

Wiesław ZWIERZYCKI*, **Arkadiusz STACHOWIAK***,
Kasper GÓRNY*

DOBÓR MATERIAŁU NA NOŻE DO CIĘCIA PAPRYKI. BADANIA TRIBOKOROZYJNE

MATERIAL SELECTION FOR KNIFE TO CUTTING BELL PEPPER. TRIBOCORROSION RESEARCH

Słowa kluczowe:

zużycie, pin-on-plate, stal odporna na korozję, tribokorozja

Key words:

wear, pin-on-plate, stainless steel, tribocorrosion

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań w zakresie doboru materiału na elementy do cięcia papryki. Jako kryterium doboru przyjęto minimalizację zużycia w warunkach jednoczesnych oddziaływań tarciovych i korozyjnych (tribokorozja). Badania wykonano na specjalistycznym stanowisku z węzłem modelowym typu pin-on-plate. Analizowano wpływ twardości stali martenzytycznej na intensywność ubytku materiału. Wyniki badań wykorzystano przy konstrukcji urządzenia do wydrążania papryki.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.

WPROWADZENIE

W ramach projektu celowego realizowanego ze środków Centrum Innowacyjności przy NOT w Warszawie na potrzeby wielkopolskiego producenta linii do przetwórstwa owoców i warzyw wykonano badania, mające na celu wytypowanie potencjalnych materiałów na elementy do cięcia papryki. Z przeglądu literatury [L. 1, 2] wynika, że do usuwania gniazd nasiennych i cięcia papryki odpowiedni może być nóż rurowy o zewnętrznym kącie zaostrenia rzędu 15° . Noże do drażenia (i cięcia) papryki pracują w warunkach tribokorozji, co oznacza, że o zużyciu ich krawędzi tnących decydują zarówno efekty mechaniczne (tarcie), jak i korozyjne oraz wzajemne interakcje między procesami. W Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej opracowano wcześniej stanowisko i metodę badania takich złożonych efektów [L. 3, 4, 5]. Posiadane narzędzia wykorzystano przy realizacji projektu (symulując warunki pracy noża).

Badania obejmowały ocenę odporności na zużycie:

- korozyjne – analizy wykonano na podstawie krzywych polaryzacji (prąd-potencjał), identyfikując występowanie obszaru pasywacji oraz porównując gęstości prądu dla wybranych wartości potencjału z tego obszaru,
- w warunkach jednoczesnych oddziaływań korozyjnych i mechanicznych (tribokorozji) – analizy wykonano na specjalistycznym stanowisku z węzłem modelowym typu pin-on-plate umożliwiającym monitorowanie prądu z obszaru tarcia oraz oszacowanie intensywności ubytku materiału.

Zasadniczo ocenę odporności na zużycie wykonano dla wstępnie wybranej – przez producenta urządzenia do cięcia papryki – stali 4H13. Jest to stal odporna na korozję o strukturze martenzytycznej. Celem badań szczegółowych była analiza wpływu twardości (obróbki cieplnej) na intensywność zużywania. Twardość przygotowanych próbek kształtowała się w zakresie od 44 do 54 HRC. Poszukując alternatywnego rozwiązania, wykonano również testy dla stali austenitycznej 0H18N9. Stal ta cechuje się większą odpornością na zużycie korozyjne niż stal martenzytyczna, wyraźnie mniejsza twardość (w stanie bez obróbki) skutkuje jednak większym zużyciem mechanicznym w wyniku mikroskrawania. Stal 0H18N9 badano w stanie bez obróbki oraz po umocnieniu przez odkształcenie plastyczne.

OCENA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE KOROZYJNE

Obecnie przy ocenie zachowania korozyjnego materiału za jedno z najważniejszych uznaje się charakterystyki stałoprądowe (zależność prąd-potencjał) [L. 6, 7]. Charakterystyki te noszą nazwę krzywych polaryzacji.

