

Dr hab. inż. Jacek Mucha, prof. PRz.,

Katedra Konstrukcji Maszyn

E-mail: j_mucha@prz.edu.pl

Dr inż. Jan Jaworski

Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji

E-mail: jjktmiop@prz.edu.pl

Wydział budowy Maszyn i Lotnictwa

Politechnika Rzeszowska

al. Powstańców Warszawy 8

35-959 Rzeszów, Polska

Zużycie powierzchni narzędzi podczas eksploatacji w procesie wykrawania blachy krzemowej

Słowa kluczowe: *zużycie narzędzi, stale szybko tnące, wykrawanie, blachy krzemowe*

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono opis mechanizmu zużycia powierzchni roboczych stempli wykrawających elementy z blachy krzemowej. Badania wykazały różnice w zużyciu narzędzi dla stali szybko tnącej w przypadku dwóch procesów jej wytwarzania (odlewnia i spiekania). Wykazano wpływ dodatkowej powłoki z TiN na intensywność degradacji powierzchni przyłożenia stempli wykrawających. Obserwacji poddano zmiany obszaru umocnienia materiału wykrawanego w pobliżu linii cięcia. Określono wpływ zużycia stempli na zasięg zmian twardości materiału blachy krzemowej M530-50A.

1. Wprowadzenie

Wytwarzanie elementów wykrawanych o określonej jakości wymaga doboru optymalnych parametrów procesu [4, 6, 11, 30]. Gréban et al. w swojej pracy [6] opublikowali efekty wykrawania elementów ze stopu miedzi. Tekiner et al. [30] przedstawił wyniki analizy eksperymentalnej wykrawania elementów z blach aluminiowych. Zaś Hernández i pozostali autorzy pracy [11] przedstawili w jaki sposób zmiana geometria krawędzi tnącej stempli wpływa na jakość powierzchni przecięcia. Wykazali wpływ wielkości luzu wykrawania i średnicy stempli na przykładzie blachy stalowej kwasoodpornej (AISI 304).

Podczas wykrawania występuje pewna zależność pomiędzy zużyciem stempli a zmianą wielkości zadzioru na krawędzi wyrobu. Badania wpływu zużycia stempli ze stali szybko tnących z pochyłą krawędzią czołową przedstawili Cheung i pozostali [4]. Przypadek wykrawania elementów ze stopu aluminium analizowali Ravela et al. [28]. Zużycie powierzchni stempli tnących podczas wykrawania powoduje zmianę jakości powierzchni przecięcia [8, 9, 14, 17÷19]. Wielkość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej znacząco wpływa na energochłonność procesu wykrawania [16]. Zużycie narzędzi, geometria oraz luz wpływają na wielkość zadzioru, którą można zmniejszyć stosując odpowiedni układ narzędzi [7].

Blachy elektrotechniczne stosowane do budowy maszyn elektrycznych mają stosunkowo dużą indukcję i przenikalność oraz dobrą wykrawalność. Właściwości magnetyczne materiału są zdeterminowane w procesie jego produkcji [31]. Do oceny wykrawalności blach stosuje się szereg kryteriów, z których ważniejsze to:

- odporność materiału na odkształcenia wykrawanych części,
- wartość wysokości zadzioru na wyrobie,
- odporność powłok na uszkodzenia podczas wykrawania,
- umocnienie materiału w pobliżu powierzchni przecięcia,
- jakość geometryczna materiału przeznaczonego do wykrawania,
- trwałość narzędzi tnących,
- jakość powierzchni przecięcia wykrawanych części.

Towarzyszące procesowi wykrawania nadmierne zużycie narzędzi tnących doprowadza do znacznych zmian i wielkości obszaru koncentracji odkształceń plastycznych w wykrawanym materiale w pobliżu powierzchni przecięcia [23, 24]. W odkształconym materiale blachy krzemowej, pojawia się niepożądana pozostałość magnetyczna, która pogarsza własności magnetyczne blachy - m.in. powodując zwiększenie prądu wymaganego dla prawidłowego procesu przemagnesowywania się ziaren struktury blachy podczas transformacji napięcia [31]. Zjawisko zaburzenia przepływu prądów wirowych jest pomocne w innych sytuacjach i jest stosowane w badaniach jakości po obróbce elementów oraz analizie wad wewnętrznych poeksploatacyjnych [13]. W przypadku maszyn elektrycznych nie jest korzystne powiększanie stratności magnetycznej zwłaszcza w przypadku blach stosowanych na wirniki i stojany silników asynchronicznych [24]. Jedną z metod, która pomaga zmniejszyć stratność magnetyczną jest wycinanie laserem. Jednakże jest ono kosztowne i stosunkowo niskiej wydajności [27]. W związku z tym nadal stosowane jest wykrawanie do produkcji blach wirnika i stojana. Jest już szereg prac dotyczących analizy stratności i zaburzeń pola magnetycznego blach wytwarzanych za pomocą cięcia różnymi technikami [5, 15, 20, 27, 32]. Jednak nadal wykrawanie jest jednym ze sposobów cięcia najczęściej stosowanym. Zaś typowymi materiałami stosowanymi na narzędzia do wykrawania są stale szybko tnące: M2, K945, M35, M42, ASP23, ASP30, ASP60 (*ASP-Asea Stora Process*).

W pracy przedstawiono zużycie narzędzi w procesie wykrawania elementów z blachy krzemowej. Obserwacji dokonano na poziomie makro i mikroskopowej. Opisano mechanizm zużywania się powierzchni stempli wykrawających. Zobrazowano wpływ zużytej krawędzi na rozkład średnich naprężeń w wykrawanym materiale przy zastosowaniu MES.

2. Charakterystyka materiału blachy i narzędzi

Do badań wykorzystano blachą krzemową o oznaczeniu przemysłowym M530-50A (M 45 wg AISI) (PN-EN 10106:2016-01) [26], o grubości $g=0,5 \pm 0,02$ mm. Blacha do wykrawania elementów maszyn elektrycznych otrzymywana jest poprzez walcowanie na zimno. M530-50A charakteryzuje się indukcją 1,54 T przy natężeniu pola 2500 A/m i stratności 5,3 W/kg przy indukcji 1,5 T. Właściwości mechaniczne oraz skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1 i 2. Zastosowana do badań blacha posiadała powłokę izolacyjną typu C6 (wg AISI ASTM A976 [1])

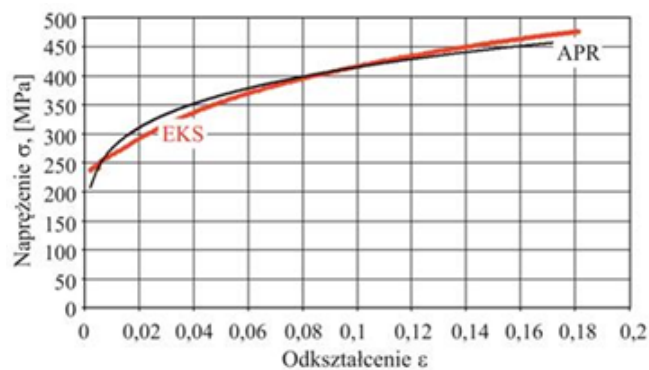
o grubości $\sim 7 \pm 1,5 \mu\text{m}$ na stronę. Krzywą umocnienia wyznaczoną w statycznej próbie rozciągania przedstawiono na rysunku 1.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne materiału blachy M530–50A

$R_{0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Z [%]	A5 [%]	$S_{0.2}$ [mm ²]	HV5	E [MPa]
245	417	33	61	10	126	2,2e+5

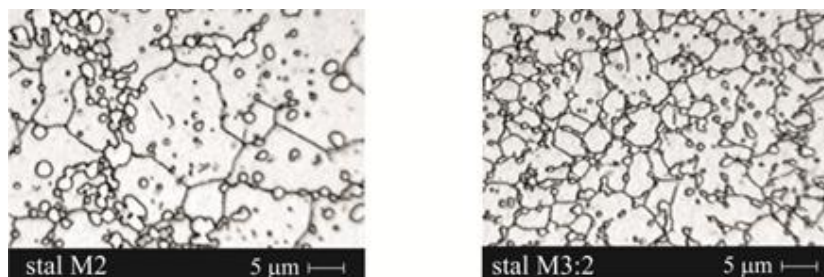
Tabela 2. Skład chemiczny materiału blachy M530–50A (% wag.)

