

MODIFICATION OF PISTON PROPERTIES IN A DIESEL ENGINE BY INTRODUCTION OF LOCAL REINFORCEMENT WITH AK12/Al₂O₃ COMPOSITE

Cezary Sarnowski, Piotr Ignaciuk

Lublin University of Technology
Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin, Poland
tel.: +48 81 5384258-9, fax: +48 81 5384258
e-mail: c.sarnowski@pollub.pl, p.ignaciuk@pollub.pl

Abstract

Pistons belong to the most mechanically and thermally loaded components of the internal combustion engines and at the same time they have to fulfil very demanding requirements in terms of dimensional stability, strength and durability. For pistons made of classic materials it is increasingly difficult to meet these requirements. The area of piston crown is particularly under hazard of very high thermal loads and temperature gradients related to the cyclic variations of the engine working process. As a result, damages on the piston head can occur, like cracks situated mostly in the vicinity of the upper edge of the piston's combustion chamber. Area of the first sealing ring is also very vulnerable to high thermal and mechanical loads. One of possible solutions of ensuring proper operational properties of the piston and preventing unwanted phenomena is application of composite materials, which have much higher strength properties than classic materials.

The paper presents results of simulation calculations of the piston models made of AK12 alloy, with local composite reinforcement of the combustion chamber edge and first ring groove. Research was aimed at determination of the influence of the local modification of the piston material on the level of piston's thermal load. The piston was used in a diesel engine working in difficult conditions. Numerical analysis of the piston was made using finite elements method. Thermal load of the piston was defined by giving boundary conditions of the heat exchange and mean effective pressure corresponding to the maximum engine load.

Keywords: transport, internal combustion engines, FEM, MMC, composites

ZMIANA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH TŁOKA DO SILNIKA ZS POPRZEZ ZASTOSOWANIE LOKALNEGO ZBROJENIA KOMPOZYTEM AK12/Al₂O₃.

Streszczenie

Tłoki należą do najbardziej obciążonych mechanicznie i cieplnie elementów silników spalinowych. Stawiane są im wysokie wymagania dotyczące stabilności wymiarowej, wytrzymałości i trwałości. Konstrukcjom wykonanym z klasycznych materiałów coraz trudniej jest sprostać tym wymaganiom. Obszar korony tłoka jest szczególnie narażony na bardzo duże obciążenia cieplne w tym znaczne gradienty temperatury związane cyklicznością procesu roboczego. W wyniku tego dochodzi do uszkodzeń powierzchni denka, powstają między innymi pęknięcia usytuowane głównie w pobliżu górnej krawędzi komory spalania tłoka. Obszar pierwszego pierścienia uszczelniającego również narażony jest na znaczne obciążenia cieplne i mechaniczne. Jedną z możliwych dróg zapewnienia odpowiednich właściwości użytkowych tłoka i zapobiegania powstawaniu niepożądanych zjawisk jest zastosowanie materiałów kompozytowych, które posiadają własności wytrzymałościowe znacznie korzystniejsze niż materiały klasyczne.

W referacie przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych modeli tłoków ze stopu AK12 z zastosowanym lokalnym zbrojeniem krawędzi komory spalania oraz pierwszego rowka pierścieniowego materiałem kompozytowym. Badania miały na celu określenie wpływu zastosowania lokalnej modyfikacji materiału na poziom obciążenia cieplnego tłoka do silnika o zapłonie samoczynnym, pracującego w trudnych warunkach. Badania numeryczne tłoka przeprowadzone zostały metodą elementów skończonych. Obciążenie tłoka zdefiniowane zostało poprzez zadanie warunków brzegowych wymiany ciepła oraz średnie ciśnienie użyteczne odpowiadające maksymalnemu obciążeniu silnika

Słowa kluczowe: transport, silniki spalinowe, tłok kompozytowy, MES, kompozyty metalowe

