

PROBLEMY MATERIAŁOWE W STRATEGII UTRZYMANIA W RUCHU ORAZ NIEZAWODNOŚCI MASZYN GÓRNICTWA ODKRYWKOWEGO

MATERIALS PROBLEM IN THE STRATEGY OF OPERABILITY AND RELIABILITY OF THE MACHINES FOR SURFACE MINING

Włodzimierz Dudziński, Grzegorz Pękalski – Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

W artykule zawarto retrospektywne i aktualne informacje dotyczące materiałów stosowanych na konstrukcje koparek węgla brunatnego. Jako główne problemy wymieniono procesy ich szybkiego zużywania, degradację materiałową i odporność na ścieranie. Wskazano na racjonalne ograniczenie ilości gatunków stosowanych materiałów. Było to możliwe w wyniku wszechstronnej analizy warunków pracy wyselekcjonowanych zespołów oraz dostosowanych do tych warunków procesów obróbki cieplnej. Wobec szerokiego stosowania stali niskostopowych wskazano na malejącą rolę oceny stopnia degradacji materiałów. W stosunku do elementów pracujących w warunkach zużywania ściernego sformułowano tezę o potrzebie uproszczenia składów chemicznych napoiń a skoncentrowania się na precyzyjnie i powtarzalnie realizowanych technologiach napawania. Nową perspektywę w podwyższeniu trwałości zespołów tych maszyn narażonych na zużywanie ściernie i obciążenia dynamiczne stanowią niskostopowe stale martenzytyczne.

The article contains retrospective and current information concerning materials applied in the structures of brown coal excavators. As the main problems discussed here are their fast wear processes, material degradation and abrasion resistance. Rational limitation of the number of applied material grades has been pointed out. It was possible as a result of the thorough and versatile analysis of operating conditions of the selected assemblies, as well as the heat treatment processes readjusted to those conditions. In the face of the wide low-alloy steels application the diminishing role of evaluation of the material degradation degree was indicated. In relation to parts operating in the abrasion wear conditions a thesis on the need of simplifying chemical composition of the padding welds has been formulated, with a focus on precisely and recurrently executed padding technologies. The new perspective in the life improvement of the machine assemblies exposed to the abrasive wear and dynamic loads is being constituted by the low-alloy martensitic steels.

Wprowadzenie

W Polsce wydobywaniem węgla brunatnego zajmują się cztery kopalnie odkrywkowe (Turów, Bełchatów, Konin i Adamów). Jest w nich obecnie wykorzystywanych 65 maszyn podstawowych (koparki i zwalówarki). Najmłodszą z tych maszyn jest koparka KWK 910 pracująca w KWB Turów od 10 miesięcy. W latach 80. XX wieku podjęto szeroko zakrojony program modernizacji tych maszyn. Do roku 2010 zmodernizowano 13 koparek dla potrzeb krajowych oraz 5 dla kontrahentów zagranicznych. Równolegle do tych działań konstruowano i budowano nowe maszyny. Od roku 1980 wybudowano w Polsce 18 nowych maszyn. Warto podkreślić, że od tego roku nie importowano do Polski ani jednej koparki oraz ani jednej zwalówarki. Należymy bowiem do kilku zaledwie państw świata, które są samowystarczalne w budowaniu tych maszyn. Polska (co przecież w skali Unii Europejskiej nie jest zjawiskiem częstym) zalicza się do czołówki konstruktorów i producentów maszyn górnictwa odkrywkowego. Parametry eksploatacyjne, trwałość i niezawodność tych maszyn w niczym nie odbiegają od podobnych konstrukcji renomowanych firm światowych. Obecnie trwają prace koncepcyjne i projektowe nad zagospodarowaniem ogromnych złóż węgla brunatnego na zachodnich terenach kraju. Perspektywa powstania nowych kopalń wygenerowała potrzebę opracowania strategii utrzymania w ruchu (modernizacja, zwiększenie jakości, bezpieczeństwa i niezawodności) maszyn obecnie pracujących, jak

i zweryfikowanych w praktyce rozwiązań przewidywanych do zastosowań w budowie nowych maszyn. Poczesne miejsce w tych rozważaniach zajmują problemy doboru materiałów na krytyczne węzły konstrukcyjne tych maszyn.