P	C	Si	S	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	Fe
0,01	0,01	1,43	0,007	0,365	<0,01	<0,01	0,05	0,335	reszta



Rys. 1. Eksperymentalna krzywa umocnienia (EKS-linia gruba) oraz aproksymacja równaniem Hollomona (APR-linia cienka; współczynnik korelacji: 0,968)

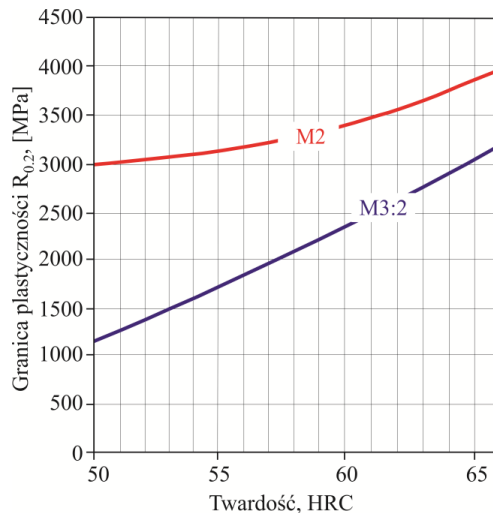
Materiały stosowane na narzędzia tnące charakteryzują się różnymi właściwościami mechanicznymi, które decydują o przebiegu zużycia powierzchni roboczych w trakcie wykrawania [2]. Do analizy eksperymentalnej użyto stemple tnące wykonane z materiału: M2, M3:2 (rys. 2), oraz M2+TiN, M3:2+TiN. Skład chemiczny tych materiałów przedstawiono w tabeli 3. Stal M3:2 (ASP 23 Vanadis, Powder Metallurgically Produced High Speed Steel) to materiał o średniej gęstości 7980 kg/m^3 i twardości po ulepszeniu cieplnym 66 HRC, zaś M2 cechuje średnia gęstość 7750 kg/m^3 oraz twardość 63 HRC. Strukturę materiału stempli po hartowaniu przedstawiono na rysunku 2, zaś wpływ twardości na granicę plastyczności na rysunku 3. Wkładki w części dolnej wykrojnika były wykonane z węglika spiekanego G40.



Rys. 2. Przykładowa struktura materiału stempli po hartowaniu

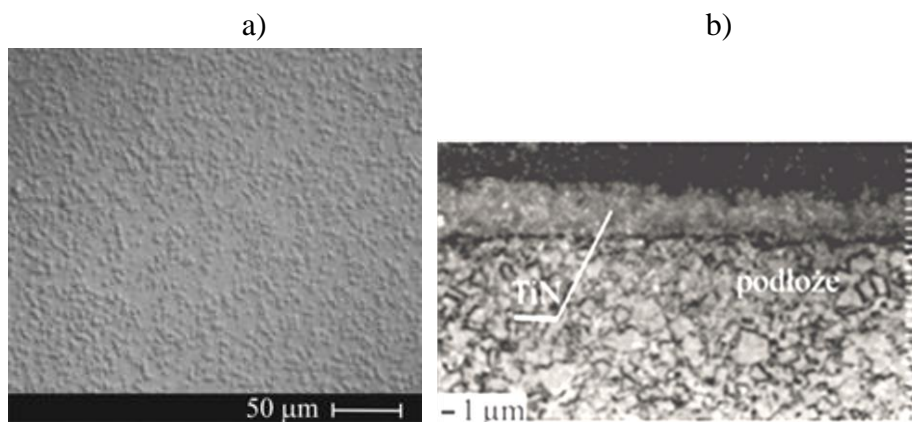
Tabela 3. Skład chemiczny materiałów stempli, [%]

Materiał	Dodatki pierwiastków									Fe
	C	Mn max	Si max	P max	S max	Cr	W	Mo	V	
M2 (SW7M)	0,82-0,92	0,4	0,5	0,03	0,03	3,5-4,5	6,0-7,0	4,5-5,5	1,7-2,1	reszta
M3:2 (ASP 23)	1,19-1,21	-	-	-	-	4,11-4,13	6,33-6,37	4,6-4,8	3,1-3,2	reszta



Rys. 3. Wpływ twardości na granicę plastyczności dla materiału stempli

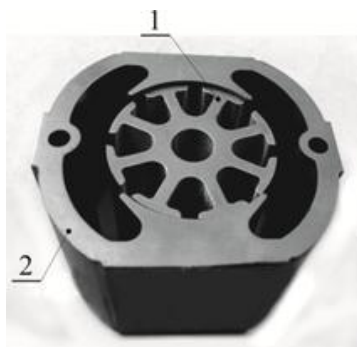
Powłokę na stemplach wykonano z zastosowaniem metody nanoszenia PVD (*Physical Vapour Deposition*). Naniesienie powłoki azotku tytanu na narzędzia odbyło się przy zastosowaniu urządzenia przy ciśnieniu $10^{-3} \div 10^{-2}$ Pa. Naniesiona tym sposobem powłoka TiN posiadała kolor żółty, charakteryzowała się twardością ok. 2300 HV5 oraz grubością $3,5 \div 4$ μm . Mikrostrukturę powierzchni stempla z naniesioną powłoką przedstawiono na rysunku 4a, zaś przekrój warstwy TiN na podłożu stempla na rysunku 4b.



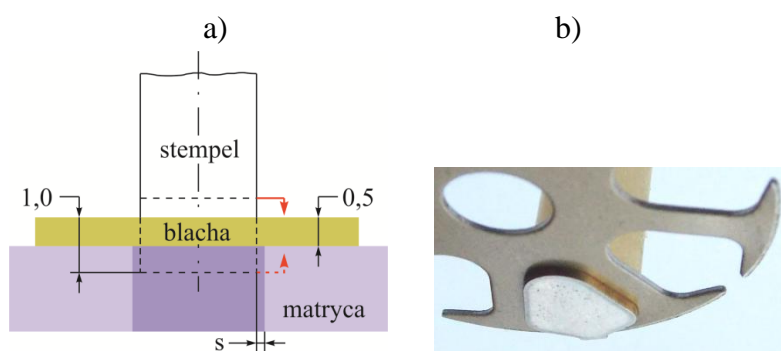
Rys. 4. Przykładowa charakterystyka strukturalna powłoki TiN:
a) na powierzchni, b) w przekroju. Materiał M3:2

3. Warunki pracy stempli

Wykrawanie realizowano na wykrojniku i prasie w warunkach przemysłowych. Badania zużycia prowadzono podczas procesu wykrawania elementów stosu blach wirnika i stojana (rys. 5), silnika asynchronicznego małej mocy.



Rys. 5. Stos blach wirnika (1) i stojana (2), z blachy krzemowej M530-50A



Rys. 6. Charakterystyka układu narzędzi oraz blachy wykrawanej:
a) schemat, b) skrajne dolne położenie stempla

Zastosowanie różnej wielkości luzu wykrawania jak też różnych materiałów narzędzi tnących pomogą wyjaśnić mechanizmy zużycia narzędzi podczas wykrawania blachy krzemowej. Badania prowadzone w tym kierunku dadzą podstawę do analizy wykrawalności blachy M530–50A. Luz względny wykrawania 0% i 8% zdefiniowano następująco:

$$L_z = \frac{s}{g} \cdot 100[\%]$$

gdzie:

g - grubość blachy,

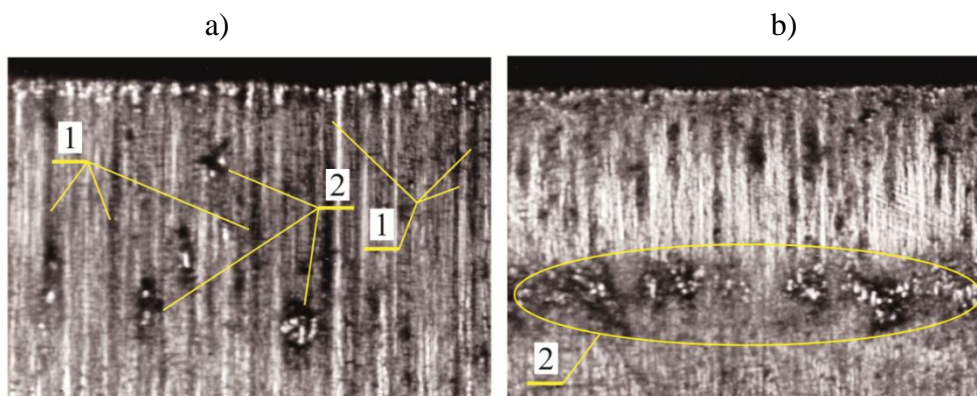
s - luz.

Luz względny ma wpływ na przebieg procesu rozdzielania materiału blachy i od niego zależy też jakość powierzchni przecięcia [12]. Luz ma szczególne znaczenie podczas wykrawania bardzo małych elementów [10]. Prędkość wykrawania była stała, jej wartość wynosiła tyle ile w typowym procesie przemysłowego wykrawania blach krzemowych (200 cięć/min.). Prędkość wykrawania jest jednym z parametrów technologicznych tego procesu. Ma wpływ na jakość powierzchni przecięcia i przebieg siły wykrawania [29]. Wykrawanie realizowano w zakresie do

800 tys. cięć. Następnie narzędzia były ostrzone tak by wyeliminować degradację krawędzi tnącej oraz skutki zużycia powierzchni przyłożenia.