1. Wstęp

Tłoki należą do najbardziej obciążonych mechanicznie i cieplnie elementów silników spalinowych. Stawiane są im wysokie wymagania dotyczące stabilności wymiarowej, wytrzymałości i trwałości. Konstrukcjom tłoków, wykonanych z klasycznych materiałów coraz trudniej jest sprostać tym wymaganiom. Niektóre obszary tłoka są szczególnie narażone na bardzo duże obciążenia cieplne w tym znaczne gradienty temperatury związane cyklicznością procesu roboczego. Występujące kolejno po sobie cykle dostarczania powietrza i paliwa a następnie spalania i powtarzalność tych procesów powoduje powstawanie znacznych naprężeń zwłaszcza w obszarze komory spalania. W wyniku czego dochodzi do uszkodzeń, pęknięć na powierzchni denka, powstają one głównie w pobliżu górnej krawędzi komory spalania tłoka, a szczególnie w miejscach gdzie dochodzi do kontaktu wtryskiwanej strugi paliwa z powierzchnią tłoka.[3] Również część pierścieniowa, a zwłaszcza rowek pierwszego pierścienia uszczelniającego, narażony jest na znaczne obciążenia zarówno cieplne jak i mechaniczne. Jedną z możliwych dróg zapewnienia odpowiednich właściwości użytkowych tłoka i zapobiegania powstawaniu niepożądanych zjawisk jest zastosowanie materiałów kompozytowych, które posiadają wyższe własności wytrzymałościowe niż materiały klasyczne, w tym zwłaszcza charakterystyki zmęczeniowe odporności na szoki cieplne [2, 9].

W referacie przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych modeli tłoków ze stopu AK12 z zastosowaniem lokalnego zbrojenia krawędzi komory spalania i pierwszego rowka pierścieniowego materiałem kompozytowym. Badania miały na celu określenie wpływu zastosowania lokalnej modyfikacji materiału na poziom obciążenia cieplnego zobrazowany przez rozkłady temperatur i wynikające z nich naprężenia i odkształcenia w tłoku do silnika o zapłonie samoczynnym, pracującym w trudnych warunkach.

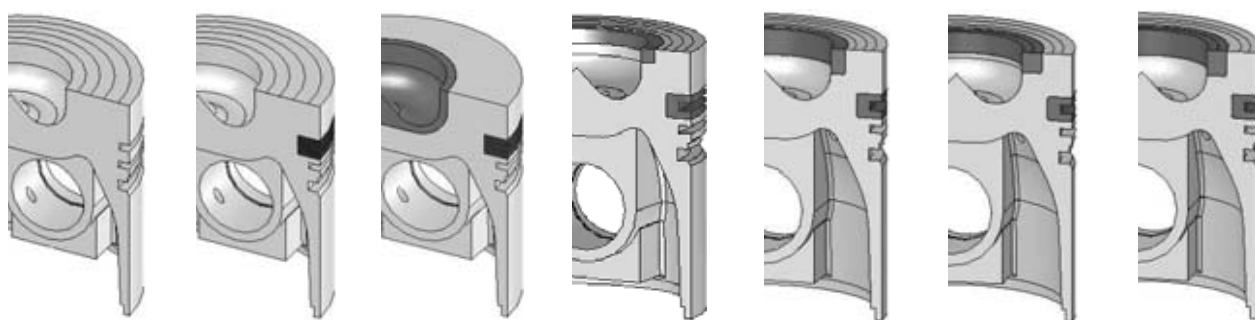
2. Obiekt i metoda badań

Badania numeryczne przeprowadzone zostały na modelach tłoka do silnika badawczego, z zapłonem samoczynnym i wtryskiem bezpośrednim do toroidalnej komory spalania. Obliczeniom poddawano model tłoka tradycyjnego zmodyfikowany lokalnym zbrojeniem materiałem kompozytowym.

Modyfikacje polegały na zastosowaniu materiału kompozytowego AK12+ 22%Al₂O₃ z porowatą preformą wykonaną na bazie włókien krótkich przesyconą stopem AK12. Materiał kompozytowy umieszczony został w obszarze korony tłoka gdzie spodziewano się wystąpienia uszkodzeń (komora spalania, strefa rowka pierwszego pierścienia, górna krawędź komory spalania) [11].

