توليد الأمواج فوق الصوتية

الأمواج فوق الصوتية هي اهتزازات ميكانيكية تتولد نتيجة لتحول الأشكال الأخرى من الطاقة إلى طاقة صوتية وفق لما يلي:

•تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة صوتية عند تطبيق الجهد الكهربائي على مبدلات الطاقة (Transducers) المصنوعة من بلورات ذات خواص كهر ضغطية (Piezoelectric Transducers).

•تتحول طاقة الحقل المغنطيسي إلى اهتزازات ميكانيكية في مبدلات الطاقة التي تعمل على مفعول التخصر المغنطيسي (Magnetostrictive effect).

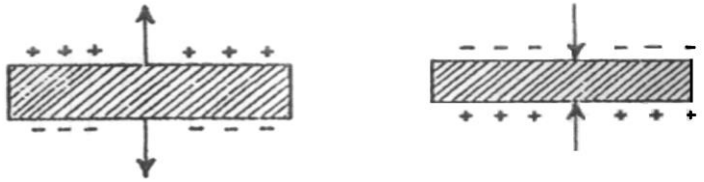
•تتحول الطاقة الميكانيكية الناتجة عن الصدمات أو الاحتكاك إلى أمواج فوق صوتية في مبدلات الطاقة الميكانيكية.

•تتحول الطاقة الكهرمغنطيسية في المواد الناقلة أو المواد المغنطيسية إلى أمواج فوق صوتية نتيجة لتولد قوى لورنتز (Lorentz force).

•تتحول الطاقة الحرارية إلى طاقة صوتية نتيجة للتسخين السريع لسطح صلب الذي يؤدي إلى تمدد موضعي فجائي وتولد جهد ميكانيكي يؤدي إلى تحرر أمواج صوتية بطيف واسع من الترددات ويستعمل في هذه الطريقة ضوء الليزر أو دفقات من الحزم الالكترونية للتسخين السريع والقوي لسطوح المواد المستخدمة كمحولات طاقة.

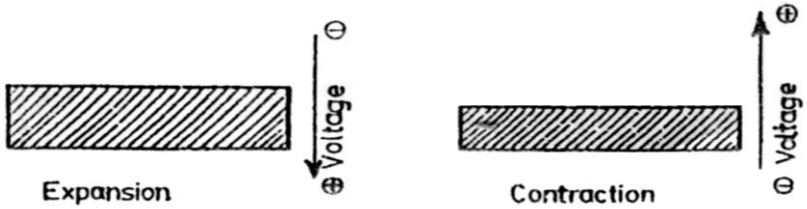
مبدلات الطاقة من المواد ذات الخواص الكهرضغطية (Piezoelectric effect)

تعرف المواد التي يتم فيها تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة فوق صوتية والعكس بالعكس بالمواد الكهرضغطية.
إذ ينتج على سطح هذه المواد جهد كهربائي عند إخضاعها إلى ضغط ميكانيكي كما هو مبين في الشكل رقم (١).