4. Obserwacja zmian struktury powierzchni narzędzi

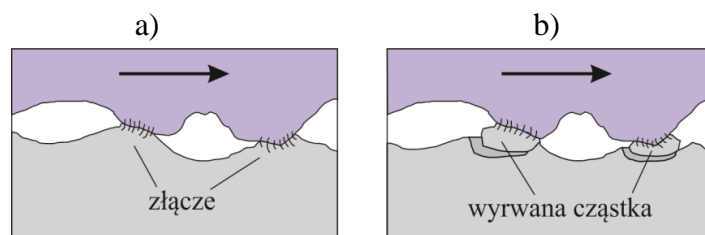
Stemple podczas pracy w trakcie wykrawania narażone były na zużycie powierzchni przyłożenia na odcinku odpowiadającym grubości blachy i przemieszczeniu koniecznym do przepchnięcia wykrojki ze strefy oddzielenia. Stempel z M2 po wykonaniu 500 tysięcy cięć posiadał na powierzchni przyłożenia liczne ślady zużycia: rysy, bruzdy, które występują w różnym stopniu na analizowanej powierzchni. Powstałe rysy jak też głębokie bruzdy są ubytkiem materiału powierzchni roboczej stempla. W czasie wykrawania występuje ścierne zużycie powierzchni przyłożenia, produktem tego są starte i zgniecione twarde, bardzo małe cząstki „1” widoczne na rysunku 7a. Pod wpływem nacisku przylepiają się do powierzchni narzędzia. Jest to adhezyjne zużycie powierzchni narzędzia. Przylepione twarde nierówności na powierzchni stempla, wpływają na powstawanie ubytków na powierzchni przyłożenia przy kolejnych cięciach stemplem. W przypadku materiału M3:2 wyraźnie widoczna jest granica nalepień (rys. 7b). Ich koncentracja występuje w odległości, na której kończy się kontakt z materiałem wykrawanym. W obszarze pomiędzy krawędzią tnącą a granicą kontaktu występują rysy.



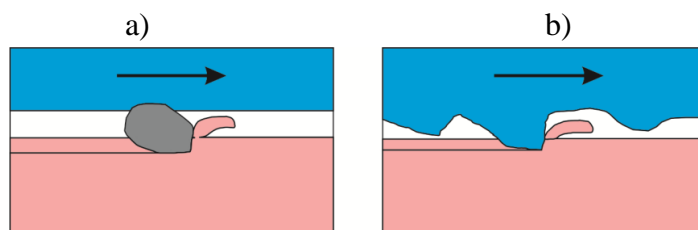
Rys. 7. Powierzchnia przyłożenia stempla po wykonaniu 500 tys. cięć:
a) M2; pow. x 80, b) M3:2; pow. x 160

Gdy powierzchnie trące stempla i blachy (po przecięciu blachy) zbliżają się do siebie lokalnie na odległość działania sił molekularnych, następuje ich szepianie (rys. 8). Tworzą się w ten sposób „zrosty”, które w wyniku dalszego ruchu stempla są rozrywane. Tak dochodzi do powstawania kolejnych narostów przy jednoczesnym brzdowaniu zgodnym z kierunkiem ruchu roboczego stempla. Podczas kontaktu pod naciskiem dwóch powierzchni najczęściej występuje zużycie ścierne (*abrasive wear*). Przebiegać może na dwa sposoby: pierwszy to kontakt trzech ciał (rys. 9a), drugi do kontakt dwóch ciał (rys. 9b). W obu tych przypadkach dochodzi do ścierania w skali mikro bardziej twardymi cząstkami materiału o mniejszej twardości. Jeżeli odrębne cząstki są bardzo twarde i duże, wówczas wbijają się w materiał o mniejszej twardości i mogą na swej drodze rysować powierzchnię (brzdowanie). Intensyfikacja przebiegu ścierania

oraz nasilenie innych mechanizmów degradacji powierzchni zaistnieje w przypadku nagromadzenia się startych mikrocząstek.

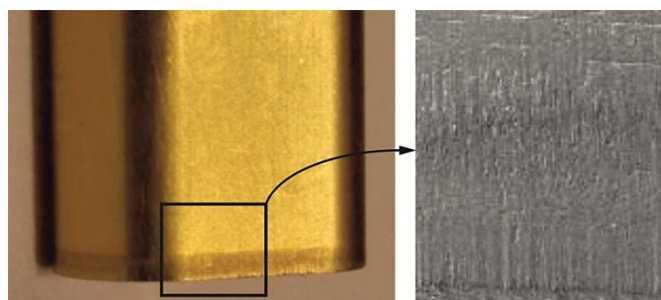


Rys. 8. Schemat przebiegu zużycia adhezyjnego: a) etap szepiania, b) odrywanie szepionej cząstki



Rys. 9. Schemat zużycia ściernego dla przypadku kontaktu: a) trzech ciał, b) dwóch powierzchni

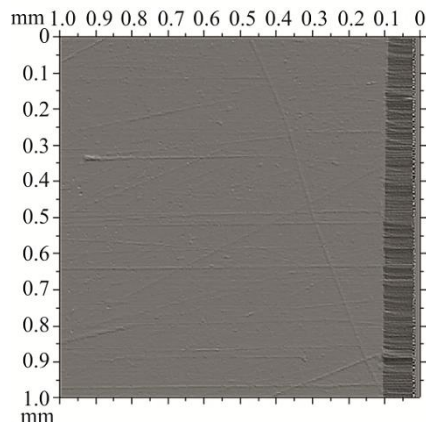
Na całym obwodzie stempla kontakt z odsłoniętym materiałem blachy krzemowej powodował początkowo ścierny mechanizm zużycia (rys. 10). Na rysunku 10 przedstawiono wygląd powierzchni przyłożenia po wykonaniu kilku tysięcy cięć. Ciemne pasmo na obwodzie stempla świadczy o zmianie stanu struktury powierzchni powłoki TiN. Intensywność zmian struktury obserwowano przy użyciu urządzeń optycznych po wykonaniu znacznie większej liczby wykrojów.



Rys. 10. Powierzchnia przyłożenia stempla po wykonaniu kilku tysięcy wycięć ($L_z = 0\%$, M3:2+TiN)

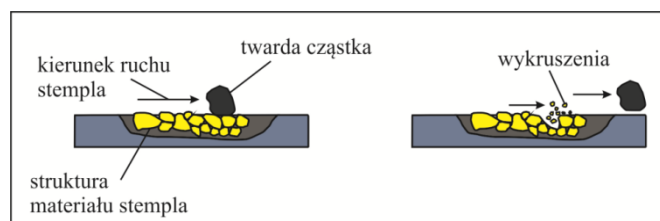
Stal M3:2 otrzymywana w technologii spiekania proszków charakteryzuje się nieco odmienną strukturą niż M2 (rys. 2). Struktura stali spiekanej jest bardziej rozdrobiona i jednorodna (rys. 2 po prawej). Materiały te różnią się między sobą charakterystyką zmienności granicy plastyczności w funkcji twardości HRC (rys. 3). Technologia wytwarzania tej stali zapewnia drobnoziarnistość austenitu oraz uzyskanie bardzo równomiernego rozkładu węglików w strukturze metalu, co jest niemożliwe do uzyskania metodami konwencjonalnymi. Stal M2 ma

większą ciągliwość, stąd bardziej podatna jest na tzw. bruzdowanie. Na zmniejszenie intensywności tego zjawiska pozwala powłoka z azotku tytanu. Narzędzia z M3:2, ze względu na rozdrobnioną strukturę, w większym stopniu ulegają zużyciu ściernemu oraz mikrowykruszeniom tuż przy krawędzi tnącej, które głęboko rysują powierzchnię przyłożenia (rys. 11).