Do wyznaczenia krzywych polaryzacji wykorzystano układ trójelektrodowy z precyzyjnym czterokanałowym potencjostatem ATLAS 9833. Jako elektrodę

odniesienia wykorzystano elektrodę kalomelową (SCE). Jej potencjał względem normalnej elektrody wodorowej wynosi 244 mV. Funkcję elektrody pomocniczej pełniła siatka platynowa o wymiarach 20×140 mm. Badana próbka stanowiła elektrodę roboczą. Próbka miała kształt walca o średnicy 10 mm i wysokości 5 mm. Badania wykonano w soku z papryki. Zmierzony odczyn soku wynosi 4,0–4,5, a przewodność elektryczna około $0,0055 \text{ } (\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1})$.

Na **Rys. 1** i **2** przedstawiono krzywe polaryzacji charakterystyczne dla badanych stali. Ocena zachowań korozyjnych badanych stali polegała na:

- identyfikacji występowania obszaru pasywnego,
- porównaniu gęstości prądu dla wybranych wartości potencjału z zakresu pasywnego.

W przypadku stali austenitycznej 0H18N9 w stanie bez obróbki (**Rys. 1**) stwierdzono wyraźny zakres pasywny od -100 do 250 mV(SCE). Wzrostowi potencjału powyżej -300 mV(SCE) (krytyczny potencjał pasywacji) towarzyszy gwałtowny spadek gęstości prądu. Stal zaczyna ulegać pasywacji, na powierzchni powstaje warstewka tlenków. Minimalną wartość gęstość prądu osiąga przy potencjale około -100 mV(SCE). Jest to potencjał pasywacji. W zakresie pasywnym gęstość prądu zachowuje względnie stałą wartość, znacznie mniejszą niż w zakresie aktywnym (poniżej -300 mV(SCE)).

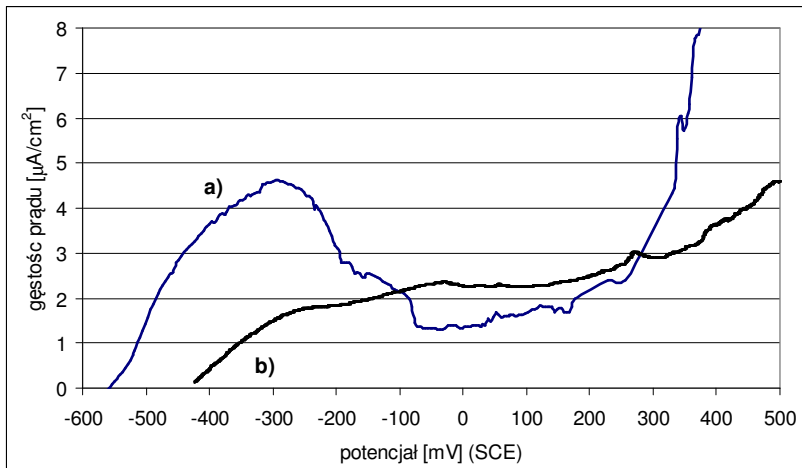
Przedstawione na **Rys. 2** krzywe polaryzacji dla stali martenzytycznej 4H13 nie posiadają charakterystycznego obszaru („szczytu”) z wyraźnym spadkiem gęstości prądu (poprzedzającym płaski przebieg charakterystyki dla zakresu pasywnego). Jednak zgodnie z danymi zawartymi w pracy C. Hodge i inni [**L. 8**] w zakresie potencjału od -200 do 300 mV(SCE) – poprzedzającym przebiegię krzywej polaryzacji – można mówić o występowaniu zakresu pasywnego. W zakresie tym gęstość prądu zmienia się wraz z potencjałem.

