Roman KUZIAK, Artur ŻAK, Dariusz WOŹNIAK

Instytut Metalurgii Żelaza

Marek ROTKEGEL

Główny Instytut Górnictwa

Marek GRODZICKI, Jerzy NAWROT

Huta Łabędy S.A.

ODRZWIA OBUDOWY CHODNIKOWEJ ZE STALI II GENERACJI

Artykuł przedstawia wyniki badań zrealizowanych w ramach projektu celowego nr 6ZR8 2008/C07012 wykonywanego przez Hutę Łabędy S.A. we współpracy z Instytutem Metalurgii Żelaza i Głównym Instytutem Górnictwa. Celem projektu było opracowanie technologii wytwarzania odrzwi obudów górniczych o dużej nośności i podwyższonych właściwościach eksploatacyjnych, gwarantowanych zastosowaniem elementów konstrukcyjnych ze stali o wysokich właściwościach wytrzymałościowych i bardzo dużej ciągliwości, podwyższonej odporności na obciążenia dynamiczne oraz odporności na agresywne działanie kopalnianego środowiska korozyjnego. W artykule przedstawiono koncepcję składu chemicznego nowoopracowanej stali, technologię ciągłego odlewania i walcowania oraz wyniki badań właściwości mechanicznych i strukturalnych kształtowników wytworzonych ze stali nowej generacji. Wysokie właściwości mechaniczne stali uzyskano poprzez kontrolowanie zawartości pierwiastków podstawowych, tj.: C, Mn, Si; ograniczenie ilości i wielkości wtrąceń niemetalicznych oraz poprzez zastosowanie mikrododatków pierwiastków stopowych, takich jak V i Ti, które wydzielają się w postaci bardzo drobnych cząstek węglikoazotków typu MX (M = V,Ti; X = C,N), korzystnie wpływających na zmiany zachodzące w strukturze stali w procesie przeróbki cieplno-plastycznej, prowadząc do uzyskania drobnoziarnistej – umocnionej wydzieleniowo – struktury ferrytyczno-perlitycznej kształtowników typu V stosowanych do produkcji obudów kopalnianych. W celu podwyższenia odporności korozyjnej na oddziaływanie środowiska wód kopalnianych, do stali wprowadzono dodatki Cu, Cr i Ni.

Słowa kluczowe: obudowa chodnikowa, odrzwia, stale mikrostopowe o podwyższonej wytrzymałości, struktura, właściwości mechaniczne, odporność korozyjna

SECOND-GENERATION STEEL SET OF MINE ROADWAY SUPPORT

This article presents the results of research conducted under targeted project no. 6ZR8 2008/C07012 carried out by Huta Łabędy S.A. in cooperation with the Institute for Ferrous Metallurgy and the Central Mining Institute. The purpose of the project was to develop the technology for manufacturing frame of mine roadway supports with high load-carrying capacity and improved operating properties, guaranteed by the use of structural components of steel with high strength properties and very high ductility, enhanced resistance to dynamic loads and resistance to the aggressive of corrosive environment at the coal-mine. The article presents the concept of chemical composition of the newly developed steel, continuous casting and rolling technology as well as the results of mechanical and structural properties of sections made of new-generation steel. High mechanical properties of steel were obtained by monitoring the content of basic elements, i.e.: C, Mn, Si; reduction in amount and size of non-metallic inclusions and use of micro-additives of alloying elements, i.e. V and Ti, which are precipitated as very fine particles of MX carbonitrides (M = V,Ti; X = C,N), with favourable effect on changes in the structure of steel during thermo-mechanical treatment, resulting in obtaining fine-grained – hardened by precipitation – ferritic-pearlitic structure of V-type sections used in manufacturing of mine roadway supports. In order to improve corrosion resistance to the impact of mine water environment, the additives of Cu, Cr and Ni are introduced into steel.

Keywords: mine roadway support, set, micro-alloy steels with enhanced strength, structure, mechanical properties, corrosion resistance

1. WSTĘP

Od momentu wprowadzenia wsadu odlewanego metodą ciągłego odlewania (COS) pod koniec lat 90. do produkcji kształtowników typu V, Huta Łabędy S.A. prowadzi systematyczne badania mające na celu podwyższenie parametrów wytrzymałościowych kształtowników i akcesoriów górniczych, przy zachowaniu wysokiej ciągliwości i odporności na obciążenia udarowe. Ilustruje to tablica 1, w której podano właściwości mechaniczne stali opracowanych dla potrzeb wytwarzania kształtowników do momentu rozpoczęcia projektu celowego. Stale te umownie nazwano stalami I generacji. Stal 25G2A jest stalą węglowo-manganową, w której

nie stosuje się dodatków wiążących azot. Z tego powodu charakteryzuje się ona najniższym poziomem udarności w porównaniu do pozostałych stali. Stal 25G2A-Ti zawiera mikrododatek tytanu w ilości 0,01÷0,03%. Poprzez dodanie mikrododatku tytanu obniżone zostaje stężenie azotu występującego w postaci roztworu stałego w ferrycie poprzez związanie go w postaci azotku TiN podczas odlewania stali. Dzięki temu uzyskano wzrost udarności tej stali, przy niezmienionym poziomie wytrzymałości w porównaniu do stali 25G2A. Stal typu HŁCORR (obecnie S480W) charakteryzuje się podwyższoną wytrzymałością w porównaniu do pozostałych stali. Spowodowane jest to zastosowaniem w niej mikrododatku wanadu w ilości około 0,07%, który umacnia ferryt za pomocą węglikoazotku V(C,N). Stal typu HŁCORR zawiera również dodatki Cu, Cr i Ni (≤ 0,5%), które podwyższają jej odporność korozyjną na działanie agresywnego środowiska wód kopalnianych.

Tablica 1. Właściwości mechaniczne kształtowników typu V

Table 1. Mechanical properties of V-type sections

Stal	R_e, MPa	R_m, MPa	A_5,%	KCU2A, J/cm^2
25G2A	390-450	590-660	20-28	35-60
25G2A-Ti	390-425	590-615	20-26	80-140
HŁCORR(S480W)	500-540	680-700	18-21	60-80

W wyniku realizacji projektu celowego wdrożono do produkcji kształtowniki na odrzwia ze stali II generacji o symbolu S550W, której podstawowymi właściwościami jest bardzo wysoka wytrzymałość i ciągliwość oraz podwyższona odporność na obciążenia dynamiczne. Oprócz tych cech, kształtowniki charakteryzują się zespołem właściwości fizykochemicznych oraz trybologicznych, takich jak odporność korozyjna, czy też odpowiednie warunki tarcia na styku powierzchni, które istotnie poprawiły parametry eksploatacyjne obudów.

Nowy rodzaj kształtowników spełnia w zakresie właściwości mechanicznych i technologicznych następujące wymagania:

Właściwości mechaniczne:

- R_e min. 550 MPa;
- R_m min. 730 MPa;
- A_5 min. 18%;
- KCU2A min. 50 J/cm^2.

Właściwości technologiczne:

- duża podatności do zginania na zimno.

Inne właściwości funkcjonalne:

- podwyższona odporność na korozję w środowisku wód kopalnianych;
- podwyższona odporność na obciążenia udarowe;
- podwyższona odporność na boczne oddziaływanie górotworu.

Zachowanie wysokiej ciągliwości i odporności na obciążenia udarowe wymaga stosowania specjalnych zabiegów zarówno w obszarze projektowania składu chemicznego, jak również metalurgii i obróbki cieplno-mechanicznej, do których zalicza się:

- obróbkę pozapiecową;
- ograniczenie udziału w stali szkodliwych zanieczyszczeń i wtrąceń niemetalicznych;
- zastosowanie tytanu do kontroli przebiegu zmian zachodzących w strukturze stali podczas przeróbki plastycznej;
- ograniczenie segregacji pierwiastków (mieszanie elektromagnetyczne);
- kontrola parametrów ciągłego odlewania i walcowania kształtowników.

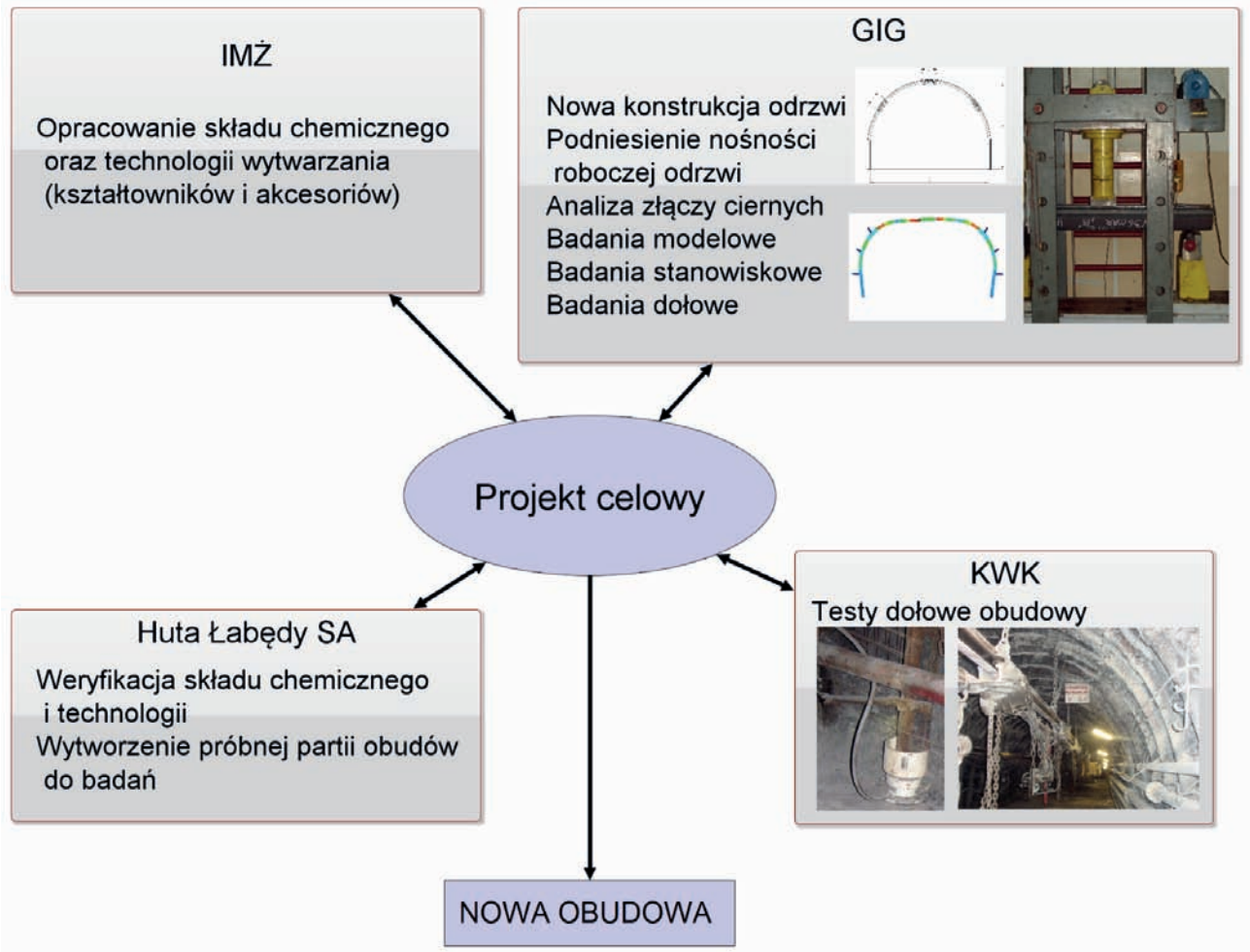
Celem opracowania jest przedstawienie wyników badań metaloznawczych kształtowników wytworzonych ze stali nowej generacji oraz obudów wyprodukowanych z tych kształtowników.

