13/2

Archives of Foundry,
Year 2001, Volume 1, № 1 (2/2)
Archiwum Odlewnictwa,
Rok 2001, Rocznik 1, Nr 1 (2/2)
PAN – Katowice PL ISSN 1642-5308

WPŁYW PROCESU TECHNOLOGICZNEGO NA NIEZAWODNOŚĆ STOPU ODLEWNICZEGO AlSi17Cu3Mg, JAKO TWORZYWA KONSTRUKCYJNEGO

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

STRESZCZENIE

Z poddanego rafinacji ciekłego stopu AlSi17Cu3Mg odlano do kokili stalowej dwie grupy próbek walcowych, które różniły się tylko tym, że jedna grupa stanowiła populację statystyczną stopu niemodyfikowanego, natomiast druga – stopu po modyfikacji fosforem.

Celem badań porównawczych było określenie modułu Weibulla w oparciu o badania wytrzymałościowe na rozciąganie oraz stwierdzenie na tej podstawie wpływu technologii na niezawodność badanego stopu.

Key words: hypereutectic silumin, AlSi17Cu3Mg

1. WSTĘP

Stopy nadeutektyczne układu Al-Si do obróbki cieplnej znajdują coraz większe zastosowanie jako tworzywa konstrukcyjne dla motoryzacji [1, 2]. Charakteryzują się one jednak obok szeregu cennych właściwości, takich jak znaczna twardość (~150HB), wysoka wytrzymałość (~200MPa), niezła udarność (~6÷9 J/cm^2), względnie niską plastycznością, tj. wydłużeniem krytycznym (A_5 od 0,2 do 0,4%) [1]. Niska plastyczność tych stopów powoduje, że łatwo ulegają one kruchemu pękaniu przy obciążeniach niższych od granicy plastyczności, co jest wynikiem wewnętrznych wad strukturalnych, charakterystycznych dla tworzyw odlewanych. Na charakter wad strukturalnych w odlewach z tych stopów tj. ich wielkość, ilość, kształt i rozłożenie

---

[1] *prof. zw. dr hab. inż.*
[2] *dr inż.*
[3] *dr inż. .*

mają niewątpliwie wpływ na przebieg krystalizacji pierwotnej, a w tym wpływ modyfikacji, jak również późniejsza obróbka cieplna.

Celem badań jest określenie, w ujęciu statystycznym, wpływu historii technologicznej tworzywa odlanego ze stopu AlSi17Cu3Mg na prawdopodobieństwo zniszczenia podczas próby rozciągania oraz na moduł Weibulla [3]. Uzyskane wyniki z badań wytrzymałościowych (wprowadzone do arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel) posłużyły do wyznaczenia metodą korelacji krzywoliniowej zależności prawdopodobieństwa przetrwania od wytrzymałości, a na tej podstawie określenia modułu Weibulla. Wyznaczenie tego modułu ma praktyczne znaczenie i może być wykorzystane zarówno podczas projektowania konkretnego elementu maszyny lub urządzenia, jak i analizie możliwości zamiany jednych tworzyw - innymi.

Realne części odlewane maszyn i urządzeń reprezentowane są w niniejszych badaniach przez odlewane próbki, które w zależności od skali mogą służyć do określenia trwałości całego elementu. Ponieważ odlewy wykazują pewien rozrzut statystyczny trwałości ze względu na rozkład wielkości wad (porowatość, zanieczyszczenia, wżery), przeto można przypuszczać, że element odlewany ulegnie szybszemu zniszczeniu niż półwyrób uprzednio przerabiany plastycznie. Na podstawie prawdopodobieństwa zniszczenia zależnego od funkcji, jaką rozpatrywany detal ma pełnić, można go zaprojektować z odpowiednio dobranego tworzywa tak, aby dopuszczalne ryzyko nie zostało przekroczone [3].

Dla potwierdzenia uzyskanych wyników stosuje się często współczesne metody statystyki opisowej [4, 5] a programem najbardziej uniwersalnym do tego celu jest arkusz kalkulacyjny Microsoft Excel 97 [6].

