

Zygmunt HADUCH SUSKI*, **Jorge LOZANO ANDRADE***,
Alan GARCÍA RODRÍGUEZ*, **Hernán R. GONZÁLEZ***,
Erick RODRÍGUEZ*

ZWIĘKSZENIE TRWAŁOŚCI ROLEK DO FORMOWANIA RUR

INCREASING TOOL LIFE OF ROLLERS FOR ROLL FORMING OF TUBES

Słowa kluczowe:

rolki, stal narzędziowa, rury, obróbka cieplna, azotowanie, obróbka podzerowa

Key words:

rolls, tool steels, tubes, heat treatment, nitriding, subzero treatment

Streszczenie

Przemysł wytwarzania rur stosuje różne metody i techniki ich produkcji, jednak formowanie rur stalowych ze szwem ma największe osiągnięcia na rynku. Podstawowe narzędzie do ich formowania, czyli rolki są tradycyjnie wykonywane ze stali narzędziowych o wysokiej zawartości chromu, na przykład stali narzędziowej D2. Jednak jakość rur nowej generacji wykonywanych ze stali o wyższej wytrzymałości i twardości wymaga zastosowania nowych materiałów

* University of Monterrey (UEM), Engineering Department, San Pedro Garza García N.L., Mexico, zygmunt.haduch@udem.edu.

przewyższających właściwości mechaniczne stali D2. Zaistniała więc konieczność zmian technologii, przeprojektowania narzędzi, przebadania nowych materiałów i opracowania odpowiedniej obróbki cieplnej, zapewniając im dłuższą żywotność i zmniejszenie przestoju w celu spełnienia oczekiwań produkcyjnych. W niniejszym projekcie zostały przeanalizowane i ocenione najlepsze opcje przedstawione na rynku narzędzi do pracy na zimno w celu zwiększenia żywotności istniejących narzędzi (stal D2).

Ocenę przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych zbliżonych maksymalnie do parametrów produkcyjnych. Wykorzystano tester do badań tribologicznych (T-05) i wykonano badania dynamiczne (próba Charpy'ego). Wykazano przydatność nowych materiałów i możliwość uzyskania oszczędności.

WPROWADZENIE

Firmy produkujące rury z materiałów o wysokiej wytrzymałości mechanicznej zmuszone są do stosowania wyższych nacisków, co oznacza większe zużycie narzędzi, a czasem ich awaryjne pękanie. To podraża koszty wytwarzania i powoduje problem konkurencyjności na rynku [L. 4].

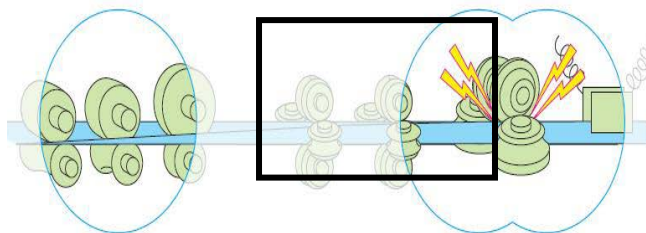
Rozwiązania problemu należy szukać wśród nowych materiałów, ich właściwej obróbki cieplnej lub cieplno-chemicznej oraz powłok, których zastosowanie bardzo się rozpowszechniło [L. 6–8]. Chodzi nie tylko o zwiększenie twardości materiału rolek, ale odpowiednie proporcje; twardości – odporności na zużycie – odporności na pękanie.

Liczne badania próbują wyjaśnić zachowanie się stali narzędziowych podczas operacji formowania rur, w których podkreśla się znaczenie składu chemicznego materiału rolek, obróbki cieplnej i uformowanej mikrostruktury oraz jej znaczenie dla trwałości narzędzi. Wielu autorów [L. 9, 10] zajmuje się też pokryciami PVD i CVD, w większości jednak na narzędziach skrawających, stosunkowo niewiele jest prac badających zachowanie się tych powłok w warunkach wysokich obciążeń lub zmęczenia [L. 13].

PROBLEM

Podjęta problematyka badawcza związana jest z linią produkcyjną rur grubościennych formowanych na maszynie ABBEY-ETNA 6K. W procesie produkcji występują zarówno problemy zużycia, jak i pęknięcia rolek formujących. **Rysunek 1** przedstawia linię formowania rur z zaznaczonym miejscem przestrzeni badawczej.

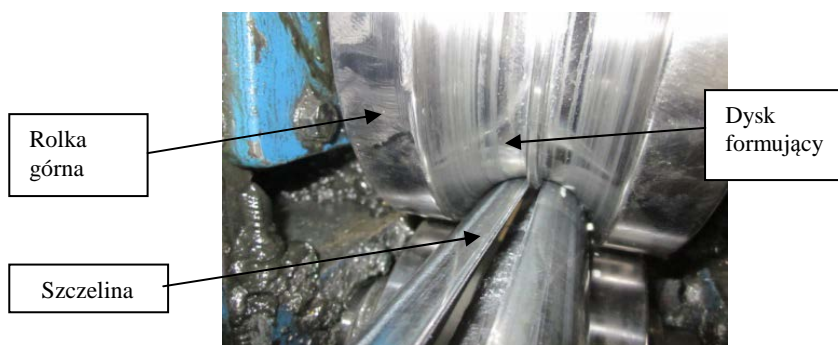
Obszar badawczy składa się z trzech zestawów rolek. Rolki dolne są dzielone w połowie, natomiast górne są przedzielone dyskiem, którego zadaniem jest takie uformowanie szczeliny rury, aby jej przyleganie było płaskie i nie



Rys. 1. Schemat procesu formowania rur ze szwem [L. 5]

Fig. 1. Process of manufacture of tubes with welded seams [L. 5]

sprawiło problemów przy zgrzewaniu oporowym. Jest to więc dysk zapewniający odpowiednie wyrównanie ścianki rury do zgrzewania. Wszystkie części wykonane są ze stali D2 do pracy na zimno. **Rysunek 2** przedstawia górną rolkę z dyskiem formującym szczelinę przed spawaniem.



Rys. 2. Formowanie szczeliny przed spawaniem oporowym

Fig. 2. Seamed tube formation by rollers and flap

Dysk formujący staje się coraz cieńszy i zużywając się w sposób pokazany na **Rysunku 3**, nie pozostawia powierzchni płaskiej, co utrudnia proces właściwego połączenia rury.

