

Dariusz Rudnik<sup>1</sup>

Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa

Jerzy Sobczak<sup>2</sup>

Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

## WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE MATERIAŁU TŁOKA KOMPOZYTOWEGO DO SILNIKA SPALINOWEGO

Dynamiczny rozwój motoryzacji oraz wciąż zaostrzane kryteria dotyczące poprawy szeroko rozumianej ekonomiczności i ekologiczności pojazdów spowodowały, że stosowanie tradycyjnych materiałów w budowie samochodów okazało się niewystarczające. W związku z tym konieczne stało się wprowadzenie w konstrukcji pojazdu nowoczesnych materiałów, które mogłyby sprostać wciąż rosnącym wymaganiom. W przypadku tłoków do silników spalinowych właściwości mechaniczne materiału są niezmiernie istotne przy określaniu parametrów konstrukcyjnych tego elementu pojazdu. W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości mechanicznych metalowych materiałów kompozytowych o osnowie stopu aluminium zbrojonych dyspersyjnie: popiołami lotnymi (kompozyty ALFA<sup>®</sup>), cząsteczkami grafitu (niklowanymi) i cząsteczkami SiC (F3S.20S) oraz lokalnie preformą z włókien krótkich Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a także, dla porównania, monolitycznego stopu AK12. Wyniki badań twardości, wytrzymałości i udarności pozwoliły na stwierdzenie, że badane kompozyty charakteryzują się znacznie wyższym poziomem uzyskiwanych właściwości niż stop AK12, dotychczas powszechnie używany do produkcji tłoków. W związku z tym można przypuszczać, że zastosowanie materiałów kompozytowych pozwoli na takie zmiany konstrukcyjne samego tłoka, a w efekcie całego silnika, które przyniosą oczekiwaną poprawę parametrów użytkowych samochodu.

## SOME SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS FOR COMBUSTION ENGINE PISTONS

The dynamic development of automobile industry and continuously growing criteria concerning economic and ecological management of automobiles contributed to the fact that the traditional methods of automobile designing have turned out to be insufficient. Therefore, it became essential to introduce new materials, which would be able to meet more and more requirements. The mechanical characteristics for combustion engine pistons, such as tensile properties at room and elevated temperatures, fatigue and impact characteristics, and hardness are extremely important for reasonable and high performance designing. In this paper some selected mechanical properties for different particle reinforced aluminum matrix composites materials containing fly ash (ALFA<sup>®</sup>), nickel coated graphite and silicon carbide (F3S.20S) have been investigated along with monolithic and locally reinforced with alumina short fibers AlSi12CuNiMg alloy. The results of hardness measurements (Fig. 1), selected strength properties at room (Fig. 2 and Tab. 1) and elevated temperature (Fig. 3), impact strength (Tab. 2) showed the advantages of new materials compared with traditional ones, especially AlSi12CuNiMg monolithic alloy widely used for production of IC engine pistons. Therefore, it may be conducted, that the adoption of composite materials will contribute to the construction changes of the pistons, and as a final results to the pistons for new engines, which will bring the anticipated improvement of the car.

## WPROWADZENIE

W rozwoju światowego przemysłu motoryzacyjnego na przełomie wieków można zaobserwować wzmoczony wzrost zainteresowania nowymi materiałami, generujący opracowanie nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych. Przejawia się to przede wszystkim we wzroście udziału w budowie samochodu materiałów lekkich, takich jak aluminium, magnez czy tworzywa sztuczne, w stosunku do udziału materiałów tradycyjnych: stali i żeliwa. Zawartość stopów Al w budowie typowego średniolitrażowego samochodu europejskiego wzrasta corocznie o 5÷6% [1]; na dzień dzisiejszy zamyka się ilością 90 kg. Samochód roku 2005 będzie zawierał już

125 kg stopów aluminium (w tym kompozytów na jego osnowie).