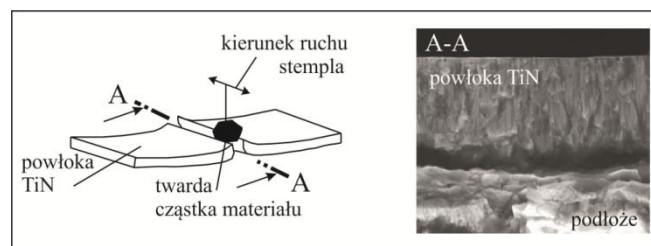


Rys. 11. Zdjęcie powierzchni przyłożenia przy krawędzi tnącej stempla po wykonaniu 500 tysięcy cięć z luzem 8% (materiał M3:2+TiN)

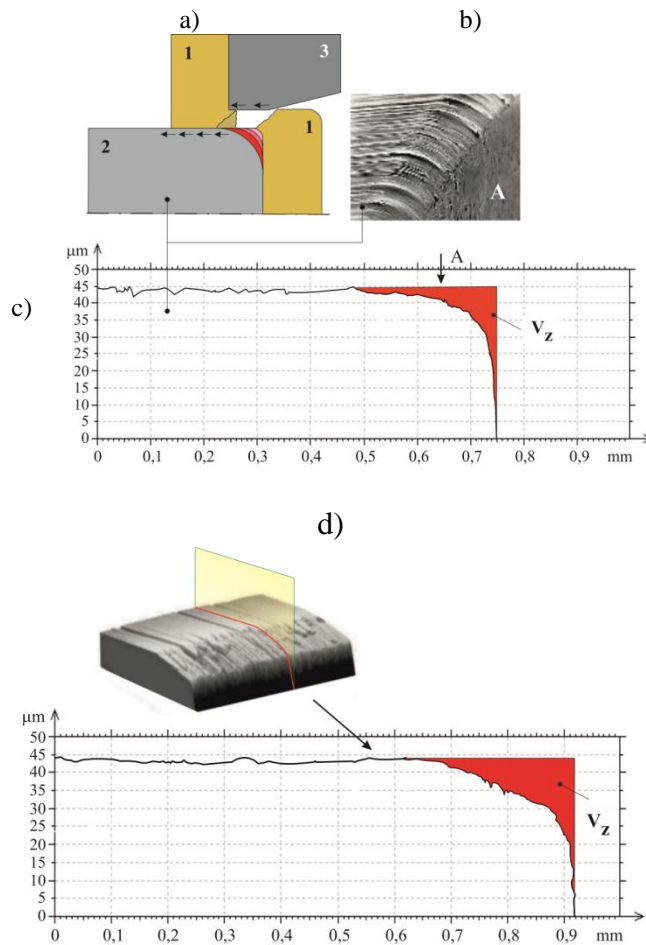
Twarde wtrącenia materiału blachy krzemowej powodowały nacisk na powierzchnię stempli (rys. 12). Po odsłonięciu materiału blachy krzemowej następował kontakt twardego wtrącenia stali krzemowej z wtrąceniami materiału stempla. W wyniku cyklicznego powtarzania się tego zjawiska następowała stopniowa degradacja powierzchni narzędzi z mieszanym mechanizmem zniszczenia: bruzdowanie i lokalne wykruszenia. Wykruszenia te powstawały według określonego schematu, przedstawionego na rysunku 12. W przypadku narzędzi pokrytych powłoką TiN w pewnych obszarach narzędzi wystąpiły mikrouszkodzenia twardej warstwy powłoki TiN (rys. 13).



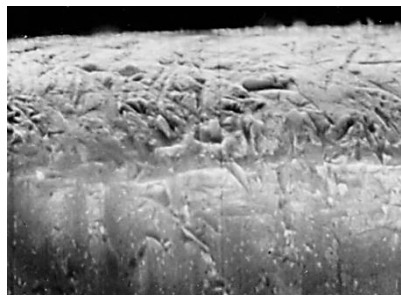
Rys. 12. Kontakt twardego wtrącenia materiału blachy i stempla oraz mechanizm wykruszania



Rys. 13. Rozwarstwienie powłoki od podłoża w wyniku działania twardego cząstek materiału wykrawanego



Rys. 14. Zmiana geometrii krawędzi tnącej stempla po wykonaniu 800 tys. cięć: a) umowny przebieg zużycia (1 - blacha, 2 - stempel, 3 - matryca), b) struktura degradacji, c) rzeczywisty profil stempla dla $L_z=8\%$; d) rzeczywisty profil stempla dla $L_z=0\%$

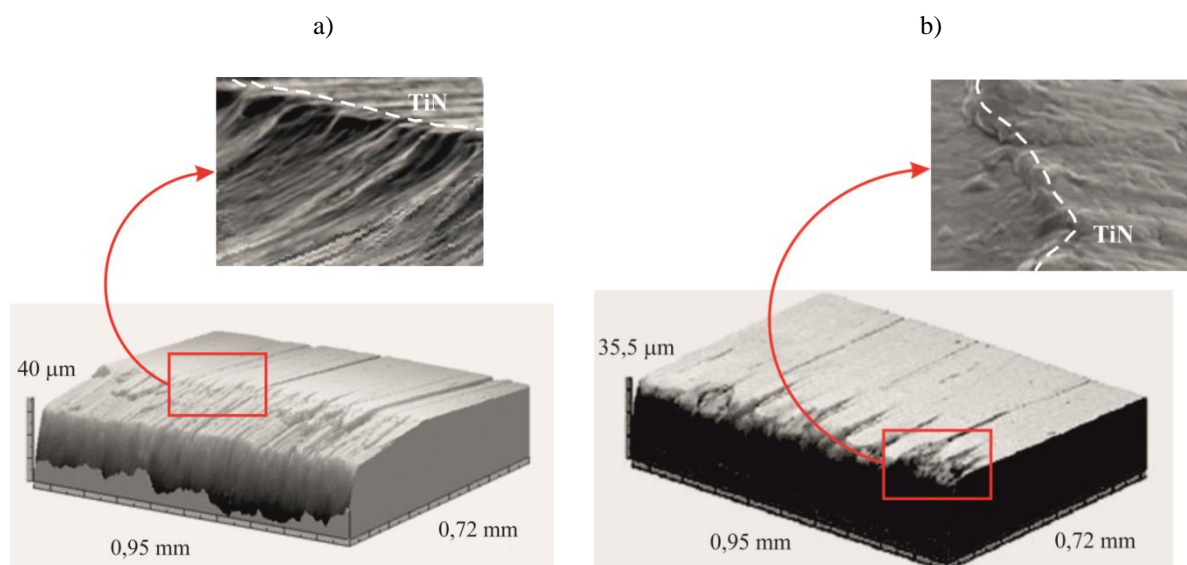


Rys. 15. Krawędź tnąca widziana od strony przyłożenia (M2+TiN po wycięciu 500 tys.; pow. x 500; $L_z=8\%$)

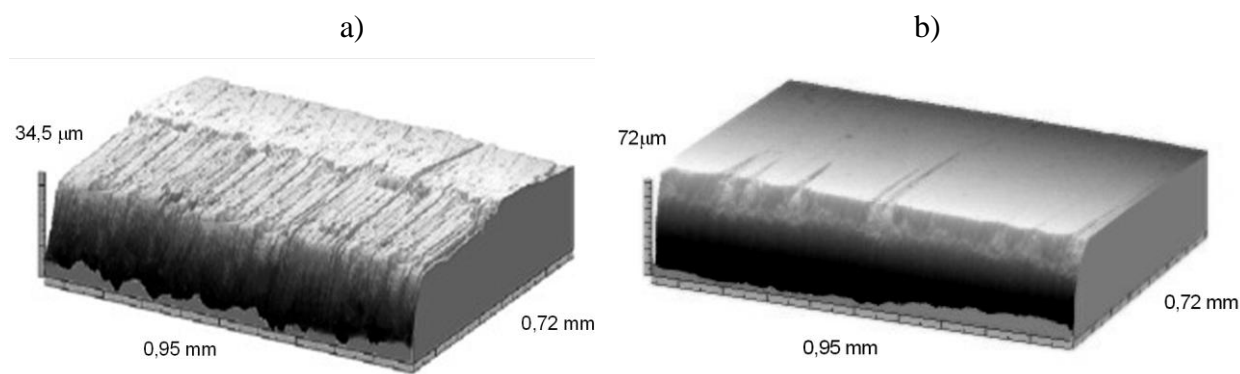
Zużycie narzędzi zależy od parametrów procesu, rodzaju wykrawanego materiału, materiału narzędzi. W dużej mierze zależy też od powłoki ochronnej na narzędziach i technologii jej nanoszenia [21]. Wszystkie te czynniki mają wpływ na energochłonność procesu wykrawania i intensywności zużywania się narzędzi [3]. W zakresie liczby wykonanych wykrojów, tj. do 800 000, największe zużycie wystąpiło w przypadku luzu 0% (rys. 14). W miarę zwiększania liczby cięć produkty ścierania tworzą nalepienia, które są przesuwane z ruchem stempla.

W przypadku mocnej adhezji nalepień z powłoką dochodzi do jej ubytków i odsłonięcia materiału podłoża (rys. 15).

Dzięki zastosowaniu indukcyjnej głowicy skanującej firmy Taylor Hobson Ltd możliwe było odwzorowanie topografii obszarów narzędzi tnących. Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono przykładowe powierzchnie po zeskanowaniu głowicą 3D oraz wybrane fragmenty zaobserwowane na mikroskopie skaningowym.



