia zaimportowano do programu PAMStamp 2G. Zarówno na narzędzie, jak i na blaszane wykrojki nałożono siatkę elementów skończonych. Zastosowano 4-wzłowe elementy powłokowe. Każdemu elementowi narzędzia przypisano odpowiednie warunki graniczne. Matrycy ciągowej odebrano wszystkie stopnie swobody, podczas gdy możliwość poruszania się wzdłuż osi Z pozostawiono w odniesieniu do stempla i dociskacza. Do stempla przyłożono wektor prędkości, a do dociskacza siłę równą 15kN w przypadku kształtowania blachy tytanowej Gr 2 oraz 5 kN w przypadku kształtowania blachy aluminium 2024 i stalowej AMS 5604. Wykrojce pozostawiono wszystkie stopnie swobody.



Rys. 60. Model numeryczny procesu tłoczenia czasz

W obliczeniach założono izotropowe właściwości wytrzymałościowe blach z uwzględnieniem uplastycznienia materiału dla warunku podanego w 1948 r. przez R. Hill'a. Krzywą umocnienia materiału blachy opisano prawem Hollomon'a:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (10)$$

gdzie: K – stała materiałowa,
 n – wykładnik umocnienia.

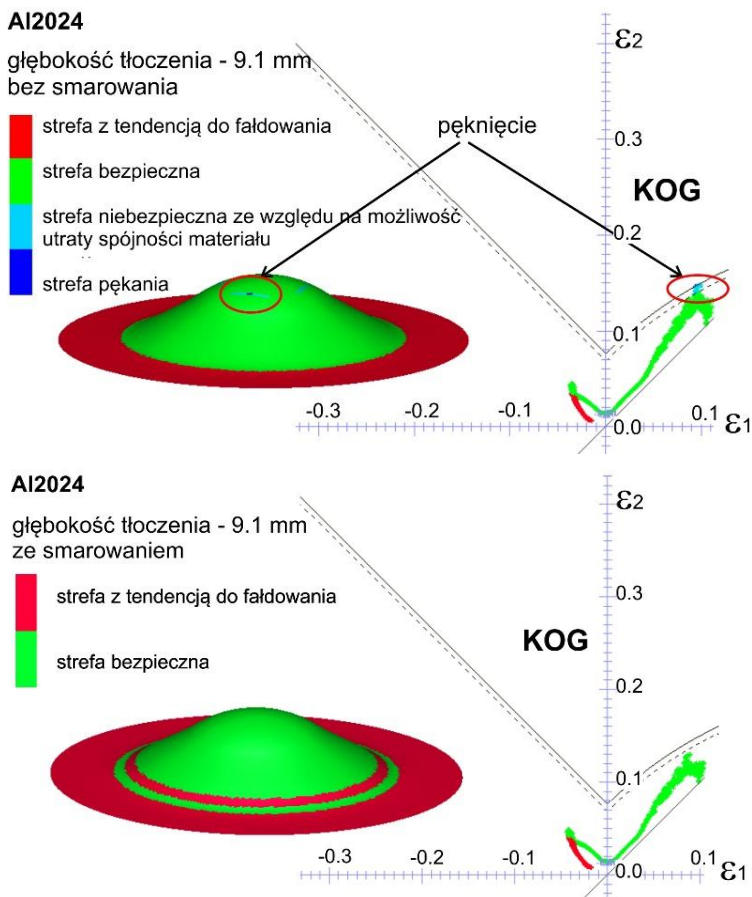
Niezbędne do przeprowadzenia symulacji numerycznej dane materiałowe, takie jak: granica plastyczności R_e , granica wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz stała materiałowa K i wykładnik umocnienia n wyznaczono doświadczalnie w statycznej próbie rozciągania (tab. 9), zgodnie z [111, 112, 113]. Wartości współczynników tarcia, z uwzględnieniem rodzaju tłoczonego materiału, odpowiadające warunkom tarcia technicznie suchego na powierzchni kontaktu blachy ze stemplem oraz warunkom smarowania na powierzchniach kontaktu: „matryca-blacha-dociskacz” przyjęto na podstawie uśrednionych wartości współczynników tarcia uzyskanych w próbie przeciągania pasa blachy.

Tabela 9. Właściwości materiałowe przyjęte w obliczeniach numerycznych

Parametr Materiał	Moduł Younga E [GPa]	Umowna granica plast. R_{p02} [GPa]	Granica wytrzym. na rozciąganie R_m [GPa]	Wsp. Poissona ν [-]	Gęstość ρ [kg/m ³]	Stala materiałowa K [GPa]	Wykładnik umocnienia n [-]
Gr 2	105	0,236	0,344	0,37	4500	0,465	0,125
Al2024	73	0,313	0,469	0,33	2800	0,593	0,151
AMS 5604	196	1,040	1,35	0,27	7800	1,288	0,039

Do oceny poprawności zaprojektowania procesu tłoczenia blach zastosowano krzywe odkształceń granicznych (KOG) analizowanych blach z wykorzystaniem warunku Keelera. W pracy [13, 34] szczegółowo omówiono doświadczalno-teoretyczne wyznaczanie krzywych odkształceń granicznych.

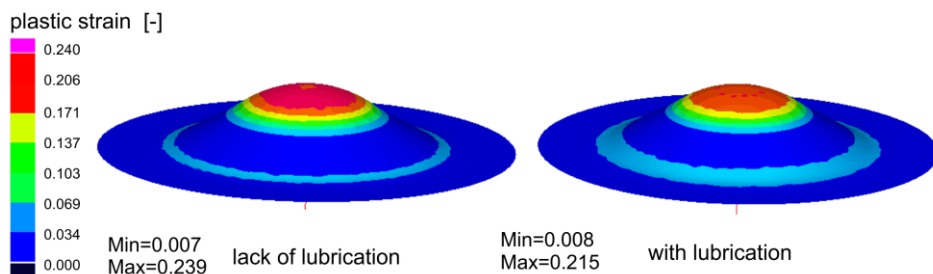
Analizowano wpływ warunków tarcia na rozkład odkształceń w wytłoczkach oraz pocienienie blach. Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono na rysunkach 61÷69. Rozkłady odkształceń plastycznych w wytłoczce aluminiowej, uzyskanej podczas kształtowania w warunkach tarcia technicznie suchego, w chwili jej pęknięcia w porównaniu z odkształceniami jakie występują podczas tłoczenia ze smarowaniem przedstawiono na rysunku 61. W przypadku braku smarowania pęknięcie materiału wytłoczki pojawia się przy zagłębieniu stemplą równym 9,1 mm, natomiast w warunkach smarowania powierzchni roboczych matrycy i dociskacza, przy takim samym zagłębieniu stemplą, nie zaobserwowano obszarów niebezpiecznych ze względu na utratę spójności materiału wytłoczki.



Rys. 61. Porównanie odkształceń w wytłoczkach aluminiowych z krzywą odkształceń granicznych przy zagłębieniu stemplą 9,1 mm: bez smarowania (u góry) i ze smarowaniem (u dołu)

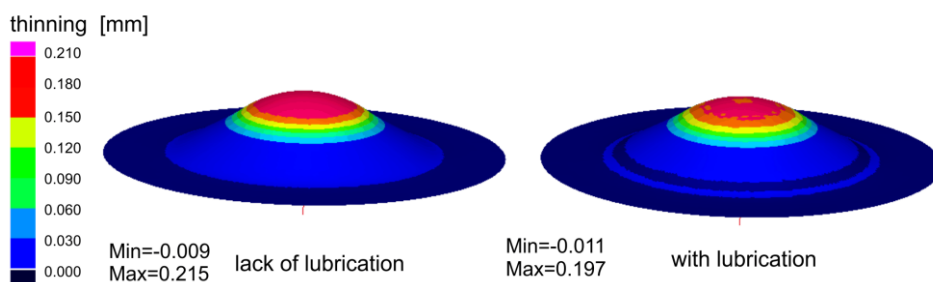
Rozkład odkształceń plastycznych ε [-] i wartości pocienienia ścianek wytłoczek aluminiowych w wyniku procesu kształtowania przedstawiono odpowiednio na rysunkach 62 i 63.

Al2024 -depth of drawing - 9.1 mm



Rys. 62. Rozkład odkształceń na powierzchni wytłoczek aluminiowych: bez smarowania (po lewej) i ze smarowaniem (po prawej)

Al2024 -depth of drawing - 9.1 mm



Rys. 63. Rozkład pocienienia wytłoczek aluminiowych: bez smarowania (po lewej) i ze smarowaniem (po prawej)

Zaobserwować można typowy dla wytłoczek osiowosymetrycznych, obwodowy rozkład odkształceń plastycznych w materiale blachy i towarzyszące mu pocienienie ścianki wytłoczki. Największe wartości odkształceń plastycznych występują w obszarze wierzchołka tłoczzonej czaszy, w miejscu tym widoczne jest również znaczne pocienienie odkształcanego materiału, które można ograniczyć stosując odpowiednie smarowanie.

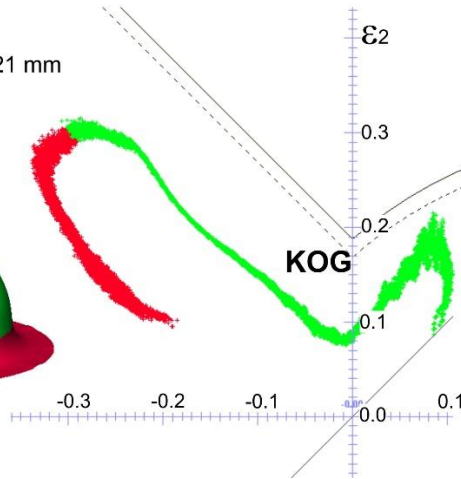
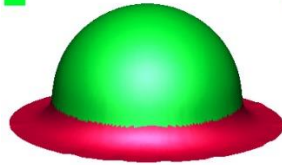
Wyniki symulacji numerycznych procesu tłoczenia czaszy kulistej z blachy tytanowej Gr 2 przedstawiono na rysunkach 64÷66. Zastosowanie smarowania pozwoliło w tym przypadku uzyskać bardziej równomierny rozkład odkształceń plastycznych w materiale wytłoczki oraz ograniczyć pocienienie ścianek wytłoczki. Znaczny wzrost grubości blachy w części kołnierzonej wytłoczki spowodowany jest występowaniem obwodowych naprężeń ściskających.