2. ZAKRES ZREALIZOWANYCH PRAC

Zmniejszenie zużycia stali w obudowie chodnikowej związane jest przede wszystkim z rozstawem odrzwi. To z kolei wiąże się ze zmniejszeniem nośności obudowy. Spadek ten, bez zwiększania ciężaru obudowy, może być zniwelowany przez zastosowanie odrzwi o większej nośności lub wykonanych ze stali o podwyższonych parametrach mechanicznych. Ten kierunek działań został przyjęty w projekcie celowym realizowanym w latach 2010–2012 przez Hutę Łabędy S.A., Instytut Metalurgii Żelaza i Główny Instytut Górnictwa. Prace wykonywane w ramach projektu odbywały się wielowątkowo. Jednym z kierunków działań było opracowanie składu chemicznego nowego gatunku stali S550W o podwyższonych parametrach mechanicznych oraz opracowanie technologii wytwarzania kształtowników z tej stali. Drugim kierunkiem było opracowanie konstrukcji odrzwi obudowy ŁPw z nowej stali, pozwalającej w optymalny sposób wykorzystać wysoką wytrzymałość poszczególnych elementów. Całokształt działań w ramach projektu przedstawiono w postaci schematu na rysunku 1.

Uwzględniając zaplanowany do uzyskania poziom właściwości mechanicznych nowej stali oraz możliwości technologiczno-wytwórcze Huty Łabędy S.A. założono, że wysokie właściwości mechaniczne kształtowników muszą być uzyskane bezpośrednio po walcowaniu na gorąco bez dodatkowych operacji technologicznych, które mogłyby generować niepotrzebne koszty.

Badania przemysłowe obejmowały opracowanie numerycznych modeli: reologicznych, rozwoju mikrostruktury podczas kształtowania plastycznego, przemian fazowych w czasie chłodzenia bezpośrednio po odkształcaniu. Przeprowadzono także symulacje fizyczne oraz badania przemysłowe w celu wyznaczenia warunków brzegowych i początkowych analizowanych procesów produkcji. Opracowane modele oraz zgromadzone dane wejściowe zastosowano do symulacji numerycznych walcowania kształtowników. Określono rozkład: pola temperatury, pola naprężeń i odkształceń. W ramach zadań przemysłowych przeprowadzono również badania materiałoznawcze, w tym badania ilościowe, aby określić jaki wpływ na kształtowanie się mikrostruktury i właściwości mechanicznych ma temperatura i szybkość chłodzenia po walcowaniu. Następnie w ramach prac rozwojowych opracowano doświadczalne technologie odlewania i walcowania kształtowników ze stali S550W. W efekcie tych prac wytworzono prototypowe partie obudów, które przekazane zostały do badań w Głównym Instytucie Górnictwa.



Rys. 1. Kierunki działań realizowanych w ramach projektu celowego
Fig. 1. Trends in activities performed under the targeted project

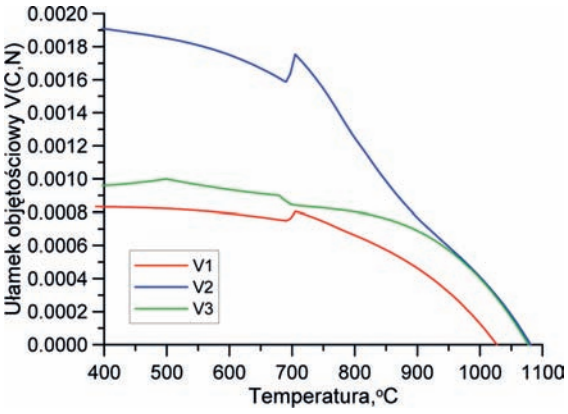
3. WYKORZYSTANIE MIKRODODATKÓW STOPOWYCH DO KSZTAŁTOWANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH STALI NOWEJ GENERACJI

Podwyższenie właściwości wytrzymałościowych nowego gatunku stali uzyskano wykorzystując dwa sposoby oddziaływania na strukturę stali, mianowicie:
– poprzez wzrost zawartości węgla, przy równoczesnej korekcie zawartości manganu;
– poprzez zastosowanie łączne mikrododatków Ti i V oraz podwyższonej zawartości azotu.

Przy projektowaniu składu chemicznego nowej stali (II generacji) zastosowano, podobnie jak w stali S480W, dodatki Cr, Cu, Ni podwyższające odporność korozyjną. Wzrost zawartości węgla powoduje wzrost udziału perlitu w strukturze stali, a tym samym wzrost jej wytrzymałości. Istotne jest jednak to, że mechanizm ten w przybliżeniu wpływa w takim samym stopniu na wzrost granicy plastyczności jak i wytrzymałość na rozciąganie, w przeciwieństwie do umocnienia wydzieleniowego, które silniej podwyższa granicę plastyczności niż wytrzymałość na rozciąganie. Dlatego ważnym zagadnieniem w projektowaniu składu chemicznego nowej stali było ustalenie właściwej proporcji między wkładem parametrów struktury ferrytyczno-perlitycznej a wkładem umocnienia wydzieleniowego do granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. W celu określenia wzajemnego oddziaływania mikrododatków Ti i V w stali przeprowadzono obliczenia termodynamiczne. W literaturze można znaleźć kilka modeli termodynamicznych, które wykorzystywano do przewidywań procesów wydzieleniowych w stalach z mikrododatkami stopowymi [1–3]. Obliczenia w ramach projektu przeprowadzono z wykorzystaniem programu ThermoCalc-Ver. S [4]. Ta wersja programu uwzględnia możliwość pojawienia się przerwy mieszalności roztworów stałych, co daje bardziej realistyczne wyniki obliczeń w przypadkach, w których temperatura analizowanego układu zmienia się bardzo szybko. Składy chemiczne stali do badań numerycznych podano w tablicy 2.

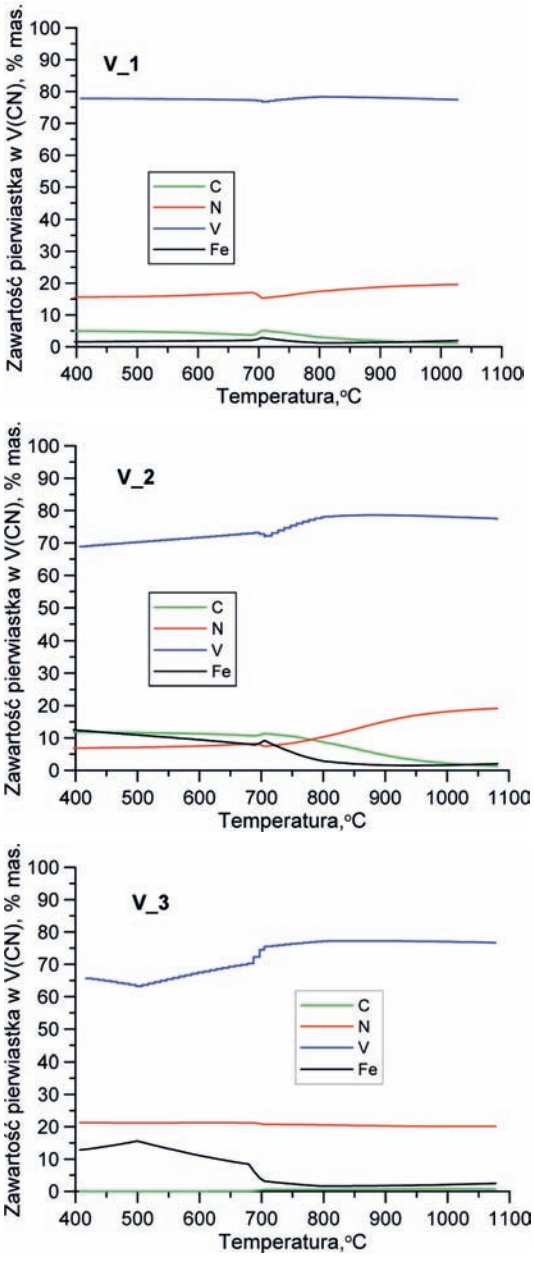
Wyniki obliczeń termodynamicznych dla pierwszej grupy stali zawierającej jedynie wanad pokazują, że tworzy się w nich węglikoazotek V(C,N). Zmiany udziału objętościowego i składu chemicznego węglikoazotku w funkcji temperatury dla tej grupy stali przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Z rysunku 2 wynika, że wzrost zawartości wanadu z 0,05 do 0,10% podwyższa o około 90ºC temperaturę rozpuszczania węglikoazotku oraz powoduje około 2,3-krotny wzrost jego udziału objętościowego w zakresie temperaturowym stabilności ferrytu. Powodować to powinno proporcjonalny do udziału objętościowego wzrost efektu umocnienia wydzieleniowego stali.