Rys. 16. Powierzchnia przyłożenia stempli M2+TiN po wykonaniu 800 tys. cięć, z luzem: a) 0%, b) 8%

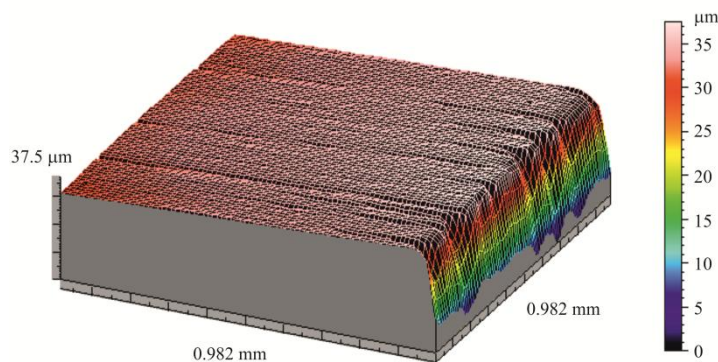


Rys. 17. Powierzchnia przyłożenia stempli M3:2+TiN po wykonaniu 800 tys. cięć, z luzem: a) 0%, b) 8%

Stal spiekana (M3:2+TiN) okazała się bardziej odporna na mechanizmy zużycia się niż odlewana (M2+TiN). W przypadku wykrawania z luzem 8% wystąpiło niewielkie zużycie powierzchni przyłożenia, powłoka jest nienaruszona z wyjątkiem kilku dłuższych bruzd. Twarde wtrącenia, które zawiera materiał wykrawany rysowały powierzchnię stempli, aż do powstania bruzd. W kilku miejscach nastąpiły małe wykruszenia powłoki, odsłaniając materiał podłoża wzdłuż linii bruzd zaczynających się od krawędzi tnącej (rys. 17b). Materiał stempla M3:2

w połączeniu z powłoką TiN wykazuje mniejsze zużycie w porównaniu do M2+TiN. Po wykonaniu 800 tysięcy cięć przez stempel z M3:2+TiN na powierzchni przyłożenia widoczne są rysy (rys. 17b). Na początku wykrawania mogło dojść do oddzielenia (wykruszenia) się warstewki TiN od strony krawędzi. Dalsza eksploatacja stempli z takimi ubytkami powłoki ułatwiła proces ścierania, powiększając w tych miejscach jej ubytek. Od czoła (pow. natarcia) uległa zużyciu jednak mniej niż w przypadku stempli tnących z luzem 0%. Natomiast wykrawaniu z luzem 0% towarzyszy w mniejszym stopniu zużywanie się powierzchni natarcia, a w większym powierzchni przyłożenia (rys. 14d). Podczas cięcia z dużym luzem (8%) następuje ugięcie blachy i przesuwanie się materiału blachy po powierzchni natarcia. Wykrawanie z luzem 8% sprawia, że intensywniej zużywa się powierzchnia natarcia (rys. 14c), powiększeniu ulega też promień zaokrąglenia krawędzi stempla. Degradacja powierzchni stempli z M3:2+TiN (rys. 17b) jest nieco inna niż w przypadku materiału M2 z powłoką TiN (rys. 16b). Podobnie jest w przypadku stempli wykonanych z M3:2(+TiN) dla luzu 0% (rys. 17a). Stal szybko tnąca (odlewana) jest mniej odporna na bruzdowanie. Po pewnym czasie powłoka jest wyłamywana w miejscach silnego bruzdowania (rys. 16, 17), zaś stal spiekana z pokryciem TiN w większym stopniu opiera się mechanizmom degradacji.

Naniesienie powłoki hamuje zużycie powierzchni roboczych stempli, jednak zachodzący proces tarcia odsłoniętego materiału blachy o powierzchnie robocze stempli spowodował, że powłoka ulega odrywaniu odsłaniając rodzimy materiał podłoża. W ten sposób przesuwała się granica powłoki na powierzchni przyłożenia stempli (rys. 16b). Granica powłoki nie ma przebiegu liniowego (rys. 16b), i nie jest skutkiem zużywania się powłoki TiN, lecz słabej odporności materiału podłoża stempli. Eksploatacja stempli z ubytkami powłoki przyspiesza niestety proces jej niszczenia.



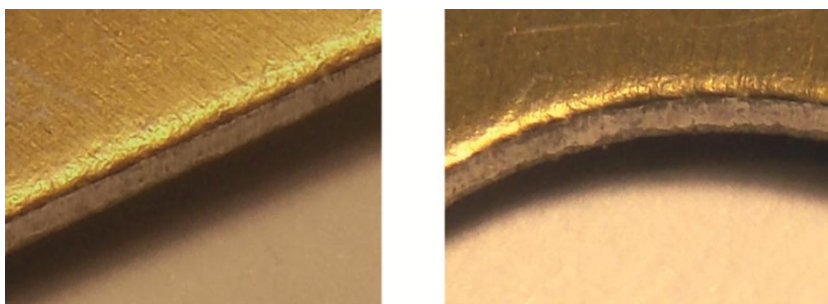
Rys. 18. Krawędź tnąca i powierzchnia przyłożenia stempla M2+TiN, po wykonaniu 800, tys. cięć, z luzem 8%

Powierzchnię stempla ze stali M2 i pokryciem TiN o grubości 3,5 mm po wykonaniu 800 tysięcy cięć przedstawiono na rysunku 18. Tuż przy krawędzi tnącej na powierzchni przyłożenia zaobserwowano większe zużycie (na rysunku kolor różowo-biały: 36÷37 µm)). Im dalej od krawędzi tym kolor czerwony staje się bardziej nasycony (wartości 28÷29 µm). Zmian wielkości zużycia na tej powierzchni sięga kilku mikrometrów. Świadczy to o zużyciu powłoki TiN.

5. Wpływ geometrii ostrza na odkształcenia w materiale blach

5.1. Rozkład twardości

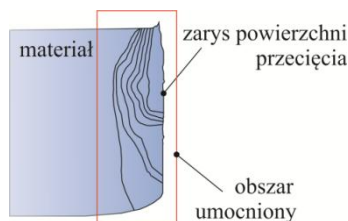
Mimo deformacji materiału blachy podczas wykrawania powłoka klasy C6 nie została wykruszona lub naderwana. Zarówno na odcinkach prostych (rys. 19-po lewej), jak i na krzywoliniowej linii przecięcia (rys. 19-po prawej) powłoka posiada spójną z podłożem strukturę.



Rys. 19. Stan powłoki blachy krzemowej przy powierzchni rozdzielania

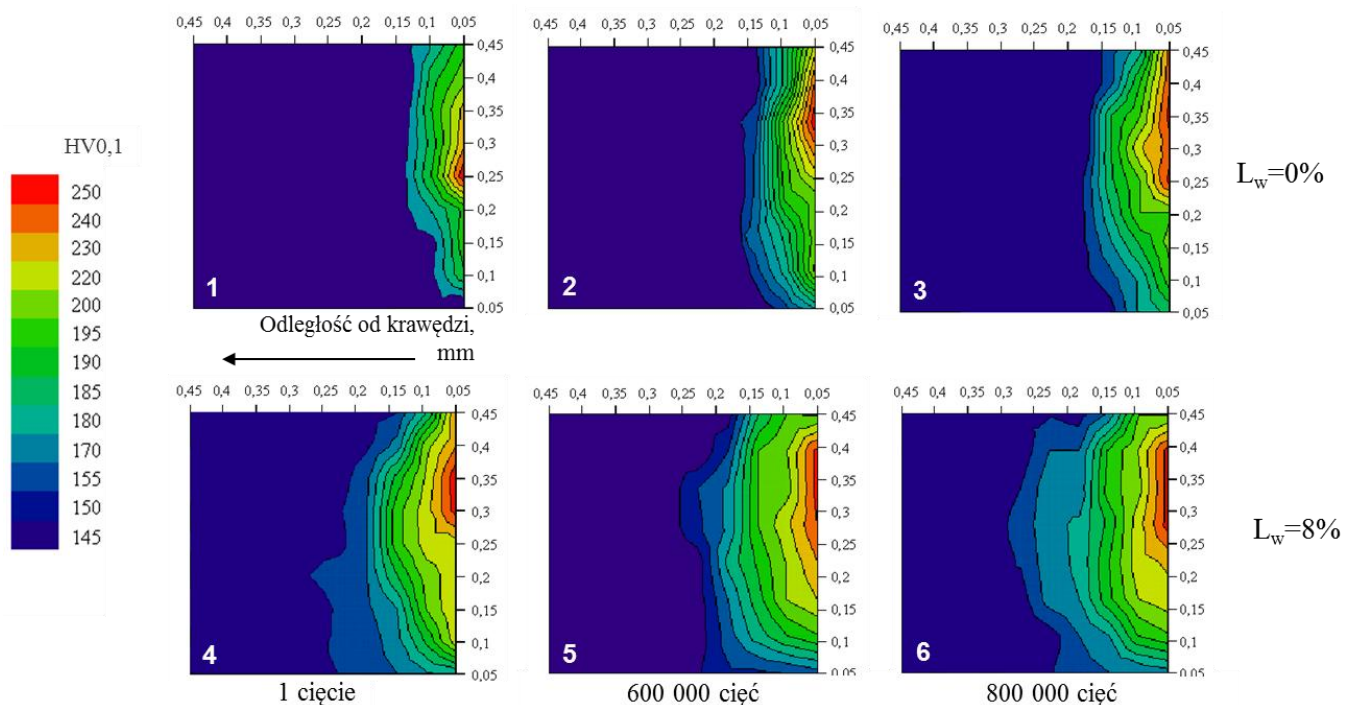
Wykrawanie narzędziami o zbyt dużym zużyciu krawędzi tnących ma wpływ w dużej mierze na wielkość obszaru odkształconego w pobliżu krawędzi cięcia. Metodą pośrednią określono zasięg zmian w materiale za pomocą pomiaru twardości. Twardość zmierzono za pomocą mikro twardościomierza MATSUZAWA. Penetrator stanowiła końcówka: ostrosłup o kącie wierzchołkowym 136° . Pomiary dokonano przy obciążeniu 0.100 kg (HV0.1), a czas przetrzymania końcówki w mierzonym material wynosił 10 sekund. Twardość wyjściowa blachy przed wykrawaniem wynosiła 145 HV0.1 (średnia z 5 pomiarów). Krok pomiarowy ustalono co 0,05 mm.