Ilustracją powyższej tezy może być spektakularne uruchomienie na początku lat 80. zeszłego stulecia masowej produkcji tłoków do silnika spalinowego zbrojonych lokalnie preformami na bazie tlenku glinu przez firmy TOYOTA i KOLBENSCHMIDT [2]. Zmiana materiału tłoka, jako jednego z najistotniejszych elementów silnika spalinowego, powinna prowadzić z jednej strony do obniżenia masy silnika (wraz ze zmianami innych elementów silnika, wywołanymi zmniejszeniem

<sup>1</sup>dr inż., <sup>2</sup> dr hab. inż.

masy tłoka: korbowodu, wału korbowego, mas wyrównowazających, koła zamachowego), zaś z drugiej do wzrostu możliwości większego obciążenia cieplnego silnika, prowadzącego do podwyższenia jego sprawności.

Wprowadzenie do produkcji nowych materiałów konstrukcyjnych, takich jak aluminiowe materiały kompozytowe, powinno być poprzedzone badaniami tych materiałów pod kątem możliwości ich zastosowania na wybrane części pojazdu samochodowego. Dla tłoka silnika spalinowego jednymi z najistotniejszych badań są badania właściwości mechanicznych proponowanego nowatorskiego rozwiązania materiałowego.

## MATERIAŁ DO BADAŃ

Próbki do badań pobrano z prasowanych w stanie ciekłym w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie tłoków ze stopu AK12 (AlSi12CuNiMg) lokalnie zbrojonych preformami na bazie włókien krótkich z tlenku glinu typu Saffil (AK12-22 obj.%  $Al_2O_3$ ) i zbrojonych dyspersyjnie (w całej objętości) cząsteczkami grafitu (AK12-5,7 wag.% grafitu niklowanego), węgla krzemu SiC (F3S.20S - AlSi7Mg-20 obj.% SiC) i popiołami lotnymi (ALFA<sup>®</sup> - AK12-5,8 wag.% popiołów lotnych, z ang. *fly ash*). Za wzór przyjęto tłok do silnika wysokoprężnego rodziny CA90 (wersja 1CA90 i 4CA90). Jest to silnik o zapłonie samoczynnym, chłodzony wodą, przeznaczony do pracy ciągłej z pełnym obciążeniem, niewymagający specjalnej obsługi. Posiada bezpośredni wtrysk paliwa, objętość cylindra  $570\text{ cm}^3$ , przy 3000 obr/min, charakterystyka mocy  $N_B$  sięga 10 KM (7,35 kW). W wersji jednocyndrowej powszechnie stosowany jest do napędu pomp, młynów, maszyn rolniczych, generatorów prądowych, betoniarek, kompresorów i traktorów. W wersji wielocyndrowej (np. 4CA90) może z powodzeniem stanowić jednostkę napędową do samochodu osobowego lub dostawczego.

Wyboru tłoka (silnika) dokonano na podstawie przeprowadzonych konsultacji z potencjalnym wytwórcą odlewów nowej generacji, Wytwórnią Sprzętu Komunikacyjnego GORZYCE S.A. w Gorzycach k. Sandomierza oraz przyszłym użytkownikiem wyrobów kompozytowych, Wytwórnią Silników Wysokoprężnych ANDORIA S.A. w Andrychowie oraz analizy użyteczności, szans wdrożeniowych i analizy marketingowej.

## OCENA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH

### Twierdzenie

Rozkład twardości HB w przekroju tłoka dla badanych materiałów, zarówno w stanie lanym, jak i po obróbce cieplnej przedstawiono na rysunku 1.

