

БЕЗРАЗРУШИТЕЛНА ОЦЕНКА НА МОДУЛА НА ЮНГ ЗА ЧУГУНОВИ ОТЛИВКИ

NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF YOUNG'S MODULUS FOR CAST IRON

НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ОЦЕНКА МОДУЛА ЮНГА ДЛЯ ЧУГУНУНЫХ ОТЛИВОК

Ass.Prof. Ph.D. Popov AI.
Institute of Mechanics – BAS, Sofia, Bulgaria

Abstract: In this paper the algorithm for non-destructive evaluation (NDE) of Young's modulus – E is design. For this purpose the velocities of propagation of longitudinal and transversal waves are measuring. A Determine – Stochastic dualism approach is used.

KEY WORDS: NDE, YOUNG'S MODULUS, MEASURING OF VELOCITIES OF PROPAGATION OF LONGITUDINAL AND TRANSVERSAL WAVES

1. Въведение

Определянето на модула на Юнг за отливки е често срещана задача при окачествяването им. Класическите подходи в този случай са:

- *Детерминистичен:* използват се зависимости от механиката [1,2].

- *Стохастичен:* използват се регресионни модели [3]. За подобряване качеството на зависимостите, в настоящата статия, се предлага

Детерминистично - Стохастичен дуализъм, който се състои в построяване се регресионни модели с отчитане на зависимости от механиката.

Тези модели се използват за безразрушително оценяване на модул на Юнг за чугунени отливки.

2. Модул на Юнг – E

1.1. Зависимости от теория на еластичността

В теория на еластичността [1] са известни зависимостите

$$E_D = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho V_L^2 \quad (1)$$

$$E_D = 2(1+\nu)\rho V_T^2 \quad (2)$$

където ρ - плътност (тази величина се приема за константа на материала), V_L и V_T са скорости на разпространение съответно на напречни и надлъжни ултразвукови вълни; ν - коефициент на Поасон

$$\nu = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{V_L}{V_T} \right)^2 - 1 \right] / \left[\left(\frac{V_L}{V_T} \right)^2 - 1 \right]$$

Модулът на Юнг се нарича динамичен (E_D), тъй като той се оценява чрез V_L и V_T .

След преобразуване на зависимости (1), (2) за модула на Юнг се получава зависимост само от V_L и V_T

$$E_D = \left(\frac{3 - 4(V_T/V_L)^2}{1 - (V_T/V_L)^2} \right) \rho V_T^2 \quad (3)$$

1.2. Модифицирана зависимост

Коеф. на Поасон - ν се изменя в малък интервал.

Въвежда се означение $M = \rho \frac{1+\nu}{1-\nu} (1-2\nu)$ и

зависимост (1) се свежда до

$$E_D = M V_L^2 \quad (4)$$

3. Технически средства

За измерване на скоростите на разпространение на напречни и надлъжни ултразвукови вълни се използват:

- Цифров ултразвуков дефектоскоп – SITESCAN 150S (ф-ма Sonatest - Англия).
- Нормални осезатели (2 МНз и диаметър 12 мм) с пиезопластини с X-срез и Y-срез.
- Контролен блок №1 (БДС EN 12223)

4. Измерване на скорости

Методите, които се използват за измерване на V_L и V_T , са изложени в [5].

4.1. За надлъжни вълни - V_L

Нормален осезател с пиезопластина с X-срез се калибрира с КБ №1.

Измерват се дебелините съответно за еталон и образец (с механичен инструмент с точност 0.01 mm) съответно l_E , l_X .

Отчитат се показания n_E , n_X от дефектоскопа съответно за еталон и образец.

Скоростта на надлъжни вълни V_L , в mm/ μ s, се определя от

$$V_L = V_{EL} \cdot \left(\frac{n_E}{l_E} \right) \left(\frac{l_X}{g \cdot n_X} \right) \quad (5)$$

където V_{EL} , в mm/μs, – надлъжна скорост на разпространение на ултразвука в еталон; g – коефициент отчита обхвата R на калибриране ($g = R / 100$).

