

Възможности на ултразвуковите методи за окачествяване на повърхностни финишни обработки

н.с.І ст. д-р Йонка Петкова Иванова, Институт по Механика-БАН
доц.д-р Тодор Асенов Парталин, СУ”Св.Кл.Охридски”, Факултет по математика и информатика

Анотация: *Работата представлява проучване на възможностите на повърхностни ултразвукови вълни при изследване на финишни обработки на металите. Оценяват се измененията в скоростите и затихването на ултразвуковите вълни в зависимост от вида, качеството и състоянието на повърхностната обработка.*

Ключови думи: *повърхностни финишни обработки, ултразвукови методи, оценяване на грапавост, скорости и затихване на повърхностни ултразвукови вълни*

Увод

Окачествяването на повърхностните обработки на материалите е важна и актуална практическа задача и същевременно задача с научно значение. Грапавостта на повърхнините на детайлите оказва влияние върху експлоатационните им свойства, поради което са разработени и утвърдени стандарти, регламентиращи параметрите за оценка на повърхнините.

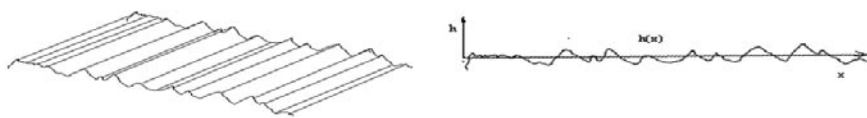
Оценяването на повърхностната грапавост на материалите се осъществява чрез методи, например микроинтерференционни методи, растерни методи, метод на засенчването и методи на опипването, създадени въз основа на пиезоелектрични или магнитни ефекти, като се получава информация за параметрите, които характеризират грапавостта [4,5]. В [4 -11] са дадени изследвания с безконтактни техники, прилагат се акустична емисия, ултразвукови методи на обратно отразен от грапавостта сигнал. Показани са възможностите [4-8] на ултразвуковите методи (с надлъжни и повърхностни вълни), за различаване и окачествяване на грапави повърхности на материали. Изследването на разпространението на повърхностни ултразвукови вълни дават възможност за изграждане на критерии при определяне на качеството на повърхностните и подповърхностните слоеве на материалите. Повърхностните ултразвукови вълни намират приложение за откриване на повърхностни несъвършенства, грапавост, слоестост и др. Поради зависимостта на скоростта на повърхностната вълна от честотата и различни дълбочини на проникване, се очаква различната грапавост да влияе върху параметрите скорости и затихване.[6,7,11,12]

Някои теоретични съображения върху изследването на грапавост

В проучената литература [6-13] липсва единен и обобщаващ модел на грапавост, въз основа на който да се обоснове хипотеза за разпространението на ултразвуковите повърхностни вълни. Поради това в тази работа разпространението и поведението на вълната върху грапава повърхност ще бъде обоснована само частично. Повечето автори [6-8] предполагат строго анизотропна грапавост. Предполага се, че грапавините са резултат от механичната финишна обработка на детайла, като според формата на върха на режещия инструмент се получават бразди с характерен вид [3-5]. Профилът на грапавата повърхност на детайлите се получава чрез профилометри [4,5]. Предвид важноста на характеристиката грапавост са разработени огромно количество профилометри, които се основават на различни физични принципи, явления и методи за регистриране на отклонението на реалната повърхност от идеалната [4-5].

Грапавостта е интегрална характеристика т.е. отнася се за цялата повърхност или поне за площ много по-голяма от единична бразда. Ще приемем, че има основен образуващ елемент на грапавостта като всяка възможна грапавост може да се получи като суперпозиция от градивния елемент с вариращи параметри и големина. Примерният елемент би могъл да представлява полегнала триъгълна призма с дължина L , разположена под различен ъгъл спрямо характерната посока върху повърхността на грапавия детайл. Видът на грапавостта се определя от произхода на грапавостта. Така например грапавостта от корозия е много

по-различна от тази, която е получена в резултат на механична обработка с металорежеща машина. Най-често след обработка се получават бразди с профил, показан на фиг.1.