Krzywe polaryzacji przedstawione na **Rys. 2** wskazują znaczący wpływ obróbki cieplnej (dla uzyskania wymaganej twardości) na intensywność procesów korozyjnych (gęstość prądu). W przypadku próbek o wyższej twardości (54 HRC) stwierdzono wyraźnie wyższe gęstości prądu dla potencjałów z zakresu pasywnego. W wyniku hartowania stali martenzytycznej w materiale powstają naprężenia. Zwiększają one stan energetyczny przypowierzchniowych warstw stali, intensyfikując procesy korozji elektrochemicznej.

W przypadku stali austenitycznej 0H18N9 część próbek poddano umocnieniu przez odkształcenie plastyczne (zgniot rzędu 40%). **Rys. 1** wskazuje, że odkształcenie plastyczne stali austenitycznej 0H18N9 (wytworzenie dodatkowych naprężeń w materiale) nieznacznie zwiększa gęstość prądu w obszarze pasywnym. Nie są to jednak tak znaczne zmiany, jak w przypadku hartowania stali martenzytycznej do twardości rzędu 52–54 HRC (**Rys. 2**).

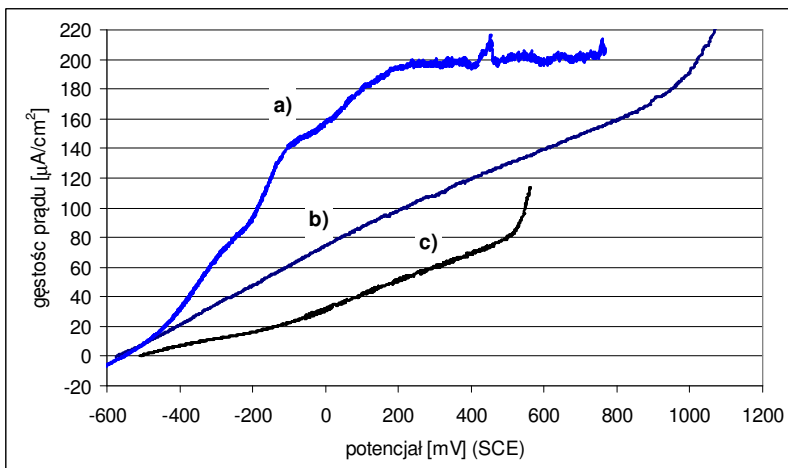
Próbki z badanych stali poddano również długotrwałemu działaniu soku z papryki w warunkach korozji swobodnej. Próbki zanurzone w soku z papryki

przetrzymano przez 3–4 dni (okres „biologicznej” trwałości soku z papryki w temperaturze pokojowej). Po testach na powierzchni próbki w badaniach mikroskopowych nie zaobserwowano żadnych śladów korozji.



Rys. 1. Krzywe polaryzacji stali austenitycznej 0H18N9 w soku z papryki (szybkość polaryzacji 2 mV/s): a) w stanie bez obróbki – 24 HRC, b) po umocnieniu – 40 HRC

Fig. 1. Potentiodynamic polarization curves for the tested steels 0H18N9 in pepper just (sweet rate 2 mV/s): a) without thermal treatment – 24 HRC, b) after cold-working – 40 HRC



Rys. 2. Krzywe polaryzacji stali martenzytycznej 4H13 w soku z papryki (szybkość polaryzacji 2 mV/s): a) 54 HRC, b) 47 HRC, c) 44 HRC

Fig. 2. Potentiodynamic polarization curves for the tested steels 4H13 in pepper just (sweet rate 2 mV/s): a) 54 HRC, b) 47 HRC, c) 44 HRC

OCENA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIĘ TRIBOKOROZYJNE

Badania procesu zużywania tribokorozyjnego wykonano na specjalistycznym stanowisku z węzłem modelowym typu pin-on-plate. Stanowisko zostało zaprojektowane i wykonane w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej [L. 3, 4, 5]. Schemat stanowiska pokazano na **Rys. 3**. Do badań wykorzystano:

- trzpień z końcówką w kształcie ściętego stożka o średnicy płaskiego końca 1,5 mm; w testach stosowano dwa rodzaje trzpień wykonanych z:
 - węgla spiekane (WC) o twardości około 2000 HV pokrytego azotkiem tytanu (TiN),
 - tworzywa sztucznego – poliacetalu (POM) – o twardości kulkowej 170 MPa,
- próbki w kształcie walca o średnicy 10 mm i grubości 5 mm wykonane z badanych stali.