Geneza badań materiałowych maszyn górnictwa odkrywkowego

Początkiem badań związanych z problemami materiałowymi występującymi w maszynach górniczych były ekspertyzy zlecane do Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej w połowie lat 80. XX wieku.

Wtedy także podjęto szerokie studia literaturowe na ten temat. Okazało się, że zwartych publikacji dotyczących tych maszyn nie jest wiele [1÷3]. Wszystkie one zawierają informacje (niekiedy rozdziały) dotyczące zagadnień materiałowych. Są to zazwyczaj zestawienia materiałów stosowanych na określone elementy i zespoły konstrukcyjne. W kwestii zasad doboru materiałów w książkach tych odwoływano się do specjalistycznych pozycji literaturowych.

Zaletą publikacji [1÷3] jest kompleksowe traktowanie zagadnień konstrukcyjnych, materiałowych i technologicznych, co narzuca systemowe i wieloaspektowe podejście do całokształtu problemów związanych z tymi maszynami. Wymienione publikacje nie podejmują jednak całościowo problemów materiałowych, (nie uwzględniają zagadnień degradacyjnych), a ich zakres jest dostosowany do potrzeb i stanu rozpoznania

problemów w momencie ich publikacji. Najnowsza z wymienionych pozycji literaturowych pochodzi z 1973 roku.

Tematyka materiałowa dotycząca maszyn górniczych pojawiała się dość często w artykułach publikowanych w specjalistycznych czasopismach. W latach 60. XX wieku publikacje te dotyczyły tych elementów maszyn, które ulegały szybkiemu zużyciu powodując konieczność ich wymiany lub naprawy (np. prace dotyczące zębów czerpaków koparek autorstwa Janusza Zipsa czy Rudolfa Haimanna). Próba zebrania szeroko rozumianej problematyki materiałowej był raport [4]. Traktując rzecz chronologicznie zajmowano się następującymi zagadnieniami materiałowymi dotyczącymi koparek węgla brunatnego.

1. Ustalenie elementów i zespołów „szybko zużywalnych” z przyczyn materiałowych i sformułowanie propozycji stosowania konkretnych materiałów wraz z ich obróbką cieplną.
2. Określenie materiałowych czynników degradacji w odniesieniu do konstrukcji nadwozia koparki (zmiany struktury i właściwości, korozja, pękanie, itp.).
3. Zagadnienia warstw napawanych pracujących w warunkach zużycia ściernego i obciążeń dynamicznych.
4. Analiza możliwości szerszego zastosowania w konstrukcji koparek niskostopowych stali martenzytycznych (stałe konstrukcyjne o podwyższonej odporności na ścieranie).

Nowe rozwiązania stosowane w maszynach węgla brunatnego były opracowywane zawsze przez interdyscyplinarne zespoły. W ich skład wchodził, oprócz pracowników uczelni, przedstawiciele konstruktorów i eksploataatorów tych maszyn. W takich warunkach organizacyjnych można otwarcie uwzględnić elementy ryzyka podejmowanych decyzji. Jednocześnie minimalizuje się to ryzyko, wykorzystując opinie eksperckie na wszystkich etapach prac badawczych. Doświadczenie dowodzi, że opinie ekspertów mają szczególną wagę na etapie formułowania zadań i określania metodologii osiągania rozwiązań.

Elementy i zespoły szybko zużywalne – zagadnienia materiałowe

W 1999 roku dokonano podsumowania prac badawczych dotyczących tych zespołów i elementów koparek, które określono jako „szybko zużywalne”. W pracy [4] wymieniono na podstawie studiów literaturowych, opinii eksperckich i badań własnych następujące zespoły koparek:

1. Czerpaki (noże, uszy, poszycie).
2. Zęby czerpaków (naroża czerpaków).
3. Łańcuch gaśnicowy (ogniwa, płyty gaśnicowe).
4. Konstrukcję podwozia (wielobok napędowy kompletny, koła jezdne).
5. Zsuwnie, leje, przesypy.
6. Łożyska ślizgowe, tuleje, przekładnie ślimakowe.
7. Mechanizm obrotu (koła jezdne, szyny).
8. Konstrukcja nadwozia (w szczególności wysięgnik koła czerpakowego, węzeł centralny).