Rys. 2. Udział objętościowy węglikoazotku V(C,N) w funkcji temperatury w grupie stali zawierających wanad

Fig. 2. Volume fraction of V(C,N) carbonitride in group of steels containing vanadium as a function of temperature



Rys. 3. Skład chemiczny węglikoazotku V(C,N) w funkcji temperatury w stalach zawierających wanad

Fig. 3. Chemical composition of V(C,N) carbonitride in steels containing vanadium as a function of temperature

Tablica 2. Składy chemiczne stali modelowych, które były przedmiotem analizy z wykorzystaniem programu ThermoCalc

Table 2. Chemical compositions of model steels, which were the subject of analysis with ThermoCalc software

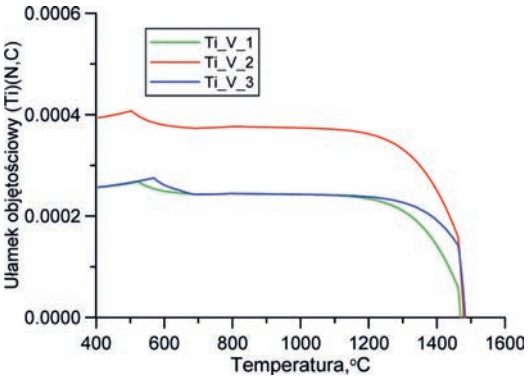
System	Wariant	C	Mn	Si	V	Ti	N
V	V1	0,24	1,4	0,3	0,05	-	0,01
	V2	0,24	1,4	0,3	0,10	-	0,01
	V3	0,24	1,4	0,3	0,05	-	0,02
Ti	Ti1	0,24	1,4	0,3	-	0,013	0,01
	Ti2	0,24	1,4	0,3	-	0,020	0,01
	Ti3	0,24	1,4	0,3	-	0,013	0,02
Ti-V	Ti-V1	0,24	1,4	0,3	0,07	0,013	0,01
	Ti-V2	0,24	1,4	0,3	0,07	0,020	0,01
	Ti-V3	0,24	1,4	0,3	0,07	0,013	0,02

Wzrost zawartości azotu w stali, przy niezmienionej zawartości wanadu, również podwyższa stabilność termodynamiczną węglikoazotku V(C,N) oraz nieznacznie zwiększa udział objętościowy tego związku. We wszystkich analizowanych przypadkach, program ThermoCalc przewiduje zastępowanie części atomów wanadu, atomami żelaza w złożonym węglikoazotku. Zjawisko to jest szczególnie widoczne dla stali modelowej V3, w zakresie stabilności temperaturowej ferrytu. Prawdopodobnie z tego powodu również zawartość azotu w złożonym węglikoazotku utrzymuje się w przybliżeniu na stałym poziomie.

Wyniki obliczeń termodynamicznych przeprowadzonych dla grupy stali zawierających tytan przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

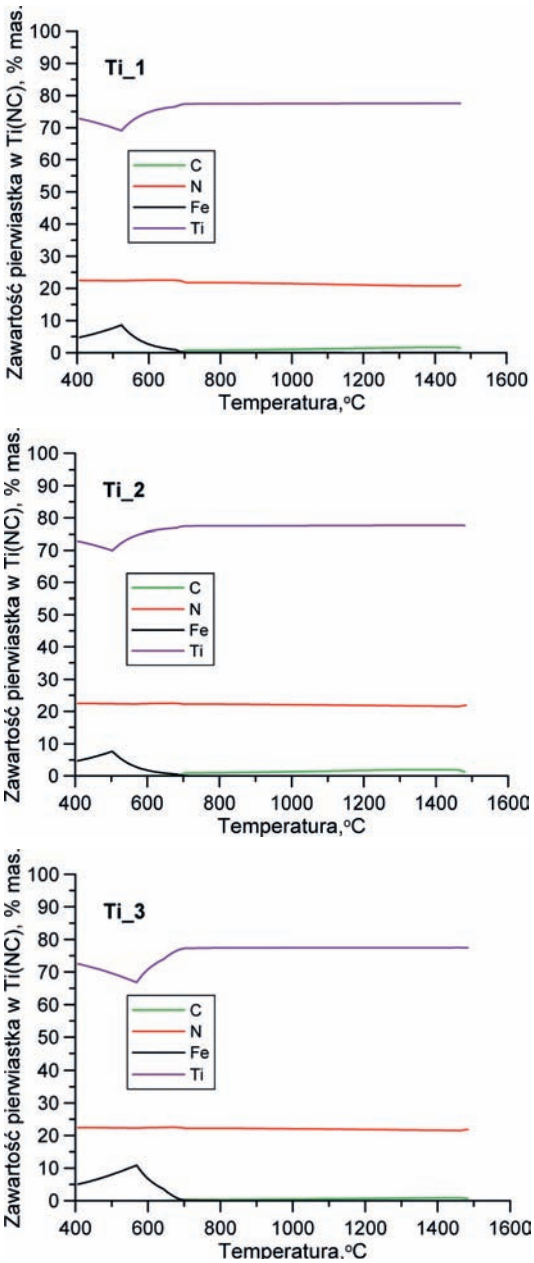
Z rysunku 4 wynika, że stabilność termodynamiczna azotku Ti(N,C) jest dużo wyższa od stabilności V(C,N). Wyraża się to wyższą temperaturą tworzenia się tego związku (1490°C), przy której w stali występuje jeszcze faza ciekła. Wzrost zawartości azotu silnie zwiększa udział objętościowy Ti(N,C) w stali, jednak nie zmienia istotnie temperatury początku wydzielania się tego związku. Wyniki obliczeń przedstawionych na rysunku pokazują, że Ti(N,C) zawiera tylko niewielkie ilości węgla, zaś poniżej 700°C może zawierać on również Fe.

Obliczenia termodynamiczne pokazują, że w stalach zawierających równocześnie Ti i V tworzą się dwa złożone związki, mianowicie, (V,Ti)(C,N) i (Ti,V)(N,C). Pierwszy z nich jest zbliżony składem chemicznym do



Rys. 4. Udział objętościowy węglikoazotku Ti(C,N) w funkcji temperatury w grupie stali zawierających tytan

Fig. 4. Volume fraction of Ti(C,N) carbonitride in group of steels containing titanium as a function of temperature



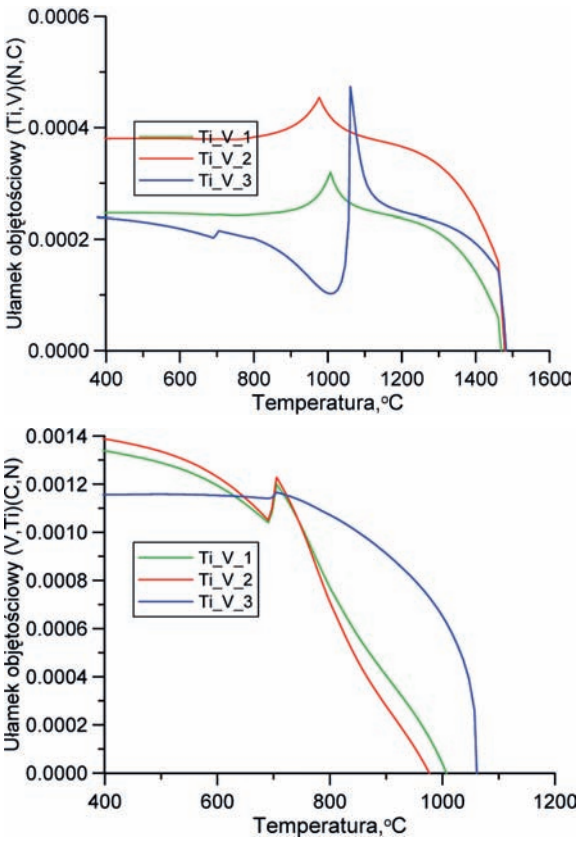
Rys. 5. Skład chemiczny węglikoazotku Ti(C,N) w funkcji temperatury w wytopach zawierających tytan

Fig. 5. Chemical composition of Ti(C,N) carbonitride in melts containing titanium as a function of temperature

VC a drugi do TiN. Zmiany udziału objętościowego tych związków w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 6. Zmiany składu chemicznego tych związków w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 7 i 8.

Z przedstawionych obliczeń wynika, że zawartość wanadu w azotku (Ti,V)(N,C) początkowo wzrasta w przedziale temperatur 1200–1000°C, a następnie maleje w miarę dalszego obniżania temperatury. Spowodowane jest to wydzielaniem się węglika (V,Ti)(C,N), który powstaje w przedziale temperatur 1100–1000°C.

Odnosząc uzyskane wyniki obliczeń termodynamicznych do celów projektu, należy stwierdzić, że dodanie tytanu do stali zawierającej wanad może znacząco wpływać na efekt umocnienia wydzieleniowego V(C,N). Z kolei spodziewanym efektem podwyższania zawartości azotu jest wzrost wytrzymałości stali. Taki wpływ azotu zaobserwowano w badaniach [5, 6].

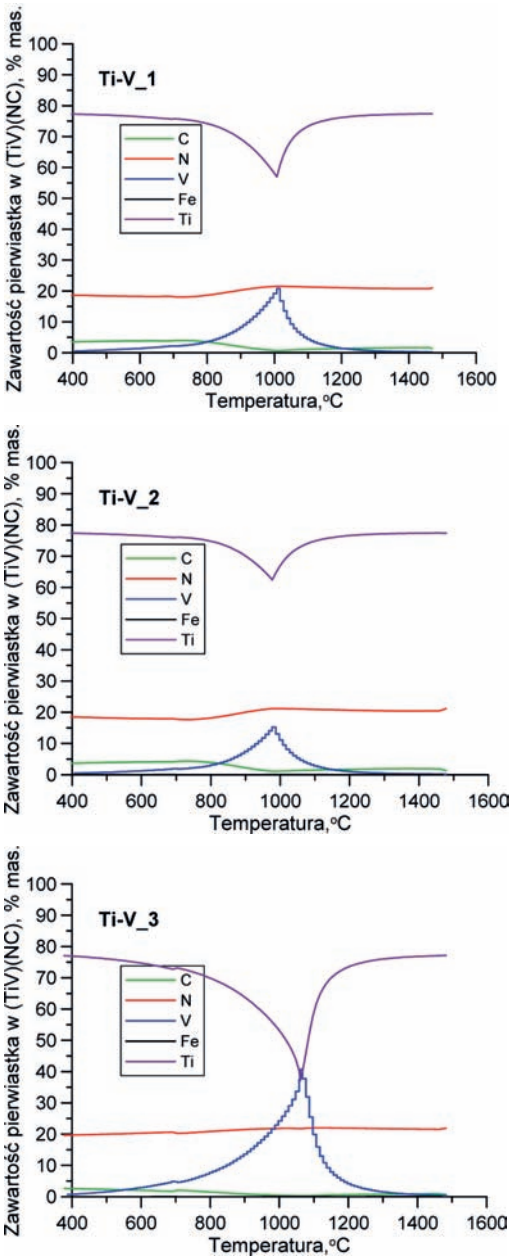


Rys. 6. Zmiany udziału objętościowego (Ti,V)(N,C) i (V,Ti)(C,N) w funkcji temperatury w stalach zawierających Ti i V

