ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОНСТАНТИТЕ В ЗАВИСИМОСТТА НА ХОЛ–ПЕТЧ ЗА AlSi7Mg СПЛАВ ЧРЕЗ УЛТРАЗВУКОВИ ИЗМЕРВАНИЯ

ГЕОРГИ ДОБРЕВ^{1*} и АЛЕКСАНДЪР ПОПОВ²

¹ *Институт по металознание, съоръжения и технологии
с Център по хидро- и аеродинамика „Акад. Ангел Балевски“,
Българска академия на науките,
бул. Шипченски проход № 67, 1574 София, България,
e-mails: dobrevbg@mail.bg*

² *Институт по механика, Българска академия на науките,
ул. Акад. Георги Бончев, Бл. 4, 1113 София, България,
e-mail: alporov@abv.bg*

Резюме. В настоящата статия е определена границата на провлачване на алуминиево-силициева сплав AlSi7Mg чрез зависимостта на Хол–Петч. Изведени са зависимости за определяне на константата на вътрешно триене в зърната, константата на Петч и средния размер на зърната в зависимостта на Хол–Петч за алуминиево-силициева сплав AlSi7Mg чрез измерване на скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни. Определянето на границата на провлачване без разрушаване на изпитвания образец представлява интерес за практиката.

Ключови думи: зависимост на Хол–Петч, алуминиево-силициева сплав AlSi7Mg , ултразвукови вълни.

1. УВОД

Изследвана е алуминиево-силициева сплав AlSi7Mg [1]. Възможността за определяне на границата на провлачване на AlSi7Mg сплав, без разрушаване на изпитвания образец, представлява интерес за практиката. Тази задача може да се реши с методите на регресионния анализ, като се търси зависимост за границата на провлачване чрез ултразвукови измервания.

В настоящата статия е използвана полумемпиричната детерминистична зависимост на Хол–Петч за определяне границата на провлачване на AlSi7Mg сплав [2]. За целта е необходимо да се определят константата на вътрешно триене в зърната σ_0 , константата на Петч K_y и средният размер

* Corresponding author.

DOI: 10.7546/EngSci.LVI.19.01.03

на зърната $\overline{D}$ в тази зависимост чрез ултразвукови измервания на AlSi7Mg сплав [3].

2. ЗАВИСИМОСТ НА ХОЛ–ПЕТЧ

През 50-те години на миналия век в материалознанието е получена зависимостта на Хол–Петч. Многочислените експерименти, публикувани в литературата, за нисковъглеродни стомани със среден размер на зърната $\overline{D} \sim (10 \div 100) [\mu\text{m}]$ показват много добри резултати [2]. В статия [4], публикувана в Енциклопедия за алуминиеви сплави, е дадено, че зависимостта може да се използва и при алуминиеви сплави. Зависимостта на Хол–Петч, за разглеждания случай на алуминиево-силициева сплав AlSi7Mg, има вида:

$$\sigma_S = \sigma_0 + K_y (\overline{D})^{-1/2}, \quad (1)$$

където σ_S е границата на провлачване, σ_0 – константата на вътрешно триене в зърната и K_y – константата на Петч.

За алуминиеви сплави са получени зависимостите [5]:

$$\sigma_0 \approx \frac{4}{3} \frac{G}{1 - \nu}, \quad (2)$$

$$K_y \approx \frac{1}{4} \frac{G}{\sqrt{1 - \nu}}, \quad (3)$$

където

$$G = \rho V_T^2, \quad \nu = \frac{0,5 - (V_T/V_L)^2}{1 - (V_T/V_L)^2}, \quad [3],$$

V_L и V_T са скоростите на разпространение, съответно, на надлъжните и напречните ултразвукови вълни, $\rho \approx 2700 [\text{kg/m}^3]$ е плътността на материала.

