ARCHIWUM ODLEWNICTWA

14/19

Rok 2006, Rocznik 6, Nr 19
Archives of Foundry
Year 2006, Volume 6, Book 19
PAN - Katowice PL ISSN 1642-5308

# OCENA NIEZAWODNOŚCI ODLEWNICZYCH STOPÓW Al NA PODSTAWIE WŁAŚCIWOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

A. GIEREK[1], J. PIĄTKOWSKI[2], J. SZYMSZAL[3]
Politechnika Śląska, Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów,
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

STRESZCZENIE

Ocenę niezawodności odlewniczych stopów Al., określoną modułem Weibulla, wyznaczono na przykładzie wyników badań wytrzymałości na rozciąganie i zginanie dla nadeutektycznego siluminu AlSi17Cu4Mg w stanie po odlaniu, po modyfikacji 0,05% fosforem, po obróbce cieplnej oraz po łącznym procesie modyfikacji z obróbką cieplną. Na tej podstawie, oszacowano wytrzymałość, a więc niezawodność odlewu n-razy większego od badanej próbki, określając tzw. „efekt skali" w funkcji masy wyrobu rzeczywistego dla każdego z analizowanych etapów produkcyjnych.
*Key words: reliability, Al-Si alloys, statistical analysis*

## 1. WSTĘP

Prawidłowo przeprowadzona analiza statystyczna wyników badań właściwości wytrzymałościowych na próbkach poddanych rozciąganiu i zginaniu stanowi ważny krok w praktycznym zastosowaniu przedmiotowej metody do projektowania konstrukcyjnych elementów, o większych niż badana próbka gabarytach. Dotyczy to różnych materiałów, a szczególnie nowoopracowanych tworzyw odlewniczych, takich jak np. nadeutektyczne stopy Al-Si-Me [1]. Tworzywa te ulegają kruchemu pękaniu przy obciążeniach niższych od granicy plastyczności, co może być wynikiem obecności wewnętrznych wad, charakterystycznych dla tworzyw odlewanych [2].

[1] *Prof. zw. dr hab. inż. Adam Gierek - profesor,*
[2] *Dr inż. Jarosław Piątkowski – adiunkt, - jaroslaw.piatkowski@polsl.pl*
[3] *Dr inż. Jan Szymszal – adiunkt, - jan.szymszal@polsl.pl*

## 2. METODYKA BADAŃ

Celem badań jest przedstawienie metodyki wyznaczenia funkcji rozkładu Weibulla dla tworzywa odlanego ze stopu AlSi17Cu4Mg:

- ✓ w stanie surowym po odlaniu,
- ✓ po procesie modyfikacji 0,05% wag. P (w postaci zaprawy CuP),
- ✓ w stanie obrobionym cieplnie (przesycanie i starzenie),
- ✓ po procesie modyfikacji z późniejszą obróbką cieplną.

Badaniom na działanie prostego i złożonego stanu naprężeń poddano silumin nadeutektyczny o zawartości ~17% wag. Si oraz ~4% wag. Cu i ~1% wag. Mg. Stop ten topiono w indukcyjnym piecu oporowym ST59-MR, w tyglu z SiC o pojemności 1,5 l, pod pokryciem ochronnym 2NaF i KCl. Po uzyskaniu temperatury ~ 820$^{o}$C, kąpiel poddano rafinacji preparatem Rafglin-3 w ilości 0,3% wag. w stosunku do masy stopu. Temperaturę odlewania kontrolowano termoelementem NiCr-NiAl TP-202K-800-1.

*Przygotowanie próbek na rozciąganie i zginanie*

Badany silumin odlewano do kokili grafitowej Ø12×110 mm, a następnie z odlewów tych wykonano 25 próbek Ø10×100mm. Drugą część stopu poddano modyfikacji fosforem w ilości 0,05%wag. w postaci zaprawy Cu-P (~9,95% wag. P), otrzymując dalszych 25 próbek o końcowych wymiarach Ø10×100mm. Według tej samej technologii przygotowano kolejną część stopu, z którego odlane próbki (25 sztuk) poddanych zabiegowi obróbki cieplnej wg następujących parametrów:

- przesycanie 490$^{o}$C/8 h/woda,
- starzenie 160$^{o}$C/6 h/powietrze.