Grade 2

głębokość tłoczenia - 21 mm
bez smarowania

strefa z tendencją
do faldowania

strefa bezpieczna

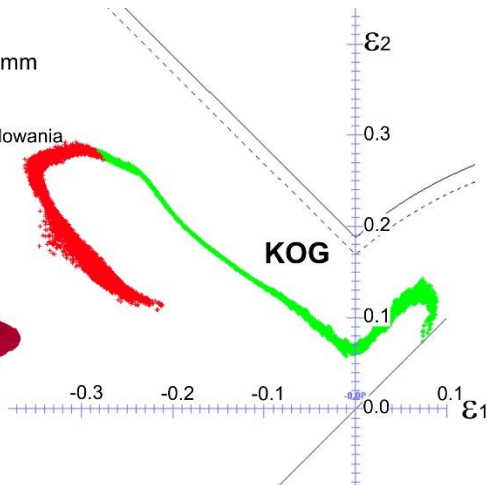
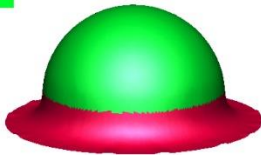


Grade 2

głębokość tłoczenia - 21 mm
ze smarowaniem

strefa z tendencją do faldowania

strefa bezpieczna

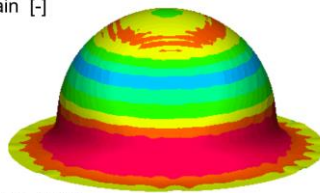


Rys. 64. Porównanie odkształceń w wylózkach tytanowych z krzywą odkształceń granicznych przy zagłębieniu stempla 21 mm: bez smarowania (u góry) i ze smarowaniem (u dołu)

Grade 2 -depth of drawing - 21 mm

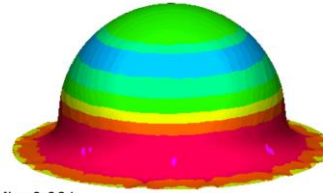
plastic strain [-]

0.370
0.317
0.264
0.211
0.159
0.106
0.053
0.000



Min=0.084
Max=0.372

lack of lubrication

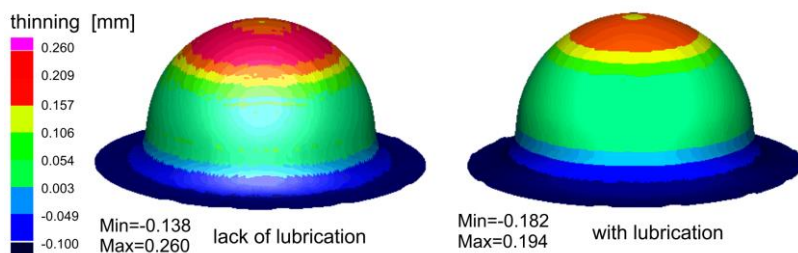


Min=0.061
Max=0.377

with lubrication

Rys. 65. Rozkład odkształceń na powierzchni wylózek tytanowych: bez smarowania (po lewej) i ze smarowaniem (po prawej)

Grade 2 -depth of drawing - 21 mm



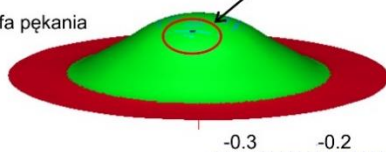
Rys. 66. Rozkład pocienienia wytłoczek tytanowych: bez smarowania (po lewej) i ze smarowaniem (po prawej)

Porównanie odkształceń występujących w wytłoczkach stalowych uzyskanych w różnych warunkach tarcia przedstawiono na rysunku 67. W warunkach tarcia technicznie suchego, przy głębokości tłoczenia równej 9,4 mm, w obszarze materiału wytłoczki pojawia się strefa pęknięcia, odpowiadająca punktom zlokalizowanym powyżej krzywej odkształceń granicznych. Przy tej samej głębokości tłoczenia lecz w obecności smaru technologicznego nie zaobserwowano pęknięcia materiału, chociaż odkształcenia znajdują się blisko strefy niebezpiecznej zagrożonej utratą spójności materiału.

AMS 5604

głębokość tłoczenia - 9.4 mm
bez smarowania

- strefa z tendencją do faldowania
- strefa bezpieczna
- strefa niebezpieczna ze względu na możliwość utraty spójności materiału
- strefa pęknięcia



pęknięcie

ϵ_2

0.3

KOG

0.2

0.1

0.0

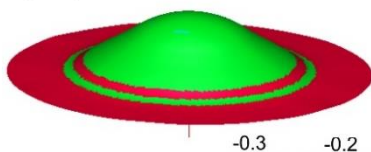
0.1

ϵ_1

AMS 5604

głębokość tłoczenia - 9.4 mm
ze smarowaniem

- strefa z tendencją do faldowania
- strefa bezpieczna
- strefa niebezpieczna ze względu na możliwość utraty spójności materiału



KOG

ϵ_2

0.3

0.2

0.1

0.0

0.1

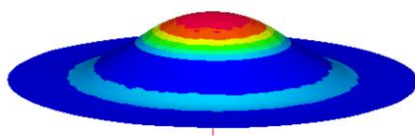
ϵ_1

Rys. 67. Porównanie odkształceń w wytłoczkach stalowych z krzywą odkształceń granicznych przy zagłębieniu stempla 9.4 mm: bez smarowania (u góry) i ze smarowaniem (u dołu)

Podobnie jak w przypadku wytłoczek aluminiowych zastosowanie smarowania zapewnia bardziej równomierny rozkład odkształceń, mniejsze pocienienie ścianek wytłoczki oraz pozwala uzyskać trochę większą głębokość wytłoczki (rys. 68 i 69).

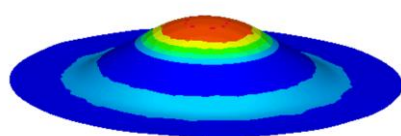
AMS 5604 -depth of drawing - 9.4 mm

plastic strain [-]



Min=0.007
Max=0.260

lack of lubrication

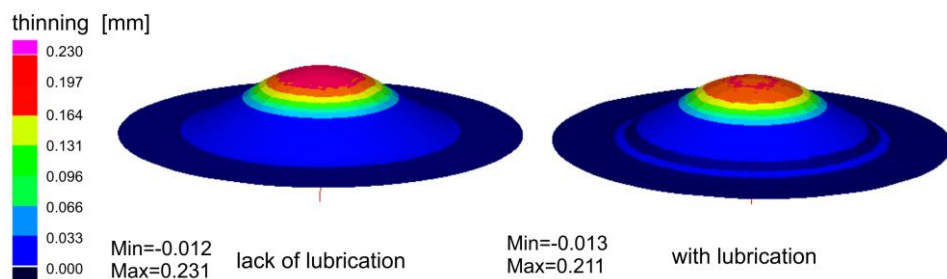


Min=0.007
Max=0.235

with lubrication

Rys. 68. Rozkład odkształceń na powierzchni wytłoczek stalowych: bez smarowania (po lewej) i ze smarowaniem (po prawej)

AMS 5604 -depth of drawing - 9.4 mm



Rys. 69. Rozkład pocienienia wytłoczek aluminiowych: bez smarowania (po lewej) i ze smarowaniem (po prawej)

Przedstawione wyniki obliczeń numerycznych wykazują pozytywny wpływ smarów technologicznych na proces kształtowania blach. Z analizy wynika, że smarowanie powoduje bardziej równomierny rozkład odkształceń plastycznych, zmniejszenie pocienienia blachy, co w efekcie sprawia, że zwiększa się głębokość wytłoczek w momencie utraty stateczności materiału (pęknięcia). Ponadto symulacje numeryczne (MES) procesu tłoczenia dzięki wykorzystaniu funkcji krzywych odkształceń granicznych umożliwiają ocenę poprawności zaprojektowanego procesu tłoczenia, ocenę zapasu plastyczności i ewentualną korektę procesu technologicznego.

3.7.2. Doświadczalna weryfikacja obliczeń numerycznych

W celu potwierdzenia pozytywnego oddziaływania smarowania na proces kształtowania blach przeprowadzono próby tłoczenia czasz w warunkach laboratoryjnych. Podczas kształtowania analizowano wpływ smarów na wielkość siły tłoczenia i głębokość wytłoczenia. Wszystkie wytłoczki wykonano z krążków o średnicy 60 mm. Badania prowadzono przy sile docisku $F_d=5$ kN (aluminium i stal) i 15 kN (tytan) oraz prędkości tłoczenia $v=10$ mm/min. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 10 oraz na rysunkach 70 i 71.

Tabela. 10. Wyniki pomiaru siły tłoczenia i głębokości wytłoczek

Materiał	Głębokość wytłoczki w momencie pęknięcia [mm]			Siła tłoczenia [kN]		
	bez smaru	Smar nr 1.11B	Smar nr 1.11S	bez smaru	Smar nr 1.11B	Smar nr 1.11S
2024	9	10,3	10,2	12,0	14,0	14,0
Gr 2	21,0*	21,0*	21,0*	41,2	28,2	30,2
5604	9,2	11,3	9,5	33,8	40,4	36,0

* wszystkie wytłoczki z blachy tytanowej kształtowano do osiągnięcia głębokości 21 mm, przy której nie występowało pęknięcie



Rys. 70. Wpływ smarowania na głębokość wytłoczenia



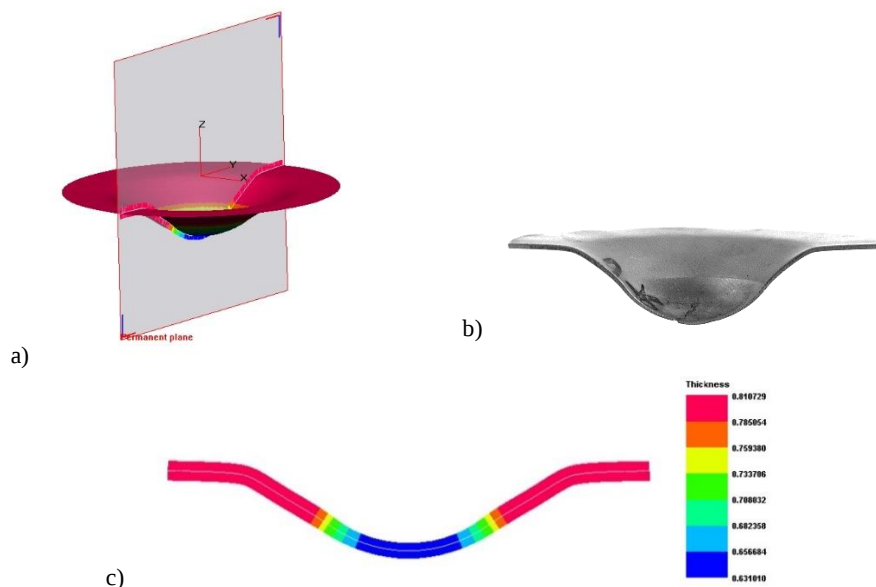
Rys. 71. Wpływ smarowania na siłę tłoczenia

W przypadku kształtowania wytłoczek z blachy aluminiowej i stalowej przy zastosowanych parametrach tłoczenia dochodziło do pęknięcia wytłoczek już przy niewielkim zagłębieniu stempla w materiał. W warunkach tarcia technicznie suchego pęknięcie materiału wytłoczki występowało przy głębokości wytłoczenia równej 9,0 mm dla blachy aluminiowej i 9,2 mm dla blachy stalowej. Smarowanie opóźniało moment pęknięcia, tj. uzyskiwano głębsze wytłoczki, a korzystniejszym okazał się smar z dodatkiem kwasu borowego. Jego zastosowanie spowodowało, że pęknięcie wytłoczki aluminiowej wystąpiło przy głębokości wytłoczenia 10,5 mm, a wytłoczki stalowej przy głębokości wytłoczenia równej 11,3 mm.

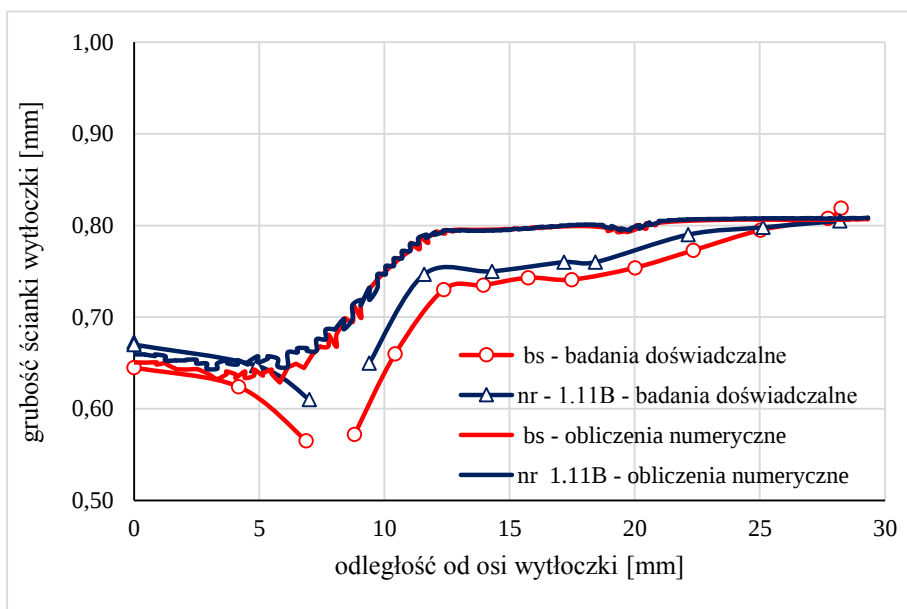
W celu zaobserwowania wpływu smarowania na wielkość siły tłoczenia we wszystkich blachach wykonano przetłoczenia o tej samej wysokości. Przykładowo, dla blachy z czystego tytanu technicznego dla głębokości wynoszącej 21 mm (rys. 71) zaobserwowano obniżenie siły tłoczenia z 41000 N przy braku smarowania do 28000 N przy smarowaniu smarem nr 1.11B oraz 30000 N przy smarowaniu smarem 1.11S.