Sporządzono modele tłoka, odwzorowujące kształty geometryczne dla różnych wariantów wykonania. Modele analizowanych tłoków przedstawia rysunek 1. W celach porównawczych przeprowadzono obliczenia tłoka z wkładką wykonaną z żeliwa austenitycznego, obejmującą pierwszy pierścień uszczelniający, następnie zastosowano materiał kompozytowy AK12/22%Al₂O₃ w miejsce wkładki (rys. 1.b). Kolejnym etapem było umieszczenie materiału kompozytowego, w obszarze całej komory spalania (rys. 1.c) oraz krawędzi komory spalania, w tłoku z kompozytowym rowkiem pierwszego pierścienia (rys 1. d-g).

Obliczenia numeryczne tłoka przeprowadzone zostały metodą elementów skończonych. Modele poddano dyskretyzacji, podział został przeprowadzony zgodnie z procedurami proponowanymi przez system CosmosWorks przy uwzględnieniu zagęszczenia siatki elementów w obszarach przewidywanych podwyższonych obciążeń [12]. Do dyskretyzacji modeli tłoków zastosowano liniowe, przestrzenne elementy typu TETRA4 [10, 11]. Przeprowadzono obliczenia rozkładów temperatury oraz naprężeń i odkształceń w tłoku związanych z obciążeniem cieplnym i mechanicznym.



a) Model 1 b) Model 1Z, 1K c) Model 1KK d) Model 1K55 e) Model 1K57 f) Model 1K77 g) Model 1K79

Rys. 1. Analizowane modele tłoka z materiałem kompozytowym w obszarze pierwszego rowka podpierścieniowego i krawędzi komory spalania

Fig. 1. Analyzed models of composite pistons for the DI diesel engine

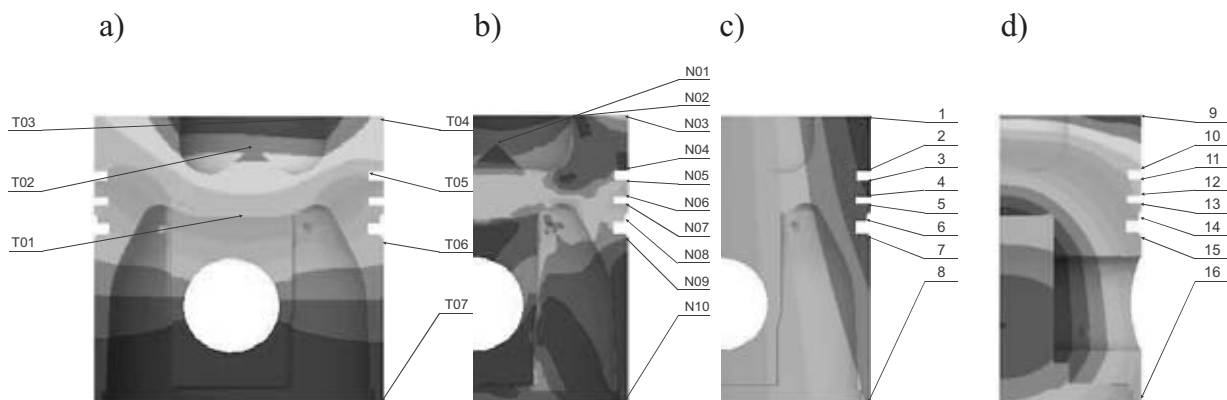
3. Warunki obciążenia modeli tłoków

Na podstawie wykresu indykatorowego uzyskanego dla maksymalnego obciążenia silnika badawczego określono uśrednioną wartość temperatury czynnika roboczego w cylindrze oraz uśrednioną wartość współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni denka tłoka.[11] Zdecydowano, że badania numeryczne wszystkich modeli tłoków będą wykonywane przy warunkach brzegowych odpowiadających podanemu obciążeniu silnika.