Czwartą część próbek poddano łącznemu zabiegowi modyfikacji i obróbki cieplnej. W ten sposób otrzymano 100 sztuk próbek Ø10×100mm wg tej samej technologii wytworzenia dla czterech różnych etapów technologicznych (po 25 sztuk dla każdego). Badania wytrzymałości na rozciąganie prowadzono na maszynie typu Instron 4469. Otrzymane próbki poddano działaniu naprężenia rozciągającego $\sigma_i$ z wcześniej określonych przedziałów, wyznaczając liczbę próbek, które wytrzymują to naprężenie. Otrzymane wartości podzielono przez wszystkie badane przy tym naprężeniu próbki, otrzymując tzw. prawdopodobieństwo przetrwania, ($P_{\sigma i}$), które przeliczono na wartości dziesiętne ($p_i$).

W celu otrzymania próbek na zginanie, stop odlewano do kokili grafitowej, uzyskując próbki o wymiarach 10×10×100mm. W ten sposób, stosując tę samą technologię odlewania, otrzymano cztery serie próbek po 25 sztuk dla każdego etapu powstania, które poddano działaniu naprężenia zginającego $R_g$ rejestrując wartość siły F (kN).

Z określonych przedziałów wyznaczono następnie liczbę próbek, które wytrzymują zadane obciążenie i podobnie jak wcześniej, otrzymaną wartość podzielono przez wszystkie badane przy tym naprężeniu próbki, wyznaczając prawdopodobieństwo przetrwania ($P_{Rg}$), przeliczone na wartości dziesiętne ($p_i$).

## 3. MODELE STATYSTYCZNE

Uzyskane wyniki z badań wytrzymałościowych (wprowadzone do arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel) [3] posłużyły do wyznaczenia metodą korelacji krzywoliniowej zależności prawdopodobieństwa przetrwania od wytrzymałości, a na tej podstawie określenia modułu Weibulla przy pomocy zależności [2, 4]:

$$P_s(V_0) = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right\} \tag{1}$$

którą można zapisać:
$p = \exp(-(\sigma/\sigma_0)^m)$ – dla próbek na rozciąganie,
$p = \exp(-(Rg/Rg_0)^m)$ – dla próbek na zginanie.

Ze względu na nieliniowy charakter funkcji (1) do estymacji jej współczynników (w tym przypadku modułu *m*) wykorzystano złożony aparat matematyczny regresji nieliniowej. Korzystając z pakietu Statistica firmy STATSoft, wyznaczono wartość naprężenia zginającego $Rg_0$ (naprężenie zginające, dla którego p=0,37 %), a następnie zdefiniowano model regresji i funkcję straty. Operator ten ma za zadanie oszacować różnicę odchyleń wartości przewidywanych od wartości obserwowanych. Każde bowiem odchylenie wartości obserwowanej od przewidywanej jest pewną stratą w trafności przewidywania. Minimalizacja funkcji straty jest procedurą estymacji współczynników równania regresji, dlatego postać tej funkcji zmienia się w zależności od stosowanej metody szacowania parametrów. W zastosowanym algorytmie najmniejszych kwadratów, funkcję straty zdefiniowano jako sumę kwadratów odchyleń wartości przewidywanych od obserwowanych.
Aby dokonać prawidłowej weryfikacji uzyskanego modułu Weibulla, należy sprawdzić czy rozkład reszt odpowiada rozkładowi normalnemu. Niespełnienie tego warunku nie powoduje utraty przez estymator jego właściwości, a jedynie brak możliwości weryfikacji hipotezy dotyczącej wartości wyliczonego parametru m.
Do estymacji funkcji rozkładu Weibulla można wykorzystać metodę sprowadzenia jej do postaci liniowej. W tym celu funkcję (1), zapisaną w postaci zmiennych $\sigma$ i $\sigma_0$ lub Rg i $Rg_0$ poddano podwójnemu logarytmowaniu otrzymując:

$$\begin{aligned} &\ln(\ln(1/p)) = m\cdot\ln(\sigma/\sigma_0) \text{ - dla próbek poddanych rozciąganiu,} \\ &\ln(\ln(1/p)) = m\cdot\ln(Rg/Rg_0) \text{ - dla próbek poddanych zginaniu.} \end{aligned} \tag{2}$$

Równania te zawierają zmienną niezależną „$\ln(\sigma/\sigma_0)$” lub „$\ln(Rg/Rg_0)$”, natomiast zmienna zależna, to „$\ln(\ln(1/p))$”. Obliczeń tych parametrów dokonano w arkuszu kalkulacyjnym Microsoft Excel stosując odpowiednie funkcje i operatory [3].

