

## THE EFFECTS OF TEMPERATURE ON STRENGTH OF THE NEW PISTON ALUMINUM MATERIALS

**Barbara Siemińska - Jankowska**

Instytut Lotnictwa BK, 02 - 265 Warszawa,  
Al. Krakowska 110/114, tel. 48 22 846 00 11, fax. 48 22 846 44 32

Email: [ajank@ilot.edu.pl](mailto:ajank@ilot.edu.pl)

**Stanisław Pietrowski**

Pol. Łódzka, Katedra Systemów Produkcji,  
90 - 924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1 / 15, tel. 48 42 631 22 75

**Abstract:** Among all components of the engine, the pistons are probably the one subjected to the widest range of stress and temperature. Therefore selection of the proper material on the piston in varied temperature is very important. A satisfactory piston material must fulfill many, often conflicting, requirements. It is exposed to a range of static and dynamic stress with a wide range of temperatures from sub-zero to about 350°. This paper describes the research results of strength properties of eutectic and hypereutectic aluminium - silicon alloys comprise some nontraditional alloyed elements, as Co, Cr, Mo and higher contents of Ni, Cu. The strength properties of these silumins are shown in representative strength - temperature, hardness - temperature, strength - alloying element contents, hardness - alloying element contents curves. The researches were conducted with eutectic and hypereutectic alloys in which Si and Mg contents were set at constant level but Cu, Ni contents were changed from 1% to 4.5%, but Co, Cr, Mo contents were varied from 0% to 1%. The tensile strength of siluminium increases if the Co, Cr, Mo contents growths to about 0.4% - 0.6%. The best results of strength properties were obtained when the silumins contain about 4% Cu, 4% Ni and 0.5% Mo. The tested elements forms multimetalic compounds which set on boundary of grains, which are rounded in shape and increase the strength properties of silumins.

## ZALEŻNOŚĆ WYTRZYMAŁOŚCI NOWYCH STOPÓW ALUMINIUM NA TŁOKI OD TEMPERATURY

**Streszczenie:** Istotne wymaganie materiału na tłoki dotyczy jego parametrów wytrzymałościowych w temperaturze otoczenia oraz przy różnych wartościach temperatury pracy tłoka. Wraz ze wzrostem temperatury następuje obniżenie parametrów wytrzymałościowych materiałów na tłoki. Zmniejszenie parametrów wytrzymałościowych silnie zależy od zawartości pierwiastków stopowych w materiale tłoków. W publikacji podano wyniki badań parametrów wytrzymałościowych nowych materiałów na tłoki w funkcji składu chemicznego i temperatury. Materiały wykonano na bazie siluminów okołoeutektycznych i nadeutektycznych, do których wprowadzono niekonwencjonalne dodatki stopowe takie, jak kobalt, molibden, chrom oraz zwiększoną zawartość miedzi i niklu. Wyniki badań pozwalają ocenić wpływ poszczególnych pierwiastków stopowych dodawanych pojedynczo, jak i łącznie. Stwierdzono, że wprowadzenie takich pierwiastków stopowych, jak: kobalt, molibden, chrom powoduje polepszenie parametrów wytrzymałościowych zarówno w temperaturze otoczenia jak i, co szczególnie istotne, parametrów w maksymalnych temperaturach pracy tłoków. Stwierdzono także mniejszy spadek wytrzymałości przy zwiększaniu temperatury aż do temperatury pracy tłoków.

### 1. Wstęp

Wytrzymałość materiałów które są stosowane na tłoki oraz wytrzymałość strukturalna konstrukcji tłoków, należą do najważniejszych wymagań związanych z konstrukcją tłoków.

W związku z tym, że pracują one w szerokim zakresie wartości temperatury, jeżeli chodzi o tłoki wykonane ze stopów Al, to do 350°C, a więc wymaga się aby właściwości wytrzymałościowe materiału tłoków były odpowiednie w szerokim zakresie zmienności temperatury, zarówno przy obciążeniach statycznych jak i obciążeniach szybkozmiennych, w tym generujących duże gradienty naprężeń. Z powodu wysokich obciążeń mechanicznych i termicznych konstrukcja tłoków o zapłonie samoczynnym charakteryzuje się większymi wymiarami geometrycznymi i większą masą. Jednakże wartości temperatury w poszczególnych miejscach tłoka, w całym zakresie pracy silnika, nie mogą być zbyt duże, zarówno w odniesieniu do silników o zapłonie iskrowym jak i wysokoprężnych. Decydują bowiem o tym właściwości materiałów na tłoki oraz właściwości paliw i olejów smarujących. Temperatura tłoka nie może w żadnym miejscu osiągnąć temperatury topnienia, a nawet temperatury, w której wytrzymałość materiału staje się zbyt mała, a z drugiej strony, w miejscach gdzie olej styka się z konstrukcją tłoka, jego temperatura musi być niższa od temperatury rozkładu oleju czy paliwa. Przekroczenie tych wartości temperatury może być szkodliwe nie tylko dla konstrukcji tłoka ale także może prowadzić do powstawania sadzy i substancji toksycznych w spalinach. Tak więc w tłokach wysokoobciążonych silników spalinowych często konieczne staje się wprowadzenie chłodzenia aby utrzymać temperaturę w różnych miejscach tłoka na założonym poziomie.

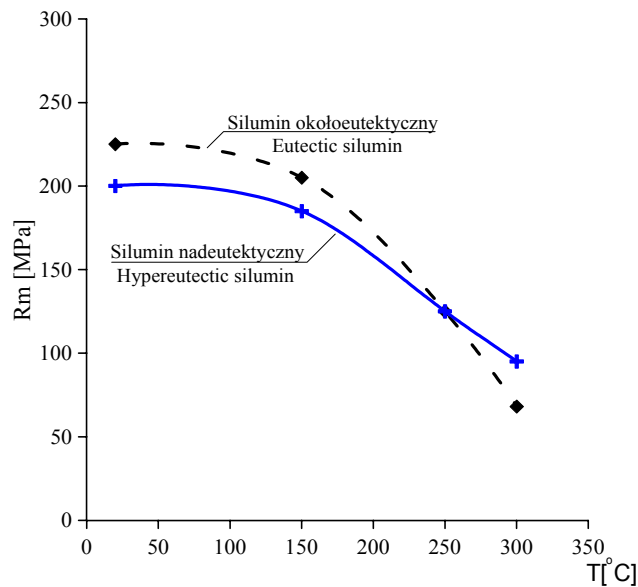
Najistotniejszymi parametrami wytrzymałościowymi dla oceny konstrukcji tłoków jest wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , wydłużenie względne po rozerwaniu  $A_m$  oraz twardość. W związku z tym, że tłoki pracują w szerokim zakresie temperatury ważne są właściwości fizyczne materiałów na tłoki przede wszystkim w temperaturze pracy a nie tylko w temperaturze otoczenia.

Wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne są istotne z punktu widzenia maksymalnych obciążeń tłoka, które występują na ogół krótkotrwałe lub w sytuacjach awaryjnych. Dotyczy to więc na ogół wytrzymałości w warunkach występowania maksymalnej temperatury w tłoku około 320 - 350°C. Twardość materiału decyduje przede wszystkim o zużyciu rowków podpierścieniowych i piast tłoków a wartość tej twardości dotyczy temperatury podczas pracy silnika, która w odniesieniu do rowków podpierścieniowych nie powinna być wyższa, niż 230°C.

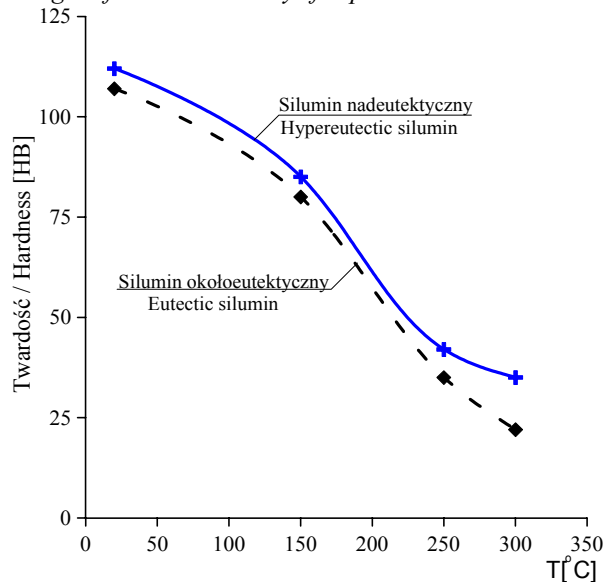
Ponadto z punktu widzenia jakości tłoków istotna jest wytrzymałość zmęczeniowa, i to zarówno cieplna, jak i mechaniczna, oraz wytrzymałość na pełzanie. Tłok podlega bowiem zmiennym w szerokim zakresie obciążeniom, jak i długotrwałym dużym obciążeniom o charakterze statycznym. Materiał na tłoki powinien więc charakteryzować się odpowiednio wysokimi właściwościami w warunkach normalnych, jak i w warunkach pracy przy wysokich temperaturach panujących w komorze spalania.

Najszerzej stosowanymi materiałami na tłoki są siluminy tłokowe okołoeutektyczne zawierające około 11 - 13% krzemu i siluminy nadeutektyczne zawierające około 17 - 24% krzemu. Wadą standardowych stopów aluminium na tłoki jest stosunkowo szybki spadek wytrzymałości na rozciąganie i twardości w funkcji temperatury. Siluminy okołoeutektyczne w temperaturze 150°C mają wytrzymałość o około 10% mniejszą, w temperaturze 250°C spadek wytrzymałości wynosi już 40 - 50%, a w temperaturze 300°C stop dysponuje tylko około 35% tej wytrzymałości, którą miał w temperaturze +20°C. W odniesieniu do siluminów nadeutektycznych spadek wytrzymałości w funkcji temperatury jest nieco mniejszy (o około 5%) a szczególnie jest to zauważalne w najwyższych temperaturach, powyżej 250°C. W odniesieniu do twardości siluminy tłokowe wykazują znacznie szybszy spadek w funkcji temperatury. Już w temperaturze 150°C twardość siluminów okołoeutektycznych jest mniejsza o około 25%, niż w temperaturze 20°C, natomiast w temperaturze 250°C twardość jest mniejsza o około 70%, natomiast w temperaturze 350°C około 80% mniejsza, niż w temperaturze 20°C. W siluminach nadeutektycznych ten spadek jest powolniejszy ale głównie

przy wartościach temperatury powyżej 200°C a więc w zakresie temperatur zbliżonych do maksymalnej temperatury rowków podpierścieniowych oraz zbliżonej do maksymalnej temperatury denka tłoka. Na rys.1 przedstawiono zależność między wytrzymałością na rozciąganie materiału tłoków a temperaturą natomiast na rys.2 zależności twardości w funkcji temperatury, w odniesieniu do standardowych materiałów na tłoki. Obserwowane na wykresach wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz twardości w różnych temperaturach pozwalają na dokonanie oceny jak ważne są parametry wytrzymałościowe materiału na tłoki szczególnie przy wartościach temperatury zbliżonych do maksymalnej temperatury pracy.



Rys.1. Wytrzymałość niektórych stopów aluminium krzemu w funkcji temperatury  
Fig. 1. Hot strength of some Al-Si alloys for pistons internal combustion engines



Rys.2. Twardość niektórych stopów aluminium krzemu w funkcji temperatury  
Fig. 2. Hardness of some aluminum alloys for pistons internal combustion engines

Opracowując konstrukcję tłoka należy uwzględnić fakt, że tłok pracuje przy maksymalnych dopuszczalnych temperaturach i powinny być wprowadzone określone środki zapobiegające powstawaniu uszkodzeń i możliwości nadmiernego zużycia tłoka. Takimi środkami jest

zastosowanie chłodzenia tłoka, wkładek metalowych podpierścieniowych i denka tłoka z materiałów o wysokiej temperaturze topnienia, posiadającego korzystniejsze właściwości wytrzymałościowe w wysokich wartościach temperatury pracy tłoka.