Próbki montowano w specjalnej komorze wykonanej z polichlorku winylu (PVC). Rozwiązanie to umożliwiało prowadzenie badań procesu zużywania elementów węzła tarcowego w otoczeniu elektrolitu (około 60 ml). W układzie stanowiska do podtrzymywania komory zastosowano specjalny statyw wyposażony w czujniki tensometryczne przeznaczone do pomiaru siły normalnej i siły tarcia w miejscu styku trzpień z próbką. Ruch posuwisto-zwrotny trzpień uzyskiwano za pomocą mechanizmu mimośrodowego. Zastosowane rozwiązanie umożliwiało przemieszczanie trzpień na odcinku około 6 mm z częstotliwością od 1 do 10 Hz.

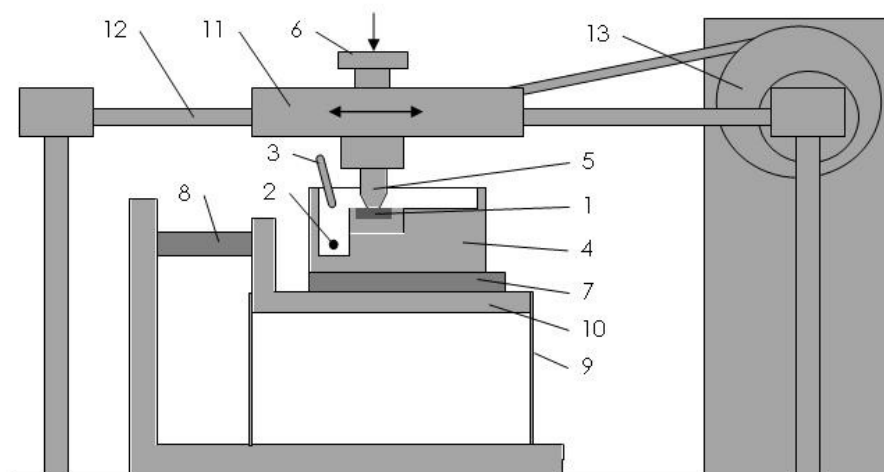
Wszystkie testy wykonano w temperaturze 20–22°C, wykorzystując jako elektrolit sok z papryki (pH 4,0–4,5). Przed każdym eksperymentem powierzchnię próbek oraz trzpień myto. Po zamontowaniu w komorze próbki poddawano polaryzacji. Najpierw przez 5 minut polaryzowano potencjałem katodowym o około 0,3 V niższym od potencjału korozji swobodnej. Zabieg ten miał na celu usunięcia warstwy tlenków. Następnie przez około 15–30 minut polaryzowano próbkę zadanym potencjałem z obszaru pasywnego. W tym okresie trzpień pozostawał nieruchomy. Po wstępnym przygotowaniu powierzchni próbek rozpoczynano zasadniczy test zużyciowy.

W trakcie eksperymentu tribokorozyjnego dokonywano pomiaru oraz rejestracji:

- natężenia prądu tribokorozyjnego,
- siły nacisku i siły tarcia,
- temperatury elektrolitu.

Po zakończeniu testu oceniano zużycie powierzchni próbek. Jako miarę zużycia przyjęto głębokość śladu zużycia wyznaczaną na podstawie pomiarów profilometrycznych w połowie długości drogi tarcia. W dalszej części wyniki poszczególnych testów zostaną przedstawione jako intensywność zużywania,

tn. przyrost głębokości śladu zużycia odniesiony do jednego przemieszczenia trzpienia ([nm/cykl]). Cykl odpowiada przemieszczeniu trzpienia między skrajnymi położeniami na drodze tarcia (odległość około 6 mm).