## 4. BADANIA STATYSTYCZNE NIEZAWODNOŚCI SILUMINU AlSi17Cu4Mg

Badaniom poddano populację 100 próbek wykonanych z siluminu AlSi17Cu4Mg poddanych rozciąganiu (tabl. 1) i 100 próbek poddanych zginaniu (tabl. 2).

Tabela 1. Oszacowanie wartości modułu Weibulla na podstawie próby na rozciąganie
Table 1. Estimation of module Weibull on basis of test onto expansion

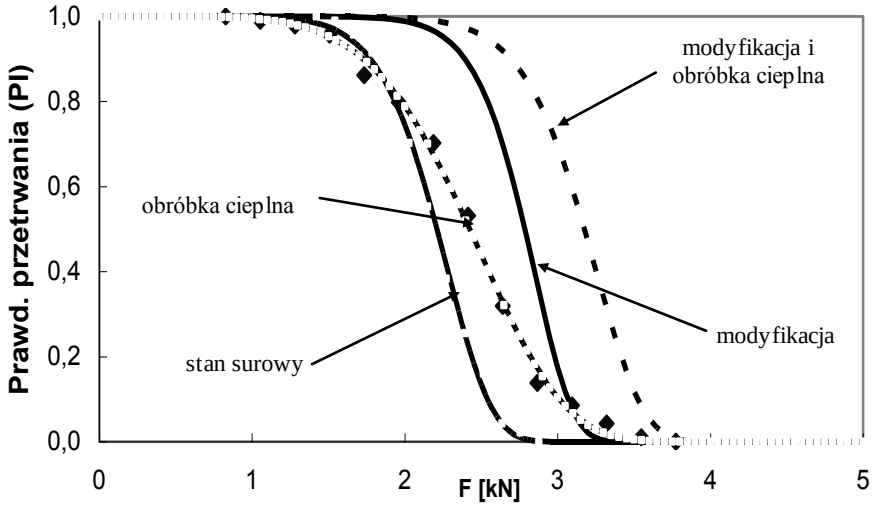
| **Silumin w stanie po odlaniu** | | **Silumin obrobiony cieplnie** | |
|---|---|---|---|
| **Model: p = exp (-(σ/190,1)^m)** R=0,9911; wyjaśniona wariancja: 98,24% | | **Model: p = exp (-(σ/248,5)^m)** R=0,9956,; wyjaśniona wariancja: 99,12% | |
| **Moduł m** | **15,16** | **Moduł m** | **21,16** |
| Błąd estymacji | 1,07933396 | Błąd estymacji | 1,16506 |
| t(8) | 14,0464838 | t(8) | 19,0244 |
| Poziom p | 6,4049E-07 | Poziom p | 6,01E-08 |
| **Silumin po modyfikacji fosforem** | | **Silumin po modyfikacji i obr. cieplnej** | |
| **Model: p = exp (-(σ/257,2)^m)** R=0,9912, wyjaśniona wariancja: 98,25% | | **Model: p = exp (-(σ/277,5)^m)** R=0,9933, wyjaśniona wariancja: 98,68% | |
| **Moduł m** | **16,95** | **Moduł m** | **18,59** |
| Błąd estymacji | 1,022339 | Błąd estymacji | 0,877178 |
| t(8) | 16,58888 | t(8) | 21,1939 |
| Poziom p | 1,76E-07 | Poziom p | 2,58E-08 |

Tabela 2. Oszacowanie wartości modułu Weibulla na podstawie próby na zginanie
Table 2. Estimation of module Weibull on basis of test onto bending