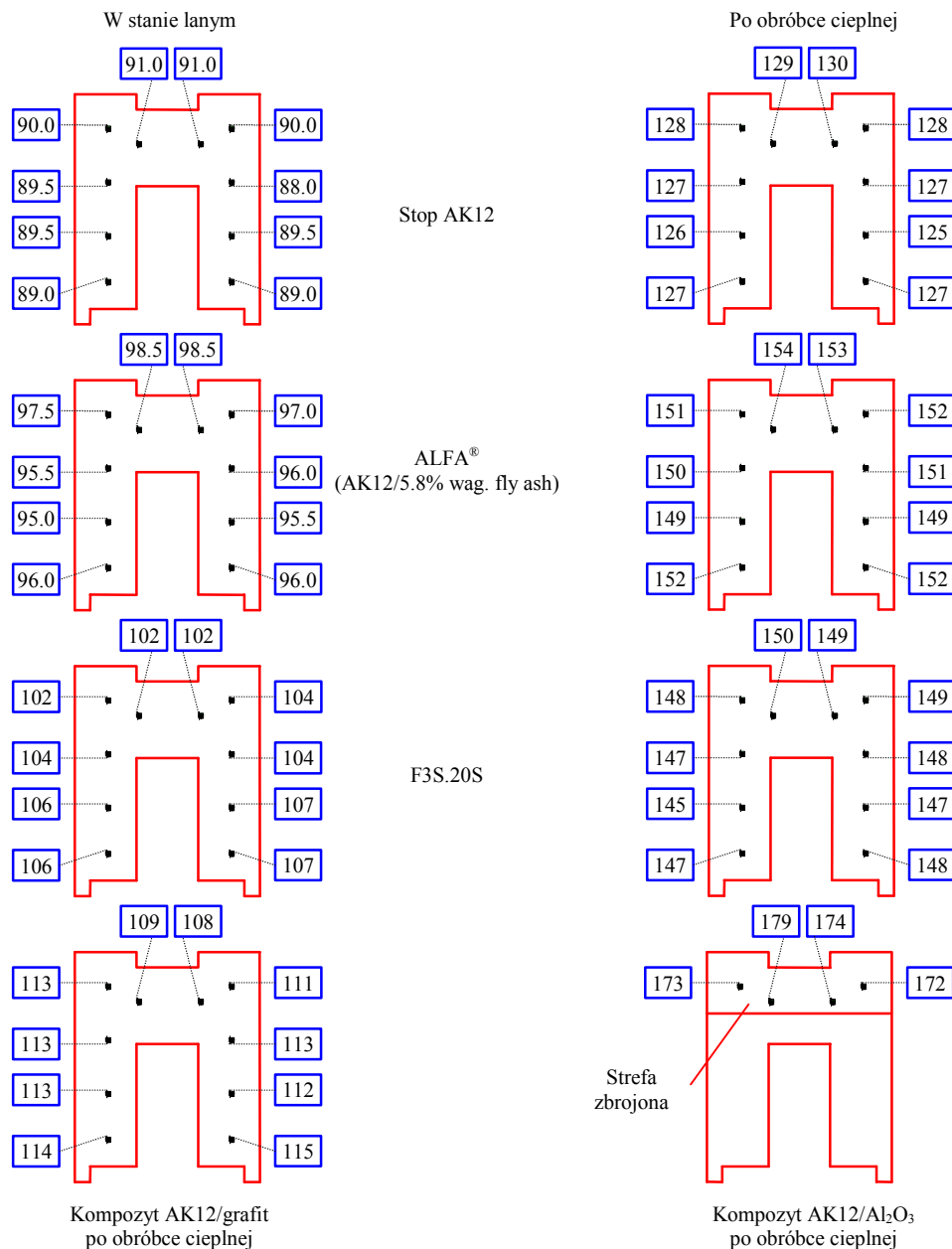
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1. W przypadku wszystkich tłoków występuje równomierny rozkład twardości na powierzchni przekroju, co może świadczyć z jednej strony o poprawności przeprowadzenia procesu technologicznego wykonywania tłoków, a z drugiej o równomierności rozłożenia fazy zbrojącej w strukturze (w przypadku tłoków zbrojonych lokalnie i w całej objętości).
2. Występuje wzrost twardości materiału monolitycznego po obróbce cieplnej w stosunku do materiału nieobrobionego cieplnie średnio o ponad 40%.
3. Dla kompozytu zbrojonego lokalnie, w obszarze zawierającym włókna krótkie  $Al_2O_3$ , wzrost twardości w stosunku do materiału monolitycznego (po obróbce cieplnej) wyniósł średnio 37% (w stosunku do AK12 bez obróbki cieplnej 94%). Wzrost twardości jest spowodowany obecnością twardej fazy ceramicznej w osnowie stopu aluminium, która zmienia właściwości całego układu.
4. Kompozyt zbrojony dyspersyjnie grafitem charakteryzuje się wyższym poziomem twardości niż stop monolityczny, nieobrobiony cieplnie, lecz niższym poziomem niż stop AK12 po obróbce cieplnej. Jest to spowodowane jednoczesnym występowaniem dwóch faz o silnie zróżnicowanych właściwościach: miękkiej fazy grafitowej i twardej fazy Al3Ni, pochodzącej z pokrycia grafitu.
5. W przypadku kompozytów ALFA<sup>®</sup> i F3S.20S występują zbliżone wartości twardości tych materiałów zarówno w stanie lanym, jak i po obróbce cieplnej. W stosunku do stopu monolitycznego, jak również kompozytu AK12-grafit są to wartości wyższe, natomiast niższe niż dla kompozytu AK12- $Al_2O_3$  po obróbce cieplnej.