Rys. 3. Schemat stanowiska do badania tribokorozji w węzle typu pin-on-plate: 1 – próbka, 2 – elektroda pomocnicza, 3 – elektroda odniesienia, 4 – komora badawcza, 5 – trzpień, 6 – obciążenie trzpienia, 7 – czujnik siły nacisku, 8 – czujnik siły tarcia, 9 – element sprężysty, 10 – statyw, 11 – płyta z uchwytem trzpienia, 12 – prowadnica, 13 – napęd

Fig. 3. Schematic view of the tribometer for triboelectrochemical experiments: 1 – specimen, 2 – counter electrode, 3 – reference electrode, 4 – PVC cell, 5 – pin, 6 – applied weight, 7 – sensor for measurement of normal force, 8 – sensor for measurement of friction force, 9 – spring blade, 10 – stand, 11 – table (handle of the pin), 12 – linear guideway, 13 – drive

Opisane stanowisko umożliwia modelowanie procesu zużywania wytypowanych stali w warunkach zbliżonych do warunków eksploatacji. Model węzła pozwala poddawać powierzchnię próbki jednoczesnym oddziaływaniom:

- mechanicznym – odwzorującym styk ostrza noża i papryki (ewentualnie ostrza noża i piasku),
- korozyjnym – odwzorującym reakcje elektrochemiczne na powierzchni ostrza w obecności soku z papryki.

Dla zintensyfikowania procesów elektrochemicznych w trakcie testów zużyciowych badany węzeł polaryzowano potencjałem o wartości -50 mV(SCE) . Jest to potencjał odpowiadający początkowi zakresu pasywnego dla stali 0H18N9 w soku z papryki (**Rys. 1**). Nacisk w strefie styku i częstotliwość ruchu trzpienia wybrano (spośród najmniejszych, możliwych do zrealizowania na stanowisku wartości) tak, aby po 4–5-godzinnym testie obserwować mierzalne zużycie (ślady o głębokości powyżej $5 \mu\text{m}$). Wszystkie testy wykonano przy

częstotliwości ruchu trzpienia wynoszącej 3 Hz. W tych warunkach średnia prędkość ślizgania wynosiła około 36 mm/s. Badania zrealizowano, stosując nacisk około 20 MPa. Dla każdej próbki wykonano od 2 do 4 testów. Poszczególne testy składały się z 80000–120000 przemieszczeń trzpienia.

Dążąc do odwzorowania w badaniach modelowych procesu zużywania tribokorozyjnego warunków panujących w rzeczywistym węźle (nóż do wydrążania papryki), pierwszą grupę testów dla stali 4H13 wykonano, stosując trzpień z tworzywa sztucznego o twardości mniejszej niż twardość badanej stali. W żadnym z analizowanych przypadków (próbki o twardości 44 i 54 HRC) po 84000 przemieszczeń trzpienia (4 godziny) nie zaobserwowano mierzalnego zużycia próbki. Mierzalne zużycie stwierdzono dopiero po zastosowaniu trzpienia z węglika spiekanego, znacznie twardszego niż badana stal.

Wyniki badań zużywania tribokorozyjnego w węźle z trzpieniem z węglika spiekanego przedstawiono w **Tabeli 1**. Charakteryzując wyniki badań, podano wartość prądu tribokorozji (średnia wartość dla wyników pomiarów w trakcie pojedynczego testu) oraz oszacowaną intensywność zużywania (z_t). Dla obu parametrów przedstawiono zakres zmienności wyników w serii badań oraz wartość średnią dla serii. W **Tabeli 1** zamieszczono także informację o udziale składowej korozyjnej (z_{kor}) w całkowitej intensywności zużywania tribokorozyjnego (z_t). Składowa korozyjna (elektrochemiczna) to zużycie spowodowane procesami elektrochemicznymi intensyfikowanymi oddziaływaniami tarciovymi w strefie styku. Składową (z_{kor}) wyznaczono na podstawie zmierzonej wartości prądu tribokorozji, wykorzystując równanie Faradaya. Składową mechaniczną (z_{mech}) intensywności zużywania tribokorozyjnego można obliczyć jako różnicę ($z_{mech} = z_t - z_{kor}$).