4.2. За напречни вълни - V_T

Нормален осезател с пиезопластина с Y-срез се калибрира с КБ №1.

В ултразвукония дефектоскоп се преминава в опция: „измерване в μs” и калибрира mm – μs. Измерва се времето на разпространение на напречната вълна в образеца – T_X . Скоростта на напречните вълни V_T , в mm/μs, се определя от

$$V_T = l_X / T_X \quad (6)$$

2.3. Грешки при измерване на скорости

Относителни грешки при измерване на V_L и V_T

$$\frac{\Delta V_L}{V_L} \approx \pm \left(\frac{\Delta l_X}{l_X} + \frac{\Delta n_X}{g \cdot n_X} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\Delta V_T}{V_T} \approx \left(\frac{\Delta l_X}{l_X} + \frac{\Delta T_X}{T_X} \right) \quad (8)$$

5. Експериментални резултати

За сферографитен чугун

5.1. Детерминистичен подход

Измерванията на скорости на разпространение на ултразвукови вълни V_L и V_T са дадени в Таблица – 1 и Таблица – 2 съответно

Таблица -1

Марка чугун	V_L , mm/μs min / max	\bar{V}_L , mm/μs	$\left(\frac{\Delta V_L}{V_L} \right)$, %
1	2	3	4
35	5.20 / 5.60	5.40	0.56
45	5.10 / 5.30	5.20	0.58
50	5.10 / 5.30	5.20	0.58
60	5.10 / 5.70	5.40	0.56
70	5.10 / 5.70	5.40	0.56

Таблица -2

Марка чугун	V_T , mm/μs min / ma	\bar{V}_T , mm/μs	$\left(\frac{\Delta V_T}{V_T} \right)$, %
1	5	6	7
35	2.491 / 2.682	2.587	0.52
45	2.443 / 2.539	2.491	0.60
50	2.443 / 2.539	2.491	0.61
60	2.443 / 2.730	2.587	0.57
70	2.443 / 2.730	2.587	0.57

В Таблица -3 са дадени численни стойности за M по усреднени данни от Таблица -1.

Забележка: Тъй като $1 \text{ kg/m}^3 = 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, то

$$\bar{M} = 6.1 \text{ g/cm}^3. \text{ В литературата } 5.8 \leq M \leq 5.9 \text{ g/cm}^3$$

Таблица - 3

Марка чугун	ρ , kg/m ³	V	M, kg/m ³
1	2	3	4
35	7270	0.24	6168.03
45	7280	0.24	6176.51
50	7310	0.25	6091.67
60	7395	0.26	6043.91
70	7415	0.28	5800.18
Ср. ст.	-	-	6056.06

Численни стойности за E_D оценени по (4) са дадени в Таблица – 4 и оценени по (3) – в

Таблица -5 (\bar{E}_S са взети от [4])

Таблица – 4

Марка чугун	E_D , 10 ¹¹ Pa min / max	\bar{E}_D , 10 ¹¹ Pa	\bar{E}_S , 10 ¹¹ Pa	ΔE , %
1	2	4	6	7
35	1.67 / 1.93	1.80	1.67	+7.8
45	1.61 / 1.73	1.67	1.70	-1.8
50	1.58 / 1.71	1.64	-	-
60	1.57 / 1.96	1.76	1.77	-5.6
70	1.51 / 1.88	1.69	1.73	-2.3
	-	-	-	2÷ 8

Таблица – 5

Марка чугун	E_D , 10 ¹¹ Pa min / max	\bar{E}_D , 10 ¹¹ Pa	\bar{E}_S , 10 ¹¹ Pa	ΔE , %
1	3	5	6	8
35	1.64 / 1.90	1.77	1.67	+ 5.9
45	1.58 / 1.71	1.64	1.70	- 3.5
50	1.58 / 1.71	1.64	-	-
60	1.58 / 1.97	1.77	1.77	0
70	1.58 / 1.97	1.77	1.73	+ 2.3
	-	-	-	0÷ 6

5.2. Зависимост $E_D - E_S$

От експерименталните данни представени в Таблица – 4 и Таблица – 5 следва $0 \leq \Delta E \leq 8\%$,