Fig. 6. Changes in volume fraction of (Ti,V)(N,C) and (V,Ti)(C,N) as a function of temperature in steels containing Ti and V

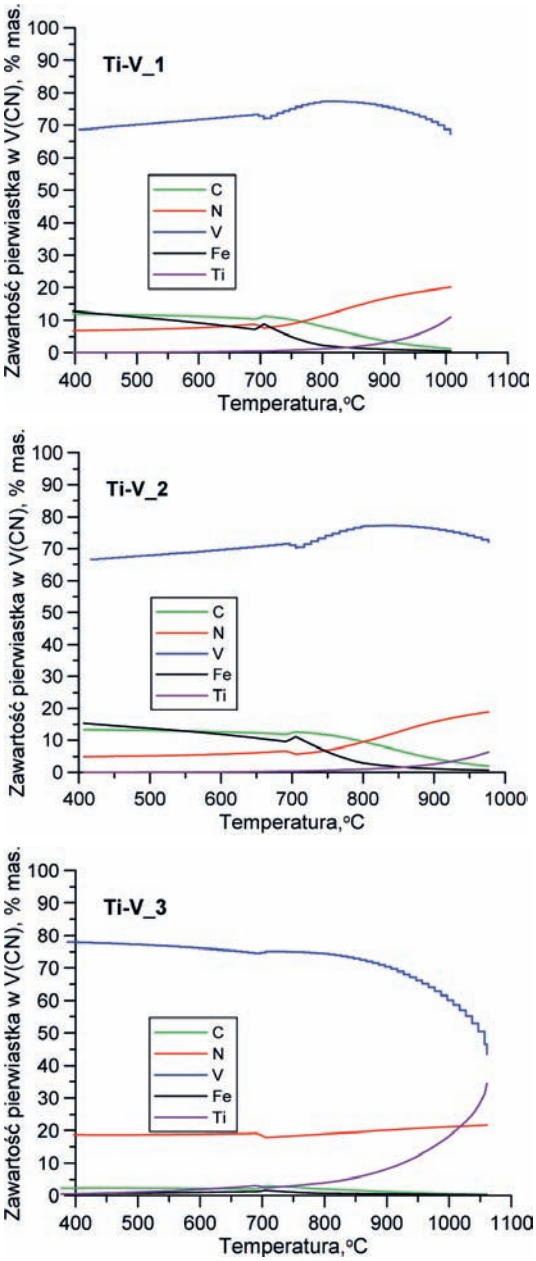
Obserwowane morfologie cząstek w stalach z mikrododatkami Ti i V przedstawiono na rysunku 9. Z obliczeń termodynamicznych wynika, że w stalach zawierających mikrododatki Ti i V powstawać mogą następujące węgliki i azotki: TiN, TiC, Ti(C,N), VC, VN, V(C,N) i (Ti,V)(C,N).

Najwyższą stabilnością termodynamiczną charakteryzuje się azotek tytanu, ewentualnie złożony węglikoazotek (Ti,V)(C,N). Oddziaływanie tych związków w stalach na kształtowniki i akcesoria górnicze jest bardzo istotne dla kształtowania ich właściwości mechanicznych. W pierwszej kolejności, tytan wykazując wysokie powinowactwo do azotu wiąże go w postaci bardzo stabilnego azotku TiN. W wyniku tego osiąga się dużą odporność stali na efekt starzenia po zgniocie, co powoduje uzyskanie wysokiej udarności próbek poddanych sztucznemu starzeniu po odkształceniu plastycznym (KCU2A). Drugim efektem występowania cząstek TiN w stali jest duża ich zdolność do hamowania rozrostu ziarna austenitu w procesie obróbki plastycznej. Efekt hamowania jest tym większy im mniejsza jest wielkość cząstek i większy ich udział objętościowy. Z drugiej strony, azotek tytanu wydziela się już w fazie ciekłej, co powoduje, że osiąga on duże rozmiary. Dlatego, chcąc przeciwdziałać rozrostowi cząstek TiN, istotne jest zastosowanie odpowiedniej szybkości chłodzenia wlewka, który powinien być odlewany w procesie COS. Z kolei cząstki VN i VC lub V(N,C) wydzielają się głównie podczas chłodzenia po walcowaniu i z tego powodu osiągają niewielkie wymiary (5÷10 nm), podczas gdy wymiary cząstek TiN mieszczą się w przedziale 15÷40 nm (około



Rys. 7. Skład chemiczny azotku (Ti,V)(N,C) w wytopach zawierających tytan w funkcji temperatury

Fig. 7. Chemical composition of (Ti,V)(N,C) nitride in melts containing titanium as a function of temperature



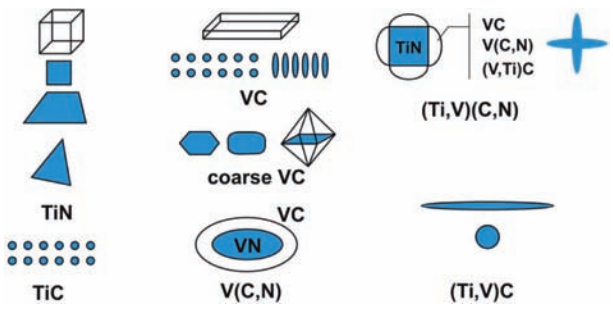
Rys. 8. Skład chemiczny węglika (V,Ti)(C,N) w wytopach zawierających tytan w funkcji temperatury

Fig. 8. Chemical composition of (V,Ti)(C,N) carbide in melts containing titanium as a function of temperature

90% populacji). Z uwagi na małe rozmiary, cząstki VN, VC i/lub V(C,N) umacniają osnowę ziarn ferrytu i płytek ferrytu w perlicie. Mechanizm powstawania roztworu stałego przedstawiono na rysunku 9. Polega on na epitaksjalnym zarodkowaniu mniej stabilnych węglików na bardziej stabilnych azotkach, które wydzielają się w wyższych temperaturach, a następnie ujednorodnianiu składu chemicznego powstającego kompleksu drogą dyfuzji.

W oparciu o przeprowadzone obliczenia termodynamiczne oraz szacunkowe obliczenia wkładu składu chemicznego (umocnienie roztworowe) i struktury ferrytyczno-perlitycznej do granicy plastyczności zaprojektowano skład chemiczny stali S550W, który pozwolił osiągnąć założenia projektu. Skład ten podano w tablicy 3.

W tablicy 3 uwzględniono również możliwość zastosowania mikrododatku niobu w stalach na kształtowniki.



Rys. 9. Morfologie cząstek węglików, azotków i węglikoazotków w stalach z mikrododatkami Ti i V

Fig. 9. Morphologies of particles of carbides, nitrides and carbonitrides in steels with Ti and V micro-additives

Tablica 3. Skład chemiczny (% mas.) stali S550W

Table 3. Chemical composition (wt %) of S550W steel

C max	Mn max	Si max	P max	S max	Cr	Ni max	V max	Ti max	Nb max	Cu	Al_c max	Inne
0,25	1,70	0,50	0,035	0,035	0,25–0,45	0,30	0,15	0,04	0,05	0,25–045	0,025	V+Nb+Ti ≤ 0,20%

Tablica 4. Skład chemiczny stali doświadczalnej z wytopu nr 171395, % masowe

Table 4. Chemical composition of experimental steel from heat no 171395, wt %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ca	Sn
0,25	1,35	0,43	0,017	0,012	0,28	0,08	0,25	0,02	0,001	0,001	0,022
Ti	**V**	**As**	**Pb**	**Nb**	**W**	**N**					
0,004	0,073	0,008	0,003	0,002	0,01	0,009					

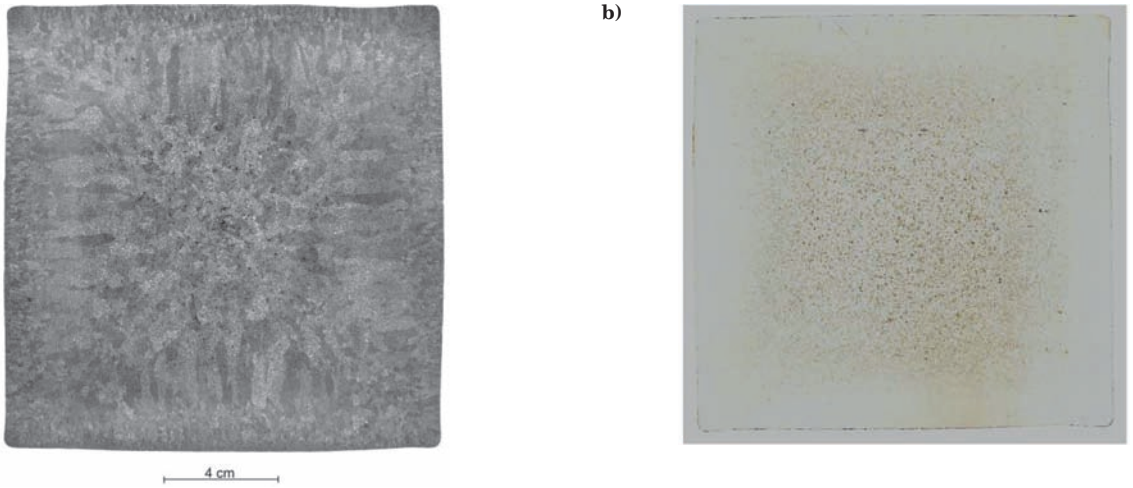
Koncepcja ta była przedmiotem prób przemysłowych w początkowym etapie projektu celowego. Pozytywne wyniki uzyskane z wykorzystaniem Ti i V spowodowały ograniczenie dalszych badań do analizy wpływu tych mikrododatków na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali S550W. Jednak z uwagi na zmienne koszty mikrododatków stopowych nie wykluczono możliwości wytarzania tej stli z zastosowaniem Ti i Nb.