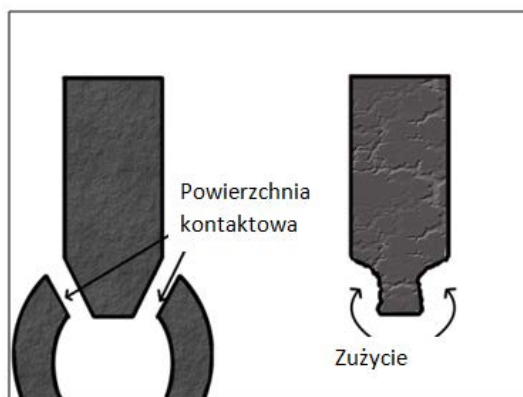
Parametry procesu walcowania rur zestawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Parametry procesu walcowania rur

Table 1. Investigated process parameters

Parametry	
Temperatura	otoczenia
Nacisk	40 kg/mm ²
Smarowanie	96% woda – 4% olej
Typ oleju	PROSOIL 634-HYL
Prędkość obrotowa rolek	364 obr./min

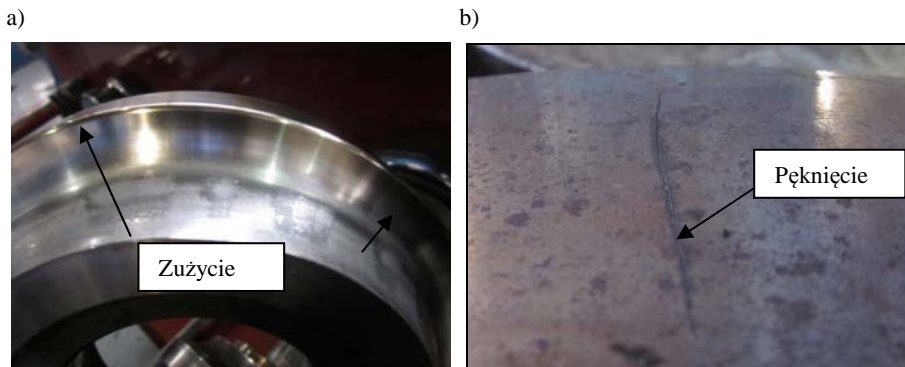
W zespole formującym 6K w linii produkcyjnej rur materiałem rur, który stwarza najwięcej problemów jest API- 5L X52 przeznaczony na rury o średnicy zewnętrznej 114 mm i 6,3 mm grubości ścianki. Jest to stal, której granica plastyczności wynosi ok. 380 MPa a więc jest stosunkowo trudna do odkształcania. W oprzyrządowaniu pokazują się pęknięcia spowodowane zmiennymi obciążeniami oraz zużycie tribologiczne zarówno rolek, jak i dysków, przy czym te ostatnie zużywają się znacznie szybciej.



Rys. 3. Schemat kontaktu pomiędzy dyskiem formującym i szczeliną rury oraz kształt zużytego dysku

Fig. 3. The scheme of the contact between the disc and tube as well as the shape of the worn surface of the disc

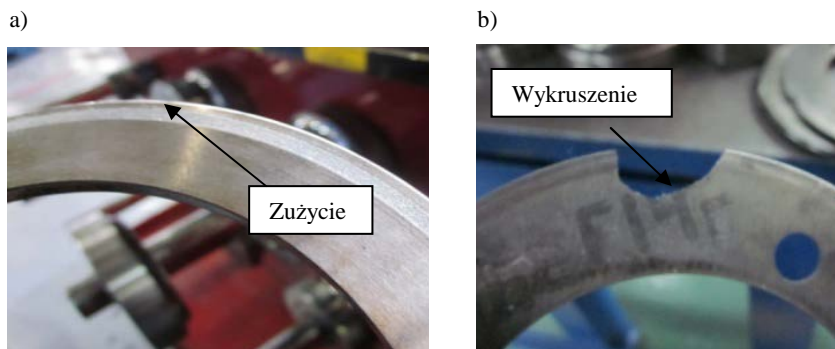
Rodzaj zużycia rolek jest zróżnicowany w zależności od tego, w którym miejscu linii produkcyjnej są usytuowane oraz jaki materiał jest formowany. Pęknięcia pojawiają się w rolkach na początku linii, gdzie naciski są wyższe. Na **Rysunku 4** pokazano przykłady zużycia i pękania rolek



Rys. 4. Przykłady zużycia (a) rolek formujących i ich pękania (b)

Fig. 4. The examples of wear modes: a) wear on roll surface, b) fatigue fracture

Również dyski formujące narażone są na zużycie i bardzo często pojawiają się w nich pęknięcia lub wykruszenia (**Rys. 5**).



Rys. 5. Zużycie dysku formującego ze stali D2 po 15 dniach pracy (a) i przykład wykruszenia (b)

Fig. 5. The wear of forming disk made of D2 steel: a) after 15 days of operation, b) the example of fatigue fracture

RAMY TEORETYCZNE PRACY

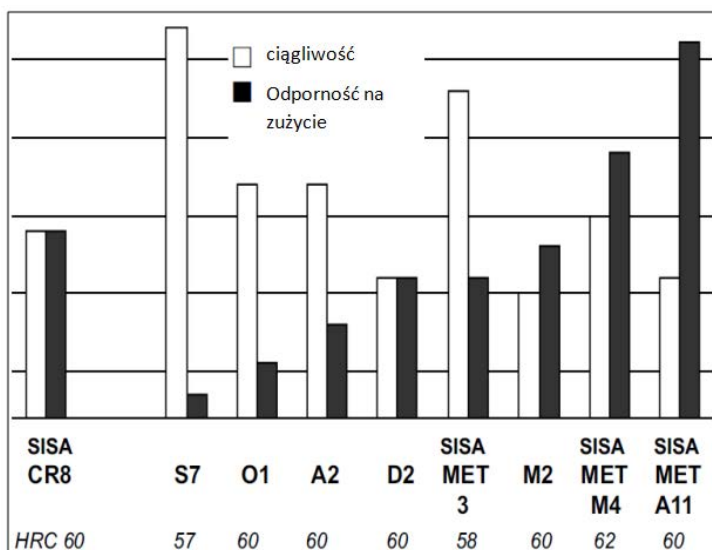
Ponieważ rolki pracują w warunkach przedstawionych w **Tabeli 1**, konieczne jest, aby materiały, z których są wykonane wykazywały wysoką twardość i odporność na ścieranie przy jednoczesnym braku odkształcenia i skłonności do pękania. Aby spełnić powyższe parametry, w świecie wykonuje się rolki ze stali stopowych ze składnikami tworzącymi węgliki i zapewniającymi dobrą hartowność [**L. 12, 13**].

Stale o wysokiej zawartości wanadu. Amerykańska firma *Roll-Kraft* [**L. 11**] sugeruje zastosowanie stali typu CPM 10V zawierających 9,75% V, co zapewnia wyższą odporność na zużycie w porównaniu ze stalą D2. Zastosowanie tej stali zwiększa trwałość rolki od 1,5 do 2 razy w porównaniu ze stalą D2. Materiał ten jest zbliżony do A11 SISA – MET i został zaproponowany do badań w niniejszej pracy.

Elementy wykonane technologią metalurgii proszków. Austriacka firma Böhler – Uddeholm sugeruje, że w przypadku zwiększonego zużycia narzędzi należy stosować materiały wykonane techniką metalurgii proszków, ponieważ są one zaprojektowane tak, aby zapewnić większą odporność na ścieranie. Stosując te technologie, można zapewnić utworzenie bardzo jednorodnej struktury z drobnymi wydzieleniami węglików równomiernie rozłożonych w osnowie metalicznej i pozwala na zastosowanie różnych składników stopowych. W warstwach powierzchniowych narzędzia można usytuować twardsze węgliki, które zapewniają wyższą odporność na zużycie. Ten proces produkcyjny proponuje SISA dla materiału MET-A11 [**L. 3**].

Materiały o wysokiej i średniej zawartości chromu: Chińska firma Bao Steel Roll jako materiał walców w procesie walcowania blach o podwyższonej wytrzymałości proponuje materiał CBRWR-AR, który ma zawartość chromu w granicach 3–5%. Chrom tworzy twarde węgliki i podwyższa hartowność. Materiał ten zbliżony jest do stali SISA-CR8 zaproponowanej do badań [L. 2].

