

Zdeněk Kosňovský, Sławomir Sztejnbiś**

ZASTOSOWANIE NAJNOWSZYCH OSIĄGNIĘĆ TECHNIKI PRODUKCJI CZĘŚCI ZAMIENNYCH DLA GÓRNICTWA ODKRYWKOWEGO

1. Wstęp

Części pracujące w urządzeniach do odkrywkowego wydobycia węgla są bardzo intensywnie obciążone, a ponadto wymagana jest ich duża żywotność. Elementy te produkuje się z ciężkich odkuwek, odlewów, i nie jest to łatwy proces, gdyż wymaga właściwego doboru materiałów, pełnego wykorzystania możliwości technicznych zastosowanej stali, znajomości technologii obróbki mechanicznej, a także specyfiki pracy urządzenia, w którym te części pracują.

Dopiero właściwa kombinacja wszystkich tych elementów oraz symulacja komputerowa procesu ich wytwarzania pozwala zaspokoić wymagania użytkownika i zapewnić długą żywotność urządzenia.

W niniejszym artykule pragnę przedstawić krótką charakterystykę niektórych produktów, które wykonywaliśmy i dostarczaliśmy naszym klientom.

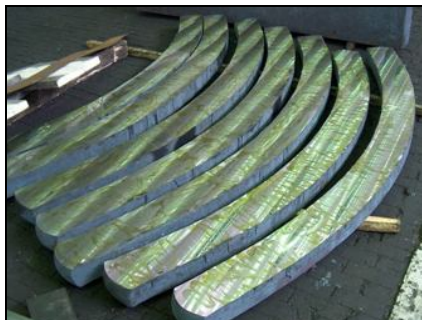
Urządzenia typu koparki, zwalówki mają dużą wydajność sięgającą 10÷20 tys. m³ wydobywanego urobku na godzinę i dlatego też każda godzina postoju oznacza potężne straty finansowe. Dlatego problem żywotności i niezawodności części zamiennych jest tak ważny.

2. Łoże kulowe wielkogabarytowe łożyska kulowe

Łożyska kulowe (rys. 1) produkowane są jako jednorzędowe lub dwurzędowe i wykonywane są z odkuwek. W zależności od średnicy łoże jest dzielone na odpowiednią ilość segmentów (rys. 2 i 3), które następnie składane są w całość. Powstałe w ten sposób łożysko powinno być odporne na zużycie i mieć jak najdłuższą żywotność.

* P.H. Arimpex, Zagnańsk

Największe wymagania techniczne stawiane są powierzchni bieżni łoża, na której toczą się kule. Do produkcji odkuwek stosowana jest zazwyczaj stal 45E, 51CrV4 i 42CrMo4. Z tych stali nasza firma dotychczas wykonywała łoża kulowe.



Rys. 2. Segmenty odkuwek bieżni



Rys. 3. Segment podwójnej bieżni kulowej

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny używanych materiałów oraz ich własności mechaniczne.

Analiza porównawcza odkuwek bieżni kulowej wykonanych ze stali z uwzględnieniem wpływu poszczególnych pierwiastków chemicznych na określone parametry wytrzymałościowe.

- **Węgiel (C)** jest głównym nośnikiem własności wytrzymałościowych stali. Rosnąca zawartość węgla prowadzi do zwiększenia granicy wytrzymałości oraz wydłużenia, obniżają się natomiast własności plastyczne (ciągliwość A , przewężenie Z , wytrzymałość na zjawisko karbu KV). Ze wzrostem wytrzymałości rośnie również twardość. **Mangan (Mn)** utwardza ferryt i podczas powstawania cementytu łączy się z węglem. W ten sposób stopniowo rośnie twardość i wytrzymałość, nawet przy niewielkim obniżeniu ciągliwości. Jego zawartość w zwykłych stalach konstrukcyjnych wynosi do 2%.