Zagadnienia niezawodności tworzyw konstrukcyjnych nabierają szczególnego znaczenia, jeżeli pęknięcie poszczególnego elementu może nieść za sobą tragiczne skutki. Odnosi się to przede wszystkim do elementów dla przemysłu kosmicznego oraz lotniczego, gdzie prawdopodobieństwo zniszczenia pojedynczego detalu powinno być bardzo małe i wynosić około 10^{-8} [3]. Podobne rozważania, można poczynić w odniesieniu do elementów dla przemysłu motoryzacyjnego. Wielkie koncerny samochodowe stawiają dzisiaj na bezpieczeństwo przyszłych użytkowników, co nieodzownie łączy się z badaniami statystycznymi niezawodności. Analiza statystyczna stanowi pierwszy krok w praktycznym zastosowaniu projektowania elementów wykonanych z różnych materiałów, a szczególnie nowoopracowanych takich jak np. nadeutektyczne stopy Al-Si-Me.

2. METODYKA BADAŃ

Badaniom poddano silumin nadeutektyczny AlSi17 o zawartości ~17%wag. Si oraz ~3%wag. Cu i ~1%wag. Mg. Stop ten topiono w indukcyjnym piecu oporowym ST59-MR z kantalowymi elementami grzejnymi, o kwadratowym przekroju komory grzewczej w tyglu z azotku krzemu o pojemności 1,5 litra, pod pokryciem ochronnym 2NaF i KCl (w stosunku 20 do 80%). Po uzyskaniu temperatury około 850°C, kąpiel poddano rafinacji preparatem Rafglin-3 w ilości 0,3%wag. w stosunku do masy stopu.

Temperaturę odlewania kontrolowano poprzez zanurzanie w ciekłej kąpieli termoelementu NiCr-NiAl TP-202K-800-1. Tak przygotowany silumin odlewano do kokili stalowej o wymiarach Ø12×110mm (117 sztuk), a następnie z odlewów tych wykonano próbki Ø10×100mm. Według tej samej technologii przygotowano drugą część stopu, który po rafinacji, poddano modyfikacji fosforem w ilości 0,05%wag. w postaci zaprawy Cu-P (~9,5%wag. P), a następnie odlewano z temperatury 850°C, otrzymując kolejnych 117 próbek o końcowych wymiarach Ø10×100mm. Badania wytrzymałościowe prowadzono na maszynie typu Instrom 4469.

3. BADANIA STATYSTYCZNE WYTRZYMAŁOŚCI

Wytrzymałość dwóch, pozornie identycznych elementów może znacznie się różnić na skutek przypadkowego sposobu wycięcia, oraz różnej liczby i jakości defektów (karbów) strukturalnych. Badaniom poddano 117 próbek z siluminu odlanego w stanie surowym oraz po modyfikacji fosforem (tabl.1).

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałościowych oraz oszacowanie parametrów do analizy statystycznej a) dla siluminu w stanie po odlaniu, oraz b) dla siluminu po modyfikacji fosforem.

Table 1. The results of strength test and the statistic parameters a) for silumin after mould casting, and b) for silumin modified by phosphorus inoculant.

a)

p	**p**	1/p	σ	ln(1/p)	ln(ln(1/p))	σ/σ_0	$\ln(\sigma/\sigma_0)$
12/13	**0,9231**	1,083	160	0,0800	-2,5252	0,8417	-0,1724
11/13	**0,8462**	1,182	165	0,1671	-1,7894	0,8680	-0,1416
11/13	**0,8462**	1,182	170	0,1671	-1,7894	0,8943	-0,1118
10/13	**0,7692**	1,300	175	0,2624	-1,3380	0,9206	-0,0828
8/13	**0,6154**	1,625	180	0,4855	-0,7226	0,9469	-0,0546
6/13	**0,4615**	2,167	185	0,7732	-0,2572	0,9732	-0,0272
5/13	**0,3846**	**2,600**	**190**	**0,9555**	**-0,0455**	**0,9995**	**-0,0005**
2/13	**0,1538**	6,500	195	1,8718	0,6269	1,0258	0,0254
1/13	**0,0769**	13,000	200	2,5649	0,9419	1,0521	0,0508

b)