Obciążenie cieplne tłoka zdefiniowane zostało poprzez zadanie warunków brzegowych wymiany ciepła, które określono na podstawie zależności dostępnych w literaturze [4, 5, 7, 14] z uwzględnieniem badań eksperymentalnych. Poszczególnym powierzchniom tłoka przypisano temperatury otaczającego ośrodka oraz współczynniki przejmowania ciepła. Uwzględnione zostały również obciążenia mechaniczne pochodzące od sił gazowych występujących na denku tłoka. Właściwości materiałów stosowanych na tłok określono na podstawie prac [1, 2, 6, 13]. Analizę naprężeń i odkształceń tłoka związanych z obciążeniem cieplnym przeprowadzono opierając się na obliczonych rozkładach temperatur w przekroju tłoka.

4. Zestawienie wyników badań numerycznych

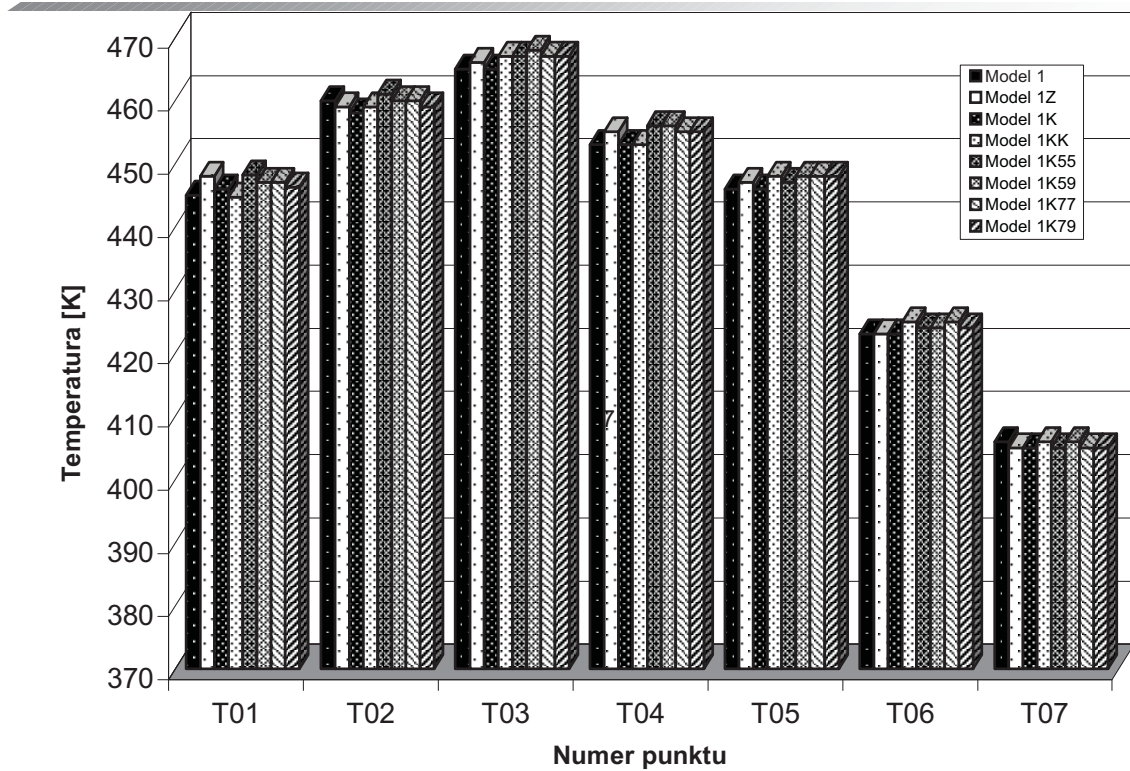
W celu przeprowadzenia analizy porównawczej rozkładów temperatur, naprężeń i odkształceń w modelach tłoka przyjęto punkty pomiarowe w dwóch płaszczyznach: prostopadłej i równoległej do osi sworznia (rys. 2).