Ogólnie można stwierdzić, że zmiana struktury materiału wywołana wprowadzeniem do osnowy stopu AK12 fazy zbrojącej spowodowała zmianę twardości otrzymanego materiału kompozytowego. W jednym przypadku - kompozyt z grafitową fazą zbrojącą - nastąpił spadek twardości, natomiast w pozostałych wariantach zbrojenia nastąpił wyraźny wzrost twardości, największy dla zbrojenia lokalnego preformą z włókien krótkich  $Al_2O_3$  po obróbce cieplnej.

## WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Badania właściwości wytrzymałościowych materiału tłoka kompozytowego prasowanego w stanie ciekłym (z obszarów monolitycznych (AK12) i zbrojonych włókniem krótkim  $Al_2O_3$ ) wykonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej SCHENCK w oparciu o zmodyfikowaną próbę niskocyklową LCF o zmiennym poziomie wartości średniego i maksymalnego obciążenia [3]. Umożliwia ona, w jednym procesie pomiarowym, dokonanie oceny wielu parametrów



Rys. 1. Rozkład twardości Brinella w przekrojach badanych tłoków

Fig. 1. The distribution of Brinell hardness on the investigated pistons sections

wytrzymałościowych, w tym również np. granicy akomodacji - tzw. granicy sprężystości nabytej ( $R_a$  - najwyższe naprężenie, przy którym zachodzi jeszcze „akomodacja”, tj. stabilizacja odkształceń trwałych po kilkukrotnym obciążeniu próbki do tej samej wartości obciążenia) czy wytrzymałości na zmęczenie w warunkach giętno-obrotowych, którą daje się również oszacować na podstawie próby statycznej (zmodyfikowana próba niskocyklowa Mansona, Coffina i Morrowa). Jest to o tyle istotne, że takie badania są tańsze i szybsze, nie wymagają bowiem realnych badań dynamicznych w warunkach giętno-obrotowych oraz z jednego procesu pomiarowego otrzymuje się kompleksowe charakterys-

tyki mechaniczne. Jest to szczególnie ważne przy opracowywaniu nowych zależności.

Maszyna w trakcie próby była sterowana za pomocą obciążeń w blokach po 20 cykli o stałej dolnej i górnej wartości obciążenia. Częstotliwość zmian obciążenia wynosiła 0,5 Hz, a żądane parametry wytrzymałościowe określono na podstawie wykresów przebiegu próby oraz zmodyfikowanej metodyki obliczeniowej. W ramach badań wyznaczano następujące właściwości:

$R_a$  - granicę akomodacji (naprężenie, powyżej którego nie stabilizuje się odkształcenie trwałe podczas wielokrotnego obciążania próbki w tym samym zakresie obciążeń),

$Z_{go}$  - wytrzymałość na zmęczenie przy zginaniu obrotowym (oceniona na podstawie zmodyfikowanej próby LCF),