Naturalnie życie poszczególnych zespołów odbywa się w różnym czasie. Wynosi on od kilkunastu godzin, w przypadku zębów czerpaków, do kilkudziesięciu lat, dla konstrukcji nadwozia. Nadwozie bywa jednak wymieniane w znacznych fragmentach na skutek awarii czy katastrof, pożarów, remontów czy wreszcie modernizacji. Z tych przyczyn, a także z obawy

o procesy degradacyjne zachodzące w materiałach konstrukcji nadwozia, zaliczono je do zespołów „szybko zużywalnych”.

Prace nad elementami i zespołami szybko zużywalnymi z przyczyn materiałowych można posumować w następujący sposób:

- Prowadzone prace doprowadziły do bardzo istotnego zmniejszenia ilości gatunków materiałów obecnie stosowanych w konstrukcji koparek węgla brunatnego. Oszacowano, że w wymienionych zespołach wykorzystano, do lat 90. XX wieku, 112 różnych gatunków materiałów. Obecnie ilość gatunków tworzyw metalicznych ograniczono do około 20. Ilustracją powyższego zestawienia może być przykład noży i listew czerpaków. Z różnych źródeł (literatura i dane od ekspertów) uzyskano informacje, że były one wykonywane z następujących materiałów: St4S (S275JR - nowe oznaczenia w nawiasach dla wszystkich stali), St5 (E295), St6 (E335), 15HM (13CrMo4-5), 18G2A (P355N), 30G2 (28Mn6) z napoinami o różnych składach chemicznych oraz 30G2 (28Mn6), 35SG (37Mn-Si5), 35HGS, 40H (41Cr4), 40GS, 45 (C45), 45G (C45E), 60S2 (60Si7), L120G13, 40HG – bez napoin. Z doświadczeń eksploatacyjnych i badań własnych wynika, że optymalne w polskich warunkach jest stosowanie stali niskostopowej o podwyższonej wytrzymałości gatunku 18G2 (E355) z napoinami typu Fe-Cr-C o możliwie prostym składzie chemicznym. Ta sama stal jest także podstawowym materiałem na konstrukcję nadwozia koparek. Wśród materiałów stosowanych na ogniwa gaśnicowe w literaturze wymienia się 17 gatunków. W tym tak „egzotyczne” tworzywo jak sprasowane w pakiety blachy stalowe. Obecnie wykorzystuje się w zasadzie dwa materiały. Są to staliwa gatunków L35GSM i L120G13. Ograniczenie ilości gatunków materiałów jest niewątpliwie postępem wynikającym z nauczania się optymalnego, dla danego zastosowania, kształtowania i wykorzystywania cech danego materiału.

Dobór materiałów był poprzedzony wieloaspektową analizą warunków eksploatacji i określeniem czynników wpływających na trwałość zespołów konstrukcyjnych. Skutkuje to poprawnością doboru materiałów, ale także opracowywaniem (teoretycznym, laboratoryjnym i realizowanym pilotażowo na rzeczywistej konstrukcji) technologii obróbki cieplnej. Można się tu posłużyć przykładem łańcucha gaśnicowego (ogniwa - płyty gaśnicowe). Opis prac w tym zakresie zamieszczono w publikacjach [5÷6]. Efektem tych badań i prób jest skokowa poprawa trwałości tego zespołu konstrukcyjnego koparki. Ważniejszym jednak sukcesem jest ugruntowanie przekonania o celowości i niezbędności przeprowadzania, nawet złożonych i czasochłonnych, procesów obróbki cieplnej. Dla przykładu czas trwania obróbki cieplnej objętościowej i powierzchniowej ogniwa gaśnicowego wykonanego ze staliwa L35GSM wynosi około 40 godzin, a dochodzi do tego jeszcze proces wyżarzania odprężającego po spawaniu płyt gaśnicowych.

- Z perspektywy lat wynika jasno, że obecnie największym wyzwaniem jest konsekwentne przestrzeganie opracowanych technologii. Różnego rodzaju „uproszczenia” i „lokalna działalność racjonalizatorska” prowadzi bowiem (są na to przykłady) do awarii (pęknięć przedeksploatacyjnych lub w początkowym okresie eksploatacji np. ogniwa gaśnicowych). To z kolei wywołuje powrót do szukania na nowo przyczyn takiego stanu rzeczy, także poprzez kosztowne prace badawcze.