Celem publikacji jest przedstawienie wyników badań parametrów wytrzymałościowych w funkcji składu chemicznego i temperatury nowych materiałów tłokowych, które opracowano w oparciu o standardowe siluminy tłokowe. Zastosowane dodatki stopowe, były dotychczas stosowane głównie dla zwiększenia wytrzymałości i żarowytrzymałości stali. Tymi dodatkami stopowymi były: chrom, kobalt, molibden, wolfram oraz nikiel. Wprawdzie nikiel jest powszechnie stosowany jako dodatek do stopów aluminium pracujących w podwyższonych temperaturach, jednakże opinie dotyczące wpływu niklu na wytrzymałość stopów aluminium w podwyższonych wartościach temperatury nie były jednoznaczne. Przebadano wpływ poszczególnych dodatków stopowych, jak również synergiczny wpływ kilku dodatków stopowych. Wyniki badań wskazują na możliwość istotnego zwiększenia wytrzymałości stopów zawierających te dodatki zarówno w temperaturze normalnej, jak i temperaturze pracy aż do 350°C, przy czym korzystniejsze efekty uzyskiwano po równoczesnym wprowadzeniu kilku dodatków stopowych. Wprowadzenie kilku dodatków stopowych zapewniało lepszą kombinację różnych parametrów wytrzymałościowych tzn. na przykład równoczesne zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia względnego. Zwiększenie zawartości miedzi lub niklu powodowało ciągły wzrost wytrzymałości zarówno siluminu okołoeutektycznego jak i nadeutektycznego. W wypadku wprowadzenia chromu, kobaltu i molibdenu zostało stwierdzone istnienie maksimum wytrzymałości przy określonej zawartości pierwiastka. Po przekroczeniu tej zawartości pierwiastka stopowego następowało zmniejszenie jego parametrów wytrzymałościowych. Prawdopodobnym powodem tego jest powstanie zbyt dużych kryształów związków międzymetalicznych, o ostrych krawędziach, które umieszczają się na granicy ziarn i powodują powstanie naprężeń wewnętrznych prowadzących do mikropęknięć w strukturze materiału. Stwierdzono, że przy dużych zawartościach poszczególnych, badanych, pierwiastków stopowych (zawartościach większych, niż odpowiadające maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie) występowało kruche pęknięcie a więc wydłużenie względne było równe lub zbliżone do zera. Fotografie mikrostruktury w okolicach przełomów wskazują na obecność dużych kryształów i dużych ilości związków międzymetalicznych na granicach ziarn. Wyniki badań wskazują, że konieczne jest dokładne kontrolowanie ilości dodatków stopowych wprowadzanych do siluminów, które zostały następnie wykorzystane do wykonania tłoków.

## 2. Wyniki badań

Przeprowadzono badania próbek nowych materiałów na tłoki siluminów okołoeutektycznych i nadeutektycznych zawierających różne ilości dodatków stopowych. Wprowadzono poszczególne pierwiastki albo pojedynczo albo równocześnie kilka pierwiastków, co pozwalało na określenie synergicznego oddziaływania badanych pierwiastków. Badania prowadzono na próbkach wykonanych specjalnie do badań wytrzymałościowych. Topienie materiału próbek odbywało się w indukcyjnym piecu laboratoryjnym a odlewy wykonywano metodą kokilową. Proces topienia był kontrolowany przy zastosowaniu metody ATD (analizy termicznej - derywacyjnej). W trakcie topienia siluminy były badane przy zastosowaniu spektrografu dzięki czemu można było uzyskać wymagany skład stopu w kokili. Odlane próbki były obrabiane termicznie (przesycanie + starzenie), przy czym parametry obróbki cieplnej zostały dobrane na drodze doświadczałnej. W zależności od składu stopu stosowano różne parametry obróbki cieplnej (temperatura i czas grzania), które były dokładnie kontrolowane. Parametry te miały bardzo istotny wpływ

na właściwości materiału. Chodziło tu przede wszystkim o uzyskanie powtarzalnych wyników badań, które można byłoby porównać z wynikami dotyczącymi standardowych stopów tłokowych.

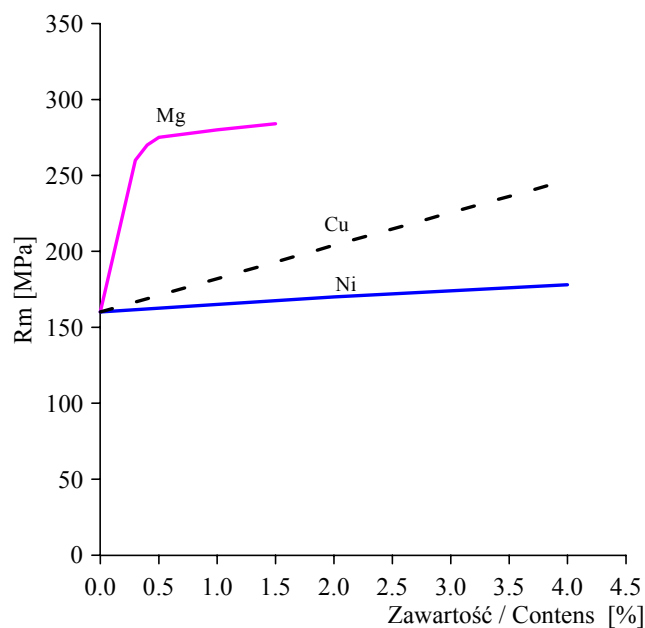
Zawartość poszczególnych pierwiastków w badanych próbkach była zmieniana w szerokim zakresie: miedzi i niklu w zakresie 1 - 4.5%, a kobaltu, molibdenu, chromu i wolfranu w zakresie 0 - 1.0%. Podstawowymi materiałami były siluminy okołoeutektyczny AK12 i nadeutektyczny zawierający 17.5 - 18.5% Si. Skład nowych materiałów, których dotyczą wyniki badań był zmienny w taki sposób, że na stałym poziomie utrzymywano w siluminie zawartość krzemu i magnezu (1.0 - 1.2%). Zawartość miedzi i niklu zmieniała się w szerszych granicach (1% - 4.5%), niż w standardowych materiałach stosowanych na tłoki.

Zrealizowane prace są zgodne z tendencjami światowymi w których prace nad poprawą właściwości mechanicznych siluminów są ukierunkowane na następujące zagadnienia: wpływ różnych dodatków stopowych, określenie czynników powodujących sferoidyzację lub zbliżoną do niej postać krystalizacji faz, zmniejszenie ilości zanieczyszczeń niemetalowych głównie tlenkowych, usuwanie zawartości szkodliwych metali w stopie, zmniejszenie zawartości wodoru w stopie oraz innych gazów będących powodem tworzenia porowatości, zwiększenie szybkości krystalizacji wpływającej na rozdrobnienie składników strukturalnych, określenie mechanizmu krystalizacji pod ciśnieniem. Bardzo ważnym problemem jest usuwanie zanieczyszczeń niemetalowych, głównie tlenkowych które powodują uszkodzenia mikrostruktury, które stają się ogniskami pęknięć materiału. Ma to wpływ przede wszystkim na wytrzymałość zmęczeniową stopów ale także na wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne materiału.