TABELA 1
Skład chemiczny używanych materiałów oraz ich własności mechaniczne

Materiał	Skład chemiczny, %										Własności mechaniczne w stanie ulepszonym cieplnie				
	C	Si _{max}	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	Ni	V	Cr + Mo + Ni _{max}	R _{e min} , N/mm ²	R _m , N/mm ²	A, % Min	Z, % Min	KV, J Min
45E	0,42÷0,50	0,40	0,50÷0,80	0,035	0,035	max 0,40	max 0,10	max 0,40	–	0,63	min 370	630÷780	17	45	25
51CrV4	0,47÷0,55	0,40	0,70÷1,10	0,035	0,035	0,90÷1,20	–	–	0,10÷0,25	–	600	800÷950	13	50	30
42CrMo4	0,38÷0,45	0,40	0,60÷0,90	0,035	0,035	0,90÷1,20	0,15÷0,30	–	–	–	min 550	800÷950	13	50	35

- **Molibden (Mo)** daje z węglem bardzo stabilny cementyt Mo_2C . Jego główny wpływ na własności stali polega na tym, że zdecydowanie poprawia własności mechaniczne w stanie zahartowanym przy zawartości do 6%. Rośnie przy tym R_m , R_e i to przy praktycznie niezmiennych cechach plastycznych. Obniżanie punktu A_r (punkt przejścia austenitu do niższych struktur) i zmniejszenie krytycznej prędkości chłodzenia powoduje zwiększenie zdolności hartowania skrośnego stali. Wykazano przy tym, że zostaje usunięta kruchość odpuszczania i zmniejsza się czułość na przegrzanie i wzrost ziaren. Stale z dodatkiem $0,14 \div 0,25\%$ Mo można po odpuszczeniu chłodzić z dowolną prędkością, dlatego że nie mają skłonności do kruchości po odpuszczeniu. Ten fakt wpływa znacząco na jakość przejściowej warstwy wyrobów i wykonanie hartowania powierzchniowego, powoduje tak zwane „samoodpuszczenie struktury zahartowanej warstwy” w warstwie pośredniej między strefą hartowaną i materiałem podstawowym nie wywołując powstania lokalnych miejsc kruchych po odpuszczeniu. Jest to bardzo ważne spostrzeżenie, szczególnie przy hartowaniu indukcyjnym.
- **Wanad (V)** wytwarza z węglem twardy cementyt. Wpływ wanadu na twardość stali zależy od tego, że przy pewnej ilości węgla większa zawartość wanadu obniża twardość, ponieważ zwiększa się ilość cementytu wanadowego i ferrytu. Maleje przy tym ilość perlitu. Obecność niewielkiej ilości wanadu w stali przy średniej ilości węgla podnosi nieznacznie wytrzymałość, ale znacząco zwiększa stosunek ciągliwości do wytrzymałości. Zaletą domieszki wanadowej jest to, że taka stal lepiej się kształtuje i ma drobniejszą strukturę. Wanad znacznie zwiększa temperaturę odpuszczania stali, która jest niezbędna do osiągnięcia żądanej twardości. Stale wanadowe charakteryzują się też wytwarzaniem cementytu, co powoduje wzrost wytrzymałości przy spadku ciągliwości. W stosunku do stali węglowych stale o małej zawartości wanadu charakteryzują się tym, że przy wysokiej temperaturze odpuszczania utrzymują dużą twardość po hartowaniu, z tym że maleje ich ciągliwość. To powoduje, że stale z domieszką wanadu są mniej korzystne przy hartowaniu powierzchniowym.

Material 45E

Często stosowanym materiałem do produkcji bieżni kulowej jest stal 45E. Wykonane z tej stali segmenty łoża obrabiane są mechanicznie, a proces utwardzania bieżni, po której toczą się kule, jest przeprowadzany w procesie dogniatania. W ten sposób powstaje warstwa utwardzonego materiału, która w procesie eksploatacji łoża ulega dalszemu utwardzeniu. Bieżnie wykonane w ten sposób charakteryzują się dobrymi parametrami technicznymi i żywotnością.