Kolejny etap analizy wyników to porównanie pocienienia blachy uzyskanego podczas obliczeń numerycznych procesu tłoczenia z pocienieniem blachy występującym w rzeczywistej wytłoczce. W tym celu wytłoczki przecięto za pomocą elektrodrażarki drutowej, a następnie zmierzono grubość jej ścianek wzdłuż tworzącej wytłoczki (rys. 72 b). Porównanie wyników obliczeń numerycznych

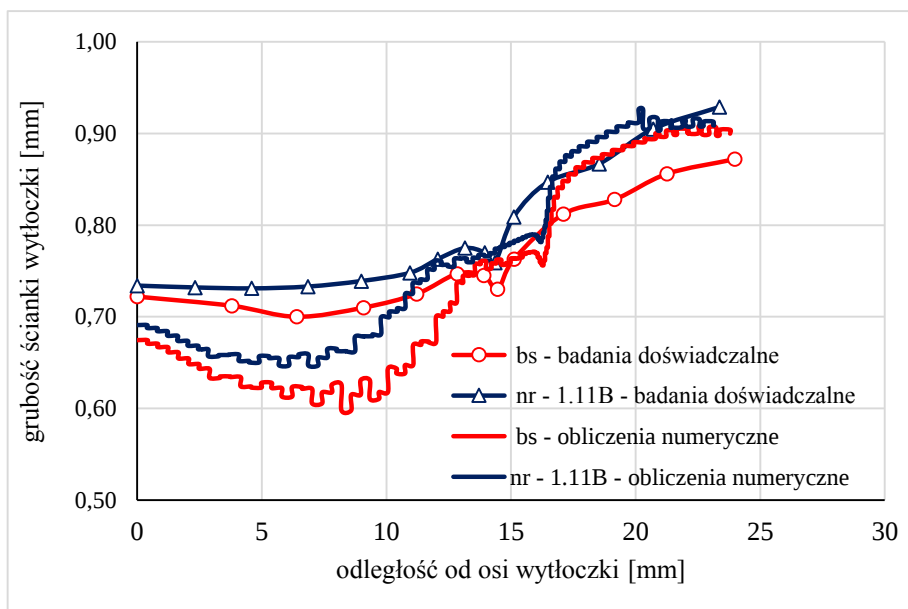
z wynikami badań doświadczalnych pokazano na rysunkach 72÷75 odpowiednio dla blachy aluminiowej, tytanowej i stalowej.



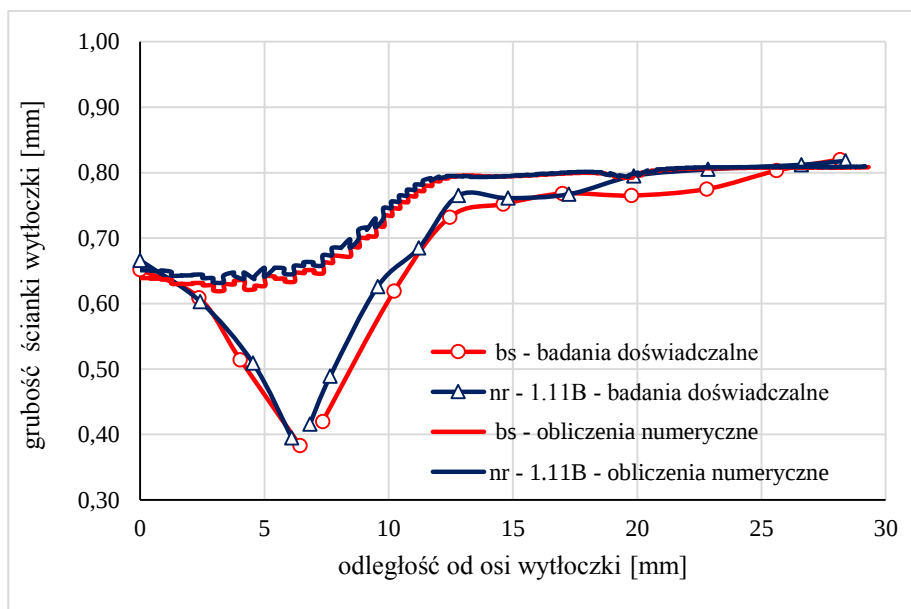
Rys 72. Przekrój wytłoczki: a) symulacja numeryczna, b) rzeczywista wytłoczka, c) rozkład grubości ścianki w przekroju płaszczyzną symetrii wytłoczki (symulacja numeryczna)



Rys. 73. Rozkład grubości ścianki w przekroju płaszczyzną symetrii wytłoczki dla blachy aluminiowej Al 2024



Rys. 74. Rozkład grubości ścianki w przekroju płaszczyzną symetrii wylotczki dla blachy tytanowej Gr 2



Rys.75. Rozkład grubości ścianki w przekroju płaszczyzną symetrii wylotczki dla blachy stalowej 5604

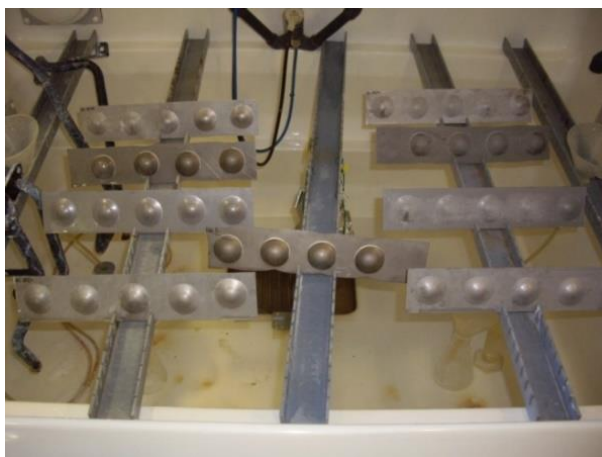
Rozbieżności między wynikami obliczeń numerycznych i doświadczalnych mogą wynikać z niedoskonałości przyjętego modelu numerycznego. W obliczeniach numerycznych założono materiał izotropowy, chociaż w rzeczywistości kształtowano blachy charakteryzujące się znaczną anizotropią właściwości plastycznych.

3.7.3. *Badania korozyjne*

Do oceny wpływu smarów technologicznych na odporność korozyjną analizowanych blach wytypowano smary nr 1.11B i nr 1.11S. Badania w komorze solnej prowadzono przez okres 21 dni. Największą odporność na korozję wykazała blacha tytanowa. W trakcie badań nie zauważono śladów korozji ani na próbkach bez smaru, ani na próbkach pokrytych smarami.

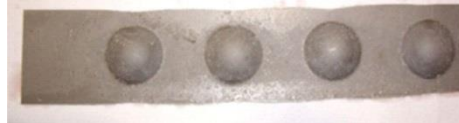
Podczas obserwacji próbek stalowych obecność pierwszych śladów korozji stwierdzono już po 72 godzinach badań na próbce nie pokrytej żadnym smarem, po 168 godzinach na próbce pokrytej smarem nr 1.11B i po 192 godzinach na próbce pokrytej smarem nr 1.11S. Silniejsze ślady korozji zaobserwowano na próbce pokrytej smarem nr 1.11B.

W przypadku próbek aluminiowych bez smaru pierwsze ślady korozji zauważono po 96 godzinach obserwacji, dla próbek pokrytych smarem nr 1.11B po 120 godzinach badań, a dla próbek pokrytych smarem nr 1.11S po 216 godzinach badań. Przykładowe wyniki badań korozyjnych ilustruje rysunek 76 i tabela 11.



Rys. 76. Widok próbek przed rozpoczęciem badań w komorze mgły solnej

Tabela 11. Widok próbek w trakcie badań w komorze mgły solnej – 21 doba badań

Próbka stalowa	
bez smaru	ze smarem
	
Próbka tytanowa	
bez smaru	ze smarem
	
Próbka aluminiowa	
bez smaru	ze smarem
	

Przeprowadzone badania wykazały, że badane smary mogą stanowić czasową ochronę korozyjną w okresie co najwyżej 7 dni. W przypadku dłuższego magazynowania wytłoczek należy usunąć smar z ich powierzchni, aby nie dopuścić do uszkodzenia wytłoczek (tab. 11). Mniejsze oddziaływanie korozyjne wykazywał smar nr 1.11S, tj. smar z dodatkiem kwasu stearynowego.

3.7.4. *Badanie zmywalności*

Ważną cechą smarów technologicznych, na którą zwracają szczególną uwagę zakłady zajmujące się nakładaniem powłok na wyroby tłoczone jest łatwość ich usuwania z powierzchni wytłoczek. Powszechnie wiadomym jest, że obecność nawet znikomej ilości smaru technologicznego osłabia przyczepność powłok do podłoża, a ich usuwanie w sposób skuteczny i nieszkodliwy dla środowiska stanowi ciągle duże wyzwanie.

Do oceny skuteczności usuwania smaru technologicznego z powierzchni wytłoczek podlegających nakładaniu powłok tj. zmywalności smaru przyjęto metodę polegającą na porównywaniu plam tłuszczowych na bibule filtracyjnej. Badania przeprowadzono na próbkach analizowanych blach o wymiarach 100x150 mm, pokrytych badanym smarem do 2/3 wysokości i pozostawionych na specjalnym wieszaku na okres 24 godzin. Następnie próbki zanurzano w roztworze myjącym o temperaturze 80°C w ciągu 5 minut, po czym płytki starannie płukano pod bieżącą wodą o temperaturze 40°C i osuszano w strumieniu ciepłego powietrza. Na tak odtłuszczonej powierzchni płytki oraz na wzorcowy krążek bibuły filtracyjnej наносzono 2-3 krople benzyny ekstrakcyjnej. Po

10 sekundach do powierzchni blachy przykładano krążek bibuły. Po odparowaniu rozpuszczalnika z obu krążków bibuły, porównywano ich wygląd. Obecność plam tłuszczowych na bibule przyciśniętej do odtłuszczonej powierzchni blachy świadczy o jej niewłaściwym odtłuszczeniu. Do odtłuszczania wykorzystano 5% roztwór biodegradowalnego detergentu w postaci płynu do mycia naczyń „Ludwik”.

Zarówno smar nr 1.11B i nr 1.11S, które zostały w trakcie badań wytypowane jako smary przeznaczone do dalszych badań przemysłowych, po omówionym procesie mycia nie pozostawiały tłustych plam na bibule filtracyjnej, co świadczy o tym, że do ich usunięcia z powierzchni nie potrzeba żadnych rozpuszczalników. Pozytywne wyniki odtłuszczania uzyskano dla wszystkich trzech gatunków blach tj, blachy aluminiowej (2024), tytanowej (Gr 2) i stalowej (ASM 5604).

3.8. Wnioski wynikające z badań własnych

Na podstawie badań własnych można wyciągnąć następujące wnioski:

- O ile gęstość roślinnych olejów bazowych, wytypowanych do badań, jest porównywalna z gęstością oleju handlowego, stosowanego w przemyśle do procesów tłoczenia blach i wytypowanego do badań porównawczych, to ich lepkość jest dużo mniejsza. Mniejsza lepkość w połączeniu ze skłonnością do obniżania się wraz ze wzrostem temperatury wskazuje na niebezpieczeństwo wyciśnięcia oleju pomiędzy trących się powierzchni i możliwość zatarcia.
- Zwilżalność powierzchni badanymi, roślinnymi olejami bazowymi zależy zarówno od rodzaju powierzchni, jak i od rodzaju oleju. W przypadku smaru handlowego, który cechuje się najmniejszą zwilżalnością, jej wartość jest porównywalna dla wszystkich rodzajów blach.
- Badanie chropowatości powierzchni wskazuje, że największą chropowatość ma blacha tytanowa, chropowatości powierzchni blachy stalowej i aluminiowej są porównywalne.
- Badania współczynnika tarcia wykazały, że oleje roślinne zmniejszają opory tarcia w różnym stopniu i zależy to w dużej mierze od rodzaju badanej pary trącej „metal – metal”, ale ich skuteczność jest ograniczona do niewielkich nacisków jednostkowych. W przypadku pary trącej „stal – tytan” naciski jednostkowe powyżej 19 MPa powodują przerwanie filmu olejowego nr 2.01 i prowadzą do zatarcia.
- Wprowadzenie do roślinnych olejów bazowych kwasu borowego lub kwasu stearynowego, jako dodatków smarnościowych, powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia oraz wyraźną poprawę właściwości smarnych, często nawet w stosunku do oleju handlowego nr 4.01.