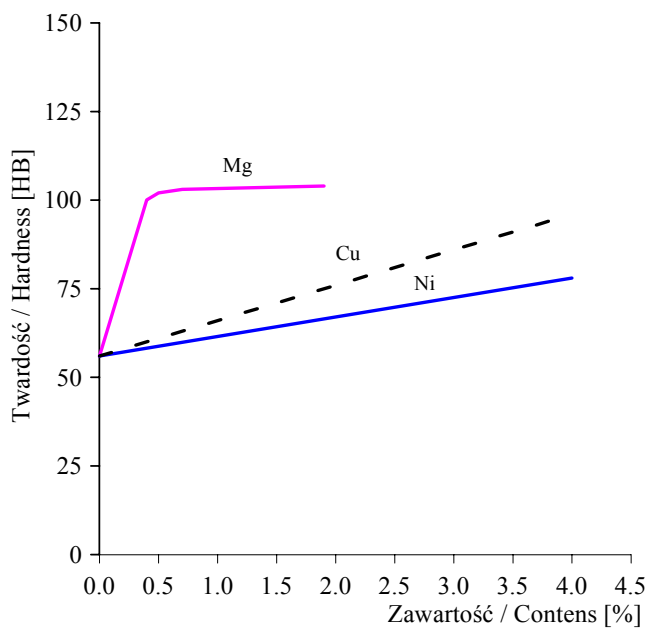
Wytrzymałość zmęczeniową materiałów determinują przede wszystkim: pasma poślizgu, zbliżniakowania, granice ziarn, granice międzyfazowe, wtrącenia i wydzielienia faz wtórnych. Inicjacja pęknięć zależy od wielkości wtrąceń, lub wydzieleni, ich wzajemnej odległości i rozkładu w osnowie metalowej. Pasma poślizgów jako niejednorodne i zagęszczone odkształcenia plastyczne zmieniają lokalnie i niejednorodnie mikrogeometrię powierzchni elementu tworząc mikrokarby i w konsekwencji powodują również lokalne spiętrzenia naprężeń. Na ogół źródłem pęknięć staje się powierzchnia lub warstwa wierzchnia materiału, gdzie nagromadzenie czynników sprzyjających jest największe. Czynniki prowadzące do pęknięć zmęczeniowych są także najczęściej przyczyną uszkodzeń statycznych materiału a więc w nich należy także doszukiwać się przyczyn mniejszej wytrzymałości materiału.

Badania siluminów zawierających takie pierwiastki stopowe, jak chrom, kobalt, molibden, nikiel, wolfran wskazują, że w stopach tych tworzą się związki międzymetaliczne, które umieszczają się na granicach ziarn i w zależności od ich kształtu oraz wielkości stają się przyczyną wzrostu lub zmniejszenia wytrzymałości. Ponadto pierwiastki te neutralizują szkodliwy wpływ żelaza w stopach aluminium tworząc także związki międzymetaliczne, jak  $(Cr, Fe)_4Si_4Al_{13}$ ,  $Al_2(CrSiFe)$ ,  $Al(SiMoFe)$ ,  $Al_{12}(SiWFe)$ ,  $AlSiFeCo$ ,  $Al_9Co_2$ ,  $Al(SiMgCuNiFeCo)$ . W siluminach zawierających małe ilości pierwiastków stopowych a duże ilości żelaza tworzy się związek międzymetaliczny  $Al_9Fe_2Si$ , który występuje w postaci długich ostro zakończonych kryształów. W wyniku tego znacznie zmniejsza się wytrzymałość zmęczeniowa, wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie względne materiału.

Zawartość pierwiastków stopowych takich, jak Co, Cr, Mo, Ni, W siluminach ma decydujący wpływ na poprawę właściwości wytrzymałościowych. Jak wynika z przeprowadzonych badań graniczna zawartość pierwiastków w odniesieniu do Co, Mo, W wynosi około 0.5%. Dalsze zwiększenie zawartości powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia względnego materiału. Powodem tego jest najprawdopodobniej obecność dużych kryształów związków międzymetalicznych na granicach ziarn co potwierdzają wyniki badań mikrostruktury.

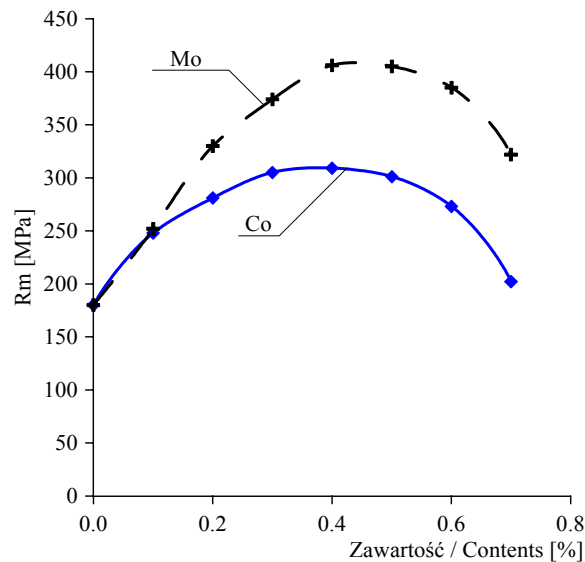


Rys.3. Wpływ zawartości miedzi, magnezu i niklu w siluminach tłokowych na wytrzymałość na rozciąganie  
 Fig. 3. Influence of Cu, Mg, Ni contents in silumin for pistons on tensile strength



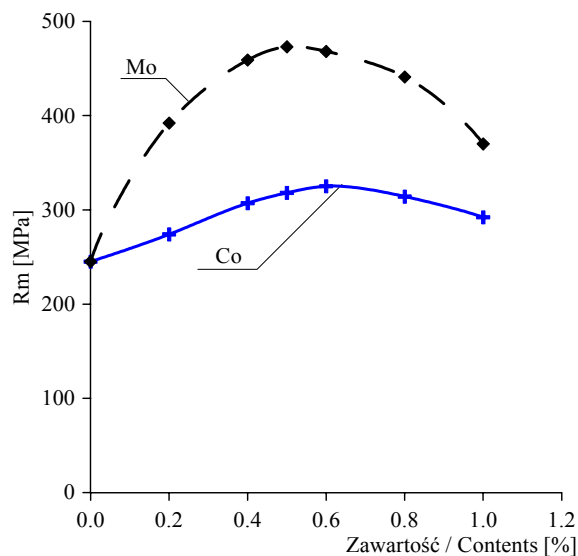
Rys. 4. Wpływ zawartości miedzi, magnezu i niklu w siluminach tłokowych na twardość stopów  
 Fig. 4. Influence of Cu, Mg, Ni contents in piston silumins on hardness