т.е. $\max \beta_l \sim 1.08$ и тогава зависимостта между E_D и E_S е

$$E_D = \beta_l E_S \quad (9)$$

където $1.00 \leq \beta_l \leq 1.08$

5.3. Безразрушително оценяване на степен на сфероидизация на графита

5.3.1. Детерминистичен подход

(Разрушителен метод)

В количествената металография [7] се въвежда „двумерен фактор на формата” (Φ) на

графитните включения $\Phi = 3.545 \sqrt{F/P}$, където F и P са съответно площ и периметър на включението графит. Степента на сфероизация на графита (ССГ) се определя по

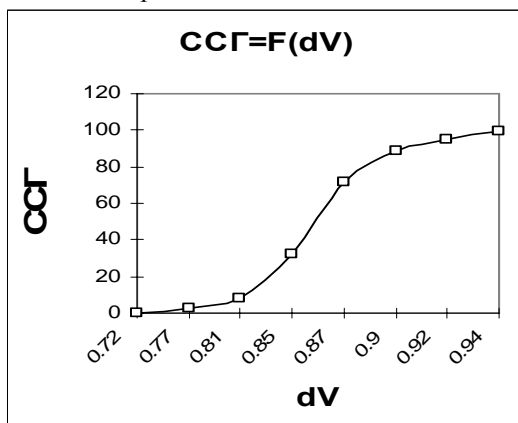
$$ССГ = \left[\frac{\left(\sum_{k=1}^{k=n} \Phi_k N_k \right)}{\left(\sum_{k=1}^{k=n} N_k \right)} \right] 100\%, \quad (10)$$

където κ – ти сектор на зрителното поле $\varnothing 100$, N_α – брой на графитните включения в к-то зрително поле.

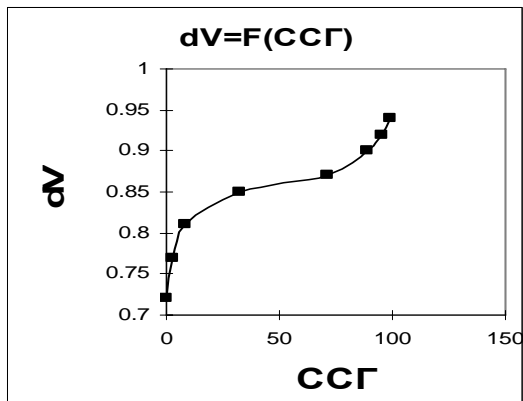
5.3.2. Стохастичен подход (безразрушителен метод)

Този подход се основава на зависимост на ССГ от скоростта на разпространение на ултразвуковите вълни - V_L . В [3] е дадена зависимост $ССГ=F(dV)$, $dV \equiv V_L / 5850$. Тя е некоректна.

Фиг.1. Некоректна зависимост



Фиг.2. Физически коректна зависимост



Зависимостта $dV(ССГ)$, във фиг.2, се апроксимирана с $dV = \beta_0 (ССГ)^{\beta_1} \exp [\beta_2(ССГ)]$, където коефициентите са определени по МНК за нелинейна регресия $\beta_0 = 0.7462$, $\beta_1 = 0.0258$, $\beta_2 = 0.0012$, $R = 0.95$. За безразрушително определяне на ССГ се използва трансцедентното уравнение

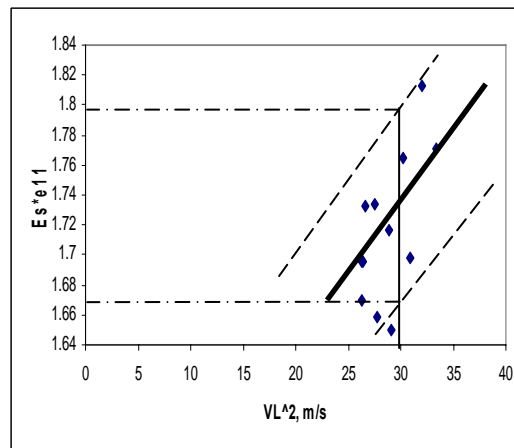
$$\beta_0 (ССГ)^{\beta_1} \exp [\beta_2(ССГ)] - dV = 0 \quad (12)$$