Na rysunku 20 przedstawiono lokalizację zmienionej mikrostruktury w wyniku wykrawania silnie zużytym stemplem w pobliżu powierzchni przecięcia. Podczas wykrawania zużywa się krawędź tnąca oraz powierzchnia przyłożenia stempli. W wyniku tego powiększa się luz wykrawania i zmieniają się kierunki naprężeń stycznych w stosunku do teoretycznej powierzchni przecięcia. Zmiana geometrii narzędzi powoduje zmianę wartości i zasięgu zmian mikrotwardości materiału w pobliżu linii cięcia. Grubość warstwy umocnionej jest związana z fazą odkształceń plastycznych. Im faza ta jest bardziej rozwinięta, tym grubość warstwy umocnionej i wzrost jej twardości są większe.

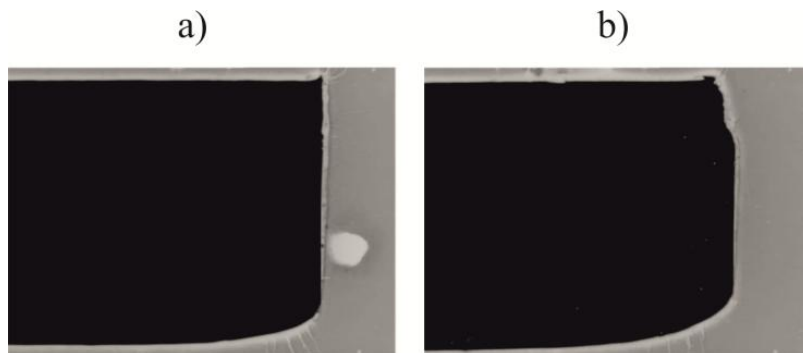


Rys. 20. Położenie badanego obszaru koncentracji odkształceń plastycznych w pobliżu powierzchni przecięcia na przekroju poprzecznym wyrobu

Największy wzrost twardości materiału zaobserwowano w pobliżu linii cięcia, a dokładniej w pobliżu miejsca inicjacji rozdzielania blachy (rys. 21). We wszystkich analizowanych przekrojach (1 ÷ 6) mikrotwardość odkształconego materiału osiąga wartość ok. 250 HV0.1 i jest o blisko 1,72 razy wyższa od średniej twardości blachy nieodkształconej (145 HV0.1). Takie zwiększenie się twardości spowodowane jest dużymi odkształceniami. Umocnienie materiału jest tak duże, że kończy się faza plastycznego cięcia, a powstające mikropełnięcia są początkiem fazy pęknięcia. Rozkład mikrotwardości w pobliżu powierzchni przecięcia był zróżnicowany w przypadku wykrawania z luzem 0% i 8%. Zmiana twardości i zasięgu obszaru umocnionego zależały od intensywności zużycia powierzchni roboczych stempli. Przy luzie zbliżonym do 0% zasięg obszaru odkształceń jest stosunkowo niewielki (rys. 21 - 1). Powiększa się wraz ze zużywaniem się narzędzi (rys. 21 - 2 i 3). Zużycie narzędzi w czasie wykrawania znacznie zwiększa zasięg obszaru odkształceń plastycznych, a tym samym pogarsza właściwości magnetyczne wyrobów. Wykrawanie z luzem 8% powoduje zwiększenie obszaru odkształceń plastycznych (rys. 21 - 4, 5, 6), sięgających znacznie dalej od powierzchni przecięcia niż w przypadku wykrawania ze szczeliną 0%. Pionowy wymiar obszaru występowania największych zmian twardości materiału jest tym większy im większa jest liczba wyciętych elementów. Zużycie narzędzi zmienia luz wykrawania i doprowadza tym samym do powiększania się strefy pęknięcia materiału. Zauważono, że wzrasta również zasięg zmiany twardości materiału w przypadku powiększenia luzu wykrawania. Zmian luzu podczas wykrawania z 0% na 8% spowodowała blisko dwukrotne powiększenie się pola zmiany twardości. W strefie pęknięcia obserwuje się znaczny wzrost twardości, tym samym zwiększa się objętość materiału o zmienionych właściwościach magnetycznych.



Rys. 21. Rozkład mikrotwardości na przekroju wyrobu w pobliżu powierzchni przecięcia uzyskany z próby wykrawania dla $L = 0\%$ i 8% po wykonaniu określonej liczby cięć z

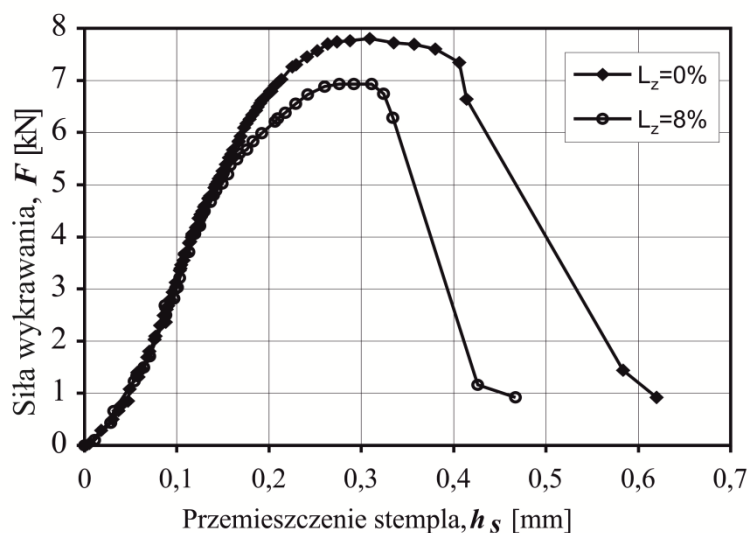


Rys. 22. Przekrój poprzeczny elementu dla początkowych cięć stemplem z luzem a) 0% i b) 8%

W przypadku silników elektrycznych w trakcie ich składania (pakietowania elementów wirnika i stojana silników) istotne jest, by uzyskane bloki były jak najbardziej „zwarte” i o jak najmniejszych ubytkach materiału. Istotny jest też zadziór, który powinien być stosunkowo mały (rys. 22a). W wyniku wykrawania z dużym luzem uzyskuje się elementy z dużym ubytkiem materiału (rys. 22b). Duże jest też zaokrąglenie krawędzi blachy. Obszar umocnienia materiału oraz jego ubytki w obrębie powierzchni przecięcia obniżają jakość magnetyczną wirnika i stojana [15, 20, 25, 31÷33].