- Dla pary trącej „stal – aluminium” największe obniżenie współczynnika tarcia daje smar nr 1.11S, tj. olej rzepakowy z dodatkiem kwasu stearynowego, a dla pary trącej „stal – tytan” i „stal – stal” smar nr 1.11B, tj. olej rzepakowy z dodatkiem kwasu borowego, z tym, że dużo większą skuteczność ma w odniesieniu do pary trącej „stal – tytan”.
- Z uwagi na fakt, że kwas borowy trudno rozpuszcza się w wodzie i olejach roślinnych najskuteczniejszym sposobem nanoszenia go na powierzchnie odkształcanych blach jest napyłanie odpowiednio rozdrobnionego kwasu borowego na cienką warstwę oleju bazowego naniesionego na blachę tuż przed operacją kształtowania.
- Z uwagi na koszt smaru i dostępność sugeruje się stosowanie oleju rzepakowego jako oleju bazowego.
- Przebadana grupa smarów mydlanych wskazuje, że mogą być stosowane jedynie w przypadku kształtowania blach przy małych naciskach jednostkowych. Większe naciski jednostkowe powodują przerwanie filmu smarnego.
- Badania potwierdziły celowość stosowania wybranych powłok antyadhezyjnych jako dodatkowego zabezpieczenia w przypadku przerywania filmu smarnego. Powłoki antyadhezyjne zmniejszają współczynnik tarcia, a przede wszystkim zapobiegają bezpośredniemu stykowi odkształcanego materiału z narzędziem i tworzeniu nalepień kształtowanego materiału na narzędziu, co potwierdzono w badaniach chropowatości powierzchni roboczych narzędzi po procesie kształtowania.
- Obiecującym, z uwagi na dobre właściwości tribologiczne, jest powłoka wielowarstwowa Cr/Cr₂N-(a-C:H) z wierzchnią warstwą amorficznego węgla. Charakteryzuje się małym współczynnikiem tarcia i brakiem skłonności do zacierania, ale wymaga dalszych badań w celu zwiększenia odporności na pękanie wskutek wysokich nacisków jednostkowych.
- Pozytywny wpływ smarów na przebieg procesów tłoczenia potwierdzono za pomocą symulacji numerycznych i prób tłoczenia sferycznych czasz. Wykazano, że smarowanie powoduje zwiększenie granicznej głębokości tłoczenia i zmniejszenie siły potrzebnej do ukształtowania wytłoczki.
- Badania korozyjne wykazały, że smary technologiczne na bazie olejów roślinnych mogą stanowić czasową ochronę. Czas ten zależy od gatunku blachy i rodzaju smaru. Lepszą ochronę przed korozją wykazywał smar z dodatkiem kwasu stearynowego.
- Przeprowadzona próba zmywalności w stosunku do smarów nr 1.11B i nr 1.11S wskazuje, że są to smary, które łatwo i skutecznie można usunąć z powierzchni blach przy użyciu np. 5% roztworu detergentu w postaci biodegradowalnego płynu do mycia naczyń „Ludwik” i gorącej wody.

4. PODSUMOWANIE PRACY

Blachy stosowane w przemyśle lotniczym to przeważnie blachy charakteryzujące się wysoką odpornością na korozję, a więc są to głównie blachy ze stopów na bazie niklu, kobaltu i żelaza oraz blachy z materiałów nieżelaznych, takich jak: stopy aluminium, czy tytan i jego stopy. Chociaż procesy tłoczenia blach dają możliwość otrzymywania wyrobów od drobnych detali po duże elementy typu poszycia samolotów, wyrobów o prostej lub złożonej geometrii, a nade wszystko zapewniają wyrobom tłoczonym dużą lekkość i wytrzymałość, jakiej nie można uzyskać innymi metodami wytwarzania, to ich stosowanie w przemyśle lotniczym jest ograniczone. Wynika to z faktu, że po pierwsze blachy te charakteryzują się niską tłocznością w temperaturze otoczenia, a po drugie mają *niekorzystne właściwości tribologiczne*, a ich kształtowanie wiąże się z koniecznością pokonywania wielu barier technologicznych.

Biorąc pod uwagę aspekt tribologiczny należy nie tylko dążyć do obniżania oporów tarcia podczas tłoczenia, ale również do ograniczania skłonności do nalepiania się kształtowanego materiału na narzędzia, zwłaszcza w przypadku kształtowania blach aluminiowych i tytanowych. Zjawisko to można ograniczyć bądź całkowicie wyeliminować poprzez stosowanie odpowiednich smarów technologicznych i odpowiedniej obróbki powierzchniowej narzędzi.

Przeprowadzone w pracy badania eksperymentalne w oparciu o opracowane ekologiczne smary technologiczne oraz symulacje numeryczne procesu kształtowania sferycznych czasz potwierdziły słuszność postawionych tez, a założone cele pracy zostały osiągnięte.

W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej procesu kształtowania sferycznych czasz oraz badań eksperymentalnych można sformułować następujące wnioski:

- o charakterze poznawczym:
 - możliwość uzyskiwania poprawnie ukształtowanych wytłoczek zależy nie tylko od tłoczności blach, ale i od ich właściwości tribologicznych,
 - tarcie znacząco wpływa na rozkład odkształceń w wytłoczkach, a co za tym idzie na pocienienie ich ścianek, co w skrajnym przypadku prowadzi do pękania,
 - niekorzystne właściwości tribologiczne objawiają się głównie dużą adhezją, zwłaszcza aluminium i tytanu do stalowych narzędzi, co sprzyja tworzeniu się połączeń adhezyjnych, a w efekcie nalepień kształtowanego materiału na narzędziach formujących,
 - wykruszające się nalepienia sprzyjają pogorszeniu się jakości powierzchni wytłoczek oraz przyspieszeniu zużycia narzędzi,
 - duża skłonność, zwłaszcza aluminium i tytanu do nalepiania na narzędziach kształtujących utrudnia otrzymywanie wytłoczek o gładkiej powierzchni zewnętrznej, zatem konieczne jest stosowanie smarów technologicznych, zapobiegających bezpośredniemu kontaktowi powierzchni trących

- o charakterze praktycznym:
 - ze względu na ochronę środowiska, w celu skutecznego obniżenia oporów tarcia podczas tłoczenia blach stosowanych w lotnictwie, można stosować smary na bazie olejów roślinnych z dodatkiem nietoksycznego kwasu borowego lub stearynowego,
 - z uwagi na fakt, że zarówno kwas borowy, jak i kwas stearynowy trudno rozpuszczają się w wodzie i olejach, można je nanosić na cienką warstwę filmu olejowego metodą napyłania (*zgłoszenie patentowe nr P.409887 z dnia 21.10.2014 r.*) przed operacją tłoczenia,
 - ze względu na możliwość przerywania filmu smarnego wskutek wysokich nacisków jednostkowych występujących w procesach tłoczenia blach celowym jest stosowanie powłok antyadhezyjnych na narzędziach, jako dodatkowego zabezpieczenia przed tworzeniem się połączeń adhezyjnych,
 - przy doborze smaru technologicznego oraz powłoki antyadhezyjnej należy uwzględnić: rodzaj kształtowanego materiału (aluminium, tytan, stal), warunki eksploatacji oraz koszt smaru i zastosowanej obróbki powierzchniowej narzędzi. Opracowane smary na bazie olejów roślinnych są tanie, łatwe do sporządzenia i nie zawierają toksycznych substancji. Spośród badanych powłok skuteczną i najtańszą będzie metoda napawania matryc brązem aluminiowym. Powłoka wielowarstwowa napyłana laserowo Cr/Cr₂N-(a-C:H) choć nie wykazuje żadnej skłonności do nalepiania kształtowanego materiału na narzędzie i daje niski współczynnik tarcia, to jest powłoką drogą i wymaga dalszych badań w celu poprawy odporności na duże naciski jednostkowe. Mimo to uzyskane wyniki napawają optymizmem, że w przyszłości może być możliwym całkowite wyeliminowanie smarowania z procesów tłoczenia blach.

Niniejsza praca stanowi w miarę kompleksowy zasób wiedzy na temat zjawisk tribologicznych podczas kształtowania wyrobów z blach stosowanych w przemyśle lotniczym metodami tłoczenia na zimno i można przyjąć, że jest skromnym, ale istotnym wkładem w lepsze poznanie i zrozumienie tych procesów. Praca koncentruje się zwłaszcza na procesach związanych z kształtowaniem blach aluminiowych (Al2024), tytanowych (Gr 2) i stalowych (5604). Wiele uwagi poświęcono rozwiązywaniu problemów tribologicznych występujących podczas ich tłoczenia na zimno.

Zamieszczone w pracy wyniki analiz numerycznych i badań doświadczalnych oraz wynikające stąd wnioski dają możliwość ich wykorzystania w zakładach zajmujących się plastycznym kształtowaniem blach trudnoodkształcalnych. Jest to szczególnie istotne, gdyż z uwagi na konieczność ciągłego obniżania ciężaru konstrukcji poszukuje się nie tylko materiałów lekkich, ale i technologii pozwalających na obniżenie ciężaru wyrobów. Procesy tłoczenia blach stanowią metodę pozwalającą na wyeliminowanie ciężkich monolitycznych struktur odlewanych i zastąpienie ich lekkimi wytrzymałymi strukturami powłokowymi.

Dzięki opracowaniu receptury ekologicznych smarów na bazie olejów roślinnych oraz sposobu ich nanoszenia na blachy będzie możliwe nie tylko uzyskanie

zmniejszenia oporów tarcia podczas kształtowania blach i ograniczenia ich nalepiania, ale również zwiększenie dbałości o środowisko naturalne.

ZAŁĄCZNIK – OSZACOWANIE NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH

Zdając sobie sprawę z faktu, że każdy pomiar jest obarczony niepewnością pomiarową (błędem) w niniejszym załączniku przedstawiono ocenę dokładności i wiarygodności pomiarów, tzn. ocenę niepewności wyników doświadczalnych, opartą na zaleceniach Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej ISO [114, 115].

Błędy pomiarowe tzw. błędy grube, które z łatwością zauważano podczas analizy wyników pomiarów tej samej wielkości, były eliminowane poprzez ich usuwanie z serii wyników, lub gdy istniała możliwość poprzez powtórzenie doświadczenia.

W przypadku pomiarów bezpośrednich, np. podczas pomiaru głębokości wytłoczenia oraz siły tłoczenia niepewność systematyczna wynikała z klasy dokładności zastosowanych przyrządów pomiarowych i wynosiła odpowiednio: $\Delta h_1 = 0,1$ mm i $\Delta F_1 = 0,2$ kN oraz niepewności odczytu określonej przez obserwatora jako $\Delta h_2 = 0,1$ mm i $\Delta F_2 = 0,2$ kN, a zatem maksymalna niepewność systematyczna pomiaru wynosiła odpowiednio $\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2$ oraz $\Delta F = \Delta F_1 + \Delta F_2$. Uwzględniając obliczone wartości niepewności systematycznych wyniki pomiaru siły tłoczenia i głębokości wytłoczek zawarto w tabelach 12-29.