Решението (ССГ) на горното трансцедентно уравнение се получава с HP50g по схемата $HP50g \Rightarrow NUM.SLV \Rightarrow Solve Equation \Rightarrow Eq: \beta_0 (ССГ)^{\beta_1} \exp [\beta_2(ССГ)] - dV = 0$

5.4. Стохастичен подход

Експериментални данни и техния анализ [6]

Фиг.3. Основна зависимост

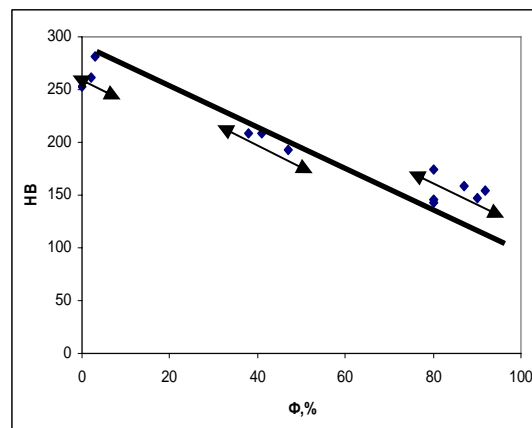


За чугуни марки ВЧ 35 – ВЧ 70

$$\text{Зависимост: } E_S = N + M V_L^2$$

$N=1.359$; $M=0.012$; $R=0.61$; $\Delta E \sim 7.4\%$

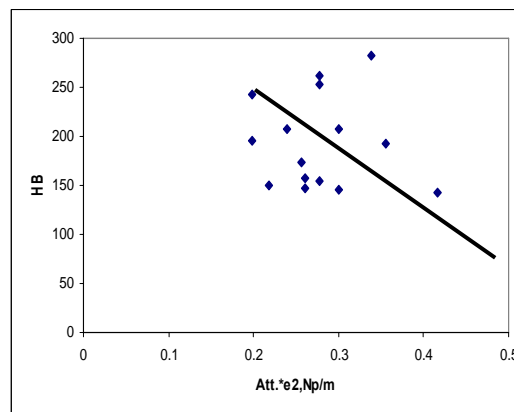
Фиг.4. Допълнителна зависимост



$$\text{Зависимост: } HB = a (\% \Phi) + b$$

A: $\Phi < 30\%$; B: $30\% < \Phi < 50\%$; C: $80\% < \Phi < 95\%$
 $a = -0.737$; $b = 195.219$; $R = -0.96$

Фиг.5. Разделяне по Φ , П



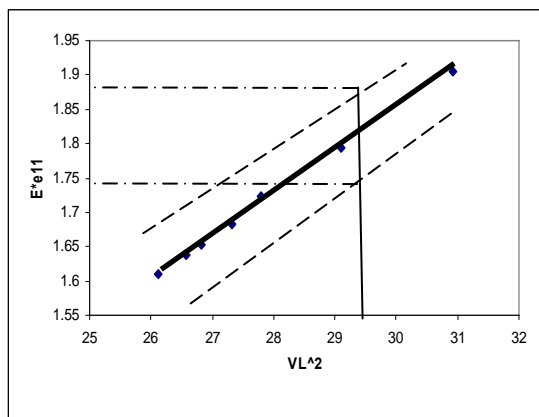
Дискриминираща функция

$$z(HB, Att.) = (Att.) / \max Att. + (HB) / \max HB - 1$$

Ако $z(HB, Att.) < 0$, $\Phi \geq 80\%$, $\Pi \leq 20\%$

Ако $z(HB, Att.) > 0$, $\Phi \leq 40\%$, $\Pi \geq 60\%$

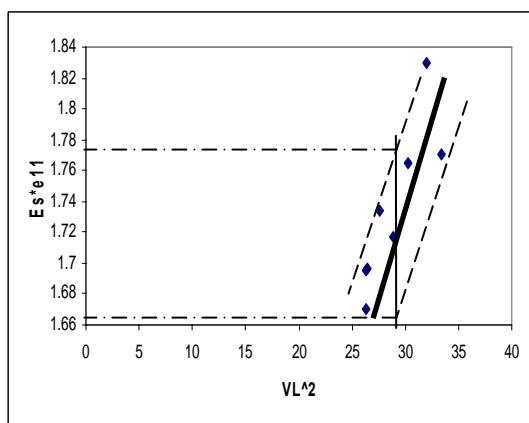
Фиг.6. Локална зависимост за $\Phi \geq 80\%$, $\Pi \leq 20\%$