Изведена е зависимост за коефициента на затихване α_L от средния диаметър на зърната $\overline{D}$, в поликристални материали, и скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни V_L и V_T $[\text{mm}/\mu\text{s}]$ [6]:

$$\alpha_L = \frac{8\pi^3}{375} \frac{(M_{FactA}^{Al})^2}{\rho^2} f^4 \left[\frac{4\pi}{3} \left(\frac{\overline{D}}{2} \right)^3 \right] \left(\frac{1}{V_L^3} \right) \left(\frac{2}{V_L^5} + \frac{3}{V_T^5} \right), \quad (4)$$

където α_L е коефициентът на затихване при разпространение на ултразвукови вълни, $M_{Fact.A.}^{AL}$ е факторът на анизотропия – тази величина е различна от коефициента на анизотропия $M_{Coe.f.A.}^{AL}$, f [μHz] е честотата на ултразвуковите вълни. Отчитайки фактора $M_{Fact.A.}^{AL}$ и коефициента $M_{Coe.f.A.}^{AL}$ на анизотропия [7], за алуминиеви сплави е получена зависимостта $M_{Fact.A.}^{AL} \approx 0,33\rho V_T^2$. Зависимостта (4) е правата задача – определяне на коефициента на затихване α_L при зададена честота на ултразвуковите вълни f и измерване на средния диаметър на зърната $\overline{D}$, както и на скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни V_L и V_T . След провеждане на необходимите преобразувания на зависимостта (4), е получено уравнението за средния диаметър на зърната $\overline{D}$ [μm]:

$$W(V_L; V_T) (\overline{D})^3 - k (\alpha_L / f^4) = 0, \quad (5)$$

където

$$W(V_L; V_T) = \left(\frac{V_T^4}{V_L^3} \right) \left(\frac{2}{V_L^5} + \frac{3}{V_T^5} \right),$$

α_L [Nr/m] е коефициентът на затихване при разпространение на ултразвукови вълни в алуминиеви сплави, $k = 3 \times 10^6$ е коефициентът, отчитащ различните дименсии в уравнение (5). Това е обратната задача – определяне на средния диаметър на зърната $\overline{D}$ [μm] чрез измерване на коефициента на затихване α_L [Nr/m] при зададена честота $f = 2,5$ [μHz] и скорости на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни V_L и V_T [mm/μs].

3. УЛТРАЗВУКОВО ИЗПИТВАНЕ

Използвани са методите за ултразвуково изпитване „Импулс-Ехо“ и „Съчленена схема“, съответно, при двустранен и едностранен достъп до обекта на изпитване, показани на *фиг. 1* и *2* и описани в [3].

ϑ_{1a} е ъгълът на въвеждане на ултразвуковите вълни в тествания образец, $2W$ – разстоянието между осезателите с променлив ъгъл, $V^{(1)} = 2,6$ [mm/μs] – скоростта на ултразвуковата вълна в плексигласовия протектор на осезателите, B [mm] – дебелина на тествания образец, t_T и V_T – съответно времето и скоростта за разпространение на напречната ултразвукова вълна в образца.

Фиг. 1. Двустранен достъп до обекта на изпитване:
 (a) нормален осезател с пиезо елемент с X-срез;
 (b) нормален осезател с пиезо елемент с Y-срез

Fig. 1. Two-sided access to the test object:
 (a) normal sensor with piezo element with X-cut;
 (b) normal sensor with piezo element with Y-cut

Фиг. 2. Едностранен достъп до обекта на изпитване
Fig. 2. One-sided access to the test object

При едностранен достъп до обекта на изпитване, законът на Снелиус, при $\vartheta_{1a} = 45^\circ$, е представен във вида [3]:

$$\frac{V_T^2}{\sqrt{2V_1^2 - V_T^2}} - \frac{W}{t_T} = 0. \quad (6)$$

4. ЕКСПЕРИМЕНТ

За образец от AlSi7Mg сплав с рамери $30 \times 30 \times 200$ mm са определени разстоянието между осезателите $W \sim (150 \pm 0,01)$ [mm] и времето за разпространение на ултразвуковите вълни $t_T \sim (24,47 \pm 0,01)$ [μ s].

Използвани са цифров ултразвуков дефектоскоп SITESCAN 150 S, два ъглови осезателя с променлив ъгъл и пиезо елемент с X-срез, както и цифров шублер с точност $(\pm 0,01)$ и удължени рамена за вътрешно измерване на дебелина TESA.

Скоростта на разпространение на напречните ултразвукови вълни V_T [mm/ μ s] е определена от уравнение (5) по метода на бисекциите, реализиран в програма ZEROIN [8]. Използван е on-line компилатор C++ за ZEROIN. Резултатите от решенията на уравнение (5) са дадени в табл. 1.