Фиг. 1. Вид на грапави повърхности

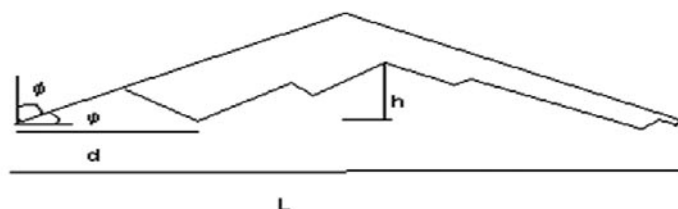
В зависимост от вида на инструмента образуващата има своите характерни елементи (примери на фиг 2).



Фиг. 2. Характерни елементи на грапави повърхности

За да формулираме свой възглед по темата ще обсъдим една от образуващите линии и значението на някои параметри (височина, стъпка, ъгли и пр.[3]) на грапавите повърхности. Ще се опитаме да обосновем подход за оценка на грапавост посредством измерване и анализиране на параметрите на повърхностни ултразвукови вълни (ПУВ). Дълбочината на проникване на ПУВ е от порядъка на дължината на вълната λ (примерно 1.5λ) и това е причината за влиянието на повърхностният релеф върху разпространението им.

Приемаме, че образуващата линия на грапавата повърхност е начупената линия от отсечки, като ъглите да са фиксирани. Очевидно дължината на начупената линия на определена база L е постоянна независимо от линейните параметри (височина h , стъпка d) и зависи само от ъгъла (ϕ или φ). От друга страна ако стъпката d и/или височината h са с характерния размер на градивните частици на материала, то дължината на начупената линия ще бъде равна на L . Изменението на скоростта и затихването на повърхностните вълни от грапавостта ще зависи от отношението на височина h или стъпка d към дължината на вълната λ параметрите (h/λ или d/λ).



Фиг. 3

Отношението (h/λ или d/λ) е крайна величина. За $d/\lambda \gg 1$ и $h/\lambda \gg 1$ скоростта ще бъде $CR=C_0/\sin(\varphi)$, като за малки ъгли φ браздите по скоро ще бъдат препятствие за повърхностните вълни и ще ги отразяват. Ако $1 \gg d/\lambda$ и $1 \gg h/\lambda$ релефът няма да повлияе на скоростта, но ще промени затихването на ПУВ тъй като браздите ще имат характера на разсейватели. Особено интересно е въздействието на релефа върху ПУВ за съизмерими грапавини и дължини на вълната. Това се случва при разпространение на вълните перпендикулярно на браздите, но интерес представлява разпространението им по тези бразди. За големи и малки бразди ($d/\lambda \gg 1$, $h/\lambda \gg 1$, $1 \gg d/\lambda$ и $1 \gg h/\lambda$) влиянието би трябвало да е много малко, но когато проникването е от порядъка на λ е възможно да се очакват ефекти като интерференция, „разливане” на вълната, които от своя страна ще променят затихването на ПУВ и пререзпределят спектъра на ултразвуковия сигнал. При косото преминаване на ПУВ е вероятно ъгълът на вълновия фронт с образуващата на браздите да бъде определящ.

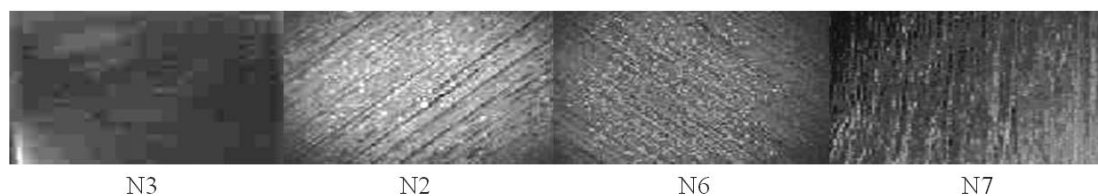
Реално браздите не са с прави склонове и, често нямат остри ръбове, а понякога се наблюдава наъбване на билото на грапавината. Не обсъдихме и случаите на грапавост с точков характер от корозия, ерозия или с друг произход във вид на вдлъбнатини или пъпки. За тях ще отбележим само, че може да се очаква акустичните свойства на повърхността да са изотропни, а скоростта и затихването на ПУВ да зависят от отношението на параметрите, определящи грапавостта към дължината на вълната h/λ или d/λ (d -диаметър на язвата). Със сигурност при подобни изследвания трябва да бъде намерен още поне един параметър, който да определя плътността на параметрите на грапавия профил.