Istnieje kilka typów materiałów do pracy na zimno zawierających węgliki wanadu, chromu i molibdenu. Wśród nich dominuje materiał D2 do pracy na zimno i hartowany w powietrzu, także A2 oraz niektóre modyfikowane materiały jak CR8. Na **Rysunku 6** pokazano porównanie odporności na zużycie i ciągliwości różnych materiałów.



Rys. 6. Porównanie ciągliwości (kolumna biała) i wytrzymałości na zużycie (kolumna czarna) różnych stali narzędziowych [L. 2]

Fig. 6. Comparison of toughness (white column) and wear resistance (black column) of the different tool steels [L.2]

Stal D2. Jest to stal narzędziowa do pracy na zimno, wysokowęglowa, o wysokiej zawartości chromu z dodatkiem molibdenu i wanadu (**Tab. 2**). Charakteryzuje się dobrą hartownością i odpornością na zużycie w połączeniu z umiarkowaną ciągliwością.

Tabela 2. Skład chemiczny stali AISI D2 [L. 5]

Table 2. Chemical composition of D2 steel [L. 5]

C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	V %	P %	S %
1,4–1,6	0,6 max	0,6 max	11–13	0,7–1,2	0,7–1	0,03 max	0,03 max

Obróbkę cieplną tej stali dobiera się w zależności do twardości, jaką się chce uzyskać.

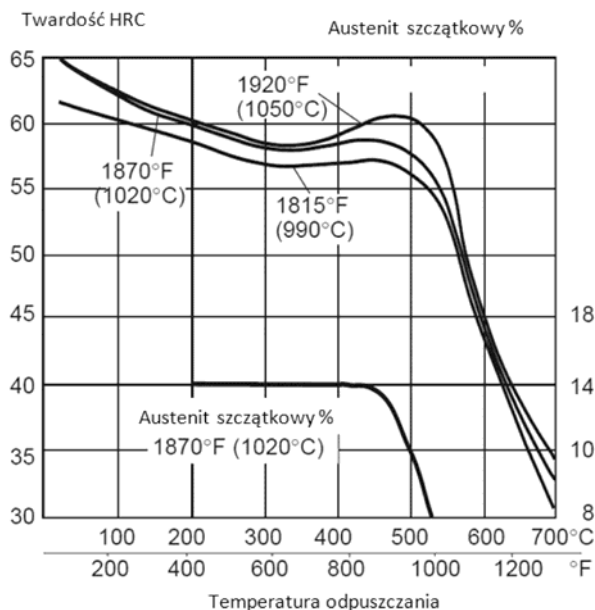
Producent zaleca:

Wyżarzanie: temperatura 850°C, przez 2 godziny.

Hartowanie: w temperaturze od 995–1025°C.

Chłodzenie: w powietrzu lub oleju.

Odpuszczanie: temperatura odpuszczania w zależności od wymaganej twardości (500–550°C). Zaleca się dwukrotne odpuszczanie w temperaturze 550°C celem uzyskania efektu twardości wtórnej i maksymalnego zmniejszenia kruchości (**Rys. 7**). Schładzać do temp. poniżej 200°C pomiędzy pierwszym i drugim odpuszczaniem. Wykres pokazuje również, że w tego rodzaju stali wysokowęglowej pozostaje po hartowaniu ok 14% austenitu szcążkowego.



Rys. 7. Zależność twardości stali D2 od temperatury hartowania i opuszczania [L. 1]

Fig. 7. The effect of heat treatment and tempering temperature on hardness for D2 steel [L. 1]

Stal CR8. Jest to stal narzędziowa do pracy na zimno zaprojektowana jako materiał zastępczy stali D2, oferujący lepszą odporność na zużycie, większą wytrzymałość i twardość. Zawiera mniej węgla i chromu więcej wanadu. Węgliki wanadu są mniejsze od węglików chromu, bardziej równomiernie rozłożone w osnowie, co powoduje mniejsze ryzyko wykruszania się ich na powierzchni trącej.

Tabela 3 przedstawia skład chemiczny stali CR8 zgodnie z danymi dystrybutora SISA.

Tabela 3. Typowy skład chemiczny stali CR8 [L. 3]

Table 3. Chemical composition of Cr8 steel [L. 3]

C %	Mn %	Cr %	Mo %	V %	W
1,1	0,35	7,75	1,6	2,4	1,1

Zastosowanie: Narzędzia do wytłaczania i kucia, tłoczenia, wykrawania, nożyce, noże krążkowe, matryce i stemple.

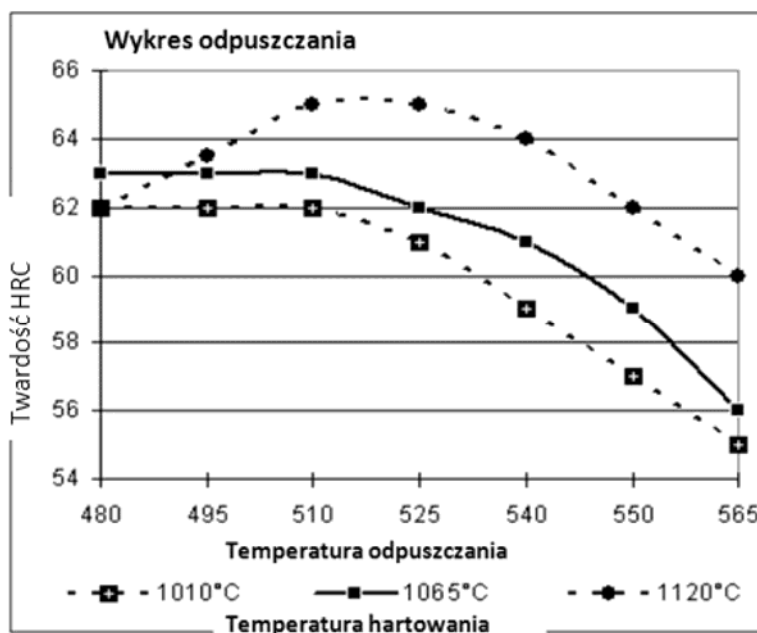
Obróbka cieplna tej stali może zależeć od twardości, jaką się chce uzyskać.

Wyżarzanie: temperatura 840–900°C, przez 2 godziny, schłodzić w piecu lub w temperaturze pokojowej.

Hartowanie: w temperaturze 1010–1020°C.

Chłodzenie: w powietrzu.

Odpuszczanie: odpuszczanie w temperaturze 480–565°C. Należy zastosować podwójne, a nawet potrójne odpuszczanie. Schłodzić do temperatury pokojowej pomiędzy każdym odpuszczaniem. W celu uzyskania pożądanej twardości po odpuszczaniu należy stosować parametry pokazane na **Rysunku 8**.



Rys. 8. Zależność twardości od temperatury odpuszczania dla stali CR8. [L. 2]

Fig. 8. The effect of tempering temperature on hardness for CR8 steel [L. 2]

Stal A11. Jest to materiał proponowany przez SISA wykonany techniką metalurgii proszków o wysokiej odporności na ścieranie (**Rys. 6**). Ta stal ma zastąpić inne stale specjalne używane do pracy na zimno, zwłaszcza gdy niska udarność narzędzia nie jest problemem, natomiast jest trudna obróbka ze względu na duży udział węglików. W **Tabeli 4** podano skład chemiczny stali A11.