TABLE 1

Интервали на търсене на корените на уравнение (5)	Изчислени стойности за V_T [mm/ μ s]
(0; 3) [mm/ μ s] и (4; 6) [mm/ μ s]	$V_T^{(1)} \in C$; $V_T^{(3)} \in C$; $V_T^{(4)} \in C$
(3; 4) [mm/ μ s]	$V_T^{(2)} = 3,249 \pm 0,015 \in R$

Броят на итерациите е ~ 117 . Времето за работа на програмата е $\sim 5 \div 6$ секунди. Решенията за скоростта на разпространение на напречните ултразвукови вълни $V_T^{(1)}$; $V_T^{(3)}$; $V_T^{(4)}$ са комплексни корени, а решението за $V_T^{(2)}$ [mm/ μ s] е реален корен, който представлява търсеното решение. При референтна стойност $V_T = 3,130$ [mm/ μ s], грешката при определяне на величината $V_T^{(2)}$ [mm/ μ s] е $\sim 3,8\%$.

Определена е скоростта на разпространение на надлъжните ултразвукови вълни V_L посредством зависимостта $\frac{V_L^2}{V_T^2} = \frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}$. За AlSi7Mg сплав, отношението на Поасон ν се изменя в тесен интервал и може да се приеме средна стойност от $\nu \approx 0,32$ [1]. Следователно $V_L \approx 1,944^* V_T$.

5. РЕЗУЛТАТИ

Определени са скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни V_L и V_T [mm/ μ s], както и коефициентът на затихване α_L [Nr/mm] в алуминиева сплав AlSi7Mg. Резултатите са дадени в табл. 2.

TABLE 2

Оценки	Точност на оценките
$V_T = 3,25 \text{ [mm}/\mu\text{s]}$	$(\pm 0,015) \text{ [mm}/\mu\text{s]}$
$V_L = 6,31 \text{ [mm}/\mu\text{s]}$	$(\pm 0,030) \text{ [mm}/\mu\text{s]}$
$\alpha_L \approx (4 \div 5) \times 10^{-3} \text{ [Nr/mm]}$	$(\pm 0,050) \text{ [Nr/mm]}$

Пример: Определен е средният размер на зърната $\overline{D}$ [μm] в AlSi7Mg сплав, чрез ултразвуково измерване на скоростта на разпространение на надлъжните и напречните вълни, както и на коефициента на затихване V_L ; V_T ; α_L , без разрушаване на изпитвания образец. Резултатите са дадени в табл. 3.

TABLE 3

Толерантен интервал при вероятност 95%	Медианна оценка
$\overline{D} \in (54,4 \div 66,5) \text{ [}\mu\text{m]}$	$\overline{D} \sim 60,5 \text{ [}\mu\text{m]}$

Определени са също константата на вътрешно триене в зърната σ_0 , константата на Петч K_y , както и границата на провлачване σ_S за AlSi7Mg сплав. Резултатите са дадени в табл. 4.

TABLE 4

Толерантни интервали при вероятност 95%	Медианни оценки	Референтни стойности [1], [2]
$\sigma_0 \in (46,8 \div 57,2) \text{ [MPa]}$	$\sigma_0 \approx 52,0 \text{ [MPa]}$	$\sigma_0 \approx 50,0 \text{ [MPa]}$
$K_y \in (7,4 \div 9,1) \text{ [MPa} \times \text{mm}^{1/2}]$	$K_y \approx 8,2 \text{ [MPa} \times \text{mm}^{1/2}]$	$K_y \approx 8,5 \text{ [MPa} \times \text{mm}^{1/2}]$
$\sigma_S \in (85,1 \div 103,9) \text{ [MPa]}$	$\sigma_S \approx 85,3 \text{ [MPa]}$	$\sigma_S \in (70 \div 100) \text{ [MPa]}$

Относителната грешка при определяне на константите σ_0 и K_y е, съответно, 4% и 3,5% при референтна средна стойност на границата на провлачване $\sigma_S = 85 \text{ [MPa]}$. Това е много добър резултат, като се вземе предвид, че стойностите на константите σ_0 , K_y и границата на провлачване σ_S са определени косвено.