$R_m$  - wytrzymałość na rozciąganie,

$E_0$  - początkowy moduł sprężystości podłużnej,

$E_{180}$  - moduł sprężystości podłużnej w zakresie pomiarowym 0÷180 MPa,

$R_{0,02}$  - umowną granicę  $R_{0,02}$ ,

$R_{0,05}$  - umowną granicę  $R_{0,05}$ ,

$R_{0,10}$  - umowną granicę  $R_{0,10}$ ,

$R_{0,20}$  - umowną granicę plastyczności,

$A_5$  - wydłużenie całkowite próbki 5-krotnej po zerwaniu (mierzone elektronicznie)

oraz następujące parametry uzyskiwane na tej samej próbce w wyniku zmodyfikowanej próby niskocyklowej LCF:

$b$  - wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej (współczynnik Basquina),

$c$  - wykładnik odkształcalności zmęczeniowej.

Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

z kierunku równoległego, co świadczy o tendencji włókien zbrojących do ich porządkowania prostopadle do siły prasowania lub innym anizotropowym wpływie fazy zbrojącej.

4. Sztywność strefy zbrojonej, oceniana wartościami modułu sprężystości podłużnej  $E$  również wzrasta wskutek zbrojenia, przy czym wzrost ten jest odczuwalny w większym stopniu dla próbek pobranych z kierunku równoległego względem kierunku ruchu stempla prasującego.

## WYTRZYMAŁOŚĆ W PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE

Przeprowadzono badania zmian wytrzymałości na rozciąganie w różnej temperaturze w zakresie do 400°C osnowy AK12 (odlanej grawitacyjnie i prasowanej w stanie ciekłym) oraz kompozytu AK12- $Al_2O_3$  w kierunku poziomym (prostopadłym do kierunku ruchu stempla prasującego).

TABELA 1. Wartości otrzymane w wyniku badań wytrzymałościowych

TABLE 1. The values obtained in mechanical tests

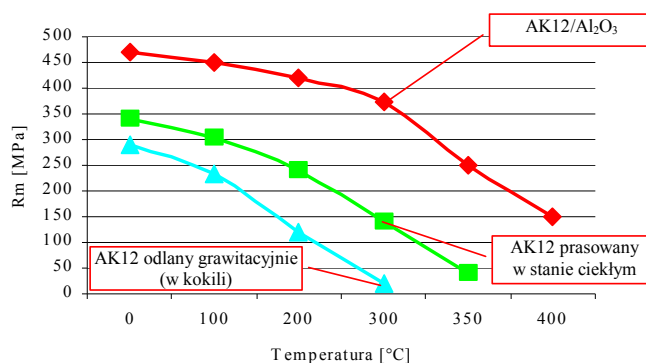
Badana właściwość Oznaczenie, opis	$R_m$ MPa	$R_a$ MPa	$Z_{go}$ MPa	$E_0$ GPa	$E_{180}$ GPa	$R_{0,02}$ MPa	$R_{0,05}$ MPa	$R_{0,10}$ MPa	$R_{0,20}$ MPa	$A_5$ %	$b$	$c$
AK12, bez OC, pionowo	219	114	76	74	73	90	105	121	142	0,80	-0,0685	-0,3068
AK12/ $Al_2O_3$ , bez OC, pionowo	288	226	112	108	93	208	234	248	-	0,52	-0,0611	-0,3916
AK12/ $Al_2O_3$ , bez OC, poziomo	325	170	113	98	100	150	185	243	-	0,54	-0,0685	-0,2769
AK12, po OC, pionowo	349	283	138	77	74	258	288	306	330	1,50	-0,0600	-0,4136
AK12/ $Al_2O_3$ , po OC, pionowo	432	302	163	105	99	282	325	383	-	0,60	-0,0608	-0,3515
AK12/ $Al_2O_3$ , po OC, poziomo	439	410	205	84	94	392	416	-	-	0,55	-0,0494	-0,3220