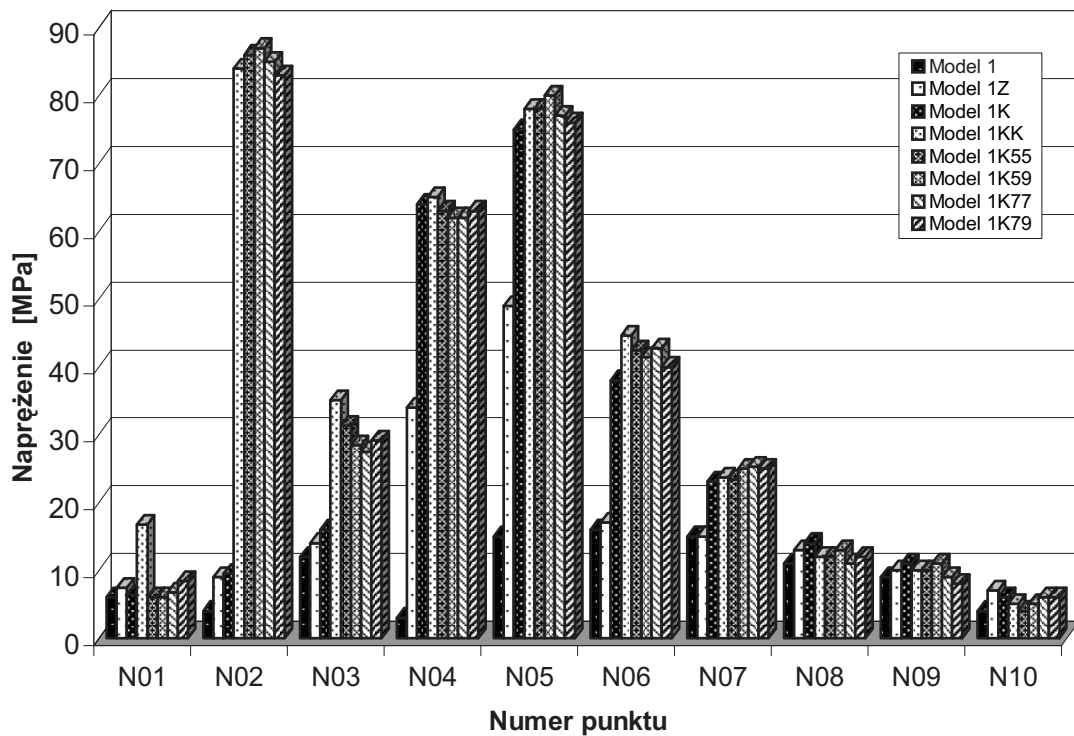
Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w modelach tłoka do analizy: a) rozkładów temperatury; b) naprężeń; odkształceń w płaszczyznach c) prostopadłej i d) równoległej do osi sworznia [11]

Fig. 2. Localization of measurement points in the investigated piston: a) temperatures; b) stress pattern; c), d) thermal deformations [11]

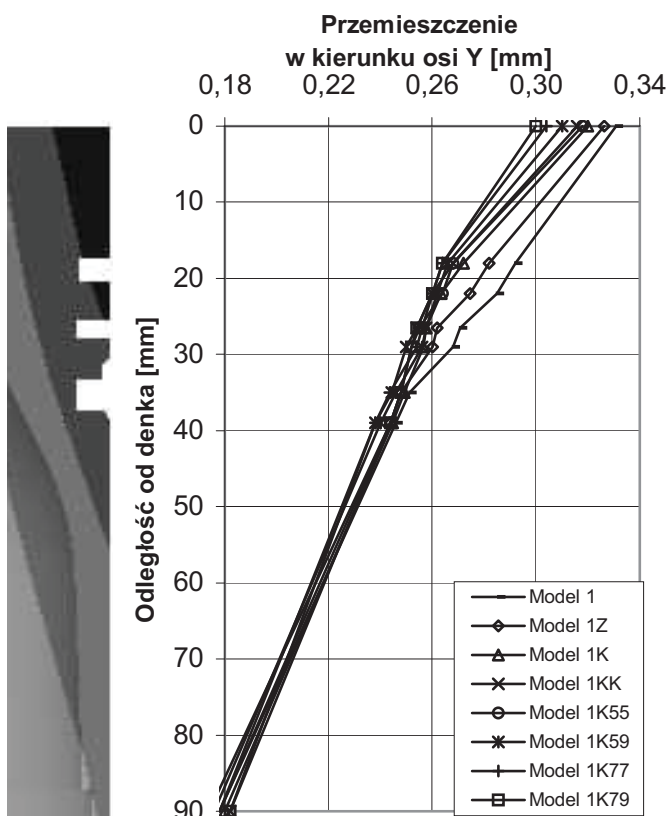
Wyniki porównań obciążenia tłoka w wybranych punktach przedstawiono na rysunkach 3-6.