Ако разгледаме едно набраздяване с произволна образуваща естествено е описанието да се направи чрез Фуриерово разложение на образуващата линия в ограничен прозорец по дължината и. В практиката се ползват профилограми с различна дължина на базата. При характерни бразди (фиг. 2) може да се очаква да има общи черти в спектрите, като е възможно те да се регистрират чрез обработка на сигнала (така нар. кепструм), т е. като се потърси зависимост между спектъра на изменението на сигнал от ПУВ и $\text{cepstr}(h(x))$.

Експеримент

В работата се оценяват промените в параметрите на ултразвуковите вълни (напр. скорости и затихване) в зависимост от вида и състоянието на повърхностната обработка на метални образци.

Изследвани са повърхностни обработки, нанесени върху метални шини и плочи с размери 250x50x10 mm. Грапавините върху шините са получени чрез шлайфане с шкурки с различни размери на абразивните частици (№ от 80 до 800) в определен участък от метала. Грапавите повърхности са оценени с измервателен часовник с точност 0.01mm и наблюдавани под микроскоп. Параметърите за оценка на грапавостта са височината (h) и стъпката на грапавините (d). На фиг.4 са показани някои от грапавите повърхности заснети след наблюдаване под микроскоп ММИ – 2.



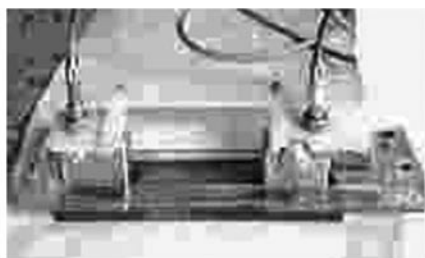
Фиг.4. Грапавите повърхности заснети след наблюдаване под микроскоп

Таблица 1

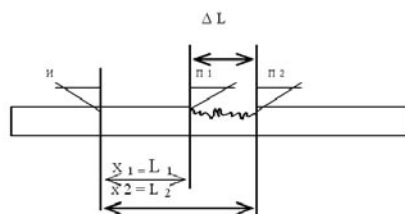
N	1	2	3	4	5	6	7	8
Повърхн	Необрб.	Грапава повърхн. h=50 μm d=60μm	Повърхн. без грапавост	Грапава повърхн h=35±10 μm d=50μm	Повърхн. без грапавост	Грапава повърхн. h=30±10 μm d=50μm	Грапава повърхн. h=30±10 μm d=80μm	Грап. повърх. Необр.

Ултразвукови изследвания

Проведени са ултразвукови изследвания с повърхностни вълни с работна честота 4MHz се възбуждат чрез ъглов осезател с променлив ъгъл, при ъгъл на пречупване, близък до втория критичен ъгъл за плегсиглас и стомана. Дължината на вълната е от порядъка на 0,75 mm. Използва се метод на преминаване [2], като единият осезател излъчва, а другият приема ултразвукови импулси. На фиг. 5 са показани приспособленията, единият от които е неподвижен, а другият се премества по линия на различни разстояния.



Фиг.5. Осезатели за повърхностни вълни включени за метод на преминаване



Фиг.6.Схема за определяне на скорости на повърхностни ултразвукови вълни

Използван е компютъризиран ултразвуков апарат, състоящ се от генератор и приемник на ултразвукови

сигнали OPGUD и ултразвукова PC-карта OPKUD-01/100, интегрирана в персонален компютър клас Pentium III. Апаратът има управляемо усилване до 110 dB, максимална чувствителност 0.1-1 mV/деление, минимална чувствителност 50-500 mV/деление и честотна лента 0.1 – 25 MHz. Разрешителната способност на аналого-цифровия преобразовател (АЦП) е 8 бита, а честотата на дискретизация 100 MHz. Точността на измерване на времето е от порядъка на 1 ns [1].