Tabela 12. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania - Al2024 bez smaru

Głębokość wytłoczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
8,4	0,2	2,4	9,0	9,1	0,43	9,0±0,31
9,3	0,2	2,2				
8,7	0,2	2,3				
9,3	0,2	2,2				
9,2	0,2	2,2				
8,9	0,2	2,2				
8,2	0,2	2,4				
9,3	0,2	2,2				
8,8	0,2	2,3				
9,5	0,2	2,1				

Tabela 13. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania - Al2024 bez smaru

Siła tłoczenia F	Niepewność systematyczna pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
11,9	0,4	3,36	12,0	12,0	0,25	12,0±0,18
11,6	0,4	3,45				
12,4	0,4	3,23				
12,2	0,4	3,28				
12,0	0,4	3,33				
12,2	0,4	3,28				
11,8	0,4	3,39				
12,3	0,4	3,25				
12,0	0,4	3,33				
11,9	0,4	3,36				

Tabela 14. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania - Al 2024 w obecności smaru nr 1.11B

Głębokość wytłoczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
10,2	0,2	2,0	10,3	10,2	0,51	10,3±0,36
9,9	0,2	2,0				
9,7	0,2	2,1				
10,2	0,2	2,0				
10,4	0,2	1,9				
9,8	0,2	2,0				
11,0	0,2	1,8				
11,1	0,2	1,8				
10,7	0,2	1,9				
9,8	0,2	2,0				

Tabela 15. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania - Al 2024 w obecności smaru nr 1.11B

Siła tłoczenia F	Niepewność systematyczna pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
14,2	0,4	2,82	14,0	14,1	0,31	14,0±0,22
13,8	0,4	2,90				
13,9	0,4	2,88				
13,7	0,4	2,92				
14,1	0,4	2,84				
14,0	0,4	2,86				
14,5	0,4	2,76				
13,4	0,4	2,99				
14,1	0,4	2,84				
14,2	0,4	2,82				

Tabela 16. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania - Al 2024 w obecności smaru nr 1.11S

Głębokość wytlóczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
9,9	0,2	2,02	10,2	10,3	0,42	10,2±0,3
10,7	0,2	1,87				
9,8	0,2	2,04				
11,0	0,2	1,82				
10,4	0,2	1,92				
9,9	0,2	2,02				
10,3	0,2	1,94				
10,2	0,2	1,96				
9,7	0,2	2,06				
10,5	0,2	1,90				

Tabela 17. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania - Al 2024 w obecności smaru nr 1.11S

Siła tłoczenia F	Niepewność systematyczna pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
14,3	0,4	2,80	14,0	14,3	0,66	14,0±0,48
14,0	0,4	2,86				
12,8	0,4	3,13				
12,9	0,4	3,10				
13,8	0,4	2,90				
14,2	0,4	2,82				
14,4	0,4	2,78				
14,5	0,4	2,76				
14,8	0,4	2,70				
14,3	0,4	2,80				

Tabela 18. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – Ti Gr 2 bez smaru

Głębokość wytlóczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
22,4	0,2	0,89	21,0	21,4	1,1	21,0±0,85
19,8	0,2	1,01				
21,3	0,2	0,94				
22,0	0,2	0,91				
19,9	0,2	1,01				
21,4	0,2	0,93				
21,0	0,2	0,95				
22,2	0,2	0,90				
21,5	0,2	0,93				
18,7	0,2	1,07				

Tabela 19. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – Ti Gr 2 bez smaru

Siła tłoczenia F	Niepewność systematyczna pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
43,0	0,4	0,93	41,2	42,1	3,05	41,2±2,19
42,5	0,4	0,94				
39,8	0,4	1,01				
45,0	0,4	0,89				
44,3	0,4	0,90				
41,8	0,4	0,96				
42,5	0,4	0,94				
39,0	0,4	1,03				
38,4	0,4	1,04				
35,0	0,4	1,14				

Tabela 20. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – Ti Gr 2 w obecności smaru nr 1.11B

Głębokość wytłoczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
21,8	0,2	0,92	20,8	21,3	1,2	20,8±0,8
21,4	0,2	0,93				
19,8	0,2	1,01				
18,9	0,2	1,06				
21,4	0,2	0,93				
22,0	0,2	0,91				
19,9	0,2	1,01				
19,7	0,2	1,02				
21,2	0,2	0,94				
18,9	0,2	0,91				

Tabela 21. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – Ti Gr 2 w obecności smaru nr 1.11B

Siła tłoczenia F	Niepewność systematyczna pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
28,0	0,4	1,43	28,2	29,0	2,3	28,2±2,19
30,4	0,4	1,32				
28,5	0,4	1,40				
24,2	0,4	1,65				
32,1	0,4	1,25				
30,1	0,4	1,33				
29,5	0,4	1,36				
30,3	0,4	1,32				
22,1	0,4	1,81				
27,0	0,4	1,48				

Tabela 22. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – Ti Gr 2 w obecności smaru nr 1.11S

Głębokość wytlóczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
19,7	0,2	1,02	20,8	21,1	1,0	20,8±0,74
19,6	0,2	1,02				
19,9	0,2	1,01				
22,0	0,2	0,91				
21,8	0,2	0,92				
21,6	0,2	0,93				
21,8	0,2	0,92				
19,4	0,2	1,03				
21,1	0,2	0,95				
21,0	0,2	0,95				

Tabela 23. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – Ti Gr 2 w obecności smaru nr 1.11S

Siła tłoczenia F	Niepewność systematycz- na pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
30,0	0,4	1,33	30,2	29,9	1,4	30,2±1,04
28,3	0,4	1,41				
32,4	0,4	1,23				
33,0	0,4	1,21				
29,1	0,4	1,37				
29,8	0,4	1,34				
30,2	0,4	1,32				
30,0	0,4	1,33				
29,5	0,4	1,36				
29,4	0,4	1,36				

Tabela 24. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – stal 5604 bez smaru

Głębokość wytlóczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
8,9	0,2	8,9	9,2	9,1	1,0	9,2±0,24
9,4	0,2	9,4				
9,2	0,2	9,2				
8,9	0,2	8,9				
9,1	0,2	9,1				
9,1	0,2	9,1				
9,5	0,2	9,5				
9,9	0,2	9,9				
8,8	0,2	8,8				
9,0	0,2	9,0				

Tabela 25. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – stal 5604 bez smaru

Siła tłoczenia F	Niepewność systematycz- na pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
38,4	0,4	1,04	33,8	34,6	3,2	33,8±2,28
35,2	0,4	1,14				
28,9	0,4	1,38				
29,8	0,4	1,34				
30,5	0,4	1,31				
35,4	0,4	1,13				
33,9	0,4	1,18				
33,2	0,4	1,20				
37,0	0,4	1,08				
35,8	0,4	1,12				

Tabela 26. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – stal 5604 w obecności smaru nr 1.11B

Głębokość wytlóczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
11,4	0,2	1,75	11,3	11,3	0,3	11,3±0,22
10,8	0,2	1,85				
11,0	0,2	1,82				
11,5	0,2	1,74				
11,8	0,2	1,69				
10,9	0,2	1,83				
11,1	0,2	1,80				
11,3	0,2	1,77				
11,5	0,2	1,74				
11,3	0,2	1,77				

Tabela 27. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – stal 5604 w obecności smaru nr 1.11B

Siła tłoczenia F	Niepewność systematyczna pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
41,3	0,4	0,97	40,4	40,8	3,3	40,4±2,38
40,5	0,4	0,99				
47,8	0,4	0,84				
36,5	0,4	1,10				
40,8	0,4	0,98				
40,9	0,4	0,98				
36,6	0,4	1,09				
42	0,4	0,95				
41,1	0,4	0,97				
37,1	0,4	1,08				

Tabela 28. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – stal 5604 w obecności smaru nr 1.11S

Głębokość wytlóczenia h	Niepewność systematyczna pomiaru Δh	Niepewność względna pomiaru δh [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
9,4	0,2	2,13	9,5	9,6	0,26	9,5±0,25
9,6	0,2	2,08				
9,6	0,2	2,08				
9,8	0,2	2,04				
8,8	0,2	2,27				
8,9	0,2	2,25				
9,8	0,2	2,04				
9,6	0,2	2,08				
9,7	0,2	2,06				
9,5	0,2	2,11				

Tabela 29. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla próby miseczkowania – stal 5604 w obecności smaru nr 1.11S

Siła tłoczenia F	Niepewność systematyczna pomiaru ΔF	Niepewność względna pomiaru δF [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
36,2	0,4	1,10	36,0	35,5	3,7	36,0±2,7
38,4	0,4	1,04				
41,8	0,4	0,96				
40,2	0,4	1,00				
39,4	0,4	1,02				
32,2	0,4	1,24				
34,8	0,4	1,15				
32,4	0,4	1,23				
30,6	0,4	1,31				
34,4	0,4	1,16				

W przypadku pomiarów pośrednich do wyznaczenia niepewności systematycznej wielkości obliczanej wykorzystywano metodę różniczki zupełnej. Ogólny wzór stosowany dla funkcji wielu zmiennych $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ przedstawia równanie [114]:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n. \quad (11)$$

Niepewność względną δ_y [%] otrzymano dzieląc Δy przez wartość funkcji $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$\delta_y [\%] = \frac{\Delta y}{y} 100\% \quad (12)$$

Przykładowo, określenie niepewności systematycznej dla wyznaczonych w próbie przeciągania pasa blachy wartości współczynnika tarcia μ , będącego funkcją dwóch zmiennych F_t i F_d , przedstawia się następująco:

$$\mu = \frac{F_t}{F_d} \quad (13)$$

gdzie: $F_t = F_c/2$ – siła tarcia, przy czym F_c – siła ciągnienia rejestrowana podczas próby przeciągania pasa blachy oraz F_d – siła z jaką matryce są dociskane do przeciąganego pasa blachy, zatem wzór (13) przyjmie postać:

$$\mu = \frac{F_c}{2F_d} \quad (43)$$

Siłę F_d wyznaczano ze wzoru $F_d = A \cdot p$, gdzie: A – powierzchnia tłoczka manometru w [mm²], a p – wartość ciśnienia, wskazywanego przez manometr o najmniejszej działce 0,2 MPa, zatem wzór (14) przyjmie postać:

$$\mu = \frac{F_c}{2A \cdot p} \quad (15)$$

Korzystając ze wzoru (11) niepewność systematyczną dla współczynnika tarcia wyznaczono jako:

$$\Delta \mu = \left| \frac{\partial \mu}{\partial F_c} \right| \Delta F_c + \left| \frac{\partial \mu}{\partial p} \right| \Delta p \quad (16)$$

Po obliczeniu pochodnych cząstkowych wzór (13) przybiera postać:

$$\Delta \mu = \frac{1}{2A \cdot p} \Delta F_c + \frac{F_c}{2A \cdot p^2} \Delta p, \quad (17)$$

przy czym: $\Delta F_c = 0,05$ [N] oraz $\Delta p = 0,2$ [MPa].

Wyniki końcowe pomiaru współczynnika tarcia dla badanych par trących w warunkach tarcia technicznie suchego i w obecności wybranych smarów technologicznych wraz z maksymalną niepewnością bezwzględną zamieszczono w tabelach 30-32 i na rysunkach 77-79. Ponadto w tabelach 30-32 zamieszczono wyniki analizy statystycznej serii pomiarów jednej wielkości, tj. wartości odchylenia średniego i standardowego oraz przedział ufności i poziom istotności.