Rys. 3. Wykres temperatur w punktach charakterystycznych analizowanych modeli tłoków
 Fig. 3. Temperatures in measurement points of piston models

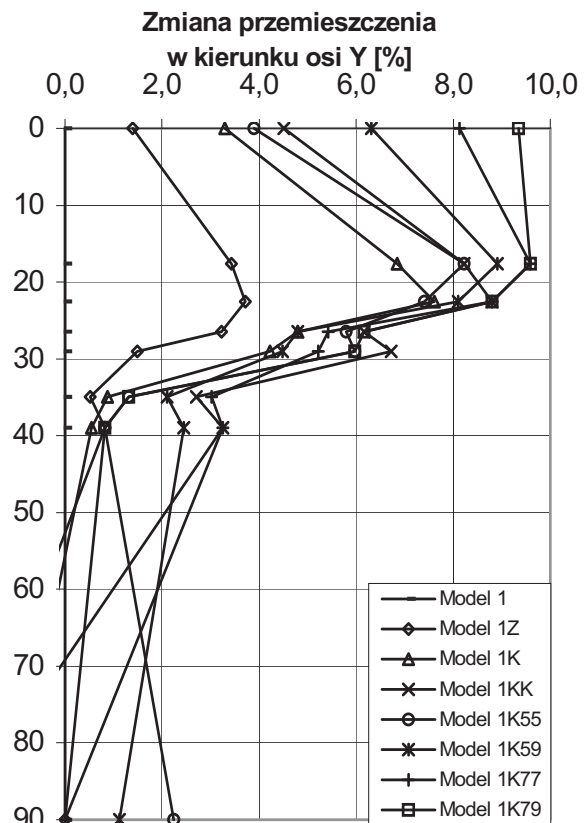


Rys. 4. Wykres naprężeń w punktach charakterystycznych analizowanych modeli tłoków
 Fig. 4. Stress values in measurement points of piston models



Rys. 5. Wykresy przemieszczeń w kierunku osi Y (prostopadłej osi sworznia) w punktach na tworzącej powierzchni bocznej modeli tłoków

Fig. 5. Displacements values in measurement points of piston models, in the direction of Y-axis



Rys. 6. Zmiana odkształcenia na tworzącej powierzchni bocznej tłoka, w odniesieniu do tłoka standardowego, w kierunku osi Y (prostopadłej osi sworznia)

Fig. 6. Change of displacements value on lateral surface, in the direction of Y-axis (perpendicular to the piston pin)

5. Analiza wyników obliczeń modeli tłoka

W wyniku badań modelowych uzyskano szereg wykresów przedstawiających rozkłady temperatur, naprężeń i odkształceń w tłoku, które poddano analizie numerycznej. Wyniki analizy obciążenia cieplnego tłoków zbrojonych materiałem kompozytowym AK12 22%Al₂O₃ w obszarze komory spalania i pierwszego rowka pierścieniowego pozwalają na sformułowanie szeregu wniosków.

Zastosowanie zbrojenia materiałem kompozytowym obszaru komory spalania i pierwszego rowka pierścieniowego powoduje znaczną zmianę rozkładu i wartości naprężeń. Wartości naprężeń termicznych wzrastają lokalnie w obszarze zastosowania zbrojenia. W niektórych obszarach nawet kilkunastokrotnie w stosunku do tłoka standardowego. Wartości wyliczonych naprężeń nie osiągają poziomu naprężeń dopuszczalnych, dla zastosowanych materiałów w temperaturach pracy.

Zaobserwowane zmiany rozkładu temperatury i wzrost wartości temperatur tłoka w wyniku zastosowania zbrojenia, wynosił max. 3-5K, można wnioskować, że wartości temperatur nie zależą, w sposób istotny od zastosowania lokalnego zbrojenia materiałem kompozytowym w analizowanym obszarze. Temperatury w punktach charakterystycznych nie przekroczyły wartości dopuszczalnych.