6. МЕХАНИКА НА РАЗРУШАВАНЕ

Основна характеристика в механиката на разрушаване, при плоско деформирано състояние, е коефициентът на интензивност на напрежението K_{Ic} (пукнатинуостойчивост). Получена е зависимостта за K_{Ic} [9]:

$$\left(\frac{K_{Ic}^A}{\sigma_S}\right)^2 \approx \xi(\overline{D}) \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \psi, \quad (7)$$

където

$$\xi(\overline{D}) = \frac{\sqrt{3}}{3} \overline{D} \left[\sigma_0 + K_y (\overline{D})^{-1/2} \right]^{-1},$$

константите σ_0 и K_y са определени от зависимостите (2) и (3), а $\overline{D}$ – от (4) чрез измерване на скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни, както и на коефициента на затихване V_L ; V_T ; α_L ,

$$\frac{E}{\rho V_T^2} = \left[\frac{3 - 4(V_T/V_L)^2}{1 - (V_T/V_L)^2} \right],$$

$$\nu = \frac{0,5 - (V_T/V_L)^2}{1 - (V_T/V_L)^2},$$

за AlSi7Mg сплав $\psi = mV_L + b$, където $m = 0,1016$; $b = 0,0038$, връзката между две случайни величини се дава с корелационен коефициент, т.е. $R \sim 99,95\%$.

Пример: Определени са стойностите на отношението между коефициента на интензивност на напрежението и границата на провлачване $(K_{Ic}/\sigma_{YS})^2$ чрез измерване на скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни, както и на коефициента на затихване V_L ; V_T ; α_L за AlSi7Mg сплав, без разрушаване на изпитвания образец. Резултатите са дадени в табл. 5.

TABLE 5

Толерантни интервали при вероятност 95%	Медианни оценки	Референтни стойности [10, 11]
$(K_{Ic}/\sigma_{YS})^2 = (2,6 \div 3,2)$ [mm]	$(K_{Ic}/\sigma_{YS})^2 = 2,95$ [mm]	$(K_{Ic}/\sigma_{YS})^2 = 3,1 \div 3,3$ [mm]
$K_{Ic} \in (26,1 \div 31,9)$ [MPa $\times$ m ^{1/2}]	$K_{Ic} = 29,0$ [MPa $\times$ m ^{1/2}]	$K_{Ic} = 27 \div 33$ [MPa $\times$ m ^{1/2}]

При средни референтни стойности на отношението $(K_{Ic}/\sigma_{YS})^2$, грешката при определяне на стойността на отношението е $\Delta \approx 5 \div 8\%$, а грешката за стойността на коефициента на интензивност на напрежението K_{Ic} е $\Delta \approx 3 \div 4\%$.

Следователно, зависимостта за определяне на коефициента на интензивност на напрежението K_{Ic} , чрез ултразвуково измерване на V_L ; V_T ; α_L за AlSi7Mg сплав, е:

$$K_{Ic} = \chi(V_L; V_T; \alpha_L) \cdot \sigma_S(V_L; V_T; \alpha_L), \quad (8)$$

където

$$\chi(V_L; V_T; \alpha_L) = \left[\xi(\bar{D}(V_L; V_T; \alpha_L)) \cdot \frac{E(V_L; V_T)}{1 - \nu^2(V_L; V_T)} \cdot \psi(V_L; V_T) \right]^{1/2},$$

$$\sigma_S \equiv \sigma_S(V_L; V_T; \alpha_L).$$

Други характеристики в механиката на разрушаване са критичната стойност на J -интеграл J_{Ic} и критичното разкритие във върха на пукнатината δ_{Ic} [11, 12]. При определени граница на провлачване $\sigma_S \equiv \sigma_S(V_L; V_T; \alpha_L)$ и коефициент на интензивност на напрежението K_{Ic} , са получени J_{Ic} и δ_{Ic} . В механиката на разрушаване са изведени зависимостите:

за плоско деформирано състояние

$$J_{Ic} = \frac{1 - \nu^2}{E} K_{Ic}^2, \quad (9)$$

$$\delta_{Ic} \approx \frac{K_{Ic}^2}{2 \cdot \sigma_S \cdot E}, \quad (10)$$

за плоско напрегнато състояние

$$J_{Ic} = \frac{1}{E} K_{Ic}^2, \quad (11)$$

$$\delta_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_S \cdot E}, \quad (12)$$

където

$$\nu = \nu(V_L; V_T), \quad E = E(V_L; V_T),$$

$$\sigma_S \equiv \sigma_S(V_L; V_T; \alpha_L), \quad K_{Ic} = K_{Ic}(V_L; V_T; \alpha_L).$$

Пример: Определени са стойностите на J_{Ic} и δ_{Ic} при плоско деформирано състояние за AlSi7Mg сплав, чрез измерване на скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни, както и на коефициента на затихване V_L ; V_T ; α_L , без разрушаване на изпитвания образец. Резултатите са дадени в *табл. 6*.