Tabela 4. Typowy skład chemiczny stali A11 [L. 4]

Table 4. Chemical composition of A11 steel [L. 4]

Norma	C %	Mn %	Si %	Cr %	Mo %	V %
AISI	2,40–2,50	0,35–0,60	0,75–1,10	4,75–5,75	1,10–1,50	9,25–10,25
A11 SISA	2,45	0,50	0,90	5,30	1,35	9,80

Zastosowanie: narzędzia do tłoczenia, nożyce, stemple, matryce do wyciskania profili.

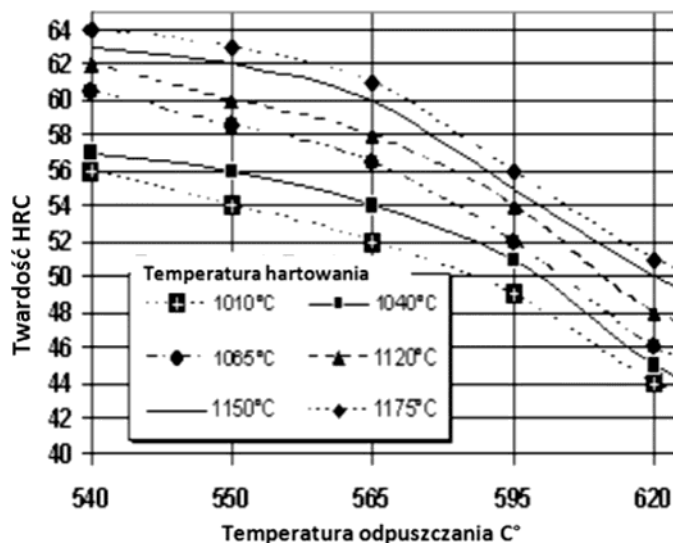
Obróbka cieplna tego materiału zależy od żądanych własności

Wyżarzanie: temperatura 870°C, przez 2 godziny, schłodzić w piecu lub w temperaturze pokojowej.

Hartowanie: temperatura austenitizacji 1010–1075°C.

Chłodzenie: w powietrzu.

Odpuszczanie: stosować dwukrotne lub nawet trzykrotne odpuszczanie w temperaturze co najmniej 540°C. W celu uzyskania pożądanej twardości po odpuszczaniu można zastosować parametry podane na **Rysunku 9**.



Rys. 9. Zależność twardości od temperatury odpuszczania dla stali A11 [L. 3]

Fig. 9. The effect of tempering temperature on hardness for A11 steel [L. 3]

Obróbka podzerowa (kriogeniczna). Dla wysokowęglowych, stopowych stali narzędziowych konieczna jest obróbka podzerowa, bowiem koniec przemiany matrenzytycznej tych materiałów jest poniżej temperatury otoczenia, a więc po hartowaniu pozostaje kilkanaście procent austenitu szczałkowego. Tak więc obróbka ta ma na celu przemianę austenitu szczałkowego w martenzyt oraz wydzielenie milionów „eta-węglików” znacznie podwyższających odporność na ścieranie przy zmniejszonej kruchości materiału.

Dodatkowo zaproponowano azotowanie jako sposób utwardzania powierzchni.

BADANIA

Analiza materiałów obecnie stosowanych na narzędzia

Ponieważ bardzo częste są przypadki niedotrzymania przez dostawców składu chemicznego produktów, badania należy zaczynać od sprawdzenia zgodności parametrów materiałowych z obowiązującymi normami. Następnie badana jest twardość i mikrostruktura materiału.

W niniejszej pracy badane były zużyte i pęknięte rolki oraz dyski formujące przenoszone na **Rys. 4 i 5**.

Tabela 5. Skład chemiczny oprzyrządowania

Table 5. Chemical composition of the accessories

Rolka					
C %	Mn %	P %	S %	Cr %	V %
1,610	0,304	0,035	0,003	11,530	0,803
Dysk					
C %	Mn %	P %	S %	Cr %	V %
1,570	0,328	0,033	0,005	11,560	0,882

Analiza dodatków stopowych, jak węgla, chromu i wanadu wykazała, że mieszczą się one w przedziałach tolerancji normy AISI dla stali D2 (**Tabela 2**). Ilości zanieczyszczeń, fosforu i siarki są niskie (**Tab. 5**). Twardość jest niewiele niższa niż zawarta w dokumentacji technicznej zakładu (**Tab. 6**).

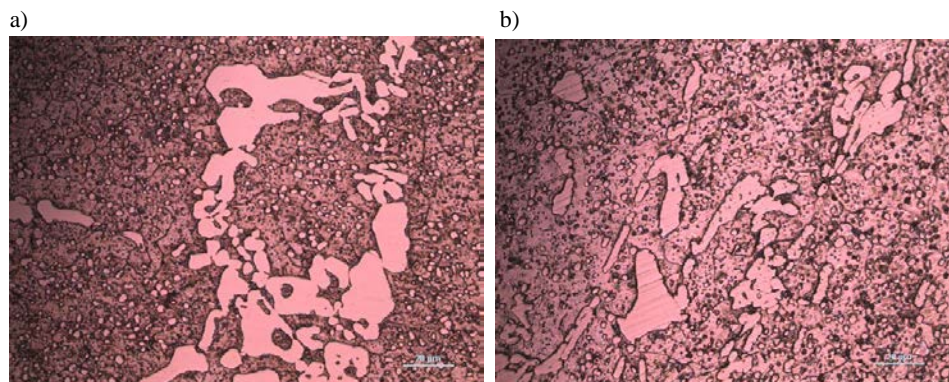
Tabela 6. Twardość oprzyrządowania

Table 6. Mechanical properties of the accessories

Elementy	Twardość (HRC)	
	Średnia	Odchylenie stand.
Rolka	54,8	1,62
Dysk	57,5	1,51

Na podstawie pomiarów twardości można wątpić czy obróbka cieplna rolek i dysków była przeprowadzona prawidłowo.

Badania mikrostruktury potwierdziły duże skupiska węglików chromu w osnowie martenzytycznej oraz stopowych węglików drugorzędowych (**Rys. 10**).



Rys. 10. Mikrostruktura stali D2: a) rolki, b) dysku. Pow. (500x) Nital 2,5%

Fig. 10. Microstructure of D2 steel, a) roll, b) disc (500x) Nital 2,5%

Aktualna obróbka cieplna rolek jest następująca:

Wyrzewanie wstępne 1 do 1,5 godziny w temperaturze 600°C.

Grzanie w temperaturze 800°C.

Temperatura austenizacji 1020°C przez okres 2–3 godzin.

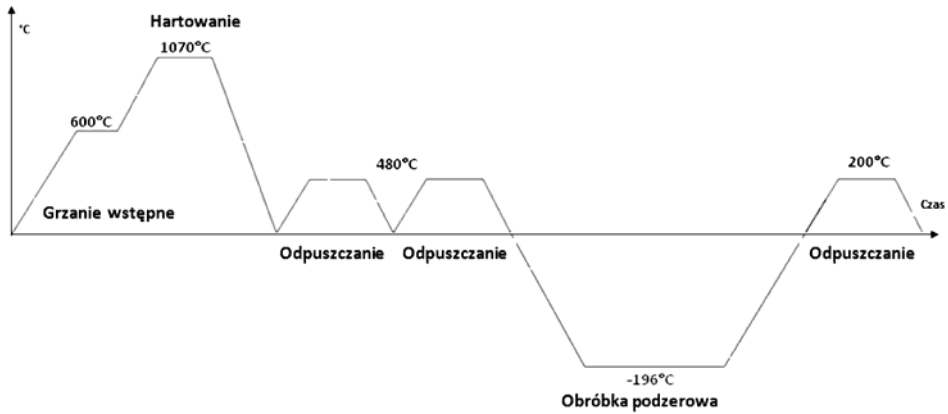
Hartowanie w powietrzu i odpuszczanie w temperaturze 180°C.