Na rys.3 przedstawiono wpływ zawartości miedzi, magnezu i niklu w siluminie na wytrzymałość na rozciąganie a na rys.4 wpływ miedzi, magnezu i niklu na twardość. Wyniki te pokazują, że wraz ze wzrostem zawartości miedzi i niklu rosła wytrzymałość na rozciąganie i twardość siluminu, natomiast jeżeli chodzi o magnez to wzrost tych parametrów następował tylko do zawartości 0.5% Mg natomiast przy dalszym zwiększeniu wzrost ten był bardzo nieznaczny.



Rys.5. Wpływ zawartości kobaltu, molibdenu na wytrzymałość na rozciąganie siluminów nadeutektycznych  
 Fig. 5. Influence of Co and Mo on tensile strength of hypereutectic silumins

Na rys.5 przedstawiono wpływ zawartości kobaltu i molibdenu w zakresie od 0% do 1% w siluminach okołoeutektycznych na wytrzymałość na rozciąganie. W zakresie tych zawartości początkowo następował wzrost wytrzymałości, do zawartości około 0.6% w odniesieniu do kobaltu i do 0.5% w odniesieniu do molibdenu a po przekroczeniu tej granicy następowało zmniejszenie wytrzymałości. Dodatek molibdenu miał większy wpływ na wytrzymałość materiału, niż dodatek kobaltu.

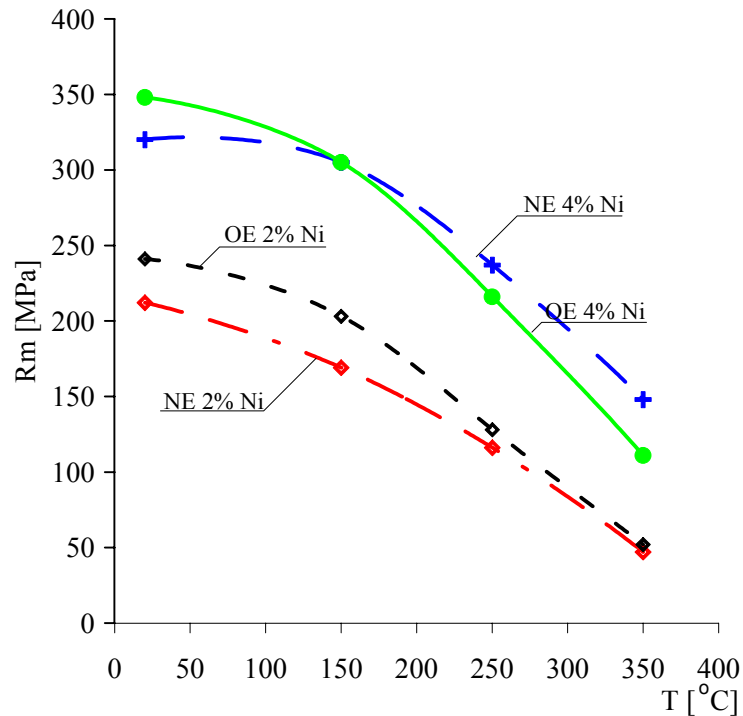


Rys.6. Wpływ zawartości kobaltu i molibdenu na wytrzymałość na rozciąganie siluminów okołoeutektycznych  
 Fig. 6. Influence of Co and Mo on tensile strength of eutectic silumins

Na rys.6 przedstawiono wpływ zawartości kobaltu i molibdenu w siluminach nadeutektycznych na wytrzymałość na rozciąganie. Stwierdzono podobnie jak w odniesieniu do siluminów okołoeutektycznych występowanie maksimum wytrzymałości na rozciąganie w zakresie zawartości kobaltu od 0.3% do 0.4% i molibdenu w zakresie od 0.4% do 0.5%. Również tutaj molibden miał większy wpływ na wytrzymałość, niż kobalt.

A więc zarówno w siluminach okołoeutektycznych, jak i nadeutektycznych charakter przebiegu zmian wytrzymałości na rozciąganie, w odniesieniu do siluminów zawierających dodatek molibdenu, jak i kobaltu był podobny. Wraz ze wzrostem zawartości kobaltu i

molibdenu w granicach 0.3% - 0.6% w siluminie ich wytrzymałość rosła. Po przekroczeniu tej wartości następowało zmniejszenie wytrzymałości. Na podstawie tych rezultatów badań wytypowano próbki do badań zależności wytrzymałości od temperatury, które przeprowadzono w zakresie wartości temperatury od 20°C do 350°C, a więc praktycznie w całym zakresie wartości temperatury pracy tłoków w silnikach spalinowych.

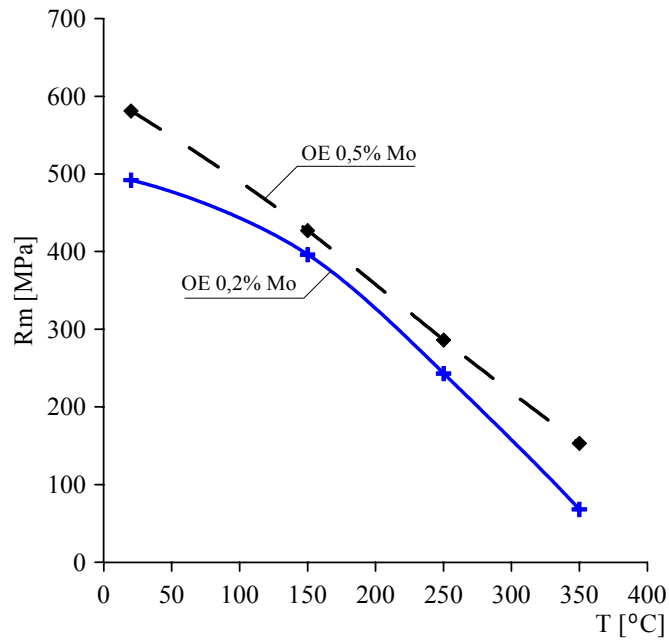


Rys. 7. Wpływ temperatury na wytrzymałość siluminu okołoeutektycznego i nadeutektycznego przy zawartości 4% Ni oraz 2% Ni