Регистрират се и се записват ехо сигнали при различни разстояния ΔL и съответно времената за преминаване на тези разстояния от ултразвуковите вълни (фиг.6). Скоростта на повърхностните вълни (C_R) се пресмята чрез формулата:

$$C_R = \frac{L_2 - L_1}{(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \tag{1}$$

където L_1 и L_2 са акустичните пътища на ултразвуковите вълни, които са равни на разстоянията x_1 и x_2 . Времената на регистриране на сигналите от повърхностните вълни съответно при разстояния x_1 и x_2 са t_1 и t_2 . Времето на регистрираните импулси се отчита по максимална стойност на обвивката на сигнала и се измерва с точност до 1 ns. Грешката при определяне на C_R се определя по

$$\Delta C_R / C_R = \Delta L / L + \Delta t / t \tag{2}$$

При $\Delta L = 0.01\text{mm}$ и $\Delta \tau = 0.01\mu\text{s}$ грешката при определянето на скоростта е $\Delta C_R / C_R = 0.0001\%$.

Относителното изменение (dC_R) на скоростта на грапавите повърхности C_{R_i} спрямо скоростта на гладките повърхности C_{R_o} се изразява:

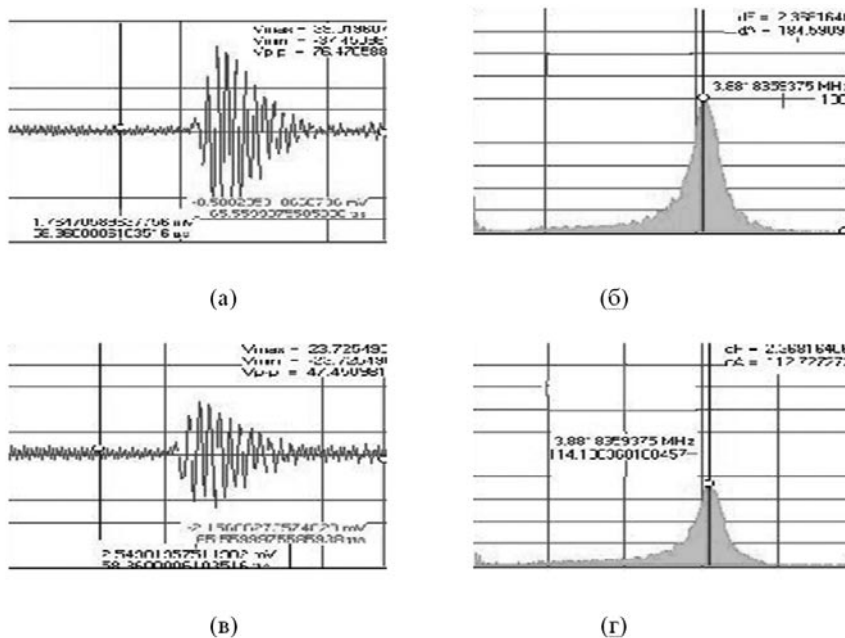
$$dC_R = (C_{R_i} - C_{R_o}) / C_{R_o} \tag{3}$$

Затихване от грапавост на повърхностните вълни се определя като отношение на амплитудата на сигнала от грапавата повърхност (A_L) към амплитудата на сигнала от образеца без грапавост (A_{oL}) при едно и също разстояние L.

$$\alpha_{\text{грап}} = \frac{1}{\Delta L} 20 \log(A_L / A_{oL}), \text{ 1/cm} \tag{4}$$

В Таблица 1 са дадени резултати от ултразвуковите изследвания относителните изменения (dC_R) и затихването на металните шини с грапавините. Скоростта C_{R_o} на повърхността без грапавост е $3\,034 \pm 5 \text{ m/s}$.

Относителните изменения в скоростта (dC_R) са по-малки от 1 % за грапавостите върху шините от 1 до 9. Значителни изменения се наблюдават при затихването от грапавините до 0.46 dB/cm. На фиг.7 са дадени ултразвуковите сигнали и спектри на образец (а,б) и с грапавост №7.