Tabela 30. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla współczynnika tarcia wyznaczonego w próbie przeciągania pasa blachy aluminiowej 2024 przez stalowe matryce (NC10)

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu= F_t/ F_d$	Niepewność systematycz- na pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
bez smaru									
981,75	800	400	0,4074	0,082	20,01	0,464	0,458	0,031	0,464±0,003
1963,50	1800	900	0,4584	0,046	10,00				
2945,25	2700	1350	0,4584	0,031	6,67				
3927,00	3700	1850	0,4711	0,024	5,00				
4908,75	4500	2250	0,4584	0,018	4,00				
5890,50	5900	2950	0,5008	0,017	3,33				
6872,25	6800	3400	0,4947	0,014	2,86				

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu= F_t/ F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
Smar nr 1.11B									
981,75	150	75	0,076	0,015	20,03	0,067	0,072	0,008	0,067±0,006
1963,50	300	150	0,076	0,008	10,02				
2945,25	450	225	0,076	0,005	6,68				
3927,00	550	275	0,070	0,004	5,01				
4908,75	700	350	0,071	0,003	4,01				
5890,50	850	425	0,072	0,002	3,34				
6872,25	850	425	0,062	0,002	2,86				
7854,00	900	450	0,057	0,001	2,51				
8835,75	1000	500	0,057	0,001	2,23				
9817,50	1100	550	0,056	0,001	2,00				

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu = F_t / F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
Smar nr 1.11S									
981,75	150	75	0,076	0,015	20,03	0,0534	0,044	0,012	0,0534±0,009
1963,50	300	150	0,063	0,006	10,02				
2945,25	450	225	0,059	0,004	6,68				
3927,00	550	275	0,044	0,002	5,01				
4908,75	700	350	0,041	0,002	4,01				
5890,50	850	425	0,038	0,001	3,34				
6872,25	850	425	0,044	0,001	2,87				
7854,00	900	450	0,051	0,001	2,51				
8835,75	1000	500	0,062	0,001	2,23				
9817,50	1100	550	0,056	0,001	2,00				

Tabela 31. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla współczynnika tarcia wyznaczonego w próbie przeciągania pasa blachy tytanowej Gr. 2 przez stalowe matryce (NC10)

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnięcia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu = F_t / F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
bez smaru									
981,75	800	400	0,483	0,097	20,01	0,492	0,499	0,032	0,492±0,04
1963,50	1800	900	0,441	0,045	10,00				
2945,25	2700	1350	0,509	0,034	6,67				
3927,00	3700	1850	0,499	0,025	5,00				
4908,75	4500	2250	0,526	0,021	4,00				

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu = F_t / F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
Smar nr 1.11B									
981,75	150	75	0,102	0,020	20,03	0,070	0,071	0,015	0,07±0,011
1963,50	300	150	0,089	0,009	10,01				
2945,25	450	225	0,076	0,005	6,68				
3927,00	550	275	0,070	0,004	5,01				
4908,75	700	350	0,071	0,003	4,01				
5890,50	850	425	0,059	0,002	3,34				
6872,25	850	425	0,055	0,002	2,86				
7854,00	900	450	0,064	0,002	2,51				
8835,75	1000	500	0,057	0,001	2,23				
9817,50	1100	550	0,061	0,001	2,00				

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu = F_t / F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
Smar nr 1.11S									
981,75	150	75	0,102	0,020	20,03	0,093	0,089	0,027	0,093±0,047
1963,50	300	150	0,064	0,006	10,02				
2945,25	450	225	0,059	0,004	6,68				
3927,00	550	275	0,089	0,004	5,01				
4908,75	700	350	0,153	0,006	4,00				

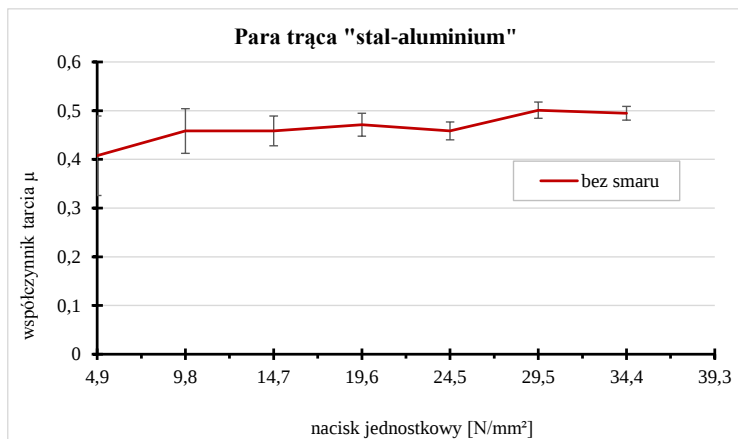
Tabela 32. Oszacowanie niepewności pomiarowych dla współczynnika tarcia wyznaczonego w próbie przeciągania pasa blachy stalowej 5604 przez stalowe matryce (NC10)

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu = F_t / F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
Bez smaru									
981,75	800	400	0,204	0,041	20,01	0,233	0,247	0,036	0,233±0,038
1963,50	1800	900	0,178	0,018	10,01				
2945,25	2700	1350	0,238	0,016	6,67				
3927,00	3700	1850	0,255	0,013	5,00				
4908,75	4500	2250	0,265	0,011	4,00				

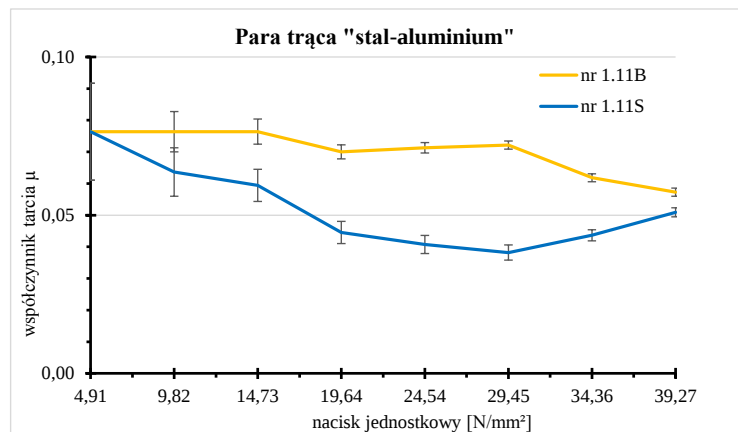
Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu = F_t / F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
Smar nr 1.11B									
981,75	150	75	0,051	0,010	20,05	0,025	0,021	0,01	0,025±0,007
1963,50	300	150	0,025	0,003	10,05				
2945,25	450	225	0,017	0,001	6,72				
3927,00	550	275	0,019	0,001	5,03				
4908,75	700	350	0,020	0,001	4,03				
5890,50	850	425	0,021	0,001	3,35				
6872,25	850	425	0,025	0,001	2,87				
7854,00	900	450	0,025	0,001	2,51				
8835,75	1000	500	0,023	0,001	2,23				
9817,50	1100	550	0,023	0,000	2,01				

Siła docisku F_d [N]	Siła ciągnienia F_c [N]	Siła tarcia $F_t=0,5 F_c$ [N]	Wsp. tarcia $\mu = F_t / F_d$	Niepewność systematyczna pomiaru $\Delta\mu$	Niepewność względna pomiaru $\delta\mu$ [%]	Średnia $\bar{\mu}$	Mediana Me	Odchylenie standardowe SD	Przedział ufności P
Smar nr 1.11S									
981,75	150	75	0,051	0,010	20,05	0,033	0,031	0,008	0,033±0,007
1963,50	300	150	0,038	0,004	10,03				
2945,25	450	225	0,025	0,002	6,70				
3927,00	550	275	0,032	0,002	5,02				
4908,75	700	350	0,031	0,001	4,02				
5890,50	850	425	0,030	0,001	3,35				
6872,25	850	425	0,029	0,001	2,87				
7854,00	900	450	0,029	0,001	2,51				
981,75	150	75	0,051	0,001	2,23				
1963,50	300	150	0,038	0,001	2,01				

a)

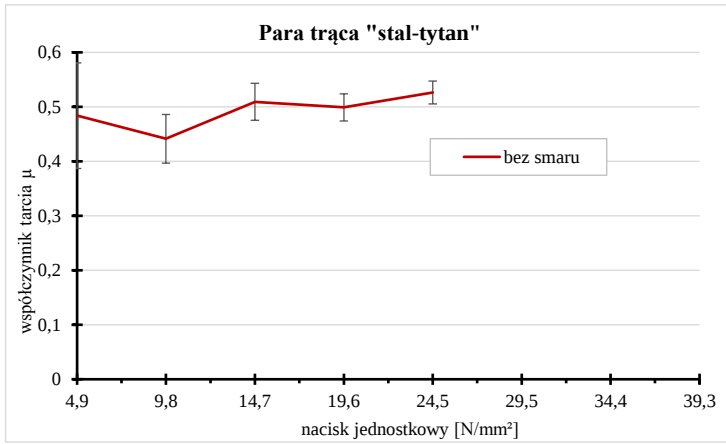


b)

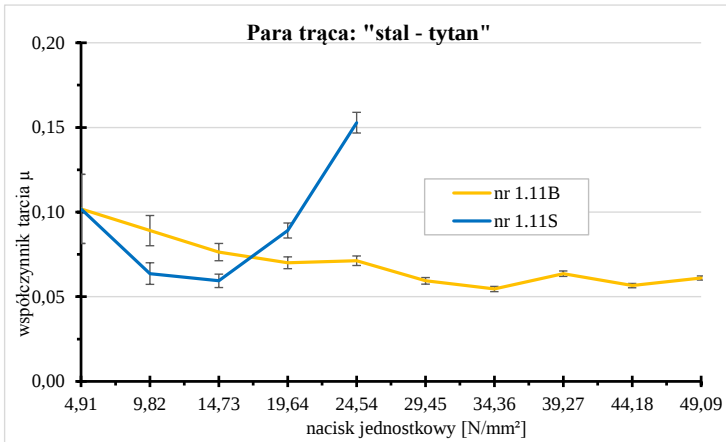


Rys. 77. Graficzne ujęcie potencjalnych wielkości błędów pomiarów współczynnika tarcia dla pary trącej „stal – aluminium”: a) bez smaru b) w obecności smarów

a)

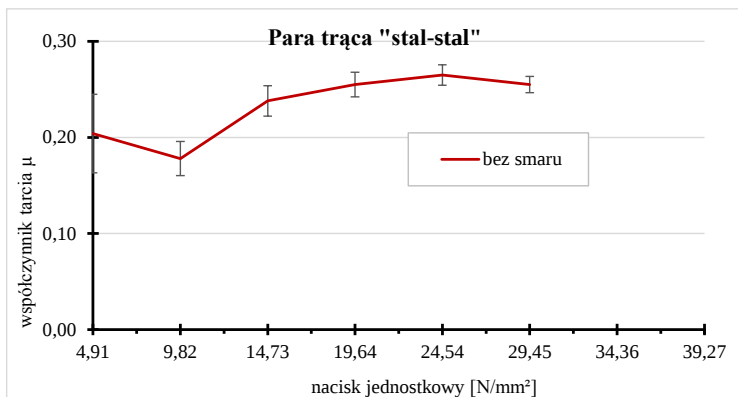


b)

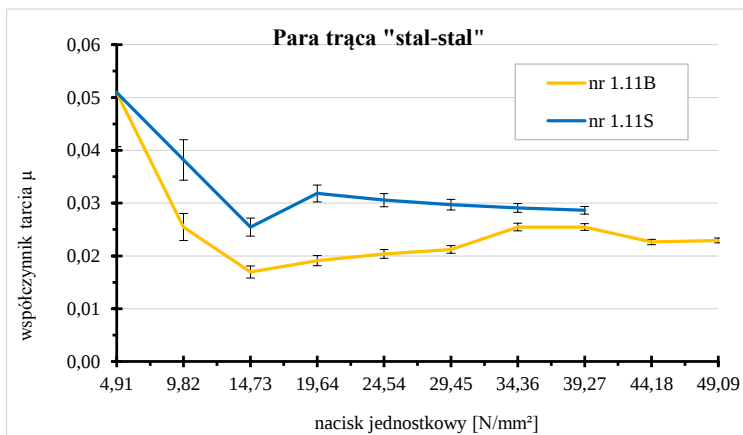


Rys. 78. Graficzne ujęcie potencjalnych wielkości błędów pomiarów współczynnika tarcia dla pary trącej „stal – tytan”: a) bez smar b) w obecności smarów

a)



b)



Rys. 79. Graficzne ujęcie potencjalnych wielkości błędów pomiarów współczynnika tarcia dla pary trącej „stal – stal”: a) bez smar b) w obecności smar