Taka obróbka cieplna powinna zapewnić twardość 62 HRC, co nie zostało osiągnięte. Natomiast odpuszczanie w temperaturze 180°C nie eliminuje całkowicie naprężeń hartowniczych.

Propozycja zmian

Na podstawie studiów bibliograficznych i podobnych projektów wykonanych i wdrożonych, zaproponowano w pierwszej kolejności zmiany parametrów obróbki cieplnej rolek i dysków ze stali D2. Następnie zaproponowano nowe materiały z ich odpowiednią obróbką cieplną i cieplno-chemiczną.

Dla rolek i dysków formujących zaproponowano kompleksową obróbkę cieplną zgodnie ze schematem przedstawionym na **Rysunku 11**.



Rys. 11. Kompleksowa obróbka cieplna zaproponowana dla elementów wykonanych ze stali D2: hartowanie – podwójne odpuszczanie – obróbka podzerowa – niskie odpuszczanie

Fig. 11. Complete heat treatment proposed for parts made of D2 steel: quenching and tempering with double annealing and cryogenic treatment

Tak przeprowadzona obróbka cieplna zapewni efekt twardości wtórnej odpuszczania, wyeliminowanie naprężeń hartowniczych i pozytywne efekty obróbki podzerowej.

Przeprowadzono analizę istniejących i proponowanych dostawców materiałów SISA i zabiegi termiczne prowadzone przez INDUX, jak również azotowanie i obróbkę podzerową oferowaną przez firmę CRYOSA.

Do dalszych badań zaproponowano stal D2 i dwa nowe materiały CR8 i A11.

Tabela 7. Skład chemiczny materiałów do badań

Table 7. Chemical composition of the materials used in the study

Stal	C %	Cr %	V %	Mo %
D2	1,57	12,59	0,819	0,955
Cr8	1,13	7,87	2,55	1,59
A11	2,42	5,01	10,13	1,07

Dla powyższych materiałów zaproponowano następującą obróbkę cieplną (**Tab. 8**), aby osiągnąć minimalną twardość 60 HRC.

Tabela 8. Proponowane parametry obróbki cieplnej

Table 8. Proposed parameters for heat treatment

Stal	Hartowanie	Odpuszczanie	Liczba zabiegów odpuszczania
D2	1070°C	480°C	2
Cr8	1120°C	510°C	2
A11	1175°C	550°C	3

Obróbka podzerowa i azotowanie są opcjonalne i mogą być zastosowane dla każdego z powyższych materiałów.

Badania tribologiczne i własności mechaniczne

Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze T-05 typu Block-on-Ring. Kombinacje wykonanych prób są zestawione w **Tabeli 9**. Prowadzono od 3 do 5 testów na próbce, z użyciem testu statystycznego Dixon Q'Test w celu ustalenia, czy konieczne było powtórzenie danego eksperymentu przy poziomie ufności 95%. Każda próbka była polerowana w celu usunięcia zanieczyszczeń.

Tabela 9. Kombinacja testów zużycia ściernego

Table 9. The program of the abrasive tests

Stal	Obrobka ciepła (TT)			
	TT Ternium	TT Propozycja	TT + Podzerowa	TT + Azotowanie
D2	x	x	x	x
CR8		x	x	x
A11		x	x	x

Urządzenie T-05 pokazuje w sposób ciągły pomiary siły tarcia (T), przemieszczenie pionowe (zużycie mierzone w μm) i temperaturę ($^{\circ}\text{C}$). Objętość zużytego materiału uzyskuje się ze wzoru poniżej, mierząc długość wytarcia przy znanej średnicy pierścienia.

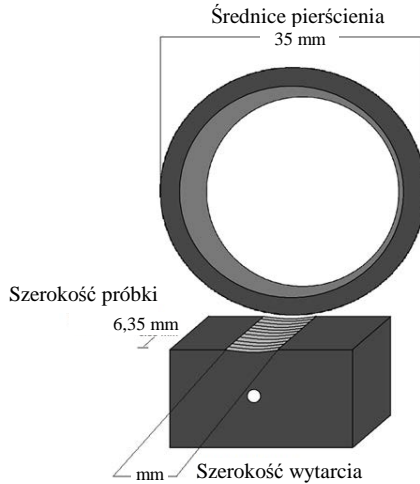
$$Z_v = \frac{D_t^2 l}{8} \left[2 * \text{Sen}^{-1} \left(\frac{b}{D_t} \right) - \text{Sin} \left(2 * \text{Sin}^{-1} \left(\frac{b}{D_t} \right) \right) \right] \quad (1)$$

gdzie: Z_v = zużycie objętościowe, mm^3

D_t = średnica pierścienia, mm, $D_t = 35$ mm

l = szerokość próbki, mm, $l = 6,35$ mm

b = średnia długość wytarcia na powierzchni próbki, mm.



Rys. 12. Sposób pomiaru zużycia próbki na testerze T-05

Fig. 12. The method for wear measurements in T-05 tribotester

Użyto próbek płaskich do badań, jako że styk rolka–rura jest najbardziej zbliżony do tej próby. Parametry prób tribologicznych przedstawiono w **Tab. 10**, natomiast sposób pomiaru zużycia pokazano na **Rys. 12**.

Tabela 10. Parametry testu T- 05

Table 10. Test parameters used in T-05 tribotester

Parametry	
Obciążenie	110 kg
Czas próby	25 min
Droga tarcia	1000 m
Temperatura	Otoczenia
RPM pierścienia	364
Olej smarujący	PROSOIL

Pierścienie do prób były wykonane ze stali D2, hartowane z pokryciem PVD typu ALCRONA (AlCrN).

Zbadano również udurowość w próbie Charpy, w której wahadło ma ciężar 50 kg. Tak, jak w przypadku prób tribologicznych użyto testu statystycznego Dixon Q-Test w celu ustalenia ilości prób. Kombinacje wykonanych prób zestawiono w **Tabeli 11**.

Tabela 11. Kombinacja prób do badania udarności

Table 11. The program of the toughness testing

Materiał	Obróbka cieplna (TT)		
	TT Ternium	TT Proponowana	TT + Podzerowa
D2	x	x	x
CR8		x	x
A11		x	x

WYNIKI

W badaniach porównano właściwości tribologiczne i udarność materiału D2 obecnie stosowanego w firmie Ternium na rolki i dyski formujące, z nowymi materiałami zaproponowanymi z ich odpowiednią obróbką cieplną. Parametrami porównawczymi w badaniach tribologicznych była objętość wytartego materiału i energia absorbowana w próbie Charpy.

Wyniki pomiaru twardości po obróbce cieplnej

Firma Ternium postawiła dostawcom oprzyrządowania kryterium minimalnej twardości 60 HRC, co prawie nigdy nie jest spełnione (zob. **Tab. 6**). Jest to powszechnie stosowane w przemyśle kryterium, łatwe do sprawdzenia. Jest ono w wielu przypadkach błędne, bo materiał łatwo jest zahartować do wymaganej twardości, ale nie stosując odpowiednio wysokiej temperatury odpuszczania materiał pozostaje kruchy i w wielu przypadkach następują pęknięcia elementu hartowanego, co ma bardziej negatywne skutki niż zużycie. Aby ustalić, jak skuteczna jest proponowana obróbka cieplna, wykonano badania twardości przedstawione w **Tabeli 12**.