Uwagi: każda z wartości podanych w tabeli stanowi średnią z 3 pomiarów

Otrzymane wyniki badań wskazują na to, że:

1. Zbrojenie stopu AK12 włóknem krótkim na bazie  $Al_2O_3$  powoduje istotny wzrost właściwości wytrzymałościowych zarówno w stanie lanym (bez obróbki cieplnej), jak i po obróbce cieplnej wraz ze spadkiem charakterystyk plastyczności.
2. Uzyskany w badaniach maksymalny poziom właściwości wytrzymałościowych znacznie przewyższa wartości otrzymywane dotychczas w kraju [4] i za granicą. Pokazuje potencjalne możliwości tkwiące w dalszej redukcji masy zbrojonych stref (obszarów) tłoka. Świadczy to również o prawidłowo przeprowadzonym procesie technologicznym wytworzonych tłoków.
3. Charakterystyki wytrzymałościowe wyznaczone na próbkach po obróbce cieplnej pobranych z kierunku prostopadłego w stosunku do kierunku ruchu stempla prasującego są odczuwalnie wyższe (zwłaszcza w przypadku granicy akomodacji  $R_a$  i wytrzymałości zmęczeniowej  $Z_{go}$ ) od analogicznych charakterystyk próbek kompozytowych AK12- $Al_2O_3$  pobranych

Badania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON, w której wbudowano komorę grzewczą, gwarantującą tempo nagrzewania próbek rzędu 20°C/min. Wyniki badań zmian wytrzymałości wraz z zadaną temperaturą (dokładność pomiaru temperatury badań oceniono na  $\pm 15^\circ C$ ) przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  badanych materiałów (po obróbce cieplnej) od temperatury

Fig. 2. Relation between tensile strength  $R_m$  of investigated materials (after the heat treatment) and their temperature

Stan prasowany wykazuje mniejszy spadek właściwości wytrzymałościowych w porównaniu z odlewem grawitacyjnym. Zbrojenie osnowy AK12 włóknem krótkim  $Al_2O_3$  oprócz istotnej poprawy charakterystyki wytrzymałościowej prowadzi do wzrostu stabilności wytrzymałości na rozciąganie. Badana właściwość zmniejsza się monotonicznie w niewielkim stopniu do temperatury  $300^\circ C$ ; po jej przekroczeniu obserwowany jest intensywniejszy spadek wytrzymałości na rozciąganie. Niewykluczone, że wysoka temperatura badań wraz z określonym czasem nagrzewania próbek wytrzymałościowych może powodować zmiany strukturalne, wpływające na uzyskany poziom badanej właściwości poprzez zmiany układów dyslokacyjnych odpowiedzialnych za termiczną stabilność strukturalną, w tym procesy na granicy rozdziału osnowa-faza zbrojąca.

Na podstawie otrzymanych wartości można stwierdzić, że zmiana struktury materiału monolitycznego AK12, wywołana wprowadzeniem fazy zbrojącej w postaci preformy z włókien krótkich  $Al_2O_3$ , spowodowała istotny wzrost właściwości wytrzymałościowych otrzymanego materiału kompozytowego i zwiększenie ich stabilności termicznej. Umożliwi to wprowadzenie daleko idących zmian w konstrukcji tłoka prowadzących do zmniejszenia jego wymiarów wraz ze wszystkimi konsekwencjami takich zmian, jak: zmniejszenie masy, możliwość przekonstruowania strefy denka tłoka, rowków pierścieniowych i części prowadzącej tłoka.

## UDARNOŚĆ

Próby udarności są stosowane do oceny zachowania się metalu w warunkach sprzyjających kruchemu pękaniu, wywołanych w próbce odkształceniami o dużej szybkości, powstałymi w wyniku udarowego działania siły. Dzięki tym badaniom w przypadku materiałów kompozytowych można między innymi w skuteczny sposób wykryć obecność karbu:

- strukturalnego (zróznicowana struktura, brak właściwej jakości połączenia osnowa-faza zbrojąca),
- postaciowego (niewłaściwie przygotowana powierzchnia próbki, nieciągłości, pęcherze gazowe itp.).