Tabela 1. Wyniki badań zużywania tribokorozyjnego analizowanych stali (-50 mV(SCE), 3 Hz, 20 MPa)

Table 1. Results of tribocorrosion experiment of the tested steels (-50 mV(SCE), 3 Hz, 20 MPa)

Stal	Twardość	Intensywność zużywania tribokorozyjnego (z_t) [nm/cykl]		Prąd tribokorozji [mA]		z_{kor}/z_t [%]
		zakres	średnia	zakres	średnia	
4H13	44–47 HRC	0,24–0,27	0,26	0,43–0,53	0,48	82,0
	52–54 HRC	0,24–0,30	0,27	0,50–0,71	0,53	87,2
0H18N9	260 HV (25 HRC)	0,36–0,42	0,41	0,15–0,25	0,20	27,2
	40 HRC (po umocnieniu)	0,23–0,27	0,25	0,20–0,31	0,25	43,9

W przypadku stali martenzytycznej analizowano wpływ twardości (obróbki cieplnej) na intensywność zużywania tribokorozyjnego. Z uwagi na możliwości diagnostyczne metody badań (pomiar głębokości śladu zużycia, pomiar prądu) i licznosc serii próbek wyniki uśredniono dla dwóch przedziałów twardości: 44–47 HRC oraz 52–54 HRC.

Warto zwrócić uwagę, że zwiększenie twardości o 15% (z 47 do 54 HRC) nie powoduje wyraźnego zmniejszenia intensywności zużywania tribokorozyjnego. Wyższa twardość zapewnia większą odporność na zużycie inicjowane oddziaływaniami mechanicznymi w styku tarciovym (mikroskrawanie). Zgodnie z tą relacją stwierdzono obniżenie składowej mechanicznej (z_{mech}) zużycia tribokorozyjnego (z 18% dla twardości 47 HRC do 12,8% w przypadku twardości 54 HRC). Niestety obróbka cieplna przeprowadzana dla uzyskania wyższej twardości powoduje intensyfikację procesów elektrochemicznych związanych z repasywacją w warunkach tribokorozyj. Wyższej twardości stali odpowiadają najprawdopodobniej większe naprężenia własne w warstwach przypowierzchniowych i wyższy stan energetyczny tych warstw. Stan taki sprzyja intensyfikacji procesów korozyjnych. Taką tendencję ilustrują krzywe polaryzacji przedstawione na **Rys. 2**. Następstwem tego jest wyższy o około 10% prąd tribokorozyj (w analizowanych warunkach) i większa składowa elektrochemiczna zużycia (z_{kor}). Ostatecznie większa jest również nieznacznie całkowita intensywność zużywania (z_t).

Dla porównania wykonano również badania zużycia tribokorozyjnego stali austenitycznej 0H18N9. Zgodnie z informacjami podanymi między innymi w pracach [L. 1, 2] tego typu stale są również stosowane w produkcji noży. Wybór tego rodzaju stali wynikał także z faktu, że stal austenityczna cechuje się wyższą odpornością na zużycie korozyjne niż stal martenzytyczna (**Rys. 1 i 2**). W konsekwencji obserwowany dla stali 0H18N9 w trakcie testu tribokorozyjnego prąd jest wyraźnie mniejszy niż dla stali 4H13. Niestety znacznie mniejsza twardość stali austenitycznej (około 25 HRC) powoduje większe zużycie wskutek oddziaływań mechanicznych (mikroskrawanie) i w konsekwencji większą intensywność zużywania tribokorozyjnego niż dla stali martenzytycznej.