Структура: $\Phi \geq 80\%$, $\Pi \leq 20\%$

Зависимост: $E_S = M\Phi V_L^2$; $M=6.2$; $R^*=0.99$;
 $\Delta E = \sim 6.6\%$

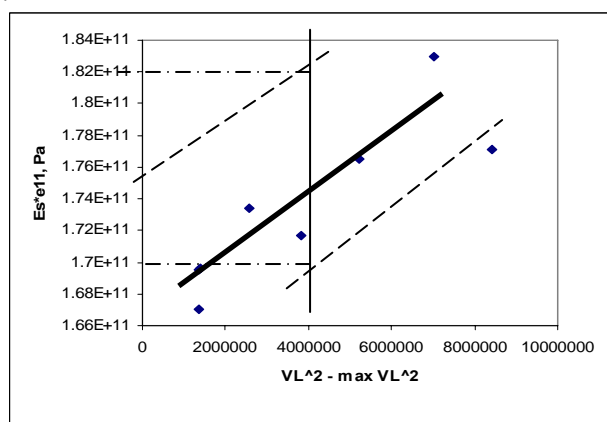
Фиг.7. Локална зависимост за $\Phi \leq 40\%$, $\Pi \geq 60\%$



Структура: $\Phi \leq 40\%$, $\Pi \geq 60\%$

Зависимост: $E_S = N\Pi + M\Pi V_L^2$
 $N\Pi = 1.262$; $M\Pi = 0.016$; $R=0.87$; $\Delta E = \sim 7.1\%$

Фиг.8. Подобряване на зависимостта от Фиг.3



Структура : $\Phi \leq 40\%$, $\Pi \geq 60\%$

Зависимост: $E_S = M\Pi (V_L - \min V_L)^2$
 $M = 1.05$; $R^*=0.87$; $\Delta E = \sim 6.2\%$

6. Заключение

От изложението се вижда, че могат да се направят следните изводи:

- С достатъчна за практиката точност, е възможно безразрушителното оценяване на модул на Юнг ((3), (4), Таблица-4, Таблица-5) чрез измервания на скорости на разпространение на ултразвукови вълни V_L и V_T .
- Използването на зависимост dV (ССГ) дава възможност за безразрушително оценяване на степента на сфероизация на графита (ССГ) чрез измерване на скорост V_L на разпространение на ултразвукови вълни.
- Прилагането на подхода на детерминистично - стохастичния дуализъм довежда до оценки за модула на Юнг, чрез измервания на скорости на разпространение на ултразвукови вълни V_L и V_T , с коефициент на корелация $\sim(0.87-0.99)$, докато при класическия стохастичен подход корелацията е ~ 0.61 .

7. Литература

1. Сокольников Ив., Математическа теория на еластичността, изд. Наука и изкуство, София, 1972.
2. Алешин Н.П., В.Е.Белый и др., Методы акустического контроля металлов, изд. Машиностроение, Москва, 1989.
3. Иванушкин Е.С, Г.С.Белай, Ультразвуковые методы контроля при производстве отливок, изд. Техника, Киев, 1984.
4. Димов Д., Д.Христов, В.Веселинова, З.Занков, Таблицы и формулы по сопротивлению на материалите, изд.Техника, София, 1992.
5. ASTM E 494-92, Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.
6. Болдин М.В., Г.И.Симонова, Ю.Н.Тюрин, Знаковый статистический анализ линейных моделей, Наука-Физматлит, Москва, 1997.
7. Литовка В.И., Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках, Наук.думка, Киев, 1987.