Problemy degradacji materiałów

Od momentu ogłoszenia pracy [7] pojęcie "degradacja" stało się modne i wykorzystywane w bardzo wielu kontekstach. Nic w tym dziwnego, bo dotyczyło zagrożenia, które nie było jeszcze wtedy dobrze w stosunku do maszyn górniczych sprecyzowane i opisane poprzez wyniki badań i zależności matematyczne. Cztery lata później w pracy [8] przedstawiono założenia i częściowe wyniki badań dotyczących materiałowych aspektów teorii degradacji. Opracowano koncepcję wielofunkcyjnego systemu rozwiązywania problemów materiałowych. Musiało minąć kilka lat zanim przeprowadzono badawczą weryfikację koncepcji i planów zaprezentowanych w tych publikacjach. Było to możliwe dzięki udziałowi w tych pracach przedstawicieli kopalni węgla brunatnego (głównie KWB „Turów” i KWB „Konin”). Badania te musiały być bowiem prowadzone na obiektach rzeczywistych, eksploatowanych przez wiele lat i przeznaczonych do kasacji lub modernizacji. W syntetycznym skrócie można sformułować poniższe wnioski wynikające z tych prac.

W wyniku wieloletniej eksploatacji obserwuje się następujące zmiany degradacyjne w strukturach stali konstrukcyjnych:

- obecność wewnątrz ziaren ferrytu oraz na granicach ziaren wydzielen Fe_3C i azotków,
- lokalny rozpad perlitu na ferryt i węgliki o budowie odbiegającej od płytkowej (perlit zdegenerowany),
- obecność mikropęknięć związanych z licznymi wtrąceniami niemetalicznymi. Nasilenie tych cech jest większe w stalach wykorzystywanych do budowy elementów konstrukcyjnych maszyn wydobywczych niż w nawet starszych rurociągach turbinowych i kolektorach elektrowni,
- związane z degradacyjnymi zmianami struktury zmiany właściwości wytrzymałościowych zależą od rodzaju materiału:

- a) w stalach o składach chemicznych zbliżonych do stali gatunku 08X i 10X polegają na wzroście granicy plastyczności i wytrzymałości, zaniku wyraźnej granicy plastyczności oraz obniżeniu udarności. Zmiany te są zgodne z teoretycznym modelem przebiegu degradacji materiałów. Nie mają one jednak decydującego znaczenia dla określenia trwałości resztkowej elementów konstrukcji koparek, gdyż najbardziej wyťažone węzły tych maszyn nie są już wykonywane z tych materiałów.
- b) w stalach o składach chemicznych zbliżonych do stali 3StSX w strukturze występują objawy podobne jak opisano poprzednio. Nie skutkuje to jednoznacznie ukierunkowanymi i powtarzalnymi zmianami właściwości mechanicznych. W przedziale czasów eksploatacji 34÷55 lat, zmiany właściwości mechanicznych mieszczą się zazwyczaj w dopuszczalnych przedziałach rozrzutów wartości. Najbardziej wrażliwym parametrem umożliwiającym ocenę, wraz z budową strukturalną stanu degradacji jest udarność tych materiałów. Uzyskane wyniki wykazują jednak bardzo duży rozrzut udarności (od $3,6 \text{ J/cm}^2$ do 70 J/cm^2). Stwierdzono także duży wpływ procesów korozyjnych na stan zdegradowania krytycznych węzłów konstrukcji nadwozia wykonywanych z tych stali. Dlatego jedyną możliwą konkluzją było zalecanie

wyeliminowania tej grupy materiałów z tego rodzaju zastosowań konstrukcyjnych.

- c) wykorzystywane w coraz szerszym zakresie w budowie konstrukcji (obecnie spawanych) nadwozia koparek, stale niskostopowe wywodzące się ze stali 18G2 (E355), wykazują wysoką odporność na procesy degradacyjne. Lokalnie tylko, po okresach eksploatacyjnych przekraczających 25 lat, stwierdzono w nich występowanie mikropęknięć związanych zazwyczaj z wtrąceniami niemetalicznymi. Stale z tej grupy powinny stać się podstawowymi materiałami na konstrukcje nadwozia. Dobre i zweryfikowane doświadczalnie rezultaty uzyskano stosując stal gatunku 12G2ANb.