Fig. 7. Influence of temperature on tensile strength of eutectic (OE) and hypereutectic (NE) silumin contained 4% Ni and 2% Ni

Na rys.7 przedstawiono wpływ temperatury na wytrzymałość siluminów okołoeutektycznego i nadeutektycznego, przy różnych zawartościach niklu: 4% oraz 2%. Charakterystyczne jest, że w miarę zwiększania się temperatury malała różnica między wytrzymałością siluminów okołoeutektycznego i nadeutektycznego. Spadek wytrzymałości w funkcji temperatury dla siluminu okołoeutektycznego był więc większy, niż dla siluminu nadeutektycznego.

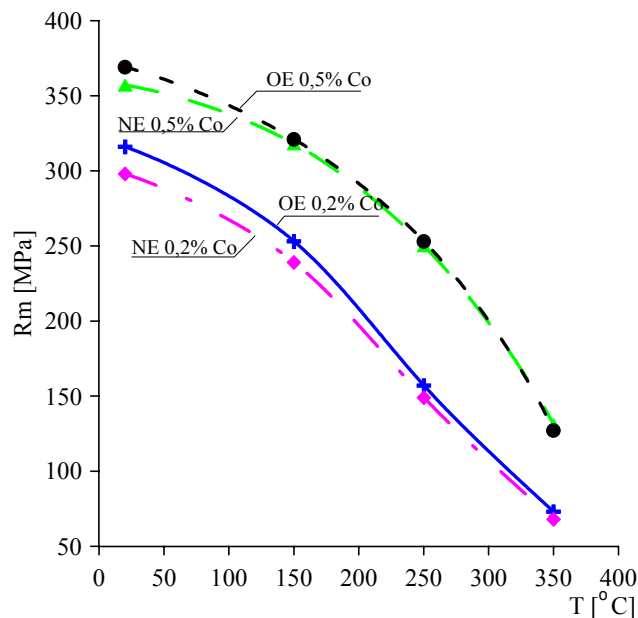




Rys. 8. Wpływ temperatury na wytrzymałość siluminu okołoeutektycznego przy zawartości molibdenu 0,5% oraz 0,2%

Fig. 8. Influence of temperature on tensile strength of eutectic (OE) silumins contained 0.5% Mo and 0.2% Mo

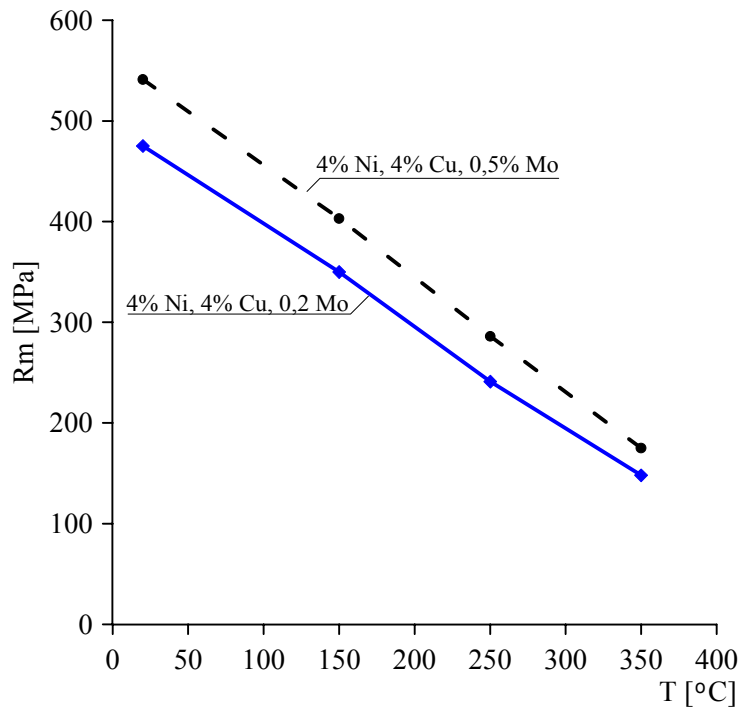
Na rys.8 przedstawiono wpływ temperatury na wytrzymałość siluminu okołoeutektycznego, przy różnej zawartości molibdenu 0.20% i 0.50%. Wpływ ten był podobny także w odniesieniu do siluminu nadeutektycznego zarówno jeżeli chodzi o charakter przebiegu, jak i wartości bezwzględne wytrzymałości, które różniły się między sobą w granicach 1%.



Rys. 9. Wpływ temperatury na wytrzymałość siluminu okołoeutektycznego i nadeutektycznego, przy zawartości 0,5% oraz 0,2% kobaltu

Fig. 9. Influence of temperature on tensile strength of eutectic (OE) and hypereutectic (NE) silumins contained 0.5% Co and 0.2% Co

Na rys.9 przedstawiono wpływ temperatury na wytrzymałość siluminów okołoeutektycznego i nadeutektycznego o różnej zawartości 0.20% Co i 0.5% Co. Charakter zmian w funkcji temperatury jest podobny zarówno dla siluminu okołoeutektycznego jak i nadeutektycznego. Charakterystyczne jest, że nie ma bardzo ostrego zmniejszenia wytrzymałości po przekroczeniu temperatury 250°C, co jest obserwowane w wypadku standardowych siluminów tłokowych.