Material 51CrV4

Z powyższego materiału produkuje się segmenty łoża, które po obróbce mechanicznej są hartowane indukcyjnie na głębokość $6 \div 8$ mm. Stal 51CrV4 ma bardzo dobre parametry mechaniczne po obróbce cieplnej. Hartowanie indukcyjne zapewnia optymalną głębokość

twardej warstwy, ale ceną tego jest ostre przejście do podstawowego materiału. Musimy się liczyć z powstaniem warstwy pośredniej pomiędzy strefą zahartowaną a materiałem podstawowym.

Materiał 42CrMo4

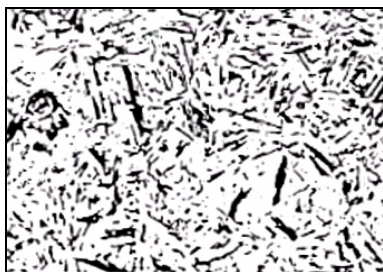
Stal 42CrMo4 uważana jest za najlepszą do produkcji wielkogabarytowych łożysk kulowych. Skład chemiczny i parametry techniczne pozwalają na osiągnięcie optymalnych wartości wytrzymałościowych. Stal ta w końcowym procesie obróbkowym może być poddana hartowaniu indukcyjnemu i hartowaniu objętościowemu.

Mikrostrukturę podstawowego materiału tworzy ferryt (7%), perlit (5%), bainit (85%) ewentualnie z niewielkimi domieszkami martenzytu (3%) (rys. 4).



Rys. 4. Mikrostrukturę podstawowego materiału

Warstwa powierzchniowa rowka łożyska została poddana hartowaniu indukcyjnemu i następującym po nim odpuszczeniem w celu zlikwidowania resztek naprężeń po tym zabiegu. Struktura po hartowaniu przedstawia się następująco: 97% martenzytu i 3% bainitu (rys. 5).



Rys. 5. Struktura materiału po hartowaniu

Główna różnica pomiędzy hartowaniem objętościowym a powierzchniowym polega na tym, że hartowanie objętościowe wymaga chłodzenia całego wyrobu w środkach chłodzących typu woda, olej, polimery, a struktura końcowa odpowiada średniej prędkości chłodzenia.

Przy hartowaniu powierzchniowym uzyskujemy tylko zahartowanie powierzchni wyrobu. Hartowanie powierzchniowe wykonuje się przy użyciu metody płomieniowej oraz indukcyjnie.

Różnica pomiędzy hartowaniem powierzchniowym a indukcyjnym polega na tym, że płomieniem ogrzewa się warstwę powierzchniową przez pewien czas, aby dojść do temperatury hartowania. Potem powierzchnię szybko ochładza się wodą.

Hartowanie indukcyjne polega na tym, że powierzchnia jest rozgrzewana do temperatury hartowania poprzez zjawisko indukcji, przy czym głębokość ogrzanej warstwy zależy od poprawnie dobranej częstotliwości prądu (im niższa częstotliwość, tym większa głębokość wnikania prądu). Później następuje chłodzenie wodą. Główna różnica obu metod polega na tym, że zostaje osiągnięta jednakowa twardość powierzchni stali zgodnie z jej składem chemicznym i większą lub mniejszą zawartością martenzytu.

Przy hartowaniu płomieniowym nie mamy pewności, że zahartowana warstwa będzie miała wymaganą grubość. Z drugiej strony uzyskujemy lepszą strefę przejściową z materiału zahartowanego do materiału podstawowego.

W przeciwieństwie do hartowania płomieniowego hartowanie indukcyjne zapewnia wymaganą głębokość hartowania, jednak jest bardzo ostre przejście z warstwy zahartowanej do materiału podstawowego.