Tabela 12. Twardość badanych materiałów

Table 12. Hardness of the tested materials

Twardość materiałów po obróbce cieplnej	
Próbki	Twardość HRC
D2 TT Ternium	55,6
D2 TT proponowana	55,8
D2 TT + podzerowa	56,5
D2 TT + azotowanie	56,6
Cr8 TT proponowana	60,1
Cr8 TT + podzerowa	63,6
Cr8 TT + azotowanie	57,8
A11 TT proponowana	60,9
A11 TT + podzerowa	61,8
A11 TT + azotowanie	58,6

Z obserwacji badania twardości materiałów po obróbce cieplnej wynika, że najwyższą twardość osiągają stale CR8 i A11 poddane obróbce podzerowej. W przypadku azotowania zmniejszyła się ich twardość, dlatego że wysoka temperatura azotowania ma wpływ na obniżenie twardości. Nie można jednak odnosić wprost wyników twardości do odporności na zużycie, bowiem zużycie jest zależne od wielu innych czynników.

Wyniki pomiarów zużycia

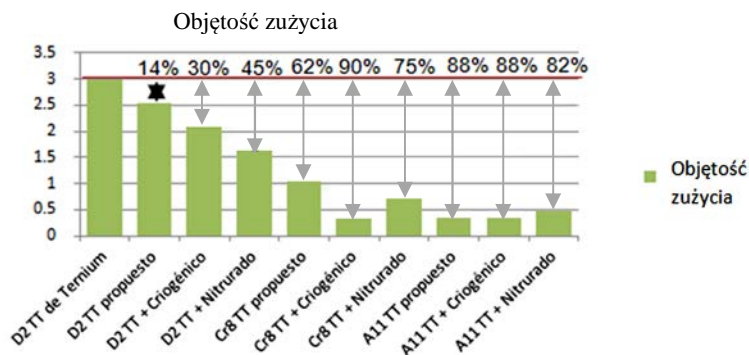
W testach zużycia na maszynie T-05 były analizowane różne czynniki: objętość wytarcia, siła tarcia i temperatura. Mierzono długość wytarcia pozostawionego przez pierścień po każdym badaniu i obliczano objętość wytarcia (**Rys. 12**). Wyniki przedstawiono w **Tabeli 13**.

Tabela 13. Wyniki badań zużycia

Table13. The results of wear tests

Próbka	Wytarcie (mm)	Objętość wytarcia (mm ³)
D2 TT Ternium	4,4130	2,9862
D2 TT proponowana	4,3760	2,5487
D2 TT + podzerowa	4,0810	2,0853
D2 TT + azotowanie	3,7660	1,6292
Cr8 TT proponowana	3,5916	1,1270
Cr8 TT + podzerowa	2,1290	0,3011
Cr8 TT + azotowanie	1,6420	0,7479
A11 TT proponowana	2,2646	0,3531
A11 TT + podzerowa	2,2189	0,3325
A11 TT + azotowanie	2,6069	0,5414

Wyniki badań zużycia z **Tabeli 13** przedstawiono na **Rysunku 13**. Można zaobserwować wzrost odporności na zużycie zaproponowanych stali stosowanych z ich odpowiednią obróbką cieplną w porównaniu ze stalą D2 obecnie stosowaną w Ternium. Najlepszy wynik, 90% wzrostu odporności na zużycie, uzyskano dla stali Cr8, hartowanej, dwukrotnie odpuszczanej i poddanej obróbce podzerowej (**Rys. 13**).



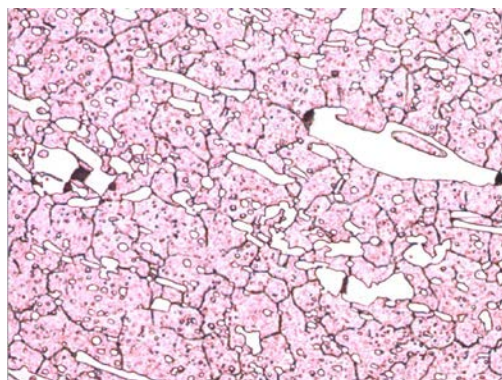
Rys. 13. Wyniki badań odporności na zużycie. Nomenklatura: TT – obrabiany cieplnie, Criogénico – obróbka podzerowa, Nitrurado – azotowanie, TT propuesto – proponowana obróbka cieplna

Fig. 13. Results of wear resistance. Nomenclature: TT – heat treated Criogénico – cryogenic treatment, Nitrurado – nitriding, TT propuesto – the proposed thermal treatment

BADANIA METALOGRAFICZNE

Wszystkie materiały podano badaniom metalograficznym celem wyjaśnienia zależności pomiędzy strukturą materiału i jego odpornością na zużycie. W przypadku stali D2, z proponowaną obróbką cieplną, zaobserwować można duże wydzielenia węglików chromu oraz drobne węgliki wanadu w matrycy martenzytycznej (**Rys. 14**).

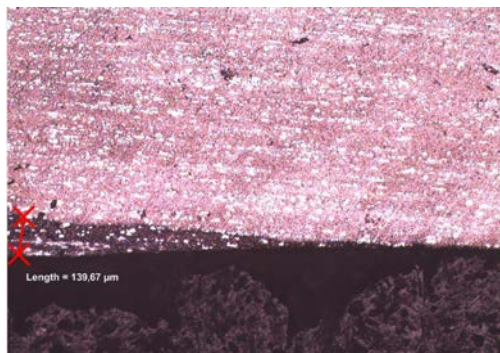
Po obróbce podzerowej zaobserwowano 30% wzrost odporności na zużycie w porównaniu ze stalą Ternium D2. Struktura wykazuje rozdrobnienie martenzytu i usunięciu austenitu szczątkowego.



Rys. 14. Stal D2 hartowana (1070°C), z podwójnym odpuszczaniem w temperaturze 480°C, nital 2,5%, pow. 1000x

Fig. 14. D2 steel (quenching temperature 1070°C and tempering temperature 480°C), nital 2,5%, 1000x

Warstwa azotowana o średniej grubości 130 m pokazana na **Rysunku 15** została wytarta w próbie tribologicznej. Ponieważ na początku próby jest styk liniowy, pomiędzy pierścieniem a warstwą azotowaną tworzą się duże naciski na małej powierzchni, co przyspiesza zużycie liniowe.