p	**p**	1/p	σ	ln(1/p)	ln(ln(1/p))	σ/σ_0	$\ln(\sigma/\sigma_0)$
12/13	**0,9231**	1,0833	225	0,08004	-2,52519	0,87481	-0,13375
11/13	**0,8462**	1,1818	230	0,16705	-1,78944	0,89425	-0,11177
10/13	**0,7692**	1,3000	235	0,26236	-1,33802	0,91369	-0,09027
9/13	**0,6923**	1,4444	240	0,36772	-1,00042	0,93313	-0,06922
9/13	**0,6923**	1,4444	245	0,36772	-1,00042	0,95257	-0,04860
7/13	**0,5385**	1,8571	250	0,61904	-0,47959	0,97201	-0,02839
6/13	**0,4615**	**2,1667**	**255**	**0,77319**	**-0,25723**	**0,99145**	**-0,00859**
4/13	**0,3077**	**3,2500**	**260**	**1,17865**	**0,16437**	**1,01089**	**0,01083**
2/13	**0,1538**	6,5000	265	1,87180	0,62690	1,03033	0,02988

Silumin w stanie niemodyfikowanym
Korelacja krzywoliniowa

Wykorzystując metody estymacji nieliniowej oparte o model [3]

$$p = \exp(-(\sigma/\sigma_0)^m) \qquad (1)$$

dokonano porównawczego oszacowania wartości modułu Weibulla.
Metoda estymacji quasi-Newtona:
Model: $p = \exp(-(\sigma/190{,}1)^m)$
Końcowa strata 0,013737300 R=0,99117. Wyjaśniona wariancja: 98,241%.

Parametr m	**15,161**
Błąd estymacji	1,07933396
t(8)	14,0464838
Poziom p	6,4049E-07

Na podstawie metody estymacji nieliniowej stwierdzono, że dla siluminu w stanie po odlaniu, najlepszym dopasowaniem charakteryzuje się funkcja, dla której wartość modułu Weibulla wynosi 15,161.

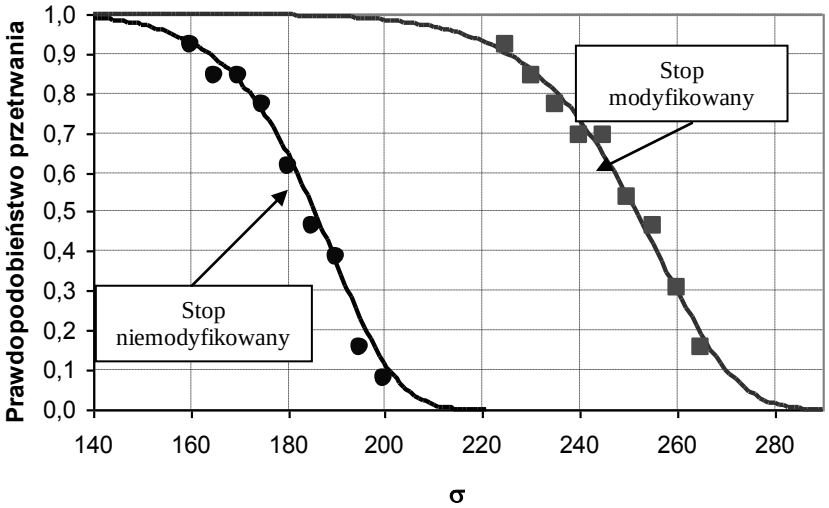
Z rysunku 1 wynika, iż dla σ = 140 MPa prawdopodobieństwo przetrwania elementu $P_S(V_O)$ zmierza do jedności. Oznacza to, że prawie wszystkie badane próbki potrafią wytrzymać takie naprężenie. W miarę zwiększania naprężenia σ, coraz więcej próbek nie wytrzymuje obciążenia i prawdopodobieństwo $P_S(V_O)$ maleje. Przy dużych obciążeniach (~220 MPa) wszystkie próbki ulegają zniszczeniu, czyli gdy $\sigma \rightarrow \infty$, to $P_S(V_O) \rightarrow 0$.
Jeżeli do równania (1) wstawimy $\sigma = \sigma_0$, to otrzymamy $P_S(V_O) = 1/e$ (~0,37). To znaczy, że naprężenie rozciągające σ_0, odpowiada naprężeniu, przy którym 37% badanych próbek wytrzymuje obciążenie.