Podstawowym materiałem na konstrukcję nadwozi modernizowanych i nowych koparek są stale niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości. Jak wynika z zamieszczonych powyżej informacji ich podatność do zmian degradacyjnych jest w przedziale przewidywanych czasów eksploatacji znikoma. Można na tej podstawie sformułować następujące tezy:

- ♦ w stosunku do maszyn zmodernizowanych i nowych nie ma potrzeby prowadzenia pełnego cyklu badań dotyczących oceny materiałowych aspektów degradacji,
- ♦ maszyny starsze (produkcji niemieckiej) mogą podlegać ocenie na podstawie koncepcji dostosowanej do potrzeb eksploatatorów [9]. Umożliwia ona diagnozowanie bez wyłączania koparki z ruchu wykorzystując opracowaną w toku wcześniejszych badań „degradacyjną bazę danych”.

W badaniach degradacyjnych jednym z czynników wpływających na trwałość obiektu są zjawiska korozyjne. Zastosowanie stali niskostopowych, nowych rozwiązań konstrukcyjnych (płaskowniki zamiast kształtowników) oraz przykładanie coraz większej wagi do zabezpieczeń przeciwkorozyjnych (ochrona bierna poprzez powłoki ochronne) spowodowało zasadnicze obniżenie zagrożeń wynikających z korozji.

Warstwy napawane – elementy narażone na zużywanie ścierne

Problemy materiałowe związane z uzyskaniem powierzchni odpornych na zużywanie ścierne są jednym z niewrażliwych problemów w wielu dziedzinach gospodarki. Nie znajdują i nie znajdują one raczej rozwiązania o charakterze uniwersalnym. Badania około 40 rodzajów napoin [np.10] oraz analiza literaturowa zagadnienia pozwala na sformułowanie własnych wniosków. Pierwszy z nich dotyczy nieprawidłowego podejścia do zagadnień odporności na zużywanie ścierne. Wywodzi się ono z przekonania o prostych relacjach pomiędzy wzrostem twardości a wzrostem odporności na ścieranie. Drugim błędem jest pomijanie lub zbyt płytkie traktowanie zagadnień makro- i mikrostrukturalnych w doborze i prognozowaniu trwałości eksploatacyjnej warstw napawanych. Po trzecie przypomnieć należy, że napawanie nie jest jedyną metodą podwyższania odporności na ścieranie. Stosowane jest także wiele klasycznych zabiegów obróbki cieplnej – powierzchniowej oraz wykorzystanie odlewniczych warstw odpornych na ścieranie. Wykazano także, że wpływ wad makroskopowych i mikroskopowych w samych napoinach oraz strefach wtopienia może być czynnikiem limitującym trwałość warstw napawanych. Często zastosowanie najpierw obróbki cieplnej objętościowej

(ulepszanie cieplne) a następnie hartowanie powierzchniowe przynosi wystarczające efekty w przypadku zębów czerpaków koparek, naroży czerpaków oraz powierzchni jezdnych ogniw gąsienicowych. Pozwala to na wyeliminowanie napawania wielu elementów konstrukcji lub ograniczenie tego procesu do celów regeneracyjnych.

Obecnie istnieje bardzo szeroka oferta materiałów do napawania, zarówno krajowa jak i zagraniczna. Można z niej wybrać elektrody i technologie napawania dostosowane do zróżnicowanych warunków pracy. Nie można się jednak oprzeć wrażeniu, że część elektrod jest projektowana i produkowana metodą prób i błędów. W dalszym ciągu zarysowuje się tendencja, że im warstwa napawana twardsza, tym lepsza. Pociąga to za sobą wprowadzanie do składu chemicznego napoin (elektrod do napawania) pierwiastków silnie węglotwórczych (Nb, B, V). Obecnie metodologia projektowania materiałów jest już na tyle zaawansowana, że można podjąć wysiłek zaprojektowania materiałów do napawania dla tych specyficznych zastosowań.