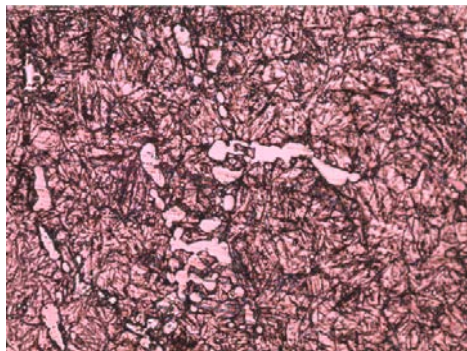


Rys. 15. Stal D2 azotowana plazmowo. Nital 2,5% (100x)

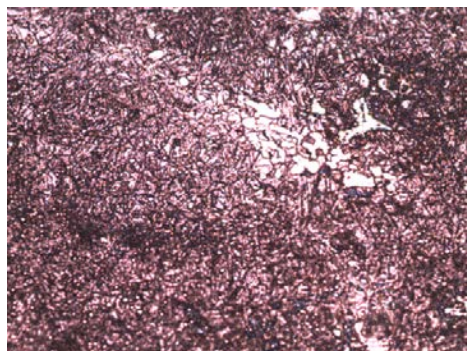
Fig. 15. Nitrided layer in D2 steel. Nital 2,5% (100x)

Stal CR8 hartowana i dwukrotnie odpuszczana wykazała 62% lepszą odporność na zużycie niż stal D2 Ternium. Jej mikrostruktura składa się z martenzytu i węglików. Jeżeli uzupełnić proponowaną obróbkę dla stali CR8 o obróbkę podzerową, różnica wartości zużycia wzrasta do 90%, co ma swoje uzasadnienie w widocznym rozdrobieniu struktury martenzytycznej i usunięciu austenitu szczytkowego (**Rys. 16 b**).

a)



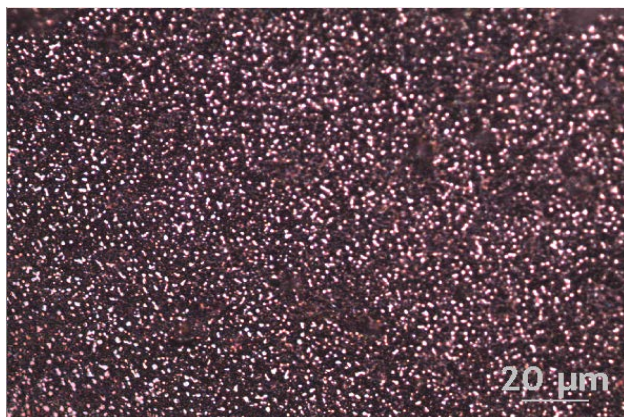
b)



Rys. 16. Stal CR8 hartowana w temperaturze 1120°C i podwójnie odpuszczana w 510°C, a). Na rys. (b) jest ta sama stal uzupełniona obróbką podzerową. Nital 2,5%, pow. 1000x

Fig. 16. CR8 hardened steel at 1120°C and tempered twice at 510°C, a). Fig. (b) is supplemented with the same steel with cryogenic treatment. Nital 2.5% (1000x)

W przypadku stali A11 wyprodukowanej w procesie metalurgii proszków obserwuje się bardzo jednorodną mikrostrukturę stali z wydzieleniami bardzo drobnych węglików w całym obszarze obserwacji (**Rys. 17**). Taka mikrostruktura sprawia, że materiał ten jest odporny na zużycie nawet bez zastosowania dodatkowych zabiegów w postaci obróbki podzerowej czy azotowania.



Rys. 17. Stal A11. Hartowana, 1175°C i podwójnie odpuszczana w temperaturze 550°C, poddana obróbce podzerowej. Nital 2,5%

Fig. 17. A11 steel. Quenching temperature 1175°C and tempering at 550°C after cryogenic treatment. Nital 2.5%

BADANIA UDARNOŚCI

Energia absorbowana w próbie udarności odzwierciedla zarówno typ materiału, jak i jego obróbkę cieplną i strukturę metalograficzną. Jak widać z **Tabeli 14**, najbardziej krucha jest stal D2 z niewłaściwie zastosowaną obróbką cieplną, temperatura odpuszczania 180°C jest stanowczo zbyt niska, aby wyeliminować naprężenia hartownicze. Podwójne wysokie odpuszczanie i obróbka podzerowa znacznie zmniejsza kruchość stali D2. Stosunkowo krucha jest stal A11, co jest naturalne w przypadku wyrobów tworzonych w procesie metalurgii proszków (**Tab. 14**).

Na **Rysunku 18** przedstawiono procentowy wzrost wytrzymałości udarnościowej proponowanych materiałów z odpowiednią obróbką cieplną w stosunku do materiału obecnie stosowanego.

Zgodnie z grafiką na **Rysunku 18** obróbka podzerowa podwyższa udarność o 83% zarówno dla stali CR8, jak i D2 w porównaniu do obecnie stosowanego materiału. W przypadku stali A11 nie notuje się polepszenia udarności, co jest naturalne dla wyrobów spiekanych z proszków.

Tabela 14. Wyniki badań udarności

Table 14. The results of toughness tests

Próbki	Energia Absorbowana (J)
D2 TT Ternium	2,00
D2 TT proponowana	2,66
D2 TT + obr. podzerowa	3,66
Cr8 TT proponowana	3,33
Cr8 TT + obr. podzerowa	3,66
A11 TT proponowana	3,00
A11 TT + obr. podzerowa	3,00

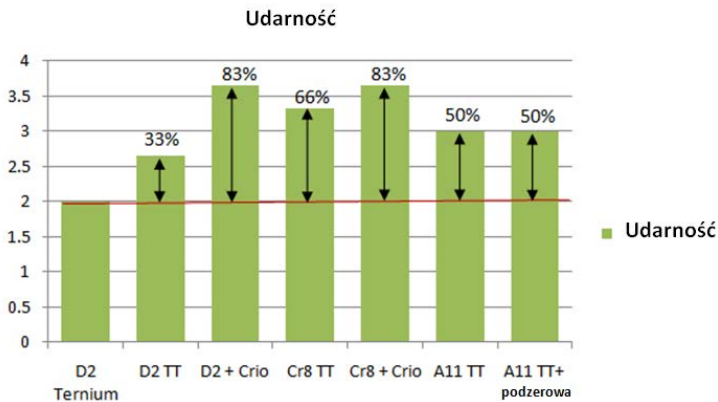
**Rys. 18. Wyniki badań udarności**

Fig. 18. The results of toughness tests

ANALIZA EKONOMICZNA

Obniżenie kosztów surowców, energii i procesu wytwarzania jest pożądane w każdym przedsiębiorstwie, aby zwiększyć konkurencyjność na rynku. Należy zrobić dokładną analizę kosztów i korzyści w celu osiągnięcia prawdziwego obrazu całości kosztów zainwestowanych w przedsięwzięcie. Najpierw przeanalizowano ceny materiału, które są szacunkowe, zmieniają się bowiem w zależności od dostawcy i kursu dolara (**Tab. 15**).

Następnie uwzględniono koszty kompleksowej obróbki cieplnej, które zakłady przeprowadzające obróbkę najczęściej kalkulują w zależności od ciężaru obrabianej części (**Tab. 16**).

Tabela 15. Koszty materiałów proponowanych za kilogram

Table 15. Cost per kilogram of the proposed material

Material	Koszt za kg w pesos
D2	106,00
Cr8	295,00
A11	450,00

Tabela 16. Koszty obróbki cieplnej, obróbka proponowana to hartowanie z podwójnym odpuszczaniem

Table 16. The costs of heat treatment, proposed treatment embraces hardening and double tempering

Obróbka cieplna	Koszt za kg w pesos
D2 Ternium	48,00
D2 TT Proponowana	48,00
Cr8 TT Proponowana	48,00
A11 TT Proponowana	84,00
Podzerowa	79,00
Azotowanie	35,50

Wykres na **Rysunku 19** przedstawia relację kosztu materiałów z obróbką cieplną w relacji do odporności na zużycie przedstawionej jako odwrotność objętości wytarcia w próbach.