Silumin po modyfikacji fosforem
Metoda estymacji quasi-Newtona.
Model: $p=\exp(-((\sigma/\mathbf{257{,}2})^m))$
Końcowa strata 0,009023678, **R=0,99125**. Wyjaśniona wariancja: 98,258%.

Parametr	**16,959**
Błąd estymacji	1,022339
t(8)	16,58888
Poziom p	1,76E-07

Na podstawie metody estymacji nieliniowej stwierdzono, że dla siluminu po modyfikacji fosforem, najlepszym dopasowaniem charakteryzuje się funkcja, dla której wartość modułu Weibulla wynosi 16,959.

Interpretację graficzną zależności (1) przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Zmiana prawdopodobieństwa p w zależności od zmiany naprężenia σ dla badanych stopów Al-Si.

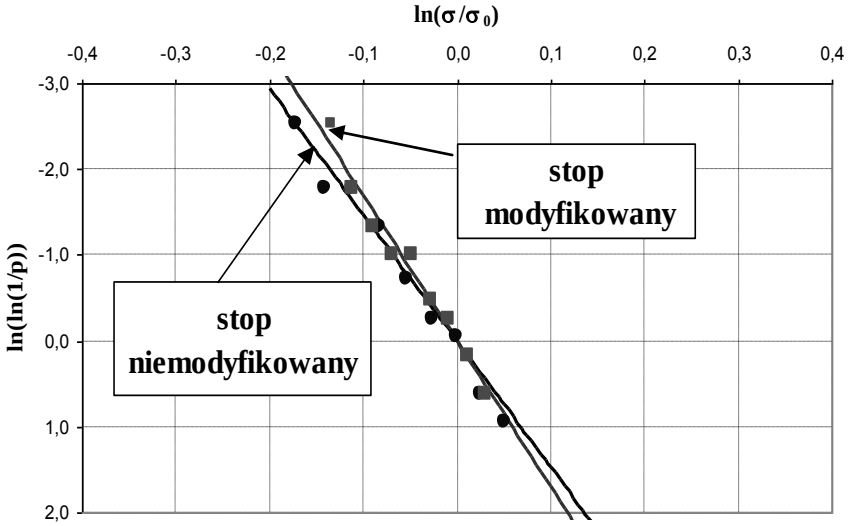
Fig.1. The change probability p on the tensile strength σ dependence for Si-Al alloys.

Wykorzystując metody estymacji nieliniowej oparte o model własny
ln(ln(1/p)=m*ln(σ/190,1) –dla siluminu w stanie po odlaniu oraz
ln(ln(1/p)=m*ln(σ/257,2) –dla siluminu modyfikowanego, dokonano ponownego oszacowania wartości modułu Weibulla. Wyniki te przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Oszacowanie Modułu Weibulla wg estymacji nieliniowej.
Table 2. Evaluation on the Weibulus modulus for non linear estimation.

Metoda estymacji quasi-Newtona:			
Model: ln(ln1/p)=m*ln(σ/σ_0)			
Silumin w stanie po odlaniu		Silumin po modyfikacji fosforem	
Parametr	**14,691**	**Parametr**	**16,983**
Błąd estymacji	0,642444	Błąd estymacji	0,7287301
t(8)	22,711789	t(8)	23,443232
Poziom p	1,527E-08	Poziom p	1,165E-08

Powyższe zależności przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Zależność prawdopodobieństwa przetrwania od naprężenia po dopasowaniu metodą korelacji nieliniowej wg modelu: $\ln(\ln 1/p) = m*\ln(\sigma/\sigma_0)$.