5. LITERATURA

1. Abramov A.H. i in.: *Smazocznyj material dlja listovoj szampovki korrozionno-stoikich staliej*. „Kuzn.-Stampov. Proizv.”, 1991, 11, p. 10-11
2. Adamus J., Lackner J.M., Major Ł.: *A study of the impact of anti-adhesive coatings on the sheet-titanium forming processes*, “Archives of Civil and Mechanical Engineering” 2013, 13, p. 64–71
3. Adamus J., *Characteristic of shaping of the titanium sheets by the cold working methods*, “International Journal of Applied Mechanics and Engineering”, 2006, 11/4, p. 727-733
4. Adamus J.: *Lubrication in sheet metal forming*, Proceedings of the 12th International Colloquium: TRIBOLOGY 2000 – Plus, Technische Akademie Esslingen, Germany 2000
5. Adamus J.: *Stamping of the titanium sheets*. “Key Engineering Materials”, 2009, 410-411, p. 279-288; (A)
6. Adamus J.: *The Influence of Friction and Lubrication on Sheet-Aluminium Forming Process*, Proceedings of the 14th International Colloquium Tribology: Tribology and Lubrication Engineering, Technische Akademie Esslingen, Germany 2004, p. 1813-1818
7. Adamus J.: *Tribologiczne problemy kształtowania blach tytanowych*. „Tribologia”, 2008, nr 2, s. 15-24
8. Adamus J.: *Tytan i jego stopy jako materiał stosowany na elementy tłoczone*, „Inżynieria Materiałowa”, 2009, nr 30/5 s. 310-313 (B)
9. Adamus J., Lacki P., Łyżniak J., Zawadzki M. *Analysis of spring-back during forming of the element made of AMS 5604 Steel*; PLAST-MET’2010; “Archives of Metallurgy and Materials”, 2010, nr 56/2, p. 423-430
10. Adamus J.: *Wybrane problemy kształtowania blach tytanowych*. „Obróbka Plastyczna Metali”, 2008, nr 19/4 s. 29-36
11. Adamus J.: *Zastosowanie powłok przeciwdrożdżających w narzędziach do tłoczenia*. „Tribologia”, 2003, nr 4 (190), s. 11-21
12. Adamus J., Dyja K.: *Wpływ tarcia i smarowania na proces kształtowania blach*, „Rudy i Metale Nieżelazne”, 2014, nr 59/4, s. 191-196
13. Adamus J., Dyja K., Motyka M.: *Determination of Forming Limit Diagram using Finite Element Method*, Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) Barcelona 2014
14. Adamus J., Lacki P. *Possibility of the increase in titanium sheets’ drawability*, “Key Engineering Materials”, 2013, 549, p. 31-38
15. Adamus J., Lacki P., Motyka M., Kubiak K.: *Investigation of Sheet-Titanium Drawability*, Proceedings of the 12th World Conference on Titanium Ti-2011, June 19-24, 2011, China National Convention Center (CNCC), Beijing: Beijing: Science Press, (2011), p. 337-341
16. Adamus J.: *Analiza kształtowania wyrobów tytanowych metodami obróbki plastycznej na zimno*, Praca habilitacyjna, Politechnika Częstochowska, WIMI I 2010, przechowywany w Bibliotece Politechniki Częstochowskiej

17. Alinger M.J., C.J. Van Tyne: *Evolution of the tribological characteristic of several forming die materials*, "Journal of Materials Processing Technology", 2001, 111, p. 20-24
18. Azumi K., Yasui N., Seo M.: *Changes in the properties of anodic oxide films formed on titanium during long-term immersion in deaerated neutral solutions*, "Corrosion Science", 2000, 42, p. 885-896
19. Balulescu M., Cira L., Herdan J., *Environmentally friendly metalworking fluids, Ecological and Economical Aspects of Tribology*, in: Proceedings of the 9th International Colloquium, Technische Akademie Esslingen, 11–13 January, 1994, 7.11-1–7.11-5
20. Bay N., Olsson D.D., Andreasen J.L.: *Lubricant test methods for sheet metal forming*, "Tribology International", 2008, 41, p. 844–853
21. Belosevic V.K. i in.: *Issledovanie vlijanija napolnitelja na wytjazone svojstva technologiceskich smazocznych materialov*, "Kuzn.-stampov. Proizv", 1986, 28/5, p. 17-18
22. Belosevic V.K. i in.: *Rol smazki pri listovoj stampovke*, "Avtomob. Prom", 1989, 60/11, p. 28
23. Boyer R., Welsch G., Collings E. W., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, USA, ASM, Materials Park, 1994
24. Bragg W.L.: *Introduction to crystal Analysis*, London G. Belland Sons 1928
25. Bühler H., Wagener H.W.: *Umformeigenschaften von titan und titanlegierungen* (Teil 1 und 2). Bänder Bleche Rohre, 6, 1965, p. 625-630, 677-684
26. Carcel A.C., Palomares D., Rodilla E., Pe' rez Puig M.A.: *Evaluation of vegetable oils as pre-lube oils for stamping*, "Materials and Design", 2005, 26, p. 587–593
27. Chinas-Castillo F., Spikes H.A.: *Mechanism of action of colloidal solid dispersions*, "Transaction of the ASME", 2003, 125, p. 552–557
28. Costa H.L., Hutchings I.M.: *Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing*, "Journal of materials processing technology", 2009, 209, p. 1175–1180
29. Czupryk W., Krawiec M.: *Efektywność smarów plastycznych z napelniającami w procesie głębszego tłoczenia blach stalowych*. „Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie”, 2012, 1/43, s. 53-61
30. Darendeliler H., Akkāk M., Yücesoy C.A.: *Effect of variable friction coefficient on sheet metal drawing*, "Tribology International", 2002, 35, p. 97–104
31. Dowson D.: *Progress in Tribology: A Historical Perspective*, New Directions of Tribology, Ed. M. Hutching, London, 1997
32. Dobrzański A.: *Materiały inżynierskie*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne 2006
33. Dyja K., Adamus J.: *Badania nad dobozem smarów technologicznych do tłoczenia blach aluminiowych i tytanowych*. „Tribologia”, 2014, 45/3 (255), s. 19-28
34. Dyja K., Więckowski W.: *Wpływ tarcia na proces tłoczenia blach stosowanych w lotnictwie*. Materiały IX Seminarium Naukowego „Zintegrowane studia podstaw deformacji plastycznej metali – PLASTMET 2014” Łańcut, 25-28 listopada 2014

35. Eleöd A.: *Ocena przydatności smarów do plastycznej obróbki metali. Technika smarownicza*. „Tribologia”, 1979, 6, p. 170-173
36. Erbel S., Kuczyński K., Marciniak Z.: *Obróbka plastyczna*. PWN, Warszawa, 1981
37. Erdemir A., Eryilmaz O.L., Fenske G.R.: *Self-replenishing solid lubricant films on boron carbide*, “Surf. Eng”, 1999, 15, p. 291–295
38. Erdemir A., Fenske G.R., Erck R.A., Nicholas F.A., Busch D.E., *Tribological properties of boric acid and boric-acid-forming surfaces*, Part 1: crystal chemistry and mechanism of self-lubrication of boric acid, “Lubrication Engineering”, 1991, 47, p. 168–178
39. Erdemir A., *Tribological properties of boric acid and boric-acid-forming surfaces*, Part II: mechanisms of formation and self-lubrication films on boron- and boric oxide-containing surfaces, “Lubrication Engineering”, 1991, 47, p. 179–183
40. Ferron A, *Smarowanie przy wytłaczaniu walcowych miseczek*, „Obróbka plastyczna”, 1979, 118/1, s. 5–17
41. Fratini L., Lo Casto S., Lo Valvo E.: *A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2006, 172, p. 16–21
42. Gåård A., Krakhmalev P., Bergström J.: *Influence of tool steel microstructure on origin of galling initiation and wear mechanisms under dry sliding against a carbon steel sheet*, “Wear”, 2009, 267, p. 387–393
43. Gåård A., Krakhmalev P.V., Bergström J., Hallbäck N., *Galling resistance and wear mechanisms – cold work tool materials sliding against carbon steel sheets*, “Tribology letters”, 2006, 26, p. 67–72
44. Gåård A., Krakhmalev P.V., Bergström J., *Wear mechanisms in deep drawing of carbon steel – correlation to laboratory testing*, “TriboTest”, 2008, 14, p. 1–9
45. Gierzyńska-Dolna M., *“Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali”*, Warszawa, WNT, 1983.
46. Gierzyńska-Dolna M., Adamus J.: *Smary technologiczne do procesów obróbki plastycznej stopów tytanu*. Mat. Konf. „Tytan i jego stopy”, Rzeszów-Łańcut, 1995, s. 45-57
47. Gierzyńska-Dolna M., Adamus J., Motyl M.: *Rola i zadania smarów technologicznych w procesach obróbki plastycznej metali*. Przegląd Mechaniczny, 1995, 16, s. 11-18
48. Gierzyńska-Dolna M., Adamus J.: *New Ecological Lubricants for Sheet Metal-Working and their Effect on Cup Quality*. “Tribologia”, 1998, 29/5, s. 673-680
49. Gierzyńska-Dolna M., Adamus J., Motyl M., Dąbrowski J.R.: *Badania nad doborem smarów technologicznych do tłoczenia blach*. „Obróbka Plastyczna Metali”, 1993, 2/3, s. 31-38
50. Goto K.: *The study of non-graphite dispersion type forging oil and re-used effect of actual machine*, Proceedings of the Seventh ICTP 2002, p. 769–775
51. 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, p. 757–766

52. Hadasik E. : *Analiza procesów przeróbki plastycznej stopów tytanu na podstawie badań plastometrycznych*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, 1979
53. Hardy W. B., Doubleday I.: *Boundary lubrication – the latent period and mixtures of two lubricants*, Proceedings of the Royal Society of London, 1923, 104/A, p. 25-38
54. Hebda M., Wachal A.: *Tribologia*, WNT, Warszawa, 1980
55. Heikkilä I., Slycke L.: *Influence of nitrogen alloying on galling properties of pm tool steels*, in: J. Bergström, G. Fredriksson, M. Johansson (Eds.), Proceedings of the 6th International tooling conference, Karlstad University, Sweden 2002, p. 217-226
56. Heikkilä I.: *Influence of tool steel microstructure on galling resistance against stainless steel*, in: D. Dowson et al. (Eds.), Proc. of the 30th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, INSA de Lyon Villebanne, France, 2003, p. 641-650
57. Hernández Battez, R. González, J. L. Viesca, J. E. Fernández, J. M. Díaz Fernández, A. Machado, R. Chou, and J. Riba:, *CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants*, "Wear", 2008, 265/3-4, p. 422–428
58. Hu Z.S., Dong J.X., Chen G.X.: *Study on antiwear and reducing friction additive of nanometer ferric oxide*, "Tribology International", 1998, 31 p. 355–360.
59. Hussain G., Gao L., Hayat N., Cui Z., Pang Y.C., Dar N.U.: *Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet*, "Journal of Materials Processing Technology", 2003, 203, p. 193–201
60. Jost, H. P. (ed.) *Lubrication—tribology*, "Edukacja i badania. Raport. Londyn": HMSO, 1966
61. Karlsson P., Gård A., Krakhmalev P., Bergström J.: *Galling resistance and wear mechanisms for cold-work tool steels in lubricated sliding against high strength stainless steel sheets*, "Wear", 2012, 286– 287, p. 92– 97
62. Kataoka S., Murakawa T., Aizawa T., Ike H.: *Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools*, "Surface and Coating Technology", 2004, 177-178, p. 582-590
63. Kiechle A.: *Entwicklung umweltfreundlicherer Kuhlsmierstoffe für die Umformung von Blechen*. Werkstattstechnik , 1989, 79/10, p. 577-580
64. Kishor N, D. Kumar R.– *Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method*, "Journal of materials Processing Technology", 2002, 130-131, p. 20-30
65. Kot M., Major Ł., Lackner J.: *Tribological phenomena of new kind of multilayer coatings TiN/a-C:H*, "Materials and Design", 2013, 51, p. 280-286
66. Laber S., Laber A.: *Lubrication an application properties of „Motor Life Professional” exploitation agent*, Wyd. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra, 2004
67. Lacki P. *Modelowanie tarcia w procesach objętościowej obróbki plastycznej*, Praca habilitacyjna, Politechnika Częstochowska, WIMiI 2010, przechowywany w Bibliotece Politechniki Częstochowskiej