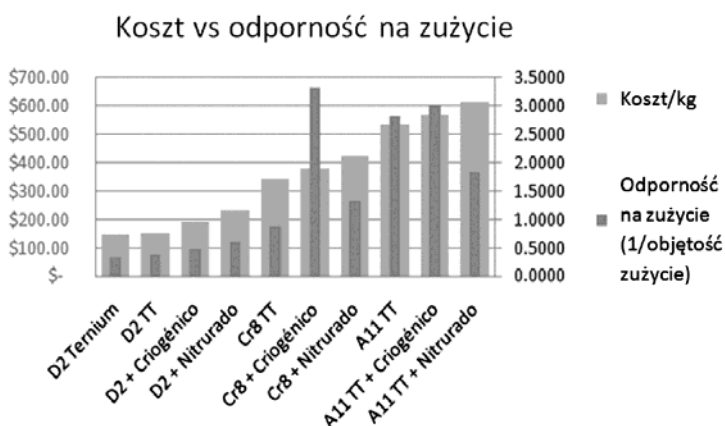
**Rys. 19. Koszt materiału w relacji do odporności na zużycie**

Fig. 19. Relation between the cost and the wear results

Materiałem o najbardziej sprzyjającej relacji koszt materiału w relacji do zużycia jest CR8 z obróbką podzerową, którego wytrzymałość na zużycie znacznie przerasta koszty materiałów i obróbki cieplnej.

WNIOSKI

Należy przełamać przekonanie, że stal D2 szeroko stosowana na narzędzia do pracy na zimno jest najlepszym materiałem we wszystkich warunkach pracy, również na rolki do kształtowania rur.

1. Jeśli chce się kontynuować produkcję narzędzi ze stali D2, należy:
 - stosować obowiązkowo podwójne odpuszczanie w temp. od 480 do 550°C,
 - koniecznie stosować obróbkę podzerową celem wyeliminowania austenitu szczytkowego po odpuszczaniu i podwyższenia odporności na zużycie,
 - w zależności od warunków pracy próbować zastosowania obróbki powierzchniowej; azotowania, borowania lub stosowania pokryć PVD.
2. Nowe materiały:

Najlepsza okazała się stal SISA CR8 z proponowaną obróbką cieplną składającą się z hartowania i podwójnego odpuszczania, poddana następnie obróbce podzerowej.

Proponowane stale SISA A11 z obróbką cieplną składającą się z hartowania i potrójnego odpuszczania plus ewentualną obróbką podzerową dają bardzo dobre wyniki w warunkach braku obciążeń dynamicznych, jako że jest wykonana metodą metalurgii proszków.

ANALIZA KOSZTÓW I KORZYŚCI

Stal CR8 z obróbką podzerową jest materiałem prezentującym największe korzyści w stosunku do poniesionych kosztów. Następna jest stal A11 hartowana i potrójnie odpuszczana i wreszcie ta sama stal uzupełniona obróbką podzerową.

Obróbka cieplna jest niezbędna, aby zwiększyć trwałość narzędzi, musi być jednak przeprowadzona zgodnie z parametrami starannie dobranymi do danego materiału i warunków eksploatacji narzędzi.

W świecie globalizacji i w warunkach ostrej konkurencji należy poszukiwać lepszych materiałów i nowych technologii w celu zwiększenia wydajności i obniżenia kosztów. Analiza musi jednak być oparta na rzetelnym i dokładnym wyliczeniu kosztów i korzyści.

Zaleca się wykonanie zestawu rolek z materiału CR8 z zaproponowaną obróbką cieplną i odrębną obróbką podzerową dla oceny wyników odporności na zużycie rolek na linii produkcyjnej w walcowni 6K. Ocenę przydatności rolek należy przeprowadzić w oparciu o ilość ton wyprodukowanych rur tego samego kalibru od zmiany zużytych rolek na nowe.

Azotowanie nie jest zalecane dla takich zastosowań, w których siły wywierane przez rolki są zbyt duże i bardzo skoncentrowane. Azotowanie daje dobre wyniki przy większych powierzchniach styku między narzędziem i materiałem formowanym.

Obróbka pozonderowa jest wysoce zalecana dla klasycznych stali wysokowęglowych, natomiast nie wykazuje zbytnej poprawy jakości dla stali wytworzonej w procesie metalurgii proszków.

ZALECENIA

1. Stosować dwukrotne wysokie odpuszczanie i obróbkę podzerową dla stali D2.
2. Rozpocząć eliminowanie narzędzi ze stali D2, zastępując je materiałem typu stal CR8.
3. Wykonanie zaawansowanych badań tribologicznych z próbkami o styku powierzchniowym, które lepiej odzwierciedlają mechanizm zużycia.

LITERATURA

1. Sisa (2009). Acero D2. Recuperado el 13 de enero del 2011 de www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20D2.pdf
2. Sisa (2008). Acero Cr8. Recuperado el 13 de enero del 2011 de <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20CR8.pdf>
3. Sisa (2008). Acero Sisa Met A11. Recuperado el 13 de enero del 2011 de <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA-MET%20A11%20de%20Metalurgia%20en%20Polvo%20%28PM%29.pdf>
4. Haduch Z. (2010) Proceso de Formación de Tuberías de Acero, Recuperado el 15 de Enero del 2011
5. ASM Handbook, volumen 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloy
6. Córdova S. (2003) TESIS Proceso de nitruración. Universidad de Córdoba Perú.
7. De Hoyos B., García H., Moreno P., Benavides P., Prolongación de la vida útil de herramientas de troquelado, PEF de licenciatura; San Pedro Garza García; 2010.
8. Inzunza F., Zaragoza A., Treviño D., Prolongación de la vida útil de dados de extrusión de aluminio, PEF de licenciatura; San Pedro Garza García; 2010.
9. Pokorny Z. (2009) Research of Mechanical Properties of Barrels After Plasma Nitriding Process.
10. Zambrano-Rengel G.E., (2009) MICROSTRUCTURE AND CHARACTERIZATION OF API 5L X-52 PIPELINE STEEL SAMPLES. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
11. Brensing K., Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes.
12. EUROPIPE GmbH (2009). Production and Testing of Large-Diameter Pipes. Recuperado el 25 de Marzo del 2011 de www.europipe.com
13. BaoStell Roll (2009) "High Abrasion Resistance Rolls" <http://www.baosteelroll.com/product/394-high-abrasion-resistance-roll-----462b/>

14. Kalbarczyk M., Michalak M., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W., Wulczyński J., Haduch-Suski Z. (2003). The Influence of PVD coating on scuffing and pitting of steel friction joints. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Plata. Argentina 2013.

Summary

Industries engaged in roll forming of tubes apply different methodologies and innovating technologies in order to perform this task, but tubes with welded seams are more profitable.

The basic tooling used to roll-form tubes, or rolls, are usually made of a tool steel with a high Chromium content, namely, D2 steel. However, in order to produce higher quality tubes of high-strength steels, higher mechanical properties than those shown by D2 steel are required.

As a consequence, new technologies, designs, materials, and heat treatments have emerged so the new requirements are met. This has a direct impact on the costs incurred and the productivity of metal-mechanic industries.

In this project, various cold work steels were analysed and compared with D2 steel, in order to improve the tool life of rolls for roll forming of tubes. Tribological testing was done with a T-05 block-on-ring setup with testing conditions similar to those in real life. Charpy testing was done in order to obtain impact toughness. The obtained results are of great importance, because they may result on significant cost reductions.