Tłok podstawowy nie posiadał wkładki podpierścieniowej w obszarze rowka pierwszego pierścienia uszczelniającego, zastosowanie wkładki z żeliwa austenitycznego spowodowało lokalne zmniejszenie, o około 3%, przemieszczenia punktów na tworzącej powierzchni bocznej tłoka w tej strefie, natomiast zmiana materiału wkładki podpierścieniowej na materiał kompozytowy AK12-Al₂O₃, o takim samym kształcie, spowodowała dalsze zmniejszenie przemieszczeń o około 4%, jednocześnie wystąpił ponad dwukrotny wzrost naprężeń w tym obszarze.

Ze względu na lepsze własności wytrzymałościowe kompozytu zastosowanie zbrojenia krawędzi komory spalania i pierwszego rowka pierścieniowego powinno pozwolić na zwiększenie trwałości i wytrzymałości tłoka. W przypadku zastosowania lokalnego zbrojenia materiałem kompozytowym konieczna jest modyfikacja wymiarów korony tłoka, powinna ona obejmować obszar, w którym zauważalna jest zmiana odkształcenia tłoka wynikającego z obciążenia cieplnego. Pozwoli to na zmniejszenie luzu pomiędzy tuleją cylindrową a tłokiem zwłaszcza podczas zimnych rozruchów oraz obniżenie toksyczności spalin.

Nie zaobserwowano istotnego wpływu zastosowania lokalnego zbrojenia tłoka w obrębie korony na rozkłady temperatur, naprężeń i odkształceń w jego części prowadzącej.

Literatura

- [1] Buschow, J. K. H., Cahn, R. W., Flemings, M. C., Ilshner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S., *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, Vol. 1, Oxford 2001.
- [2] Evans, A., Ch., San Marchi, Mortensen, A., *Metal Matrix Composites in Industry, An Introduction and a Survey*, Springer Verlag 2003.
- [3] Gardyński, L., *Badania nad podwyższeniem odporności na zmęczenie cieplne tłoków do wysokodoladowanych silników ZS*, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1999.
- [4] Jaskólski, J., Budzik, G., *Stacjonarny przepływ ciepła w tłoku silnika spalinowego*, monografia, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
- [5] Jaskólski, J.: *Zagadnienia optymalizacji obciążeń cieplnych tłoków silników spalinowych*, monografia, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
- [6] Korb, G., Neubauer, E., *Thermophysical Properties of Metal Matrix Composites*, Volume 7: Insitute of Materials Science and Testing – Vienna University of Technology, MMC-Assess Consortium, July 2001, Austrian Research Centres Seibersdorf, 2001.
- [7] Meijer, G., Ellyin, F., Xia Z., *Aspects of residual thermal stress/strain in particle reinforced metal matrix composites*, 1359-8368/00/ Elsevier Science Ltd, Composites: Part B31, 29–37, 2000.
- [8] Persson, H., *Guidelines for joining of metal matrix composites*, Volume 8, mmc-assess.tuwien.ac.at MMC-Assess Consortium, Insitute of Materials Science and Testing – Vienna University of Technology, September 2001.
- [9] Rudnik, D., *Studium eksperymentalne materiału tłoka kompozytowego do silnika spalinowego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin, 2001.
- [10] Rusiński, E., Czmochocki, J., Smolnicki, T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
- [11] Sarnowski, C., *Analiza odkształceń tłoka kompozytowego do silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym w warunkach zróżnicowanych obciążeń cieplnych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2006.
- [12] Sarnowski, C., Niewczas, A., *Analiza zmian obciążeń zbrojonego lokalnie kompozytowego tłoka silnika wysokoprężnego*, Transport Samochodowy, nr 2/2004, Wydawnictwo ITS, Warszawa 2004.
- [13] Sobczak, J., *Metalowe materiały kompozytowe*, Wydawnictwo Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków-Warszawa 2002.
- [14] Sławiński, Z., *Prognozowanie warunków brzegowych w elementach komory spalania silnika tłokowego*, TeKa Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN, Zeszyt nr 17, s. 91-102, Kraków 1999.