TABLE 6

Толерантни интервали при вероятност 95%	Медианни оценки
$J_{Ic} \in (10,9 \div 13,4) \text{ [kN}^{m-1}\text{]}$	$J_{Ic} = 12,15 \text{ [kN}^{m-1}\text{]}$
$\delta_{Ic} \in (2,46 \div 3,01) \text{ [\mu m]}$	$\delta_{Ic} = 2,73 \text{ [\mu m]}$

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изведени са зависимости за определяне на константата на вътрешно триене в зърната σ_0 , константата на Петч K_y , както и на средния размер на зърната $\overline{D}$ в зависимостта на Хол-Петч за AlSi7Mg сплав. Показана е възможността за определяне на $\overline{D}$; σ_0 ; K_y ; σ_S ; ψ ; K_{Ic} (за плоско деформирано състояние); J_{Ic} и δ_{Ic} чрез измерване на скоростите на разпространение на надлъжните и напречните ултразвукови вълни, както и на коефициента на затихване V_L ; V_T ; α_L за AlSi7Mg сплав, без разрушаване на изпитвания образец. За получените стойности са дадени точността на измерванията и статистиките – относителна грешка на измерванията, толерантни интервали при вероятност 95% и медианни оценки за определените стойности.

REFERENCES

- [1] BDS EN 1706:2010, Aluminum and Aluminum Alloys, Castings, Chemical Composition and Mechanical Properties (in Bulgarian).
- [2] V. I. TREFILOV *et al.*, *Strain Hardening and Destruction of Polycrystalline Metals*, Naukova Dumka, Kiev (1987) (in Russian).
- [3] ASTM E 494:2015 Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.
- [4] R. W. ARMSTRONG, *Hall-Petch Relationship: Use in Characterizing Properties of Aluminum and Aluminum Alloys*, Encyclopedia of Aluminum Alloys (2016).
- [5] AL. POPOV AND G. DOBREV, Relations of mechanical properties for the microstructure of Al+3.5%Mg Alloys, *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences* (2018) (in print).
- [6] I. M. LIFSHITS AND G. D. PARHOMOVSKII, On the Theory of the Propagation of Ultrasonic Waves in Semi Crystals, *Journal of Experimental and Theoretical Physics* (1950) **20** (2) 175–182 (in Russian).
- [7] P. G. MINKLYAEV AND YA. B. FRIDMAN, *Anisotropy Mechanical Properties Metals*, Metallurgy, Moscow (1986) (in Russian).
- [8] G. E. FORSYTHE, M. MALCOLM AND C. MOLER, *Computer Methods for Mathematical Computations*, Prentice-Hall Inc., New York (1977).

- [9] A. E. ANDREYKIV, *Spatial Problems in Crack Theory*, Naukova Dumka, Kiev (1982) (in Russian).
- [10] I. M. KERNSHTEYN *et al.*, *Basics of Experimental Fracture Mechanics*, Lomonosov Moscow State University, Moscow (1989) (in Russian).
- [11] V. V. SELIVANOV, *Mechanics of Destruction of a Deformable Body*, 2, Bauman Moscow State Technical University, Moscow (2006) (in Russian).
- [12] YU. G. MATVIENKO, *Models and Criteria for Fracture Mechanics*, Fizmatlit, Moscow (2006) (in Russian).

EVALUATION OF CONSTANTS IN HALL–PETCH RELATIONSHIP FOR AlSi7Mg ALLOY BY ULTRASONIC MEASUREMENTS

GEORGY DOBREV^{1*} AND ALEXANDER POPOV²

¹*Institute of Metal Science, Equipment and Technologies
with Hydro-and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”,
Bulgarian Academy of Sciences,
67, Shipchenski Prohod Blvd, 1574 Sofia, Bulgaria,
e-mail: dobrevbg@mail.bg*

²*Institute of Mechanics, Bulgarian Academy of Sciences,
Acad. G. Bonchev St., Bl. 4, 1113 Sofia, Bulgaria,
e-mail: alpopov@abv.bg*

Abstract. In the present paper the yield strength of aluminum-silicon alloy AlSi7Mg is determined by means of Hall–Petch relationship. Dependencies of determining the internal friction constant in the grains, the Petch constant, and the average grain size in Hall-Petch relationship for AlSi7Mg alloy are obtained by ultrasonic measurements. The non-destructive evaluation of the yield strength for the tested specimen is of interest to the practice.

Keywords: AlSi7Mg alloy, Hall–Petch relationship, ultrasonic measurements.

Received February 15, 2019