Próby udarności wykonano na próbkach bez karbu w temperaturze pokojowej sposobem Charpy'ego zgodnie z PN-EN 10045-1 [5]. Próba udarności polegała na złamaniu jednokrotnym uderzeniem noża młota wahadłowego INSTRON-WOLPERT PW-30 o prędkości wahadła  $5,52$  m/s próbki bez karbu o długości  $55$  mm i przekroju kwadratowym o boku  $10$  mm, podpartej swobodnie obydwoma końcami na podporach młota. Energia początkowa młota wynosiła  $300$  J.

Pomiar pracy uderzenia, odpowiadającej energii zużytej na złamanie próbki, następował automatycznie. Obliczenia zostały wykonane automatycznie zgodnie z oprogramowaniem urządzenia według normy ISO 14556.

Otrzymane w wyniku przeprowadzonych pomiarów wartości przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 2. Wyniki badań udarności  
TABLE 2. The results of impact strength tests

Numer próbki	Materiał	Obróbka cieplna	Energia, J
1	Stop AK12	-	6
2	Kompozyt AK12- $Al_2O_3$	-	120
3	Stop AK12	+	5
4	Kompozyt AK12- $Al_2O_3$	+	134
5	Kompozyt AK12-grafit	+	133

Z danych zawartych w tabeli wynika, że w porównaniu ze stopem monolitycznym AK12, dla którego nie stwierdzono istotnych różnic w wartościach udarności niezależnie od tego, czy stop ten poddano czy nie poddano obróbce cieplnej (udarność od  $4,81$  do  $6,15$  J), kompozyty zawierające fazę zbrojącą zarówno w postaci krótkich włókien  $Al_2O_3$ , jak i niklowanego grafitu charakteryzują się wielokrotnie (około  $20$  razy) większą udarnością. Zwraca uwagę fakt, że dla kompozytu zbrojonego krótkimi włóknami  $Al_2O_3$ , w przypadku zastosowania obróbki cieplnej, osiąga się pewien wzrost udarności w stosunku do tego samego kompozytu pozostającego w stanie nieobrobionym cieplnie (próbka 2:  $120$  J - próbka 4:  $134$  J).

## PODSUMOWANIE

Jednym z głównych założeń niniejszej pracy były w miarę pełne badania właściwości jednego z preferowanych hybrydowych rozwiązań materiałowych, mianowicie stopu AK12 ( $AlSi12CuNiMg$ ), powszechnie stosowanego do wytwarzania tradycyjnych monolitycznych tłoków silników spalinowych, zbrojonego  $22$  obj. % włókna krótkiego na bazie tlenku glinu (skrótowo oznaczonego jako AK12- $Al_2O_3$ ) [6]. W wariantcie konstrukcyjnym przyjęto miejscowe (lokalne) zbrojenie tłoka w obszarze denka i pierwszych pierścieni - uszczelniającego i zgarniającego. Stwierdzona doświadczalnie znaczna poprawa właściwości mechanicznych (charakterystyk wytrzymałościowych w temperaturze otoczenia i temperaturze podwyższonej, wytrzymałości zmęczeniowej, granicy akomodacji, udarności, twardości) pozwala na prognozowanie daleko idących zmian konstrukcyjnych w tłoku kompozytowym.

Uwzględniając uzyskiwany wysoki poziom właściwości mechanicznych nowy tłok powinien charaktery-

zować się zmniejszeniem grubości ścianek, co w konsekwencji doprowadzi do istotnego zmniejszenia jego masy, a więc jednego z podstawowych parametrów użytkowych. Powinno być także możliwe usytuowanie pierwszego pierścienia uszczelniającego bliżej denka, czyli lepsze uszczelnienie pary tłok-cylinder, co w konsekwencji doprowadzi do pełniejszego spalania mieszanki paliwowo-gazowej i pozwoli na podniesienie wydajności pracy silnika jako całości. Nie bez znaczenia jest także spodziewana poprawa jakości spalania w aspekcie ekologicznej czystości spalin i zmniejszenia hałasu oraz wibracji silnika. Pozostaje otwarty problem zmian konstrukcji i materiału wkładki cylindrowej, zaworów, korbowodu, tj. pozostałych części silnika.