4. KSZTAŁTOWNIKI ZE STALI NOWEJ GENERACJI

W ramach projektu celowego wykonano szereg wytopów, które były walcowane na kształtowniki i płaskowniki służące do produkcji jarzm. Uzyskane wyniki przedstawiono na przykładzie badań właściwości kształtownika V32, który był odwalcowany w Hucie Łabędy S.A. z przemysłowego wytopu 171395 odlanego technologią COS. Skład chemiczny wytopu podano w tablicy 4.

Obrazy makrostruktury i odbitki Baumanna wykonane na próbach pobranych z wlewka o wymiarach przekroju 160 mm × 160 mm oraz kształtownika V32 przedstawiono na rysunkach 10 i 11. Zarówno geometria wlewka, jak i jego makrostruktura są prawidłowe. Zewnętrzny naskórek tworzy 20 mm warstwa kryształów zamrożonych. Poniżej tej warstwy występuje strefa kryształów kolumnowych, zaś w środku wlewka występują kryształy równoosiowe. Obraz makrostruk-

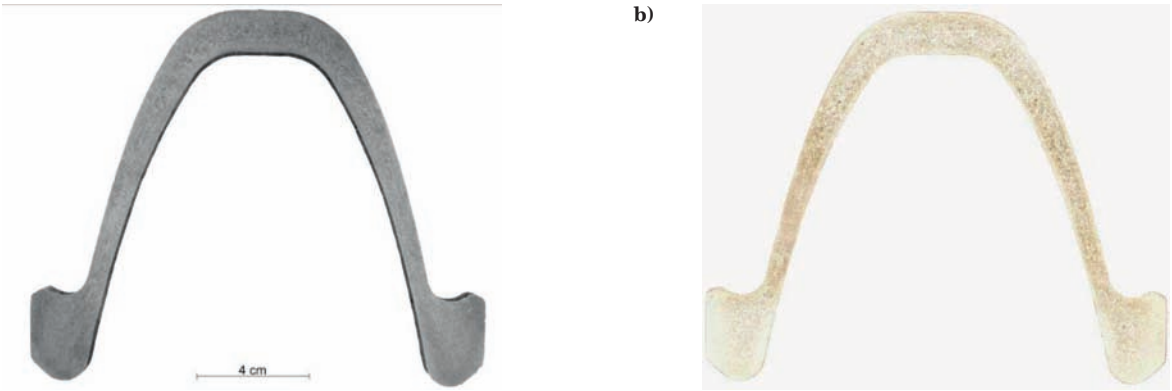
a) b)



Rys. 10. Obraz makrostruktury – (a) i odbitka Baumanna – (b) wlewka z wytopu nr 17395

Fig. 10. Macrostructure – (a) and Baumann print – (b) of ingot from melt no. 17395

a) b)



Rys. 11. Obraz makrostruktury – (a) i odbitka Baumanna – (b) kształtownika V32 po walcowaniu wlewka z wytopu nr 17395

Fig. 11. Macrostructure – (a) and Baumann print – (b) of section V32 after rolling of ingot from melt no. 17395

tury wlewka nie ujawnił obecności wad, które miałyby negatywny wpływ na parametry jakościowe kształtowników. Na uwagę zasługuje rozkład gęstości wtrąceń niemetalicznych na przekroju poprzecznym wlewka, które koncentrują się w strefie kryształów równoosiowych, gdzie rozmieszczone są jednorodnie zarówno w przekroju, jak i na długości wlewka. Jest to efekt zastosowania mieszania elektromagnetycznego w trakcie odlewania wlewka.

Wygrzewanie wsadu przed walcowaniem na kształtowniki V32 prowadzono zgodnie z instrukcją technologiczną Huty Łabędy S.A. Temperatura wygrzewania mieściła się w przedziale 1180–1200°C. Proces walcowania kształtowników prowadzono tak, aby temperatura pasma po ostatnim przepuście mieściła się w przedziale 950–980°C. Właściwości mechaniczne próbek pobranych z badanego kształtownika podano w tablicy 5. Jak wynika z tej tablicy, uzyskano zakładany poziom właściwości mechanicznych kształtownika. Badania makrostruktury kształtowników (rys. 11) nie wykazały w nich obecności wad wewnętrznych i przypowierzchniowych. Wtrącenia niemetaliczne, które skoncentrowały się w środku wlewka w procesie odlewania, występują w środniku i w ramionach badanego kształtownika.

Należy podkreślić, że mimo bardzo wysokiej wytrzymałości, kształtownik charakteryzuje się wysoką ciągliwością oraz odpornością na proces starzenia po zgniocie.

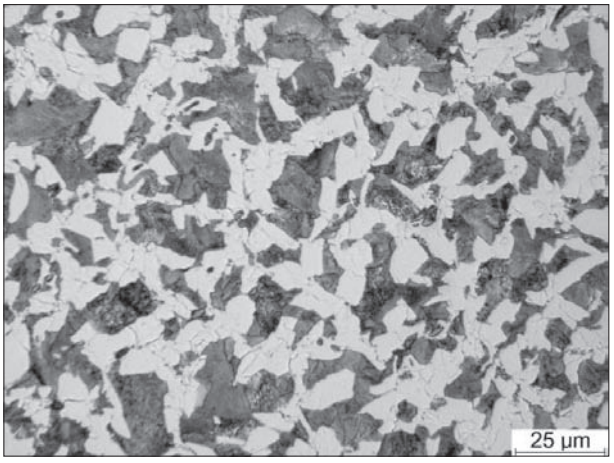
Tablica 5. Właściwości mechaniczne kształtownika V32
Table 5. Mechanical properties of section V32

Lp.	R_e MPa	R_m MPa	R_e/R_m	A_5 %	Z %	KCU2A, J/cm^2
1	585	761	0,77	28,0	67	97
2	581	764	0,76	25,4	66	69
3	584	757	0,77	25,6	68	67
Średnia	**583**	**761**	**0,77**	**26,3**	**67**	**78**

Strukturę kształtownika tworzą dwa składniki, ferryt i perlit. Udział objętościowy każdego z wymienionych składników wynosi około 50% (rys. 12). Są to optymalne proporcje między składnikami struktury z punktu widzenia mechaniki ich oddziaływania podczas odkształcenia plastycznego stali.

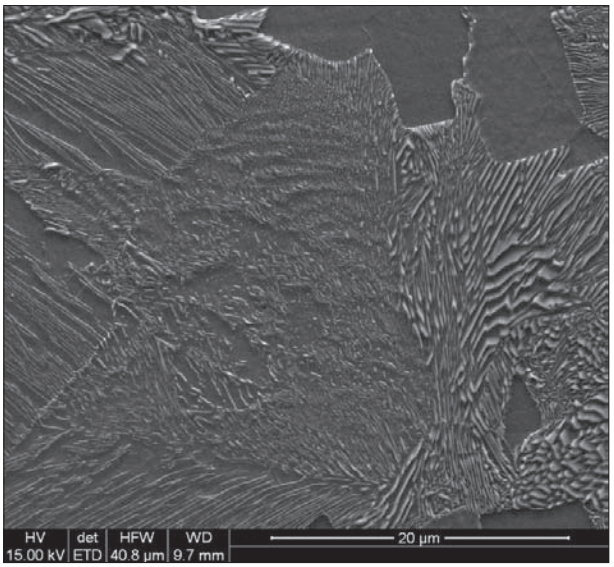
Mikrostrukturę perlitu badano metodą wysokorozdzielczej skaningowej mikroskopii elektronowej (FEM_SEM) oraz prześwietleniowej mikroskopii elektronowej (HRTEM). Przykład kolonii perlitu obserwowanej za pomocą mikroskopu skaningowego przedstawiono na rysunku 13. Obrazy przedstawione na tym rysunku pokazują, że oprócz perlitu płytkowego, w strukturze stali występuje również perlit zdegenerowany. Ponadto w koloniach perlitu występują globularne cząstki cementytu. Przykład perlitu płytkowego i cząstek cementytu przedstawiono na zdjęciach na rysunku 14 wykonanych w transmisyjnym mikroskopie elektronowym. Wynik pomiaru udziałów objętościowych składników strukturalnych i średniej średnicy równoważnej ziarna ferrytu i perlitu w badanej próbce oraz pasmowości perlitu podano w tablicy 6.

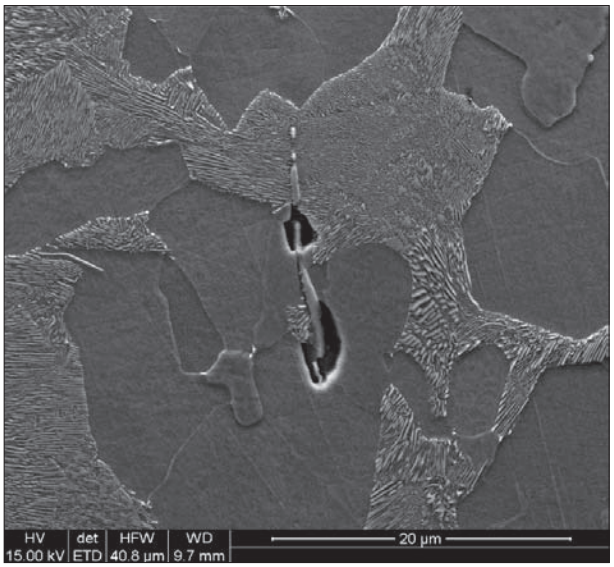
Pasmowość perlitu oceniono metodą erozji. Metoda ta polega na porównaniu szybkości zmian wartości udziału powierzchniowego analizowanych faz w kolejnych krokach erozji linowej, którą realizowano w dwóch



Rys. 12. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym próbki wytrzymałościowej pobranej z kołnierza kształtownika po statycznej próbie rozciągania (tablica 4)