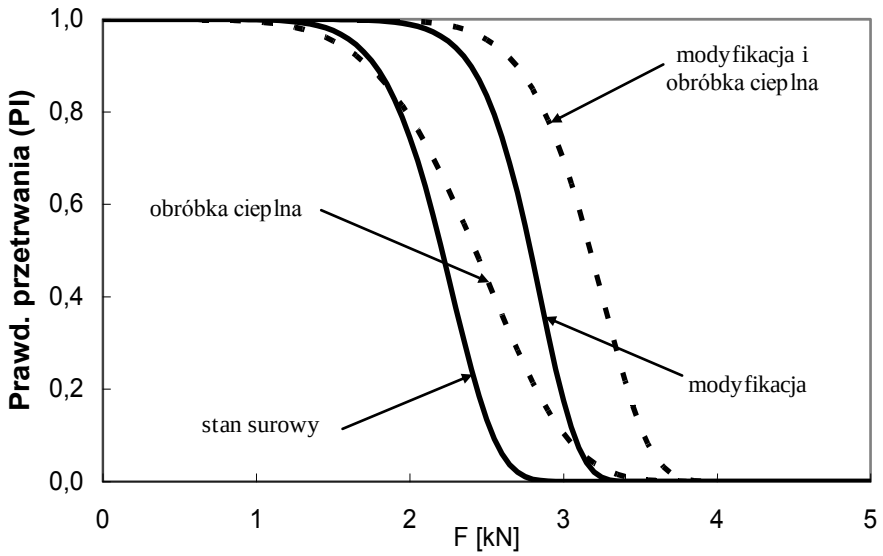
| **Silumin w stanie surowym po odlaniu** | | **Silumin obrobiony cieplnie po odlaniu** | |
|---|---|---|---|
| **Model: p = exp(-(Rg/2,6)^m)** R=0,9989, wyjaśniona wariancja=99,78% | | **Model: p = exp(-(Rg/3,2)^m)** R=0,9992, wyjaśniona wariancja=99,84% | |
| **Moduł m** | **5,55** | **Moduł m** | **11,46** |
| Błąd estymacji | 0,206189 | Błąd estymacji | 0,3795427 |
| t(8) | 26,92301 | t(8) | 30,208036 |
| Poziom p | 8,69E-13 | Poziom p | 6,18412E-12 |
| **Silumin po modyfikacji fosforem** | | **Silumin po modyfikacji i obr. cieplnej** | |
| **Model: p = exp(-(Rg/2,3)^m)** R=0,9985, wyjaśniona wariancja=99,70% | | **Model: p = exp(-(Rg/2,8)^m)** R=0,9987, wyjaśniona wariancja=99,74% | |
| **Moduł m** | **8,58** | **Moduł m** | **12,43** |
| Błąd estymacji | 0,3075843 | Błąd estymacji | 0,633632 |
| t(8) | 27,916989 | t(8) | 20,617337 |
| Poziom p | 2,76059E-12 | Poziom p | 4,57E-10 |

Interpretację geometryczną wartości modułu Weibulla badanego siluminu na podstawie próby na rozciąganie (a) oraz próby na zginanie (b) przedstawiono na rys. 1.

a)




b)




Rys. 1. Prawdopodobieństwo przetrwania (PI) w funkcji: siły na rozciąganie (a) oraz w funkcji siły na zginanie (b) siluminu AlSi17Cu4Mg

Fig. 1. Probability of survival (PI) in function of extension strength (a), and in function of tensile strength (b) AlSi17Cu4Mg alloy

### 4.1. Wyznaczenie efektu skali

W badaniach poddano analizie problem efektu skali (ES) [2, 4]. Moduł Weibulla, który wiąże się z rozrzutem statystycznym wytrzymałości w obiekcie rzeczywistym może posłużyć oszacowaniu wytrzymałości czyli niezawodności elementów o „n razy" większych niż badana próbka gabarytach.