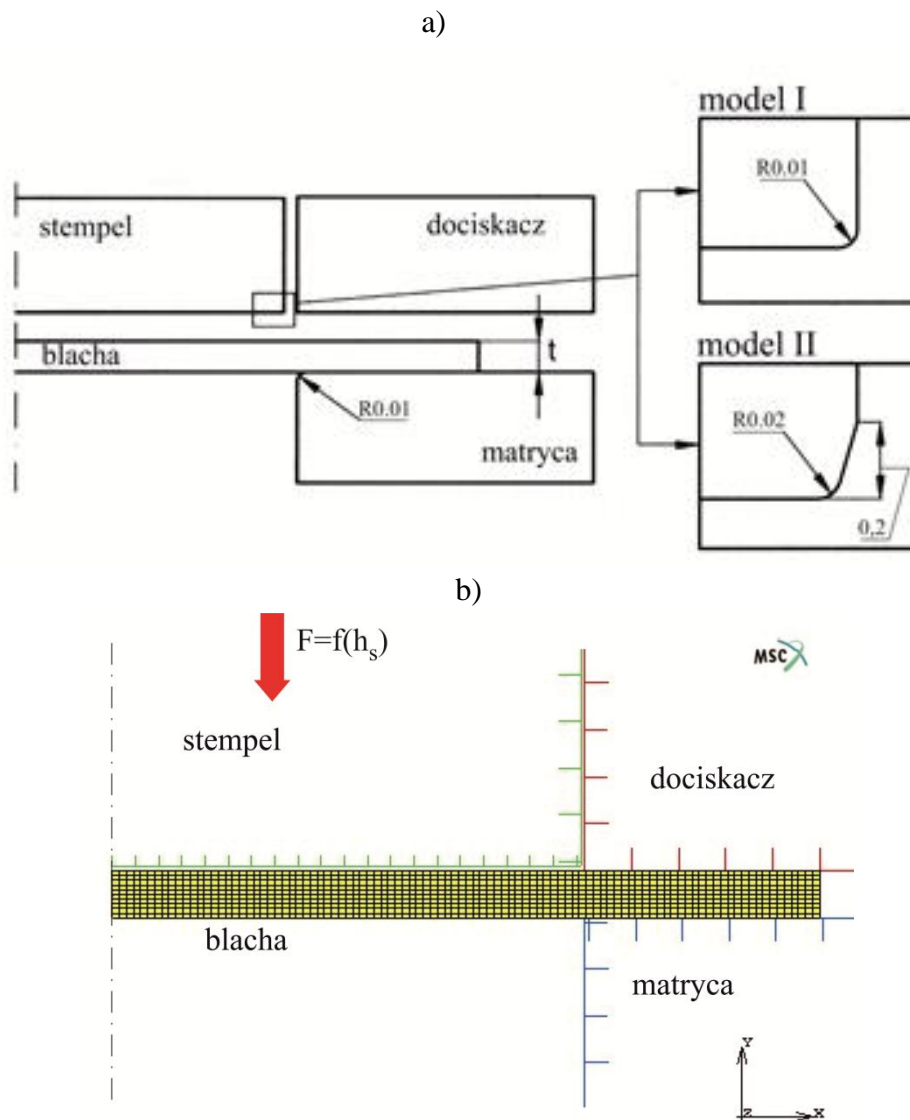
5.2. Rozkład naprężeń

Analizę MES wykrawania przedstawiono w celu pokazania jaki wpływ ma zmiana geometrii narzędzia w wyniku ich zużycia na rozkład naprężeń w chwili zapoczątkowania pęknięcia materiału. Wielkość zagłębienia wyznaczono eksperymentalnie (rys. 23) [22]. Symulacje poprowadzono do wyznaczenia rozkładu naprężeń średnich decydujących w dużej mierze o miejscu zapoczątkowania pęknięcia ($L_z=0\% \rightarrow h_s=0,41$; $L_z=8\% \rightarrow h_s=0,33$).



Rys. 23. Przebieg siły w trakcie cięcia w funkcji drogi stempla dla różnego luzu wykrawania

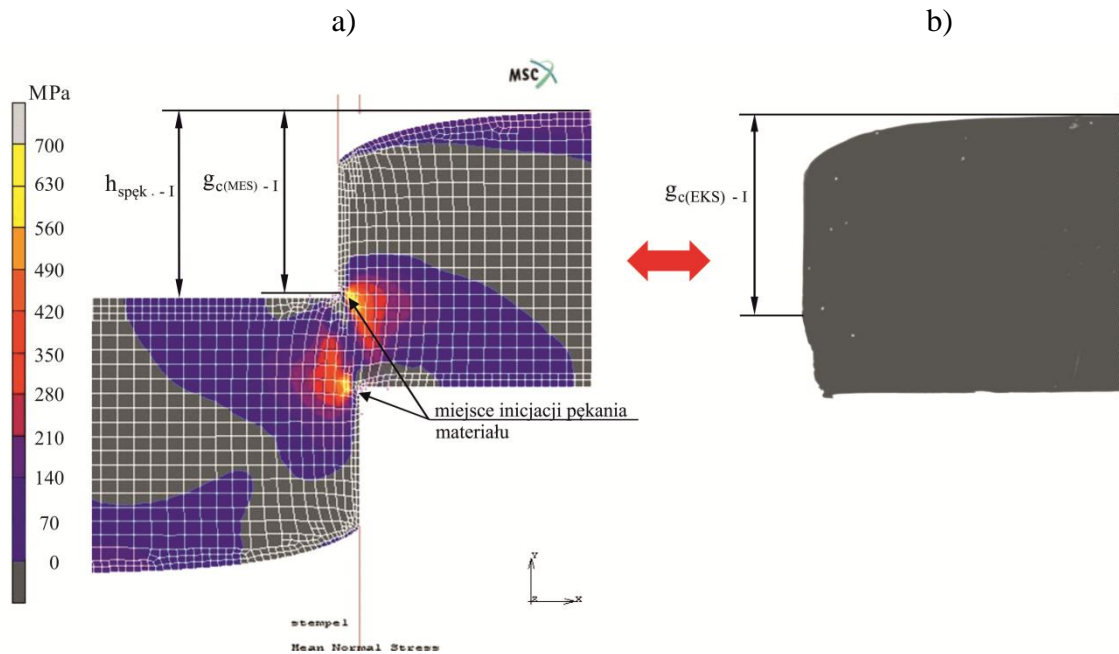
Wykrawanie zamodelowano w programie numerycznym MSC.Marc 2010. Geometrię narzędzi przeniesiono po określeniu geometrii zużytej krawędzi stempla (rys. 14 oraz 24a). Jako model materiału założono sprężysto-plastyczny z nieliniowym umocnieniem $C = 627 \text{ MPa}$, $n = 0,18$ (rys. 1). Pozostałe parametry przyjęto wg tabeli 1, zaś współczynnik tarcia 0,15. W osiowosymetrycznym modelu zdefiniowano warunki brzegowe odpowiednie do procesu wykrawania. Narzędzia zdefiniowano jako bryły sztywne, zaś blachę jako materiał odkształcalny (rys. 24b).



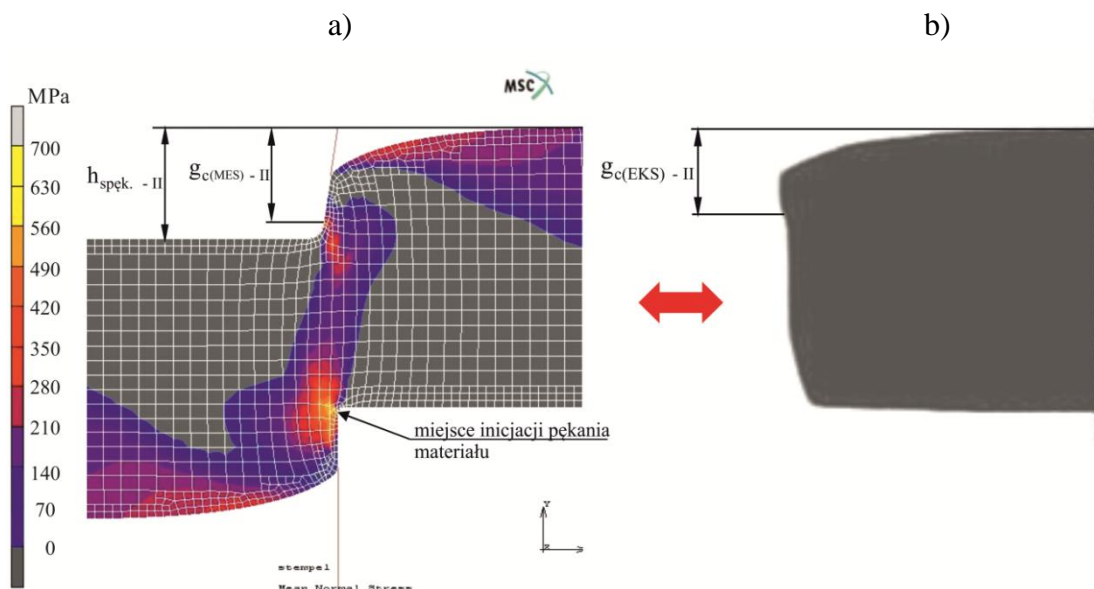
Rys. 24. Założenia modelu MES do obliczeń: a) warianty modelu stempla, b) zdefiniowane ciała

Analiza numeryczna potwierdziła wyniki uzyskane z eksperymentu. W wyniku zmiany geometrii narzędzi i luzu wykrawania zmienia się stan naprężeń i wielkość zagłębienia stempla, przy którym następuje początek fazy rozdzielania w wyniku pęknięcia umocnionego materiału na linii przebiegającej od krawędzi narzędzi (rys. 25, 26). W przypadku narzędzia o ostrych krawędziach koncentracje naprężeń pojawiły się w okolicy krawędzi stempla i matrycy (rys. 25), zaś podczas symulacji wykrawania stemplem o znacznym zużyciu (model II), koncentracja

naprężeń o większej wartości zlokalizowana jest w pobliżu krawędzi matrycy (rys. 26). Wartości naprężeń są niższe w okolicy krawędzi stempla niż matrycy. W wyniku zmiany odległości pomiędzy krawędziami stempla i matrycy zmienia się stan naprężeń na kierunkach głównych, stąd inne są wartości naprężeń średnich.