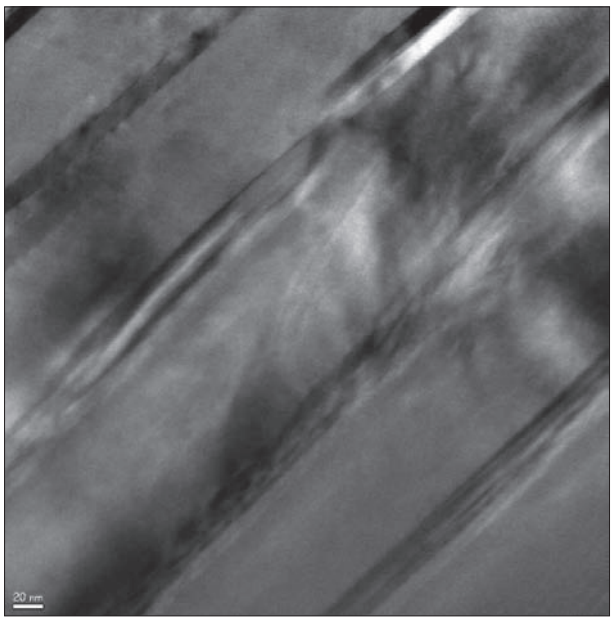
Fig. 12. Microstructure at cross-section of strength test sample taken from flange of section after static tensile test

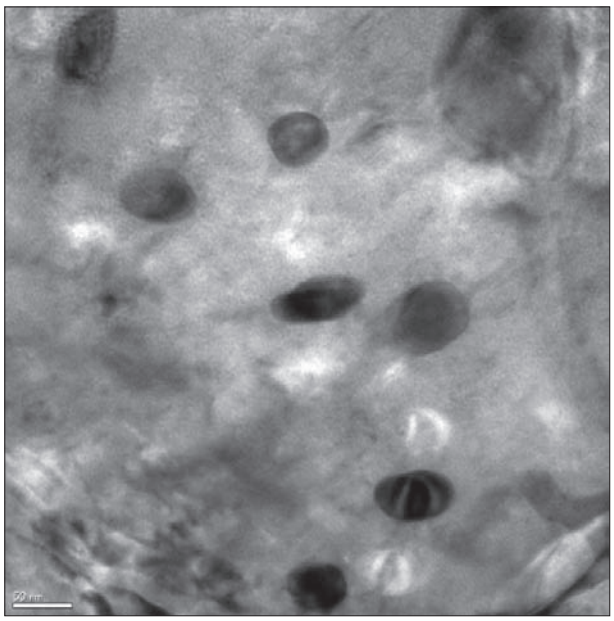




Rys. 13. Mikrostruktura perlitu w próbce wytrzymałościowej nr 1; FEG_SEM

Fig. 13. Microstructure of pearlite in strength test specimen no. 1; FEG_SEM





Rys. 14. Mikrostruktura perlitu w próbce wytrzymałościowej nr 1; HRTEM
Fig. 14. Microstructure of pearlite in strength test specimen no. 1; HRTEM

Tablica 6. Parametry mikrostruktury ferrytyczno-perlitycznej próbki wytrzymałościowej nr 1

Table 6. Parameters of ferritic-pearlitic microstructure of strength test specimen no. 1

Ferryt		Perlit		Pasmowość perlitu	
średnica µm	udział obj.	średnica µm	udział obj.	Al eroz 0º	Al eroz 45º
6,52	0,50	17,39	0,50	0,94	1,08

prostopadłych kierunkach. Dla każdego z kierunków określa się dystans zaniku (z ang. „decay distance"), odpowiadający takiej grubości erozji, przy której zmierzony udział powierzchniowy fazy jest *e* razy mniejszy od udziału początkowego. Stosunek wartości dystansów zaniku dla dwóch prostopadłych kierunków (d_e^h i d_e^V), czyli indeks anizotropii erozyjnej $AI_{eroz} = d_e^h/d_e^V$, jest miarą pasmowości danej fazy w mikrostrukturze. W przypadku całkowitego braku pasmowości szybkość erozji w kierunkach prostopadłych jest jednakowa i indeks $AI_{eroz} = 1$. W pasmowej mikrostrukturze materiałów walcowanych szybkość erozji w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania jest większa niż w kierunku równoległym, więc wartość $AI_{eroz} \neq 1$.

Wyniki pomiaru parametrów mikrostruktury wykorzystano do obliczeń wytrzymałości stali. Wpływ parametrów mikrostruktury i składu chemicznego stali na granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie oceniono za pomocą modelu opracowanego w IRSID [7]:

$$R_e(\text{MPa}) = 63 + 23(Mn) + 53(Si) + 5000(N_f) + 700(P) + \\ + F_\alpha\left[15{,}4 - 30(C) + \frac{6{,}094}{0{,}8 + (Mn)}\right]D_\alpha^{-0{,}5} + \\ + (1 - F_\alpha)[360 + 2600(C)^2] \quad (1)$$

$$R_m(\text{MPa}) = 237 + 29(Mn) + 79(Si) + 700(P) + \\ + 5369(N_f) + 7{,}24F_\alpha D_\alpha^{-0{,}5} + 500(1 - F_\alpha) \quad (2)$$

gdzie: F_α jest udziałem objętościowym ferrytu, D_α jest wielkością ziarna (średnia cięciwa) ferrytu w µm, N_f jest zawartością (%mas.) azotu „niezwiązanego" w stali w roztworze stałym, pozostałe symbole oznaczają zawartości pierwiastków w stali w %mas.

Z kolei wkład procesu wydzieleniowego do granicy plastyczności (w MPa) oszacowano za pomocą zależności opracowanej przez Kuziaka [8]:

$$\Delta R_e^{V(C,N)} = 19{,}9(C) + 552{,}8(C)^2 + 590(V) + \\ + 8650(N) + 19{,}9\ln(V_{ch}) \quad (3)$$

$$\Delta R_m^{V(C,N)} = 60 + 4{,}8(C) + 176(C)^2 + 414(V) + \\ + 5370(N) + 23\ln(V_{ch}) \quad (4)$$

gdzie: (*C*), (*N*) i (*V*) są zawartościami węgla, azotu i wanadu w stali, a V_{ch} [ºC/s] jest szybkością chłodzenia w przedziale temperatur 800–500ºC, która dla środka kołnierza kształtownika typu V32 wynosiła około 0,2ºC/s.

Wyniki obliczeń granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie podano w tablicy 7. Są one zbliżone do wyników uzyskanych w pomiarach. W obliczeniach przyjęto, że całkowity azot występujący w stali jest związany w węglikoazotkach ($N_f = 0$).

Tablica 7. Wyniki obliczeń granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie na podstawie pomiaru parametrów mikrostruktury ferrytyczno-perlitycznej

Table 7. Results of calculation of yield point and tensile strength based on measurement of parameters of ferritic-pearlitic microstructure

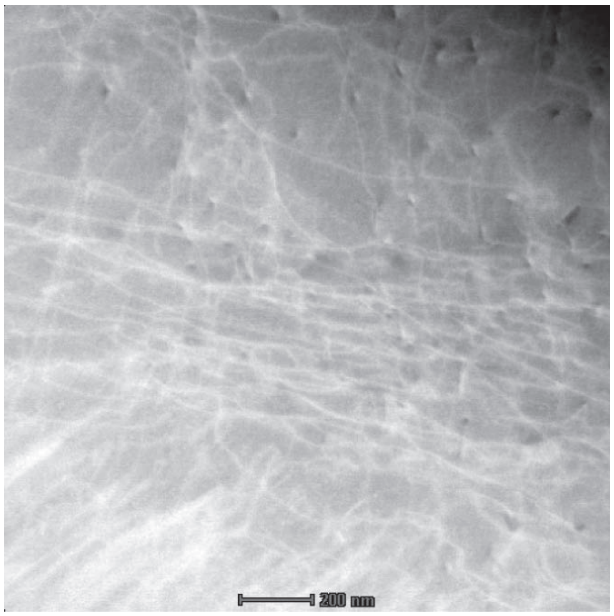
Wielkość	Wkład mikrostruktury	Wkład wydzieleń	Suma
R_e [MPa]	456	128	584
R_m [MPa]	617	113	730

Obliczenia podane w tablicy 7 pokazują, że umocnienie osnowy ferrytu cząstkami V(C,N) daje duży wkład do wytrzymałości kształtowników. Na rysunku 15 przedstawiono przykład cząstek V(C,N) wydzielonych na dyslokacjach. Występowanie tego związku potwierdziła rentgenowska analiza fazowa izolatów wykonanych z próbek pobranych z kształtownika.

Bardzo ważnym składnikiem struktury stali są wtrącenia niemetaliczne, ponieważ obniżają one ciągliwość i udarność kształtowników. W próbkach pobranych z kształtownika V32 stwierdzono głównie występowanie wydłużonych siarczków MnS (rys. 16).

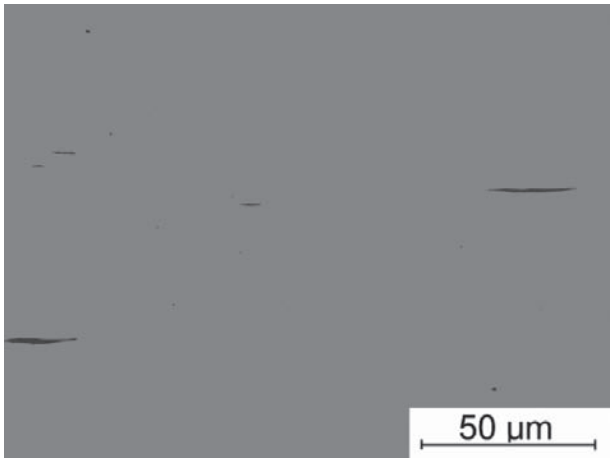
Statystykę rozkładu długości wtrąceń niemetalicznych przedstawiono na rysunku 17. Badania wykonano za pomocą analizatora obrazu mikroskopowego. Pomiar przeprowadzono dla populacji 524 cząstek, w której występowały zarówno siarczki, jak i wtrącenia tlenkowe. Z rysunku tego wynika, że w próbce pobranej z kołnierza występują głównie wtrącenia niemetaliczne o długości nieprzekraczającej 8 μm. Udział powierzchniowy wydzieleń wynosił około 0,2%.

Większość wtrąceń niemetalicznych charakteryzuje się długością w przedziale 2–6 μm. Zatem ich maksymalne wymiary są porównywalne z wielkością ziarna ferrytu (tablica 5).