Nasza firma wykonywała elementy łoża przy zastosowaniu obu metod, to jest dogniatania i hartowania indukcyjnego. Po wykonaniu hartowania indukcyjnego uzyskaliśmy twardość w granicach 48÷50 HRC, a głębokość warstwy hartowanej wahała się pomiędzy 15 a 8 mm (wytrawiono 10% kwasem HNO_3) (rys. 6).

Odkuwki odpowiadają więc całkowicie wymagom odbiorcy.



Rys. 6. Łoże kulowe po hartowaniu indukcyjnym

Alternatywnym rozwiązaniem jest wykonanie łoża kulowego bez hartowania indukcyjnego z zastosowaniem technologii obróbki objętościowej i uzyskania parametrów wytrzymałościowych w górnych granicach normy. Rozwiązanie to jest korzystne z uwagi na fakt, że cały materiał ma jednakową twardość, nie ma warstw przejściowych pomiędzy warstwą twardą i miękką, co jest bardzo zadowalającym rozwiązaniem podczas eksploatacji.

3. Wieniec zębaty

Do podstawowych urządzeń górniczych używanych przy wydobyciu węgla brunatnego należą koparki i zwalówarki. Podstawowym zespołem napędowym koparki jest przekładnia. Niezawodność jej pracy decyduje o możliwościach eksploatacyjnych maszyny. Nasza firma dostarcza wieniec zębate począwszy od małych średnic, poprzez $\varnothing 6$ m (rys. 7), $\varnothing 11$ m (rys. 8) i większe.



Rys. 7. Wieniec zębaty $\varnothing 6$ m



Rys. 8. Wieniec zębaty $\varnothing 11$ m

Chciałbym zaprezentować wieniec zębaty dzielony 6 m do napędu koła czerpakowego. Nasza firma opracowała proces techniczny wytwarzania wienca zębatego z zastosowaniem nowych rozwiązań technicznych w celu zwiększenia niezawodności ruchowej przekładni. Wieniec zębaty stanowią dwuczęściowe koła zębate (rys. 9) i jest on produkowany z czterech odlewów ze stali L 40HM. Produkcja wienca zębatego wymusza połączenie różnych technologii wzajemnie ze sobą powiązanych.



Rys. 9. Koło zębate

3.1. Wytwarzanie odlewów

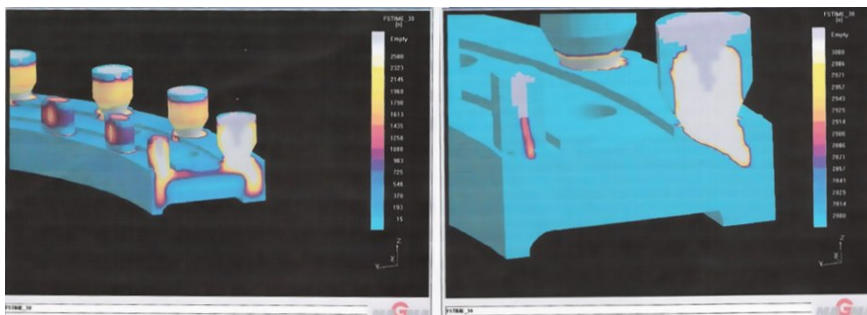
Proces technologiczny wytwarzania odlewów opracowano w aspekcie spełnienia wysokich wymagań jakościowych, takich jak produkcja odlewów bez wad zewnętrznych i wewnętrznych.

Wymagania te wymusiły zmianę konstrukcji odlewu i w oparciu o przeprowadzoną symulację komputerową opracowanie wysokospecjalistycznej technologii odlewania, zaprojektowanie i wykonanie specjalistycznego oprzyrządowania odlewniczego, opracowanie technologii formowania, wykonanie oprzyrządowania pomocniczego oraz wykonanie omodelowania.