Możliwości zastosowania niskostopowych stali martenzytycznych

Z grupy tych stali szersze zastosowania znalazła produkowana od 1974 roku stal Hardox 400. Przez wiele lat informacje o tych materiałach (nie uzasadniane wynikami badań) można było czerpać z materiałów publikowanych przez ich producentów lub dystrybutorów. W polskich publikacjach zwartych dane o tych materiałach pojawiły się dopiero w XXI wieku [11,12]. Inicjatywa podjęcia badań nad tymi materiałami (początkowo stalami Hardox 400 i Hardox 500) wypłynęła ze strony KWB Konin w postaci ekspertyzy dotyczącej ustalenia przyczyn bardzo szybkiego zniszczenia noży czerpaków koparek wykonanych ze stali Hardox 400. W roku 2002 podjęto wszechstronne badania tych stali, po stwierdzeniu praktycznie braku ich charakterystyk, które byłyby uzasadnione publikowanymi wynikami badań. Wyniki badań własnych (dotyczące stali o zbliżonych składach chemicznych, mikrostrukturach, właściwościach i zastosowaniach) opublikowano w kilkudziesięciu pracach wywodzących się z Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. W artykule na podstawie publikacji [13–15] przedstawiono syntetyczną charakterystykę tej grupy materiałowej. W trakcie realizacji badań okazało się, że także w Polsce są produkowane stale o podobnych do stali Hardox mikrostrukturach i właściwościach, są to stale wytwarzane przez HTK – Katowice. Za wyjątkiem stali HTK 700H (np. HTK 900H) wykazują one struktury martenzytu odpuszczonego i właściwości zbliżone do produkowanych w Szwecji stali Hardox. Ta grupa materiałów cechuje się brakiem jednolitych oznaczeń. Często poszczególne materiały występują pod nazwami handlowymi lub nadawanymi im przez wytwórców (Armotec, ArmoX, Fora, Raex, Compass, Zerner, itd.). Wykazują one (wbrew zapewnieniom szwedzkiego producenta) w warunkach ścierania luźnym ścierniwem odporność na ścieranie tylko od kilku do kilkunastu procent wyższą od normalizowanej stali 45. Ich walory wyraźnie wzrastają w warunkach jednoczesnego oddziaływania zużywania ściernego oraz obciążeń dynamicznych.

Odporność na działanie środowisk korozyjnych jest porównywalna ze stalami niestopowymi (węglowymi) oraz są one wrażliwe na zmiany pH roztworów korozyjnych. Wraz ze wzrostem kwasowości zmienia się także charakter korozji z równomiernej na wżerową. Są to materiały dobrze spawalne i wykazujące małą skłonność do pęknięcia w strefach wpływu ciepła (SWC). Jednak spawanie rekomendowanymi przez producentów technologiami wywołuje powstawanie szerokich SWC w obszarze których następuje zniszczenie mikrostruktur odpuszczonego martenzytu i obniżenie twardości (nawet o 100%) w stosunku do materiału rodzimego. Przeprowadzona w warunkach laboratoryjnych obróbka cieplna połączeń spawanych (hartowanie i odpuszczanie) dowiodła, że możliwe jest odtworzenie w SWC struktur bardzo zbliżonych do martenzytu odpuszczania. Wtedy to elementy np. noża czerpaka koparki wykazują wysoką i jednorodną odporność na ścieranie na całej długości. W powiązaniu z wysokimi właściwościami mechanicznymi i zachowaniem tych właściwości w obniżonych temperaturach można twierdzić, że powinny one znajdować coraz szersze zastosowanie także w budowie maszyn górnictwa odkrywkowego. Lakonicznie stwierdzić można, że w stosunku do stali o poprawnym składzie chemicznym (pamiętając, że w stalach Hardox jest on zmienny w funkcji grubości blachy w obrębie tego samego gatunku) powinna być stosowana znana zasada „primum non nocere” w stosunku do stanu dostarczenia.