68. Lacki P., Adamus J., Więckowski W., Winowiecka J.: *Modelling of Stamping Process of Titanium Tailor-Welded Blanks*, "Computer Methods in Materials Science", 2013, 13/2, p. 339-344
69. Lawrowski Z.: *Tribologia – tarcie, zużycie i smarowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1993
70. 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, p. 60–63
71. Liang H., Jahanmir S., *Boric acid as an additive for core-drilling of alumina*, "J. Tribol.", 1995, 117, p. 65–73
72. Lovell M., Higgs C.F., Deshmukh P., Mobley A.: *Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants*, "Journal of Materials Processing Technology", 2006, 177, p. 87–90
73. Määttä A., Vuoristo P., Mäntylä T., *Friction and adhesion of stainless steel strip against tool steels in unlubricated sliding with high contact load*, "Tribology International", 2001, 34, s. 779–786
74. Major L., Lackner J. M., Major B.: *Bio-tribological TiN/Ti/a-C:H multilayer coatings development with a built-in mechanism of controlled wear*; "RSC Advances", 2014, 4, p. 21108–21114
75. Major Ł., Kot M., Major B.: *Mikrostrukturalna analiza mechanizmów zużycia powłok mono- i wielowarstwowych bazujących na składzie TiN i a-C-H*, „Problemy Eksploatacji”, 2011, 4, s. 19-25
76. Marczak R.: *Zużycie tribologiczne jako mechanochemiczny proces niszczenia metali*, „Ochrona przed korozją” (wydanie specjalne), 1999, 42 s. 496-503
77. Matuszak A.: *Factors influencing friction in steel sheet forming*, "Journal of Materials Processing Technology", 2000, 106, p. 250-253
78. McClure T.F., Guggen M.D.: *Microlubrication in metal machining operations*, "Lubrication Engineering", 2002, 58(12), p. 15-21
79. Michalczewski R., Piekoszewski W.: *Wpływ dodatków AW/EP do olejów na zacieranie i powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów pokrytych powłoką WC/C*, „Zagadnienia Eksploatacji Maszyn”, 2006, 41/3, s. 67-80
80. Miller P.R., Patel H.: *Using complex polymeric esters as multifunctional replacements for chlorine and other additives in metalworking*, "Lubrication Engineering", 1997, 53, p. 31–33
81. Mori K., Murao T., Harada Y.: *Multi-stage cold deep drawing of long pure titanium cups using coloured sheets for prevention of seizure*, "Annals of the CIRP", 2003, 52/1, p. 237-240
82. Mori K., Murao T., Harada Y.: *Prevention of seizure by oxide coatings in multi-stage deep drawing of pure titanium sheets*, "Transaction of the NAMRI/SME", 2002, 30, p. 25-318
83. Mori K., Maki S., Tanaka Y.: *Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating*, "CIRP Annals - Manufacturing Technology", 2005, 54, p. 209–212
84. Mosleh M., Atnafu N. D., Belk J. H., Nobles O. M.: *Modification of sheet metal forming fluids with dispersed nanoparticles for improved lubrication*, "Wear", 2009, 267, p. 1220–1225

85. Nakamura Shun-ichi, Homma Koji: *Durability of Titanium-Clad Steel Plates as an Anti-Corrosion System*, "Structural Engineering International", 2000, 10/4, p. 262-265
86. Okazaki Y., Ito Y., Kyo K., Tateishi T.: *Corrosion resistance and corrosion fatigue strength of new titanium alloys for medical implants without V and Al*, "Materials Science and Engineering", 1996, A213 p. 138-147
87. Piekoszewski, W. Tuszyński, W.: *Właściwości przeciwdrożdżycowe, przeciwzatarciowe i trwałość zmęczeniowa węzła tarcia jako efekt rodzaju i stężenia dodatków smarowościowych w oleju*, „Tribologia : tarcie, zużycie, smarowanie”, 2003, 5, s. 203-220
88. Pellegrini D, Lechler J., Ghiotti A, Bruschi A, and Merklein M., *Interlaboratory Comparison of Forming Limit Curves for Hot Stamping of High Strength Steels*, "Key Engineering Materials", 2009, 410-411, p. 297–304
89. Podgornik B., Jacobson S., Hogmark S.: *Influence of EP and AW additives on the tribological behaviour of hard low friction coating*, "Surface & Coating Technology", 2003, 165, s. 168-175
90. Pouilleau J., Devilliers D., Garrido F., Durand-Vidal S., Mahe E. *Structure and composition of passive titanium oxide films*, "Materials Science and Engineering", 1997, B47, p. 235-243
91. Rao K., Wei J., *Performance of a new dry lubricant in the forming of aluminum alloy sheets*, "Wear", 2001, 249, p. 86–93
92. Rao K.P., Xie C.L.: *A comparative study on the performance of boric acid with several conventional lubricants in metal forming processes*, "Tribology International", 2006, 39, p. 663–668
93. Rapoport L., Feldman Y., Homyonfer M., Cohen H., Sloan J., Hutchison J.L., Tenne R.: *Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship*, "Wear", 1999, 225–229, p. 975–982
94. Romanowski W.P.: *Poradnik obróbki plastycznej na zimno*. WNT Warszawa, 1976
95. Sandberg O.: *Advanced nitrogen alloyed steels – properties and application experiences*, in: P. Beiss, C. Broeckmann, S. Franke, B. Keysserlitz (Eds.), *Proceedings of the 8th International tooling conference*, RWTH Aachen University, Germany 2009, p. 357-368
96. Sieniawski J.: *Stopy aluminium stosowane w technice lotniczej*. „Mechanik”, 2009, 7, p. 649-654
97. Sułek M.: *Wodne roztwory surfaktantów w inżynierii materiałowej systemów tribologicznych*, Politechnika Radomska, PTM, 2009
98. Szczerek M, Wiśniewski M, Bajer J.: *Tribologia i tribotechnika*. Radom: Wydaw. Instytutu Technologii Eksploatacji, 2000
99. Takeuch M., Ikesue F., Kashimura N.: *Development of environmentally friendly lubricant with high performance and simple treatment for cold forging*, *Proceedings of the 6th ICTP*, 1999, p. 383–390
100. Tisza M., Tisza Jr M.: *Development of a Capp system for lubricating selection in sheet metal forming*, *Proceedings of the 7th ICTP*, 2002, p. 751–756

101. Wang Z.G.: *Tribological approaches for green metal forming*, „Journal of Materials Processing Technology” 2004, 151, p. 223–227
102. Więckowski W., Adamus J.: *Badania tarciovo-zużyciowe tytanu i stopów aluminium*, „Obróbka Plastyczna Metali”, 2013, 24/3, s. 169-178
103. Wilhelm H.: *Das verhalten von blechen aus titan und titanlegierungen beim biegen im v-gesenk*, “Bänder Bleche Rohre”, 1976, 7, s. 284-288
104. Wilson W.R.D., *Friction and lubrication in bulk metal-forming processes*, “Journal of Applied Metalworking”, 1979, 1, p. 7–19
105. Wilson W.R.D.: *Friction models for metal forming in the boundary lubrication regime*, “Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions” of the ASME, 1988, 113, p. 60–68
106. Wu Y.Y., Tsui W.C., Liu T.C.: *Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives*, “Wear”, 2007, 262, p. 819–825
107. Zhou R., Cao J., Wang Q. J., Meng F., Zimowski K., Cedric Xia Z.: *Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet*, “Journal of Materials Processing Technology”, 2011, 211, p. 1643– 1649

NORMY:

108. Norma: ASTM D88 *Standard Test Method for Saybolt Viscosity + nomogramy i tablice do przeliczania jednostek lepkości względnej na jednostki lepkości dynamicznej i kinematycznej*
109. Norma: PN-EN ISO 9227 2012 *Badania korozyjne w sztucznych atmosferach. Badania w rozpylonej solance*
110. Norma: ASTM-B 117-2011 *Standardowa metodyka obsługi aparatu z komorą do badań w natrysku (mgłę) solnej*
111. Norma: PN-ISO 10113:1994 *Metale. Blachy cienkie i taśmy. Wyznaczanie współczynnika anizotropii plastycznej*
112. Norma: PN-EN ISO 6892-1:2010 *Metale. Próba rozciągania . Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*
113. Normy: PN-EN ISO 10275:2014-08 *Metale. Blachy i taśmy. Wyznaczanie wykładnika umocnienia przy rozciąganiu*
114. Normy: *Guide to Expression of Uncertainty in Measurements*, ISO 1995, Switzerland. Tłumaczenie: Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. Warszawa: Główny Urząd Miar 1999
115. Normy: *Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with minor corrections: JCGM 100:2008)*. Wyd. Joint Committee for Guides in Metrology
116. PAMStamp 2G

TRIBOLOGICZNE ASPEKTY KSZTAŁTOWANIA BLACH STOSOWANYCH W PRZEMYSŁE LOTNICZYM

STRESZCZENIE

Biorąc pod uwagę fakt, że blachy stosowane w przemyśle lotniczym muszą charakteryzować się dużą odpornością na korozję, są to głównie blachy ze stopów na bazie niklu, kobaltu i żelaza oraz blachy z materiałów nieżelaznych, takich jak: stopy aluminium, czy tytan i jego stopy. Niestety blachy wykonane z tych materiałów cechują się niską tłocznością i niekorzystnymi właściwościami tribologicznymi. Najgorsze właściwości tribologiczne posiadają stopy aluminium i stopy tytanu – obie grupy cechują się dużą skłonnością do przenoszenia się na narzędzia (tworzenia nalepień kształtowanego materiału na narzędziach) i zacierania, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia procesy kształtowania. W celu poprawy warunków tribologicznych konieczne jest skuteczne rozdzielenie materiałów pary trącej: „narzędzie - kształtowana blacha”, np. poprzez stosowanie smarów technologicznych bądź powłok antyadhezyjnych. Stąd też, jako główny cel pracy przyjęto opracowanie taniej i prostej receptury smaru ekologicznego oraz sposobu skutecznego nanoszenia środka smarnego na blachę w celu ułatwienia płynięcia materiału podczas tłoczenia i osiągnięcia większych, równomiernie rozłożonych w całej objętości materiału odkształceń. Badania prowadzone w ramach niniejszej pracy koncentrowały się na procesach związanych z kształtowaniem blach: aluminiowej Al2024, tytanowej Gr 2 i stalowej 5604. Opracowane receptury ekologicznych smarów na bazie olejów roślinnych oraz sposób ich nanoszenia na blachy (zgłoszenie patentowe nr P.409887 z dnia 21.10.2014r.) umożliwiły nie tylko zmniejszenie oporów tarcia podczas kształtowania blach i ograniczenie ich nalepiania, ale również zwiększenie dbałości o środowisko naturalne. Niniejsza praca stanowi w miarę kompleksowy zasób wiedzy na temat zjawisk tribologicznych podczas tłoczenia na zimno elementów powłokowych z blach stosowanych w przemyśle lotniczym i można przyjąć, że jest skromnym, ale istotnym wkładem w lepsze poznanie i zrozumienie tych procesów.

Badania realizowano w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

TRIBOLOGICAL ASPECTS IN FORMING SHEETS USED IN AVIATION

ABSTRACT

Iron, nickel, and cobalt-based alloys as well as non-ferrous metals such as aluminium alloys, titanium and its alloys are the main sheet-metals used in the aerospace industry due to the fact that they have to satisfy requirements of high resistance to corrosion. Unfortunately, sheets made of these materials are characterised by low formability and unfavourable tribological properties. Aluminium and titanium alloys have the worst tribological properties. Both material groups are characterised by a high susceptibility to lumping on tool surfaces and galling, which make the forming processes difficult or even impossible. In order to improve the tribological conditions, it is necessary to separate the materials of the frictional pair "tool – deformed sheet", eg. by the use of technological lubricants or anti-adhesive layers. Therefore, in order to improve material flow during the sheet-metal forming process and achieve a more even strain distribution in the whole volume of the material, the development of an inexpensive and easy recipe for an ecological lubricant and an effective method of its application on the sheet was the main goal of the work. The research carried out in the work concentrated on the processes occurring during the sheet-metal forming of 2024 aluminium, Gr 2 titanium and 5604 steel. The developed recipes of ecological lubricants based on vegetable oils and the method of their application on the sheet (patent application no P.409887 dated 21.10.2014) made it possible not only to reduce the frictional resistance during sheet-metal forming and a reduce lumping but also to improve respect for the environment. The work constitutes a comprehensive knowledge on tribological phenomena during the cold forming of thin-walled components made of sheets used in the aerospace industry, and it can be assumed that it is a modest but important contribution to widening the knowledge and understanding of these processes.

Financial support of Structural Funds in the Operational Programme - Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund - Project No POIG.0101.02-00-015/08 is gratefully acknowledged.