Aby zapewnić większą trwałość wienca, po przeprowadzeniu kilku prób niszczących wspólnie z Politechniką Łódzką i profesorem Kosñovským przygotowaliśmy technologię przeprowadzania obróbki cieplnej. Również tutaj, aby zapewnić wysoką jakość, należało zaprojektować i wykonać specjalistyczne oprzyrządowanie. Opracowana technologia obróbki cieplnej objętościowego hartowania wymaga zachowania ściśle określonego reżimu technologicznego, aby w końcowym etapie uzyskać twardość $290\div 310$ HB. Jakikolwiek błąd, taki jak wada odlewnicza, niedotrzymanie reżimu temperaturowego grozi zniszczeniem odlewu. Następnie wieniec został poddany obróbce mechanicznej i procesowi nacinania zębów. Proces ten z uwagi na dużą twardość materiału wymagał również wykonania specjalistycznych frezów pokrytych warstwą tytanową. W międzyczasie wykonaliśmy obróbkę cieplną stabilizacyjną.

Tego typu metoda obróbki cieplnej pozwala na wyeliminowanie istniejących dotychczas naprężeń wynikłych z hartowania indukcyjnego zębów, które prowadziły do destrukcji wienca zębatego i automatycznie skrócenia okresu jego eksploatacji.

Objętościowa obróbka cieplna pozwala na uzyskanie lepszych własności mechanicznych obrabianego materiału, a zastosowanie techniki symulacji komputerowej umożliwia wyeliminowanie błędów w procesie wytwarzania i pozwala z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że wyrób będzie wykonany właściwie (rys. 10–11).



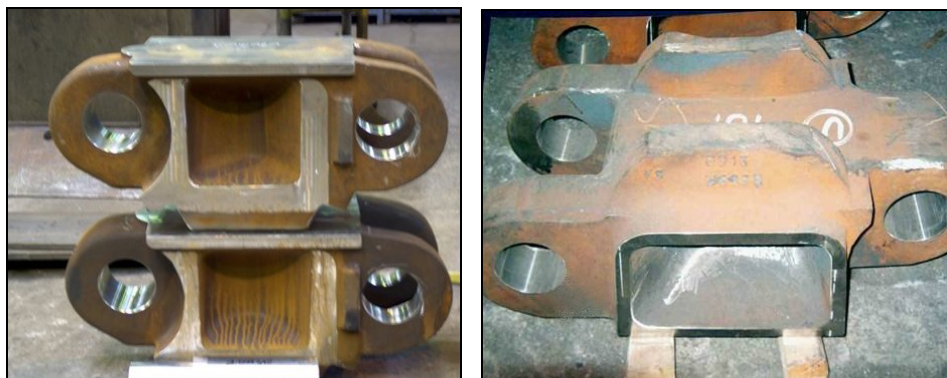
Rys. 10. Zdjęcia z symulacji komputerowej wieńca zębatego $\phi 6$ m



Rys. 11. Jedna z 4 części wieńca zębatego 6 m

4. Ogniwa gąsienicy

Ogniwa gąsienicy (rys. 12) są bardzo odpowiedzialną częścią urządzeń górniczych z punktu widzenia konstrukcyjnego, cięży na nich przeniesienie całego ciężaru urządzenia i poruszanie się po podłożu.



Rys. 12. Ogniwo gąsienicy

Wiąże się to z obciążeniami dynamicznymi i statycznymi. Do produkcji odlewów ogniwo stosuje się stale na bazie chromu, niklu i molibdenu z hartowaniem powierzchniowym.

W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny stali L35GSM oraz tak zwanej stali Hadfielda.