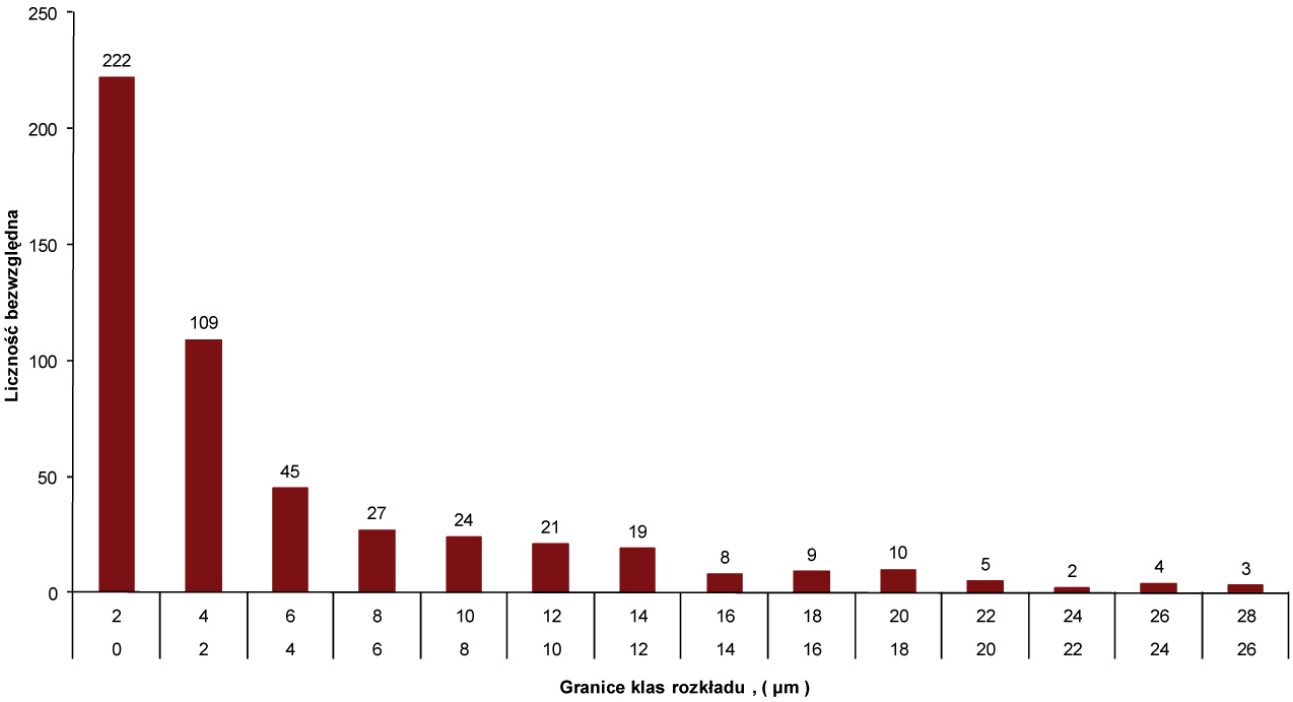
Rys. 15. Cząstki V(C,N) wydzielone na dyslokacjach w próbce wytrzymałościowej nr 1 pobranej z kształtownika V32; STEM

Fig. 15. Particles of V(C,N) precipitated at dislocations in strength test specimen no. 1 taken from sectionV32; STEM



Rys. 16. Wtrącenia siarczków MnS w próbce udarnościowej z kształtownika V32

Fig. 16. Inclusions of MnS sulphides in impact test sample from section V32



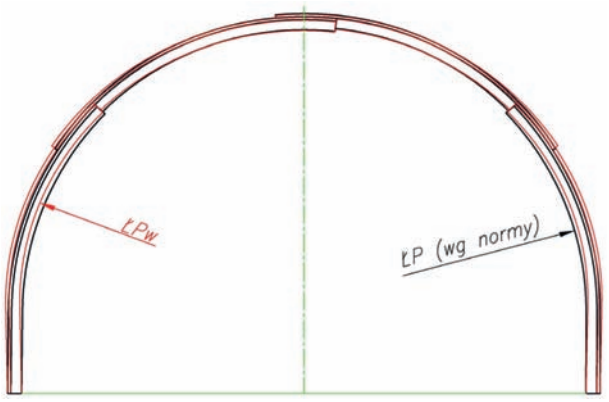
Rys. 17. Rozkład długości wtrąceń niemetalicznych w próbce z kształtownika V32

Fig. 17. Distribution of lengths of non-metallic inclusions in samples from section V32

5. BADANIA NAD OPRACOWANIEM NOWEJ KONSTRUKCJI ODRZWI

Jednym z ważniejszych zadań, realizowanych w ramach projektu celowego, wieńczących całość prac było opracowanie konstrukcji odrzwi z nowego gatunku stali, o wysokich parametrach podpornościowych, oznaczonych symbolem ŁPw. Badania te prowadzone były w Głównym Instytucie Górnictwa [9, 10]. Jak wynika z charakterystyk pracy odrzwi podatnych ŁP nośność robocza F_N (zsuwna) stanowi zaledwie 45÷55% nośności maksymalnej odrzwi F_{max} określanej dla odrzwi usztywnionych. Współczynnik określający zależność F_N/F_{max} oznaczony jest w normie PN-G-15000/05 jako k_4. Z powyższego wynika, że samo podniesienie parametrów mechanicznych stali, a przez to parametrów wytrzymałościowych poszczególnych łuków niekoniecznie musi przynieść zadowalające rezultaty. Oprócz „podniesienia charakterystyki" odrzwi usztywnionych konieczne jest wyraźne „podniesienie charakterystyki" odrzwi podatnych. Ideę tych działań przedstawiono na rysunku 18. Poprawa parametrów podpornościowych odrzwi podatnych pozwala na pełne wykorzystanie wytrzymałości poszczególnych elementów – łuków. Trzeba mieć też na uwadze, że nadmierne podniesienie charakterystyki roboczej odrzwi i ich usztywnienie jest szkodliwe i prowadzi do uzyskania odrzwi sztywnych, których nośność i funkcjonalność wyczerpuje się już przy niewielkich deformacjach. Z jednej strony konieczne jest zatem znalezienie optymalnej wartości współczynnika k_4 takiej, przy której odrzwia uzyskują największą wartość nośności roboczej, a jednocześnie pracują w dalszym ciągu jako podatne. Z drugiej strony konieczne jest uzyskanie właśnie takiej wartości współczynnika k_4 przez odpowiednie ukształtowanie złączy ciernych i właściwy dobór strzemion i parametrów ich pracy.

Dla rozpoznania tych zagadnień przeprowadzone zostały liczne analizy i badania stanowiskowe złączy ciernych zarówno na odcinkach prostych kształtowników, łukach, jak i całych odrzwiach. Z badań i analiz wynika, że złącza cierne przenoszą większe obciążenia w przypadku zastosowania trzeciego strzemienia w złączu. Jednak wzrost nośności jest jeszcze większy w przypadku wyeliminowania szczeliny między kołnierzami współpracujących łuków, która zmniejsza powierzchnię kontaktu, a tym samym siły tarcia między współpracującymi łukami w obszarze poza końcami złączy ciernych. Dla poprawy tego stanu rzeczy i wyeliminowania szczeliny konieczne jest zapewnienie jednakowej krzywizny współpracujących elementów. Warunek ten spełniają nowo zaprojektowane odrzwia ŁPw. Charakteryzują się one jednakową krzywizną współpracujących łuków ociosowych i stropnicowych. Pozwala to efektywniej niż w odrzwiach ŁP wykorzystać trzecie strzemię w złączu oraz poprawia współpracę łuków. Wymiary nowo zaprojektowanych odrzwi są zgodne z wymiarami odrzwi typoszeregu ŁP według normy PN-G-15000/02 i obejmują wielkości 7–19 oraz kształtowniki V29, V32 i V36. Na rysunku 19 przedstawiono zarys odrzwi ŁP i ŁPw.



Rys. 19. Porównanie geometrii odrzwi ŁP10/V36/4 (czarna linia) i ŁPw10/V36/4 (czerwona linia)

Fig. 19. Comparison of geometry of ŁP10/V36/4 (black line) and ŁPw10/V36/4 (red line) sets

W ramach projektu przeprowadzono badania 19 odrzwi. Badania przeprowadzano dla zmiennej liczby strzemion w złączach ciernych oraz dla zmiennej wartości momentu dokręcenia nakrętek śrub. Na rysunku 20 przedstawiono odrzwia zabudowane w stanowisku badawczym. Badaniom poddano odrzwia ŁPw8/V32/4/A, ŁPw10/V32/4/A, ŁPw12/V32/4/A, ŁPw10/V29/4/A i ŁPw10/V36/4/A. Próby pozwoliły na określe-

Rys. 18. Idea podniesienia charakterystyk odrzwi F_{max} – nośność maksymalna odrzwi (usztywnionych), F_N – nośność robocza odrzwi (podatnych), y – obniżenie odrzwi

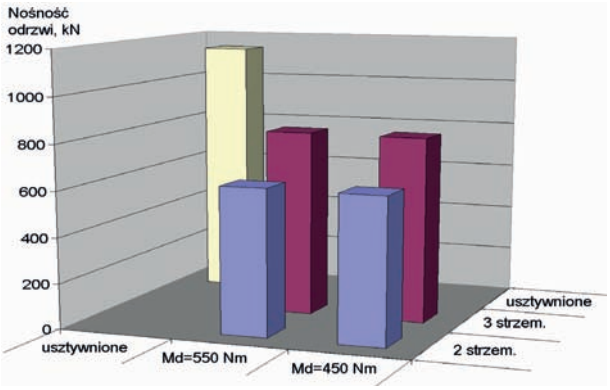
Fig. 18. The idea of improvement in characteristics of sets, F_{max} – maximum load-bearing capacity of set (stiffened), F_N – working load-bearing capacity of set (susceptible), y – lowering of set

Rys. 20. Odrzwia w stanowisku badawczym w trakcie badania
Fig. 20. Sets at test station during testing

nie nośności odrzwi oraz wpływu zmian nośności wraz ze zmianami wielkości odrzwi i kształtowników.