Фиг.7. Ултразвукови сигнали и спектри от образец без грапавост (а) (б) и образец с грапавост със средна височина на грапавините ($h=30\mu\text{m}$) (в) и (г)

Таблица 2

N	Ултразвуковия изследвания	
	$dC_R, \%$	затихване $\alpha_{зран}, \text{dB/cm}$
1	0.6	0.17
2	0.3	0.5
3	0	0
4	0.01	0.302
5	0.01	0
6	0.13	0.43
7	0.13	0.46
8	0.6	0.16

Проведени са ултразвукови изследвания и върху метални плоча, върху която са нанесени грапавини, разположени като кръг с диаметър 120 mm. Проведените измервания са в следния ред:

1. Ултразвуково сканиране на плочата, като посоката на прозвучаване е успоредна на грапавините;
2. Ултразвуково сканиране, което е перпендикулярно на грапавостта;
3. Ултразвуково сканиране със завъртане.

В Таблица 3,4,5 са представени резултати за времето на преминаване на вълната Δt , амплитудата A , и dC_R затихването $\alpha_{зран}$ съответно за случаи 1,2,3. Затихването се определя при едно и също разстояние $L=150$ mm на основа на амплитудите на сигналите в участъка без грапавост и грапавост. Измервания №1,2,5,6,7 в Таблица 3 са в участъка без грапавост, а №3-4 –през петното с грапавост. Най-големи изменения има в $\alpha_{зран}$ в случая, когато ултразвуковите вълни се разпространяват перпендикулярно на грапавостите (Таблица 4, №4). На фиг.8 са дадени ултразвукови сигнали и спектри без грапавост (а) (б) и с грапавост (в) и (г), получени перпендикулярно на направлението на грапавините. Средната височина на грапавините е $h=30 \mu\text{m}$. Може да се отбележи намаляване на амплитудите на сигналите и максималните стойности на спектрите, както и отместването на носещата честота на спектъра (фиг.8г).

Таблица 3 Ултразвуково сканиране на плочата успоредно на грапавините

№	$\Delta t, \mu\text{s}$	A, mV	$dCR, \%$	$\alpha_{зран}, \text{dB/cm}$
1	61.44	55	0	0
2	61.44	55	0	0
3	61.76	45	0.1	0.17
4	61.52	45	0.13	0.17
5	61.45	60	0.13	0
6	61.5	60	0	0
7	61.45	60	0	0

Таблица 4 Ултразвуково сканиране на плочата перпендикулярно на грапавините.

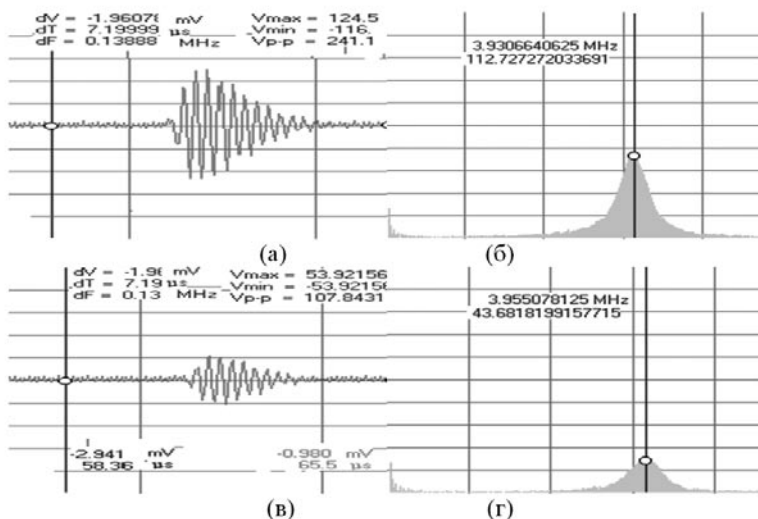
Измервания № 1,2,7-9 в Таблица 2 са в участъка без грапавост.

№	$\Delta t, \mu\text{s}$	A, mV	$dCR, \%$	$\alpha_{зран}, \text{dB/cm}$
1	61.44	50	0.00	0.00
2	61.44	50	0.00	0.00
3	61.68	35	0.39	0.31
4	61.52	25	0.13	0.60
5	61.52	35	0.13	0.31
6	61.68	40	0.39	0.31
7	61.68	40	0.39	0.31
8	61.44	40	0.00	0.19
9	61.44	50	0.00	0.00

Таблица 5 Ултразвуково сканиране под ъгъл със завъртане на осезателите.