Biorąc pod uwagę wzrost rozmiarów badanego elementu należy spodziewać się pewnego spadku wytrzymałości ze względu na większe prawdopodobieństwo wystąpienia defektów strukturalnych (pęknięcia, karby). Wytrzymałość tworzyw litych jest bowiem zdeterminowana wytrzymałością ich najsłabszego ogniwa. Oprócz tego, szczególną uwagę należy zwrócić na różnice i ewentualne konsekwencje w przypadku poddania obciążeniu próbki z odlewu surowego oraz po zabiegu modyfikacji i obróbki cieplnej. Dla odlewu surowego, gdzie występują pierwotne wydzielenia krzemu, może łatwiej dojść do powstania mikroszczelin. Sytuacja taka ma miejsce, gdy suma naprężeń powstałych w mikroobszarach w wyniku obciążenia próbki będzie większa od lokalnej granicy plastyczności. Znaczną poprawę tej sytuacji daje proces modyfikacji, który zapobiega przekroczeniu granicy plastyczności przez „spiętrzające" się naprężenia. Teoria ta została potwierdzona na przykładzie uzyskanych wartości modułu Weibulla, jakie otrzymano dla stopu w stanie surowym i w trzech innych etapach produkcyjnych. Dalszą poprawę badanej cechy materiałowej przynosi obróbka cieplna, która poprzez zmianę kształtu wydzieleń krzemu na bardziej sferyczny, powoduje zanikanie koncentratorów naprężeń. Zabieg ten jednak nie powinien wnieść takiej różnicy w wytrzymałości stopu, jak miało to miejsce w przypadku surowego odlewu i stopu po zabiegu modyfikacji. Z samej teorii Weibulla wynika, że wytrzymałość elementu zależy od jego objętości, co wyraża zależność [2]:

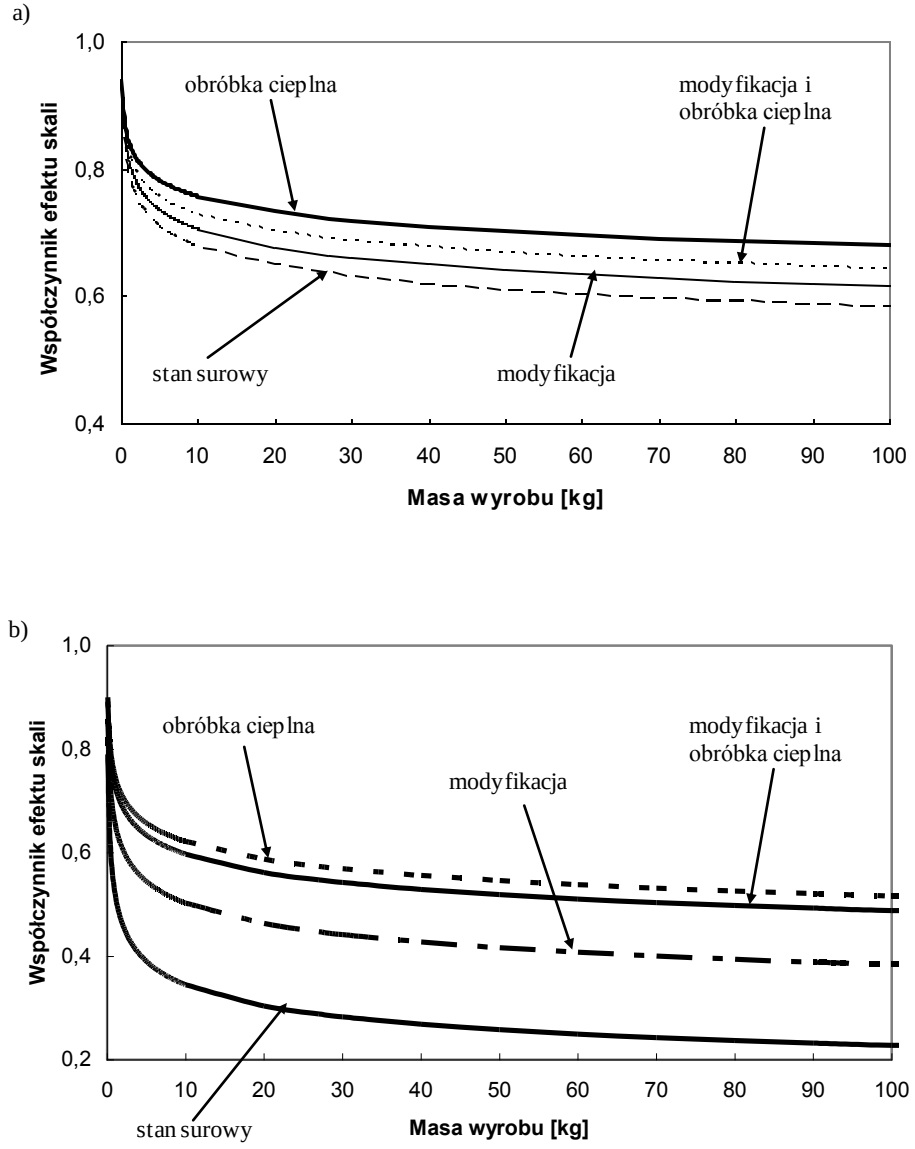
$$\frac{R_1}{R_0} = \left(\frac{V_0}{V1}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{3}$$