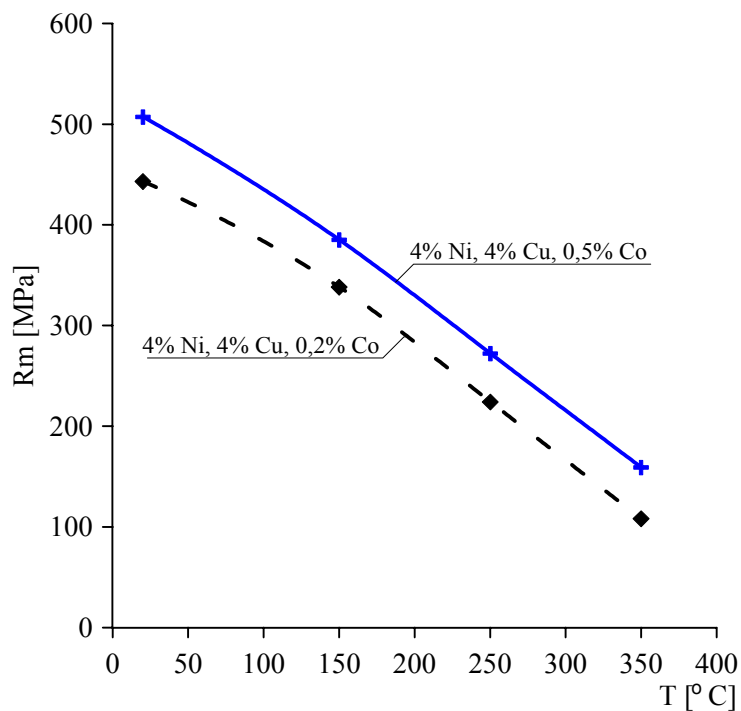
Rys. 10. Wpływ zawartości molibdenu, niklu i miedzi na wytrzymałość siluminu okołoeutektycznego w funkcji temperatury przy zawartości 4% Ni, 4% Cu, 0,2% oraz 0,5% Mo

Fig. 10. Influence of Mo, Ni, Cu contents on tensile strength in varied temperature for eutectic silumin for contents 4% Ni, 4% Cu and 0.2% Mo and 0.5% Mo

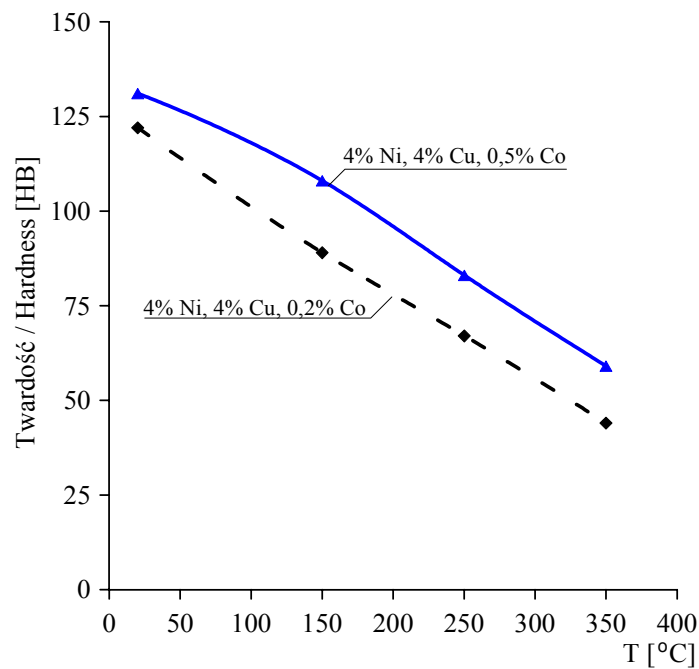
Na rys.10 przedstawiono synergiczny wpływ zawartości molibdenu, niklu i miedzi na wytrzymałość siluminu w funkcji temperatury. Silumin zawierał 4% Ni, 4% Cu oraz 0.5% Mo. Charakterystyczny był praktycznie liniowy spadek wytrzymałości w funkcji temperatury, przy czym w temperaturze 350°C wytrzymałość jego była około dwukrotnie wyższa, niż uzyskana w odniesieniu do siluminu zawierającego standardowe zawarości niklu i miedzi, bez dodatku molibdenu.

Na rys.11 przedstawiono synergiczny wpływ zawartości kobaltu, niklu i miedzi na wytrzymałość siluminu w funkcji temperatury. Silumin zawierał 4% Ni, 4% Cu oraz 0.5% Co. Uzyskano praktycznie liniowy spadek wytrzymałości w funkcji temperatury aż do temperatury 350°C, która nie jest przekraczana w warunkach normalnej pracy tłoków w silniku spalinowym.

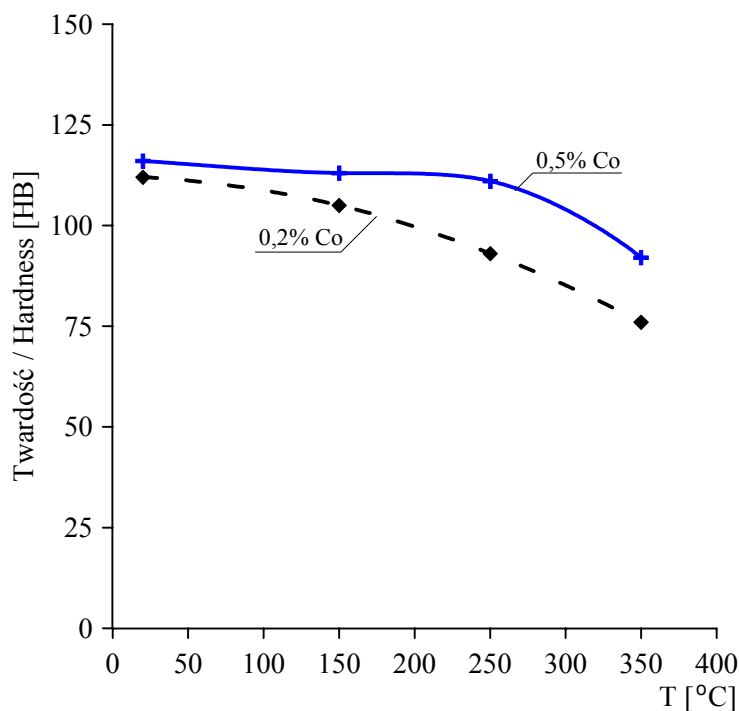
Podobne efekty, jeżeli chodzi o wytrzymałość na rozciąganie uzyskano także w odniesieniu do innych zawartości i innych dodatków stopowych. Przez wprowadzenie tych niekonwencjonalnych dodatków stopowych do siluminów uzyskano także zwiększenie twardości siluminu szczególnie w warunkach wyższych wartości temperatury. Dla przykładu na rys.12 przedstawiono zmianę twardości stopów zawierających 4% Ni, 4% Cu oraz 0.2% i 0.5% Co w funkcji temperatury a na rys.13 stopu zawierającego 0.2% i 0.5% Co oraz standardowe zawarości miedzi i niklu.