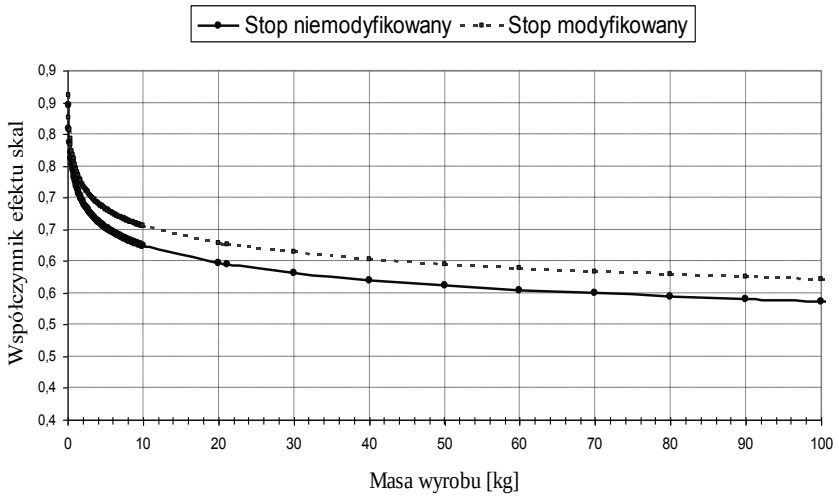
Fig.2. The statistical probability on the tensile strength dependence for method non linear estimation by formula: $\ln(\ln 1/p) = m*\ln(\sigma/\sigma_0)$.

4. PODSUMOWANIE

W badaniach rozwiązano problem efektu skali (ES) [7] na prawdopodobieństwo przetrwania. Moduł Weibulla dla badanego stopu po modyfikacji fosforem istotnie wzrasta w stosunku do tegoż stopu niemodyfikowanego; wzrasta także istotnie wartość średnia naprężenia σ_0 z 190,1 MPa do wartości 257,2 MPa.

Parametr „m”, który wiąże się z rozrzutem statystycznym wytrzymałości w obiekcie rzeczywistym może posłużyć oszacowaniu wytrzymałości elementów o większych niż próbka gabarytach, co przestawiono na rysunku 3. Tak na przykład element 10^3 razy większy od badanej próbki dla przypadku stopu niemodyfikowanego będzie się charakteryzował wytrzymałością niższą, o 40,6%, czyli σ elementu $=0{,}59\sigma$ próbki. W wypadku stopu po modyfikacji spadek wytrzymałości będzie równy 37,4%, tzn. że σ elementu $=0{,}62\sigma$ próbki.

Powyższe oszacowania świadczą o znacznym wzroście niezawodności tworzywa modyfikowanego w stosunku do niemodyfikowanego, jak i istotnym wzroście jego wytrzymałości.



Rys.3. Zależność współczynnika efektu skali w funkcji masy wyrobu rzeczywistego.
Fig.3. The relationship scale effect coefficient dependence on the mass the real manufacture.

LITERATURA

[1] Z. Poniewierski: *Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów*. Warszawa WNT (1989).

[2] S. Pietrowski: *Siluminy tłokowe, Monografia*. Krzepnięcie Metali i Stopów PAN, Komisja Odlewnictwa, z. 29, (1997).

[3] M. F. Ashby, Dawid R.H. Jones: *Materiały Inżynierskie cz.2, Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, (1996).

[4] F. Clegg: *Po prostu statystyka*. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, (1994).

[5] J. Greń: *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*. PWN, Warszawa, (1982).

[6] T. Chester, R.H. Alden: *Excel 97. Od podstaw do mistrzostwa*. Komputerowa Oficyna Wydawnicza HELP, Warszawa, (1997).

[7] A. Bełzowski: *Metoda oceny wytrzymałości długotrwałej kompozytów polimerowych*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Kompozyty, nr1 (2001).

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PROCESS ON THE RELIABILITY OF AlSi17Cu3Mg ALLOY CASTING AS CONSTRUCTION MATERIAL

SUMMARY

From the refined liquid AlSi17Cu3Mg alloy where poured into the steel mould two groups of samples for strength tests. One of it present an statistic population of cast hypereutectic silumin without previous inoculation, and the second one –hypereutectic silumin modified by phosphorus inoculate. The reason of comparative investigations was determination of Weibulls modulus on the base of strength tests. The influence of technological process on the reliability index of investigated alloy was found.

Recenzował: Prof. Stanisław Pietrowski