Przyjmuje się, że $R_0$ oraz $V_0$ oznaczają odpowiednio wytrzymałość i objętość próbki, a $R_1$ oraz $V_1$ – wytrzymałość i objętość elementu konstrukcji zachowującego podobieństwo geometrii oraz obciążenia [4]. Zależność (3) pozwala zatem, oszacować wytrzymałość elementu konstrukcyjnego o objętości

$$\frac{V_1}{V_0} = k \tag{4}$$

razy większej od objętości próbki przy zachowaniu warunków dotyczących podobieństwa kształtu i geometrii oraz sposobu obciążenia.

Efekt skali dla badanego siluminu nadeutektycznego przedstawiono na rys 2a na podstawie próby na rozciąganie oraz na rys. 2b na podstawie próby na zginanie.




Rys.2. Efekt skali dla czterech etapów produkcyjnych; wyznaczony na podstawie próby na rozciąganie (a) oraz na podstawie próby na zginanie (b) siluminu AlSi17Cu4Mg.

Fig.2. Scale effect for four formation states determined on the basis of tensile test (a) and bending test (b) of AlSi17Cu4Mg alloy.

## 5. ANALIZA WYNIKÓW

Wzrost wartości modułu Weibulla (w porównaniu do stanu po odlaniu – 15,16) jest spowodowany procesem modyfikacji (16,95) na skutek rozdrobnienia pierwotnych wydzieleń krzemu i ich równomiernego rozmieszczenia w objętości odlewu. Dalsze podwyższenie badanej cechy jest spowodowane procesami wydzieleniowymi faz międzymetalicznych zachodzącymi podczas przesycania i starzenia na skutek procesów rozpuszczania Cu i Mg w roztworze $\alpha$ (21,16). Jednak łączny proces modyfikacji i obróbki cieplnej powoduje obniżenie parametru „m" (18,59). Może to być związane z „przedobrzeniem", co świadczyłoby o tym, iż jednoczesny proces modyfikacji i obróbki cieplnej niekorzystnie wpływa na niezawodność materiałową badanego siluminu. Analizując rys. 1. można zauważyć, iż wartość prawdopodobieństwa przetrwania maleje ze wzrostem przyłożonej siły, a modyfikacja i obróbka cieplna powodują, iż zależność ta „przesuwa" się w kierunku zwiększonej zawartości tej siły. Zależność współczynnika efektu skali w funkcji masy wyrobu (rys.2) wskazuje na spadek wytrzymałości elementu n-razy większego, choć modyfikacja i obróbka cieplna zmniejszają ten spadek w porównaniu do siluminu w stanie po odlaniu.

## LITERATURA


[1] S. Pietrowski: *Siluminy*. Wyd. Politachniki Łódzkiej, Łódź (2001).
[2] M.F. Ashby, R.H. Jones: *Materiały Inżynierskie cz.2*. WNT, Warszawa, (1996).
[3] T. Chester, R.H. Alden: *Excel 2000. Biblia*. Wyd. HELP, Warszawa, (2001).
[4] A. Bełzowski: *Metoda oceny wytrzymałości kompozytów*. Kompozyty, nr 1, 2001.



***Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2006 w ramach projektu badawczego GRANT 3T08 B 014 27***


## EVALUATION OF Al CAST ALLOYS ON THE BASIS OF THE STRENGTH PROPERTIES


SUMMARY

Evaluation of cast Al alloys reliability, expressed by Weibull's modulus, was determined on example of tensile and bending strength tests of hypereutectic AlSi17Cu4Mg silumin. The alloy was investigated in as-cast state, modified state (0,05% of phosphorus), after heat treatment as well as after process combining modification and heat treatment. On this basis the strength and hence the reliability of cast n-times bigger then the investigated sample was estimated. These results enabled determination of scale effect in function of mass of real products mode of the investigated silumin in each analysed manufacturing stages.



Recenzował: prof. zw. dr hab. inż. Józef Gawroński