Bardzo efektywną metodą określania parametrów nośnościowych obudowy, jaką zastosowano na etapie projektowania, była analiza numeryczna prowadzona metodą elementów skończonych – MES (ang. FEA, FEM). Istotą metody elementów skończonych jest podział złożonego, badanego układu na skończoną liczbę elementów, analiza pojedynczego elementu, którego zachowanie jest określone przez skończoną liczbę parametrów, a następnie ponowne złożenie wszystkich elementów w celu badania odpowiedzi całego układu. Dzięki temu możliwe jest znaczne uproszczenie badań w porównaniu z analizą całej konstrukcji. Podział ten nazywany jest dyskretyzacją. Do najważniejszych zalet metody można zaliczyć łatwość algorytmizacji, możliwość rozwiązywania zadania przy niewielkim stopniu dyskretyzacji, efektywność, uniwersalność oraz szerokie możliwości zastosowania. Z punktu widzenia użytkownika modelowanie we współczesnych programach MES, na przykład stosowanych w GIG COSMOS/M, czy RAMA 3D sprowadza się do wprowadzenia geometrii całego badanego układu oraz określenia parametrów poszczególnych jego części. W celu przeprowadzenia obliczeń budowano modele, które odwzorowują zarówno kształt odrzwi, jak i parametry przekrojowe łuków. Ponadto konieczne jest przyjęcie odpowiednich parametrów materiałowych. Tak zamodelowane odrzwia podpiera się i obciąża zgodnie ze schematem badania odrzwi ujętym w normie lub zgodnie z rozkładem obciążenia występującym w danym wyrobisku górniczym.

Przeprowadzone stanowiskowe i modelowe badania nowo zaprojektowanych odrzwi z opracowanego w projekcie gatunku stali (S550W), wykazały ich wysokie parametry podpornościowe. Obliczone wskaźniki nośności tych odrzwi (W_N), są około 7% wyższe niż podobnych odrzwi ze stali S480W oraz około 37% wyższe niż odrzwi ze stali 25G2 lub 34GJ spełniającej wymagania normy PN-H-93441-1. Efekt ten został osiągnięty przez zastosowanie na łuki stali II generacji o wysokich parametrach mechanicznych i odporności korozyjnej o symbolu S550W będącej wynikiem prac realizowanych w ramach projektu celowego. Natomiast w przypadku odrzwi pracujących jako podatne, wysokie wartości nośności roboczej osiągnięto przez zastosowanie trzeciego strzemiona w złączu. Dzięki temu uzyskano także wysoką wartość współczynnika wykorzystania maksymalnej nośności odrzwi – $k_4 \geq 0{,}7$. Wyniki przeprowadzonej analizy parametrów odrzwi wykazały, że wartość momentu dokręcenia nakrętek śrub strzemion w analizowanym zakresie (450÷550 Nm) w mniejszym stopniu wpływa na nośność odrzwi niż zastosowanie trzeciego strzemienia. Zwiększenie momentu dokręcenia nakrętek śrub strzemion z 450 Nm do 550 Nm tj. o 22%, zwiększa nośność roboczą odrzwi zaledwie o ~3,5‰. Zatem dla wyraźnego podniesienia nośności roboczej odrzwi (nawet o 27%) korzystniej jest stosować dodatkowy element oporowy – trzecie strzemię w złączu (strzemię środkowe) rysunek 21.



Rys. 21. Średnie nośności robocze odrzwi ŁPw10/V36/4/A ze strzemionami SDw

Fig. 21. Average load-bearing capacities of ŁPw10/V36/4/A set with SDw clamps

6. PRÓBY DOŁOWE ODRZWI NOWEJ GENERACJI I WYNIKI TYCH PRÓB

Uzyskane wyniki badań stanowiskowych i modelowych pozwoliły wnioskować o prawidłowej pracy odrzwi oraz ich wysokich parametrach nośnościowych. W związku z tym możliwe było przeprowadzenie badań dołowych. Badania miały na celu sprawdzenie poprawności pracy obudowy wykonanej z nowego gatunku stali. Badania dołowe prowadzono w oparciu o metodykę opracowaną w GIG, na odcinkach chodników przyścianowych. W miejscach badań zabudowano bazy pomiarowe na odrzwiach z nowego gatunku stali oraz na odrzwiach ze stali konwencjonalnej. W bazach pomiarowych oprócz dynamometrów zabudowano repery pozwalające na zbadanie konwergencji wyrobiska. W trakcie badań rejestrowano obciążenie odrzwi, zsuwy złączy ciernych, a także zaciskanie pionowe, poziome oraz wypiętrzanie spągu. Górotwór otaczający wyrobisko w rejonie prowadzenia badań został rozpoznany dostępnymi metodami.

Badania i obserwacje prowadzono w trzech kopalniach: LW „Bogdanka" SA, KWK „Bobrek-Centrum" oraz KWK „Jas-Mos". Dla uzyskania szerszej informacji na temat pracy odrzwi z nowego gatunku stali badania prowadzono na różnych konstrukcjach odrzwi. W związku z tym zostały przebadane odrzwia ŁPw, zaprojektowane w ramach niniejszego projektu celowego, odrzwia ŁPSC stosowane na szeroką skalę w LW „Bodganka" SA oraz odrzwia SPŁ. Bazy pomiarowe zlokalizowano w chodnikach przyścianowych, w których wraz ze zbliżającą się ścianą wzrastają wartości obciążeń działających na obudowę. W trakcie badań rejestrowano obciążenie odrzwi, konwergencję wyrobiska

Rys. 22. Odrzwia ŁPw zabudowane w dowierzchni 3. badawczej w pokładzie 504 w KWK „Bobrek-Centrum”
Fig. 22. ŁPw set installed in research rise gallery 3, bed 504 at „Bobrek-Centrum” coal-mine

Rys. 23. Obudowa o podwyższonych parametrach mechanicznych II generacji zabudowana w chodniku nadścianowym ściany 6/VI/385, w pokładzie 385 w LW „Bogdanka” SA
Fig. 23. Second-generation mine roadway support with improved mechanical parameters installed in top gate of wall 6/VI/385, bed 385 at LW „Bogdanka” SA

oraz zsuwy w złączach ciernych. Przed przystąpieniem do właściwych badań zostały określone parametry górotworu, takie jak wytrzymałość skał na ściskanie, podzielność skał – wskaźnik RQD, rozmakalność oraz zasięg strefy spękań skał otaczających wyrobisko.

W wyniku realizacji tego zadania pozytywnie zweryfikowano zarówno nowo zaprojektowane odrzwia, jak również odrzwia wcześniej stosowane, a dla celów projektu wykonane ze stali S550W. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką nośność odrzwi wykonanych ze stali o podwyższonych parametrach mechanicznych II generacji, a przez to ich przydatność do zabezpieczania wyrobisk korytarzowych wykonywanych w trudnych warunkach geologiczno-górniczych – na dużych głębokościach, w warunkach występowania zaszłości eksploatacyjnych lub zaburzeń geologicznych. Na rysunkach 22–24 przedstawiono obudowę oraz stanowiska badawcze zainstalowane w kopalniach.

7. PODSUMOWANIE

W wyniku prac wykonywanych w ramach projektu celowego opracowano skład chemiczny nowego gatunku stali o podwyższonych parametrach mechanicznych i odporności korozyjnej o symbolu S550W. Zmodernizowano technologię wytwarzania kształtowników typu V i jarzm strzemion typu SD i SDO oraz opracowano nową konstrukcję odrzwi obudowy ŁPw. Nowa konstrukcja odrzwi pozwala w optymalny sposób wykorzystać wysoką wytrzymałość poszczególnych elementów. Odrzwia ŁPw ze stali S550W charakteryzują się podwyższonymi parametrami podpornościowymi zarówno w zakresie ich pracy jako sztywne, jak i podatne. Efekty te osiągnięto wielokierunkowo – poprzez podniesienie parametrów mechanicznych stali stosowanych na obudowy wyrobisk korytarzowych powodujące podwyższenie nośności poszczególnych elementów, a także przez odpowiednie ukształtowanie łuków oraz ich efektywne połączenie w złączach ciernych za pomocą dwóch lub trzech strzemion o podwyższonej wytrzymałości – SDw.

Odrzwia te zostały przebadane w stanowisku badawczym w GIG oraz w wybranych wyrobiskach kopalń „Bobrek-Centrum”, „Bogdanka” i „Jas-Mos”. Badaniom poddano odrzwia typu ŁPw, ŁPSC oraz SPŁ, których łuki wykonano ze stali o podwyższonych parametrach mechanicznych II generacji – S550W. Na wszystkich odcinkach testowych odrzwia z nowego gatunku stali

Rys. 24. Odrzwia SPŁ6.8-7.2/3.5/V29 ze stali S550 zabudowane w chodniku nadścianowym 3-Z1,Z2 w pokładzie 510/2 w KWK „Jas-Mos"

Fig. 24. SPŁ6.8-7.2/3.5/V29 set of S550 steel installed in top gate 3-Z1,Z2, bed 510/2 at „Jas-Mos" coal-mine

pracowały poprawnie, skutecznie zabezpieczając wyrobiska.

Mając na uwadze powyższe można stwierdzić, że zaprojektowane odrzwia mogą być z powodzeniem stosowane w podziemiach kopalń, zwłaszcza do zabezpieczania wyrobisk prowadzonych w trudnych warunkach geologiczno-górniczych, gdzie wymagane są wysokie parametry podpornościowe odrzwi.

LITERATURA

1. Sundman B., Agren J.: J. Phys. Chem. Solids; 42 (1981), 297
2. Speer J.G., Michael J.R., Hansen S.S.: Met. Trans. A, 18A(1987), 21
3. Adrian H.: Microalloying'95, Conf. Mat., June 11-14, 1995, Pittsburgh, PA, ISS, 285
4. http://www.metamorph.geo.uni-mainz.de/thermocalc/
5. Lagneborg R., Siwecki T., Zając S., Hutchinson B.: Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol. 28, No. 5, (1999) 186.
6. Yi. Li, Wilson J.A., Crowther D.N., Mitchell P.S., Craven A.J., Baker T.N.: The effect of vanadium, niobium, The effect of vanadium, niobium, titanium and zirconium on the microstructure and mechanical properties of thin slab cast steels, VANITEC, www.vanitec.org
7. Choquet P., Fabregue P., Giusti J., Chamont B.: Proc. Symp. Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel, ed. S. Yue, CIM, Quibec, 1990, 34
8. Kuziak R., Cheng Y.W., Głowacki M., Pietrzyk M.: NIST Techn. Note 1393, Nov. 1977
9. Rotkegel M.: Badania nad optymalnym wykorzystaniem właściwości mechanicznych nowego gatunku stali, Sprawozdanie GIG 09121030-151
10. Rotkegel M.: Weryfikacja konstrukcji odrzwi z nowego gatunku stali, Sprawozdanie GIG 09121050-151

Badania zrealizowano w ramach projektu celowego 6ZR8 2008/C07012.