Podsumowanie

Z treści artykułu wynika, że gdyby był on pisany jeszcze 20 lat temu, to lista aktualnych wówczas problemów materiałowych byłaby bardzo długa. Miałyby także inny charakter, dotyczyłyby bowiem problemów wynikających z potrzeb utrzymania maszyn w ruchu. Postęp w doborze materiałów, ich obróbce cieplnej, metod ochrony przeciwkorozyjnej oraz racjonalne podejście do procesów degradacyjnych, pozwalają na rozpatrywanie tych zagadnień w kategoriach „dalszego podwyższania jakości i trwałości” nowych i modernizowanych maszyn. Bazą do tych działań może być już teza, że problemy materiałowe (a także konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne) są rozwiązywane skutecznie i na wysokim poziomie. Jakościowo nowe możliwości stwarza zastosowanie niskostopowych stali martenzytycznych na te elementy, które pracują w warunkach zużywania ściernego i obciążeń dynamicznych (zsuwanie, leje i przesypy, powierzchnie ślizgowe zamków koła czerpakowego). Propozycje te zostały pomyślnie zweryfikowane nie tylko w toku badań laboratoryjnych ale także eksploatacyjnych. Istnieje także możliwość wykorzystania tych materiałów na fragmenty uzbrojenia czerpaków koparek (noże czerpaków) pod warunkiem dopracowania odbiegającej od zazwyczaj stosowanych technologii obróbki cieplnej po spawaniu elementów. Maszyny wydobywcze węgla brunatnego mają bowiem szansę być trwałe jedną z nielicznych specjalności polskiego przemysłu.

Artykuł powstał w ramach realizacji projektu rozwojowego NR 03 0039 06.

Literatura

- [1] Dombrowskij N. G., *Ekskawatory*, Izd. Maszinostrojenie, Moskwa, 1961
- [2] Hawrylak H., Sobolski R., *Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego*, Wyd. Śląsk, Katowice, 1970

- [3] Rasper L., Bahr J., Felkel E., Gärtner E., *Der Schaufelradbagger als Gewinnungsgerät*, Trans. Tech. Publikations, 1973
- [4] Pękalski G., *Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów*, Raport IMiMT PWr, nr 14, 1999
- [5] Krajczyk A., Pękalska L., Pękalski G., *Problemy doboru materiałów i obróbki cieplnej na ogniwa gąsienicowe maszyn wydobywczych węgla brunatnego*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 1, 1991, s.30-39
- [6] Pękalski G., *Kształtowanie struktur i własności odlewów ze staliwa manganowo-krzemowego poprzez obróbkę cieplną*, Acta Metall. Slovaca, 2001, r. 7, nr 2, s.214÷219
- [7] Dudek D., Oziemski S., Sobczykiewicz W., *Elementy teorii degradacji maszyn*, Problemy Maszyn Roboczych, nr 4, 1994, s.5÷34
- [8] Dudek D., Pękalski G., Pękalska L., *Koncepcje wielokryteryjnego systemu rozwiązywania problemów materiałowych w teorii degradacji maszyn*, 5th International Symposium „Continuons suface mining”, 1998, s.110÷115
- [9] Dudziński W., Pękalski G., *Materiałowe aspekty teorii degradacji*, Mat. Konf, Polska Metalurgia 1998 – 2002, 2002, T 2, s.488÷494
- [10] Pękalski G., Dudziński W., Sachadel U., Alenowicz J., *Some macro- and microstructural aspects of pad welded layer durability*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2005, vol.5, N2, s.85-104
- [11] Adamczyk J., *Inżynieria materiałów metalowych*, Wyd. P. Śląskiej, Gliwice, 2004
- [12] Dobrzański L.A., *Metaloznawstwo opisowe stopów żelaza*, Wyd. P. Śląskiej, Gliwice, 2007
- [13] Dudziński W., Konat Ł., Pękalska L., Pękalski G., *Struktury i własności stali Hardox 400 i Hardox 500*, Inżynieria Materiałowa, N3, 2006, s.139-132
- [14] Dudziński W., Konat Ł., Pękalski G., *Structural and strenght characteristics of wearresistant martensitic steels*, Archives of Foundry Engineering, 2008, N8, s.21-26
- [15] Dudziński W., Pękalski G., Halmann K., *Charakterystryki strukturalne, wytrzymałościowe i korozyjne niskostopowych stali martenzytycznych*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 5, 2010, s.48-53

Artykuł recenzowali prof. dr hab. inż. Dionizy Dudek
dr inż. Jerzy Alenowicz

Rękopis otrzymano 26.07.2011 r. *2216



Cykl: prolog do konstrukcji...