Wyrywkowe badania dodatkowe (twardość, udarność), prowadzone na przykładzie kompozytów aluminiowych zbrojonych węglikiem krzemu (F3S.20S), grafitem (AK12-grafit) i popiołem lotnym (ALFA<sup>®</sup>), również sygnalizują potencjalne możliwości stosowania danych materiałów kompozytowych na tłoki silników spalinowych. I jak w przypadku kompozytu AK12-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, również dla dodatkowo badanych materiałów, zachodzą wyraźne korelacje w układzie struktura-właściwości, pozwalające na sterowanie cechami użytkowymi nowych materiałów poprzez świadome zmiany strukturalne.

Uzyskane wyniki badań upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Zmiana struktury materiału monolitycznego wywołana wprowadzeniem do materiału osnowy (stopu aluminium) fazy zbrojącej (w postaci włókien lub cząsteczek) skutkuje poprawą właściwości otrzymanego materiału kompozytowego w stosunku do materiału monolitycznego, jak schematycznie przedstawiono w poniższej tabeli:

Właściwość	Pożądana zmiana właściwości w stosunku do AK12	Tłok kompozytowy	
		Zbrojony lokalnie (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Zbrojony dyspersyjnie (grafit, SiC, popioły lotne)
Twardość	↑, jednorodny rozkład	↑↓, +	↑↓, +
Właściwości wytrzymałościowe	↑	↑	-
Wytrzymałość temperaturowa	↑	↑	-

Udarność	↑	↑	↑ (AK12-grafit po OC)
----------	---	---	-----------------------

2. Zmiany te umożliwiają dokonanie takich modyfikacji konstrukcji tłoka, które w efekcie spowodują zmniejszenie jego masy, poprawę warunków współpracy złożenia tłok-pierścienie-cylinder oraz zwiększenie trwałości tłoka. Doprowadzi to do zmniejszenia masy całego silnika, poprawy jego osiągnięć trakcyjnych, ekonomiczności i ekologiczności.
3. Na podstawie przeprowadzonych badań najbardziej korzystnym materiałem do zastosowania na tłoki do silników spalinowych okazał się kompozyt AK12-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Możliwość zastosowania innych materiałów, które były zasygnalizowane w końcowej części artykułu jako potencjalnie możliwe do zastosowania na tłoki, wymaga dalszej weryfikacji eksperymentalnej.
4. Zastosowanie jako metody wytwarzania prasowania w stanie ciekłym wraz z obróbką cieplną gotowych wyrobów spowodowało poprawę właściwości badanych materiałów, zarówno kompozytowych, jak i monolitycznych.

## LITERATURA

- [1] Automotive News Europe 2001, 6, 26 (www.autonews europe.com).
- [2] Jolly M.R., Opportunities for Aluminium Based Fibre Reinforced Metal Matrix Composites (FRMMCs) in Automotive Castings, The Foundryman 1990, November, 509-513.
- [3] Karamara A., Maj M., Fatigue Testing of Casting by Modified Low Cycle Method, Polish Academy of Sciences, Krakow Department, Proceedings of Commission for Metallurgy and Foundry, Metalurgia 1986, 34, 43-52.
- [4] Naplocha K., Optymalizacja parametrów technologicznych procesu wytwarzania materiałów kompozytowych na osnowie stopu AK9 umacnianych włóknami ceramicznymi typu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1999.
- [5] PN-EN 10045-1 Metale. Próba udarności sposobem Charpy'ego. Metoda badania. 1994.
- [6] Rudnik D., Studium eksperymentalne materiału tłoka kompozytowego do silnika spalinowego, Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2001.

Recenzent  
Józef Śleżiona