Rys. 11. Wpływ zawartości kobaltu, niklu i miedzi na wytrzymałość siluminu okołoeutektycznego w funkcji temperatury przy zawartości 4% Ni, 1% Cu, 0,2% oraz 0,5% Co  
 Fig. 11. Influence of Co, Ni, Cu contents on tensile strength in varied temperature for eutectic silumin for contents 4% Ni, 4% Cu and 0.2% Co and 0.5% Co



Rys. 12. Zmiana twardości siluminu zawierającego 4% Ni, 4% Cu oraz 0,2% i 0,5% Co w funkcji temperatury  
 Fig. 12. Variations of silumin hardness with 4% Ni, 4% Cu and 0.2% Co and 0.5% Co for different temperature



Rys. 13. Zmiana twardości w funkcji temperatury stopu zawierającego 0,2% i 0,5% Co oraz standardowe zawartości miedzi i niklu

Fig. 13. Variations of silumin hardness versus temperature for silumin with 0.5% Co and 0.2% Co and standard contents of Cu and Ni

Charakter przebiegów jest podobny jeżeli chodzi także o inne pierwiastki stopowe (Cr, W), które były przedmiotem badań, przy czym zmieniają się bezwzględne wartości twardości i wytrzymałości. Zapewnienie właściwej pracy tłoków wymaga jednak także, aby siluminy, które charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi charakteryzowały się także dobrą stabilnością wymiarową. W odniesieniu do siluminów zawierających takie dodatki stopowe, jak Co, Cr, Mo, Ni, W można uzyskać bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe oraz dobrą stabilność wymiarową wyrażającą się małą histerezą współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha$  podczas ogrzewania i chłodzenia stopu.

## Wnioski

1. Przeprowadzone badania wpływu zawartości składników stopowych takich, jak kobalt, chrom, miedź, molibden, nikiel wolfran w siluminach okołoeutektycznych i nadeutektycznych na wytrzymałość pozwoliły na uzyskanie zależności ilościowych i jakościowych dotyczących przebiegu wytrzymałości na rozciąganie, twardości i wydłużenia względnego od zawartości poszczególnych pierwiastków stopowych.
2. Badania wpływu składu chemicznego na wytrzymałość siluminu przeprowadzono w zakresie zawartości miedzi i niklu od 0 do 4.5% natomiast w odniesieniu do chromu, kobaltu, molibdenu i wolfranu w zakresie od 0 do 1.0%.
3. Wraz ze wzrostem zawartości miedzi i niklu, w zakresie do 4.5% następował stały (liniowy), wzrost wytrzymałości na rozciąganie zarówno w siluminach okołoeutektycznych jak i nadeutektycznych.
4. Wraz ze wzrostem zawartości kobaltu, molibdenu, chromu, wolfranu w siluminach następował początkowo wzrost wytrzymałości na rozciąganie siluminów a następnie spadek wytrzymałości. Maksymalne wartości wytrzymałości wystąpiły przy zawartościach

- molibdenu, kobaltu i chromu w granicach od 0.3% do 0.6%.
5. Dodatek molibdenu miał większy wpływ na wytrzymałość, niż dodatek kobaltu. Charakter zmian był podobny, ale maksimum wytrzymałości występowało przy nieco mniejszych zawartościach kobaltu, niż molibdenu. Bezwzględne wartości wytrzymałości na rozciąganie były znacznie wyższe w wypadku dodatku molibdenu, niż kobaltu.
  6. Wyniki badań wpływu temperatury na wytrzymałość siluminów zawierających dodatki stopowe takie, jak chrom, kobalt, miedź, molibden, nikiel, wolfram wykazały, że w wyniku dodatku tych pierwiastków spadek wytrzymałości siluminów w funkcji temperatury był mniejszy w porównaniu z siluminami powszechnie stosowanymi do wykonania tłoków.
  7. Najwyższe wartości wytrzymałości siluminów w temperaturze 350°C, zbliżonej do maksymalnej temperatury pracy tłoków, uzyskano przy wysokiej synergicznej zawartości niklu, miedzi i takiej zawartości molibdenu przy której występowało maksimum wytrzymałości w temperaturze normalnej czyli 0.5%.
  8. Równie ważnym parametrem oceny materiałów na tłoki, jak jego wytrzymałość jest współczynnik rozszerzalności termicznej  $\alpha$  i jego histereza. Siluminy zawierające dodatek kobaltu, molibdenu, niklu charakteryzują się nie tylko bardzo dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi ale także małą histerezą współczynnika  $\alpha$ , co pozwala je stosować z dobrym efektem jako materiał na tłoki.

## LITERATURA

- [1] Day R.A., Smart R.F., Tommis N.: Piston Materials Technology. Proceedings of the Associated Engineering Group Technical Symposium. June 17-18 1970, Cawston House, Great Britain.
- [2] Catherall J.A., Smart R.F.: The Effects of Nickel in Aluminium - Silicon Eutectic Alloys. Metallurgia, Vol.79, No.476, 1969.
- [3] Pietrowski S.: Siluminy. Wyd. Pol. Łódzkiej, 2001, ISBN 83-7283-029-0.
- [4] Pietrowski S.: Siluminy tłokowe. Monografia PAN: Krzepnięcie metali i stopów, z.29, 1997.
- [5] Pietrowski S.: Silumin nadeutektyczny z dodatkami Cr, Mo, W i Co. Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN, Komisja Odlewnictwa. Nr.38, 1998.
- [6] Pietrowski S.: Silumin wieloskładnikowy. Patent RP Nr. P-317492.
- [7] Pietrowski S., Siemińska - Jankowska B.: The Coefficient of Linear Thermal Expansion of Synthetic and Technical Silumins. Polish CIMAC. Vol.1, No.1, Warsaw, 1994.
- [8] Pietrowski S., Siemińska - Jankowska B.: Wpływ rodzaju stopu i postaci krzemu eutektycznego na współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej siluminów. Proceedings of International Scientific Conference on International Combustion Engines „KONES'93”, Gdańsk - Jurata, 1993. ISBN 83-900666-1-0.
- [9] Siemińska - Jankowska B.: Badania symulacyjne obciążeń cieplnych materiałów na tłoki silników spalinowych. Proceedings of International Scientific Conference on International Combustion Engines „KONES'93”, Gdańsk - Jurata, 1993. ISBN 83-900666-1-0.
- [10] Poniewierski Z.: Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów. WNT, Warszawa, 1989.