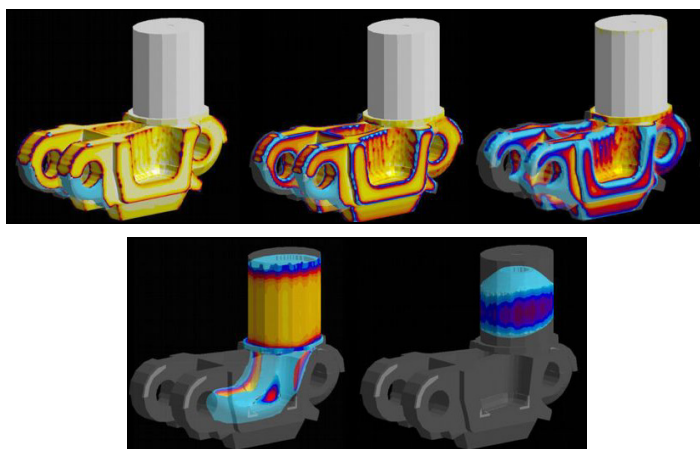
TABELA 2

Stal L35GSM oraz tak zwana Stal Hadfielda o następującym składzie chemicznym

Materiał	Skład chemiczny, %								
	C	Si _{max}	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr _{max}	Mo	Ni _{max}	Cu
L 35GSM	0,32÷0,40	0,60÷0,80	1,20÷1,40	0,030	0,030	0,30	0,30÷0,40	0,30	0,30
L120G13	1,00÷1,40	0,70	12÷14	0,07	0,01	0,30	–	0,50	–

Stal Hadfielda ma strukturę austenityczną i dużą odporność na zużycie przy jednocześnie wysokich wartościach parametrów mechanicznych.

Nasza firma dostarcza ogniwa gasienicy wykonane ze stali Hadfielda. Technologia produkcji polega na tym, że w strukturze nie może się pojawić żaden wolny węgiel żelaza Fe₃C, który się tworzy w czasie zastygania odlewów (rys. 13). Drugim wymogiem, który ma także zasadniczy wpływ na żywotność, jest właściwy wybór technologii produktów odlewniczych — to oznacza, że nie może dojść do powstania żadnych wad wewnętrznych, typu bąbli, rzadzisz, wtrąceń żużlowych czy szczelin.



Rys. 13. Przebieg symulacji komputerowej procesu stygnięcia ogniwa

Na podstawie doświadczeń oraz symulacji komputerowej procesu odlewania został dobrany odpowiedni kształt modelu. Kontrola rentgenograficzna wykazała, że odlewy nie mają żadnych wad wewnętrznych.

W praktyce sprawdziło się, że produkty tej generacji nie mają szczelin, ale bardzo wysoką żywotność i są niezawodne w eksploatacji.

Produkcja stali przebiega tu w elektrycznym piecu łukowym, w systemie dwu żużlowym, dzięki któremu można osiągnąć wymóg krańcowo niskiej zawartości siarki i właściwą proporcję węgla do manganu. Następująca po tym metoda austenitzowania cieplnego (wyżarzania) z hartowaniem w wodzie przy utrzymywaniu jej optymalnej temperatury zapewnia całkowitą strukturę austenityczną w całym przekroju odlewu.

Powstała w ten sposób struktura składająca się w 100% z austenitu bez żadnej domieszki Fe_3C wykazuje się zbyt dużą twardością (około 200+220 HB), ale z kolei wyróżnia się tym, że wraz z obciążeniem związanym z wzrastającym ciśnieniem i tarciem rośnie również odporność na zużycie.

LITERATURA

- [1] Stale do ulepszania cieplnego — norma EN 10083-1, 1996
- [2] Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle — II-109 D
- [3] *Košňovský Z.*: Kandidátská Lisertaini práce „Vnitřní nehomogenita masivních ocelových odlitků” — VSB-TU Óstrava 1975
- [4] Stahlschlüssel — Verlag Stahlschlüssel WEGST GmbH 2001
- [5] *Košňovský Z.*: Vlastní archiv materiálů a struktur litých a kovaných oceli
- [6] Přejímání protokoly výrobců odlitků a výkovků