Rys. 25. Pola naprężeń średnich na początku fazy pęknięcia materiału wykrawanej blachy (a) oraz przekrój blachy wirnika w pobliżu powierzchni rozdzielania uzyskany z prób wykrawania (b) - ($r_s, r_m = 0,01 \text{ mm}, L_z = 8 \%$, przy pierwszych cięciach; model I)



Rys. 26. Pola naprężeń średnich na początku fazy pęknięcia materiału blachy podczas wykrawania stemplem z założonym zużyciem (a) oraz przekrój blachy wirnika w pobliżu powierzchni rozdzielania uzyskany z prób wykrawania (b) - ($L_z = 0 \%$, po wykonaniu 800 tys. cięć; model II)

Degradacja materiałowa i magnetyczna na krawędziach blach elektrotechnicznych z stali krzemowych nie może być zaniedbana podczas projektowania maszyn elektrycznych. Wprawdzie zmiany magnetyczne materiału blach w znacznie mniejszym stopniu dotyczą transformatorów, ale w maszynach elektrycznych z wirującym polem magnetycznym mogą powodować straty już na większym poziomie [25, 30].

6. Wnioski

Zastosowanie do wykrawania blach prądnicowych stempli tnących pokrytych powłoką TiN spowodowało znaczne podwyższenie ich trwałości tym samym zmniejszono zasięg umocnienia materiału blachy. Wielkość luzu wykrawania pomiędzy krawędzią tnącą stempla i matrycy bardzo wyraźnie wpływa na intensywność zużywania się krawędzi stempli tnących oraz na jakość wykrawanych elementów.

- Dla luzu $L_z=0\%$ następuje szybsze zużywanie krawędzi tnących, zmniejsza się natomiast zasięg strefy odkształceń plastycznych oraz zwiększa się rozmiar strefy cięcia.
- Wykrawanie ze zwiększonym luzem $L_z=8\%$ powoduje mniejsze zużycie stempli, lecz obniża się jakość geometryczna powierzchni przecięcia oraz zwiększenia zasięgu strefy odkształceń plastycznych.
- Od wielkości luzu zależy charakter zużycia stempli. Wykrawanie z luzem 8% blachy M530-50A powoduje znaczne zaokrąglenie krawędzi tnącej, zaś przy wykrawaniu dla $L_z=0\%$ następuje zarówno zaokrąglenie krawędzi tnącej, jak również ubytki materiału na powierzchni przyłożenia.
- Nakładanie twardej powłoki TiN na stemple z materiału M2 oraz M3:2 spowodowało bardzo wyraźny wzrost trwałości przy wykrawaniu z luzem $L_z=0\%$.

Literatura

1. ASTM A976 – 13. *Standard Classification of Insulating Coatings for Electrical Steels by Composition, Relative Insulating Ability and Application*. ASTM International, 2013, pages 5.
2. Bać S., Jaworski J., Stachowicz F.: *Durability dependence on cutting tool material in blanking process of generator sheet metal*. In: Proceedings Conference Technology' 99, Bratislava, Slovak-Republic, 452, 1999.
3. Chumrum P., Koga N., Premanond V.: *Experimental investigation of energy and punch wear in piercing of advanced high-strength steel sheet*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015: 79: 1035-1042.
4. Cheung C.F., Lee W.B., Chiu W.M.: *An investigation of tool wear in the dam-bar cutting of integrated circuit packages*. Wear, 2000: 237: 274-282.
5. Emura M., Landgraf F. J. G., Ross W., Barreta J. R.: *The influence of cutting technique on the magnetic properties of electrical steels*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003: 254-255: 358-360.

6. Gréban F., Monteil G., Roizard X.: *Influence of the structure of blanked materials upon the blanking quality of copper alloys*. Journal Materials Processing Technology, 2007: 186: 27-32.
7. Golovashchenko S.: *A Study on Trimming of Aluminum Autobody Sheet and Development of a New Robust Process Eliminating Burrs and Slivers*. International Journal of Mechanical Sciences, 2006: 48: 1384-1400.
8. Golovashchenko S. F.: *Analysis of Trimming of Aluminum Closure Panels*. Journal of Materials Engineering and Performance. 2007: 16: 213-219.
9. Golovashchenko S. F.: *Quality of Trimming and its Effect on Stretch Flanging of Automotive Panels*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008: 17: 316-325.
10. Guo W., Tam H.-Y.: *Effects of extended punching on wear of the WC/Co micropunch and the punched microholes*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012: 9: 955-960.
11. Hernández J.J., Franco P., Estrems M., Faura F.: *Modelling and experimental analysis of the effects of tool wear on form errors in stainless steel blanking*. Journal Materials Processing Technology, 2006: 180: 143-150.
12. Hu D.-Ch., Chen M.-H., Ouyang J.-D., Yin L.-M.: *Finite element analysis of the thermal effect in high-speed blanking of thick sheet metal*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015: 80: 1481-1487.
13. Jasiński W., Zawada P.: *The investigation of discreteness in material of catalytic pipes by the eddy current method*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, 2003: 2: 28-30.
14. Jeong H., Ha J., Hwang J., Lee H., Kim D., Kim N.: *A study on the shearing process and the burr formation of zircaloy-4 sheet by using GTN model*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014: 15: 2167-2175.
15. Kedous-Lebouc A., Cornut B., Perrier J. C., Manfé P., Chevalier T.: *Punching influence on magnetic properties of the stator teeth of an induction motor*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003: 254-255: 124-126.
16. Klingenberg W., de Boer T.W.: *Condition-based maintenance in punching/blanking of sheet metal*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008: 48: 589-598.
17. Levy B. S., Van Tyne C. J.: *Review of the Shearing Process for Sheet Steels and Its Effect on Sheared-Edge Stretching*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012: 21: 1205-1213.
18. Lo S-P., Chang D-Y., Lin Y-Y.: *Quality prediction model of the sheet blanking process for thin phosphorous bronze*. Journal of Materials Processing Technology, 2007: 194: 126-133.
19. Makich H., Carpentier L., Monteil G., Roizard X., Chambert J., Picart P.: *Metrology of the burr amount - correlation with blanking operation parameters (blanked material – wear of the punch)*. International Journal of Material Forming, 2008: 1: 1243-1246.
20. Moses A. J., Derebasi N., Loisos G., Schoppa A.: *Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000: 215-216: 690-692.

21. Mubarak A., Akhter P., Hamzah E., Radzi M., Toff M.R.HJ.M., Qazi I. A.: *Effect of coating thickness on the properties of tin coatings deposited on tool steels using cathodic arc pvd technique*. Surface Review and Letters, 2008: 4: 401-410.
22. Mucha J., Stachowicz F.: *Effect of clearance of blanking of generator sheets - experimental investigation and numerical simulation*. Acta Mechanica Slovaca, 2004: 8: 301-306.
23. Mucha J.: *An effect of selected parameters on shearability of the EP-530-50A*. Rudy i Metale Nieżelazne, 2004: 1: 23-26 (in Polish).
24. Mucha J.: *The analysis of selected material suitability for tools used for blanking the commutator motor elements*. In: Proceedings 9th International Scientific Conference, Applied Mechanics, Ostrawa, VŠB—Technical University of Ostrawa, Czech Republic, 171–172, 2007.
25. Oka M., Kawano M., Shimada K., Kai T., Enokizono M.: *Evaluation of the Magnetic Properties of the Rotating Machines for the Building Factor Clarification*. Przegląd Elektrotechniczny, 2011: 9b: 43-46.
26. PN-EN 10106:2016-01. *Taśmy i blachy stalowe elektrotechniczne o ziarnie niezorientowanym walcowane na zimno, dostarczane w stanie w pełni przetworzonym*. PKN, 2016, stron 24.
27. Ponnaluri S.V., Cherukuri R., Molian P. A.: *Core loss reduction in grain-oriented silicon steels by excimer laser scribing. Part I: experimental work*. Journal of Materials Processing Technology, 2001: 112: 199-204.
28. Raulea LV, Goijaerts AM, Govaert LE, Baaijens FPT (2001) Size effects in the processing of thin metal sheets. J Mater Process Technol 115:44–48.
29. Slavic J., Bolka S., Bratus V., Boltezar M.: *A novel laboratory blanking apparatus for the experimental identification of blanking parameters*. Journal of Materials Processing Technology, 2014: 214: 507-513.
30. Tekiner Z., Nalbant M., Gürün H.: *An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal*. Materials and Design, 2006: 27: 1134-1138.
31. Wilczyński W.: *Influence of magnetic circuit production for their magnetic properties*. Journal of Materials Science, 2003: 38: 4905-4910.
32. Yashiki H., Kaneko T.: *Effect of alloying elements on response of nonoriented electrical steels to stamping operations*. Journal of Materials Engineering and Performance, 1992: 1: 29-34.
33. Żurek Z. H., Kurzydłowski K. J., KUKLA D., BARON D., *Material Edge Conditions of Electromagnetic Silicon Steel Sheets*. Przegląd Elektrotechniczny, 2013: 2b: 112-115.