Измервания №1-2 са в плочата без грапавост.

№	$\Delta t, \mu s$	A, mV	dCR, %	$\alpha_{зон}, dB/cm$
1	61.44	40	0	0
2	61.44	40	0	0
3	61.52	30	0.13	0.25
4	61.59	26.6	0.24	0.35
5	61.52	28.6	0.13	0.29
6	61.34	40	0.16	0



Фиг.8.Ултразвукови сигнали и спектри от метална плоча без грапавост (а) (б) и с грапавост със средна височина на грапавините ($h=30 \mu m$) (в) и (г)

Заклучение

Направените експерименти показват, че с дефектоскоп със стандартни характеристики се регистрират разликите между сигнала от грапавостите, при прозвучаване в посока с различен ъгъл спрямо главното направление на грапавините. Резултатът е преди всичко качествен. Поради това, че се работи с малко образци не е възможно да се изведе достоверна зависимост между грапавостите и параметрите скорости и затихване на ПУЗ. Изследването дава възможност да се направи извод, че с УЗ методи може да се установи наличието, направлението и големината на грапавини. За окачествяване на повърхност при съвременните технологични възможности и изисквания ще трябва да се работи с малки дължини на ПУВ като информационните параметри са скоростта, затихването и изменението на спектъра на преминалата ултразвукова вълна. За изграждане на количествени критерии изследването трябва да продължи с повече и разнообразен материал (контролирано набраздени повърхности) и по-добра апаратура (теснолентови, широколентови и високочестотни осезатели).

Работата е изпълнена по проект „Разпространение на ултразвук в непрекъсната среда с напрежения” със СУ” Св.Кл.Охридски”.

Библиография

1. Guide to OPKUD and OPBOX- ultrasonic testing units- technical data , <http://www.optel.pl>
2. Ермолов И.Н.,А.Х. Вopilкин, В.Г.Бадалян, Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии, ООО НПЦ НК “ЭХО+”,Москва, 2000.
3. Межгосударственный стандарт, Шероховатость поверхности, Термины и определения, ГОСТ25142-82.
4. Дунин-Барковский И.В. Пьезопрофилометры и измерения шероховатости поверхности, Машгизр Москва,1961.

5. Димитров Д. и колектив Ръководство за лабораторни упражнения по основи на метрологията и технически измервания, Техника, София 1976.
6. V.Minialga, S. Sajauskas, N. Sajauskas, Influence of liquid layer on the propagation of ultrasonic SAW on the rough surface, WCNDT2000, idn727.
7. S.Sajauskas, V. Minialga, N.Sajauskas, Comparative investigation of rough surfaces by transversal surface waves and longitudinal surface waves. ULTRAGARSAS Nr3(36)2000.
8. A. M. Abdelhay, and I. M. I. Mubark, Ultrasonic evaluation of surface roughness using normal incidence pulse – echo technique, NDT net, Vol.9, No4
9. Smith R., D.Bruce, Roughness measurement of hidden corroded surfaces using ultrasonic spectroscopy, Proc. 3 Joint FAA/DoD/NASA Conf. On Aging Aircraft, Albuquerque, Sept.1999.
10. Nagy P., Adler L. Surface roughness induced attenuation of reflected and transmitted ultrasonic waves, J.Acoust. Soc.Am.82 (1), July 1987.
11. Ruiz Al. Surface acoustic wave velocity measurements on surface-treated metals by laser-ultrasonic spectroscopy, PhD Dissertation, University of Cincinnati, 2004.
12. Ruiz A., P.Nagy, SAW dispersion measurement for ultrasonic characterization of surface-treated metals. Instrumentation Measure Metrologie, Vol. X –noX 2003.
13. McKerrow P.J., B.J.Kristiansen Classifying surface roughness with CTFM ultrasonic sensing, IEEE Sensors Journal, Vol.6, No5, October 2006.