W celu zwiększenia odporności stali 0H18N9 na zużywanie mechaniczne, wykorzystując naturalne właściwości tej stali, dokonano jej umocnienia przez odkształcenie plastyczne. Po zgnioście rzędu 40% uzyskano twardość na poziomie około 40 HRC. W wyniku odkształcenia nastąpiła częściowa zmiana struktury – powstał martenzyt. Stal uzyskała również właściwości ferromagnetyczne. Wyniki badań tribokorozyjnych wskazują, że po umocnieniu przez odkształcenie plastyczne intensywność zużywania stali 0H18N9 wyraźnie maleje. Osiąga poziom porównywalny z rezultatami wyznaczonymi dla stali 4H13. Odkształcenie plastyczne znacząco (o około 17%) obniża składową mechaniczną zużycia. Stan ten, nawet przy wzroście prądu tribokorozyj (zgniot zwiększa naprężenie

nia wewnętrzne), powoduje zmniejszenie intensywności zużywania tribokorozyjnego. Stal austenityczna 0H18N9 umocniona przez odkształcenie może stanowić alternatywny wariant materiałowy dla stali martenzytycznej 4H13.

WNIOSKI

1. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że stal martenzytyczna 4H13 o twardości 44–47 HRC powinna zapewnić odpowiednią trwałość nożom do wydrążania papryki. Wykonana ocena dotyczyła zużywania w warunkach jednoczesnych oddziaływań mechanicznych (nacisk papryki na ostrze) i korozyjnych (sok z papryki).
2. Ponadto wyniki badań wskazują, że nie jest celowe zwiększanie twardości stali 4H13 do poziomu 52–54 HRC. Zabieg ten powoduje zmniejszenie składowej mechanicznej zużycia tribokorozyjnego, niestety jednocześnie zwiększając intensywność procesów korozyjnych. W rezultacie intensywność zużywania tribokorozyjnego nieznacznie wzrasta.
3. Alternatywę dla stali martenzytycznej 4H13 może stanowić stal austenityczna 0H18N9 umocniona przez odkształcenie plastyczne.

LITERATURA

1. Dowgiallo A.: Cutting force of fibrous materials, *Journal of Food Engineering*, 2005, vol. 66, s. 57–61.
2. Ciulică L.G., Rus F.: The influence of the knife constructive and functional parameters on the process of cutting vegetables, *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, 2011, series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering, vol. 4 (53), nr 2.
3. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Tribocorrosion modelling of stainless steel in a sliding pair of pin-on-plate type. *Tribology International*, 2011, vol. 44, s. 1216–1224.
4. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Analysis of the tribocorrosion mechanisms in a pin-on-plate combination on the example of AISI 304 steel. *Wear*, 2012, vol. 294–295, s. 277–285.
5. Stachowiak A.: Problemy modelowania zużywania tribokorozyjnego w układach ślizgowych. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2012.
6. Bala H.: *Korozja materiałów – teoria i praktyka*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
7. Rokosz K., Hryniewicz T.: Pomiary odporności na korozję wżerową stali austenitycznej AISI 304 używanej do budowy cystern mleczarskich. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 2012, nr 3, s. 102–108.
8. Hodge C., Stack M.M.: Tribo-corrosion mechanisms of stainless steel in soft drinks. *Wear*, 2010, vol. 270, s. 104–114.

Summary

In this paper, the results of research into material selection for knives cutting bell pepper are presented. The main criterion of selection was minimum wear rate in conditions of simultaneous abrasion and corrosion (tribocorrosion). The research was carried out on the special pin-on-plate stand. Basically, the influence of martensitic steel hardness on loss of material was tested. The results of research was used to design device to cut bell peppers.