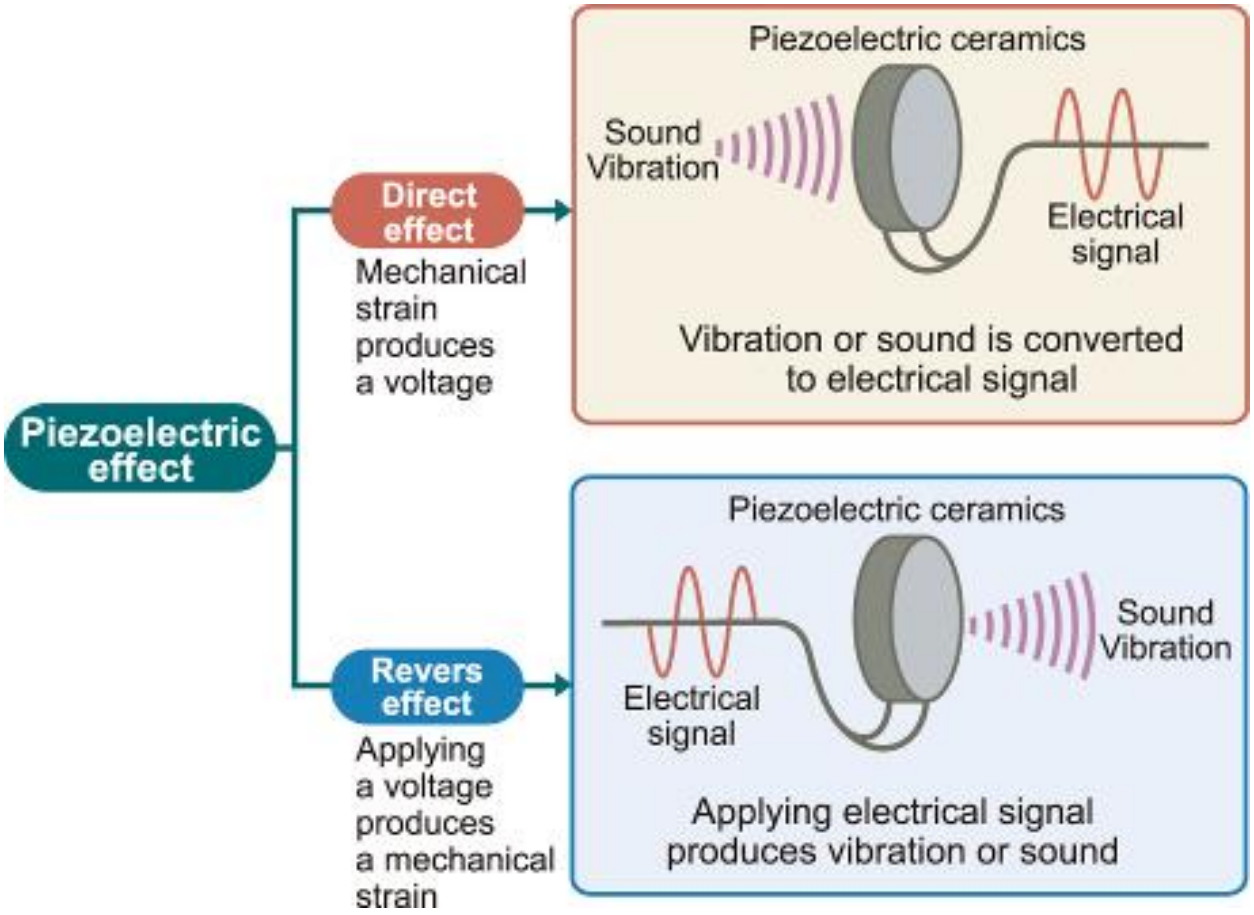
الشكل (١): المفعول الكهرضغطي المباشر

كما يتم في المواد ذات الخواص الكهرضغطية تولد اهتزازات ميكانيكية عند تطبيق فرق جهد كهربائي عليها كما هو مبين في الشكل رقم (٢).



الشكل (٢): المفعول الكهرضغطي العكسي

وبالتالي يمكن تطبيق الخاصة الكهرضغطية المباشرة في الكشف عن بنية المواد والخاصة الكهرضغطية العكسية في توليد الأمواج فوق الصوتية.



مبـدلات الطاقــة البلوريــة ذات الخــواص الكهرضــغطية (Piezoelectric Crystal Transducers):

من بين المواد وحيدة البلور التي تملك الظاهرة الكهرضغطية والمستخدمة في صناعة مسابر الاختبار بالأمواج فوق الصوتية هي:

– الكوارتز (Quartz)وتستخدم بشكل خاص في فحص المواد المتواجدة عند درجة حرارة عالية.
-كبريتات الليثيوم (Lithium Sulphate)
-كبريتيد الكادميوم (Cadimium Sulphide)
-أكسيد الزنك (Zinc oxide)
-تيتانات الباريوم (Barium titanate).

الخصائص الفيزيائية والصوتية لبعض مواد البلورات الكهرضغطية

الخصائص	تيتانات الباريوم (سيراميك مستقطب)	كبريتات الليثيوم	الكوارتز الطبيعي
الرمز الكيميائي	$BaTiO_3$	$LiSO_4$	SiO_2
الممانعة الصوتية (10^6 $Kg/m^2.S$)	٣٥	١١,٢	١٥,٣
الكثافة (10^3 kg/m^3)	٥,٧	٢,٠٦	٢,٦٥
السرعة (m/s)	٤٤٠٠	٤٧٢٠	٥٧٦٠
درجة الحرارة الحرجة (°C)	١١٥ إلى ١٥٠	٧٥	٥٧٦
القدرة على الإرسال (10^{-12} m/V)	ممتاز 190	وسط 15	ضعيف ٢,٣
القدرة على الإستقبال (10^{-3} V/m)	وسط ١١	ممتاز ١٦٥	جيد ٥٧

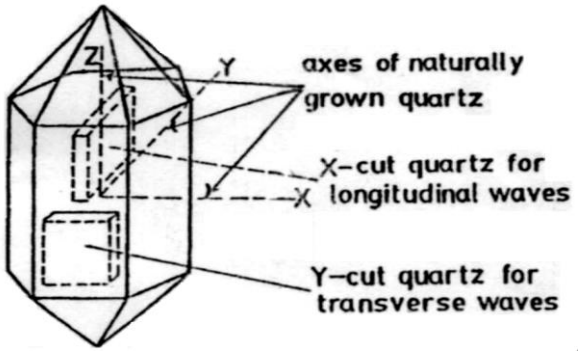
مبدلات الطاقة المصنوعة من الكوارتز:

المزايا:

- مقاوم جيد للإهتراء.
- لا ينحل بالماء.
- له خواص توازن كهربائية وميكانيكية عالية.
- يمكن أن يستخدم للعمل عند درجات حرارة عالية.

الحدود:

- سعره مرتفع.
- يولد أمواج فوق صوتية بمردود وطاقة منخفضة.
- يخضع للتحول النمطي، فعند استخدام بلور ذو قص عامودي على محور X فإنه يتولد بالإضافة إلى الأمواج الطولية أمواج قص وذلك لأن البلور يهتز أيضاً وفقاً للمحور Y، ويؤدي توليد أمواج القص إلى ظهور إشارات تشويش بعد النبضة الأساسية.



- يتطلب عمله تطبيق جهد مرتفع.

مبدلات الطاقة المصنوعة من كبريتات الليثيوم (Lithium Sulphate):

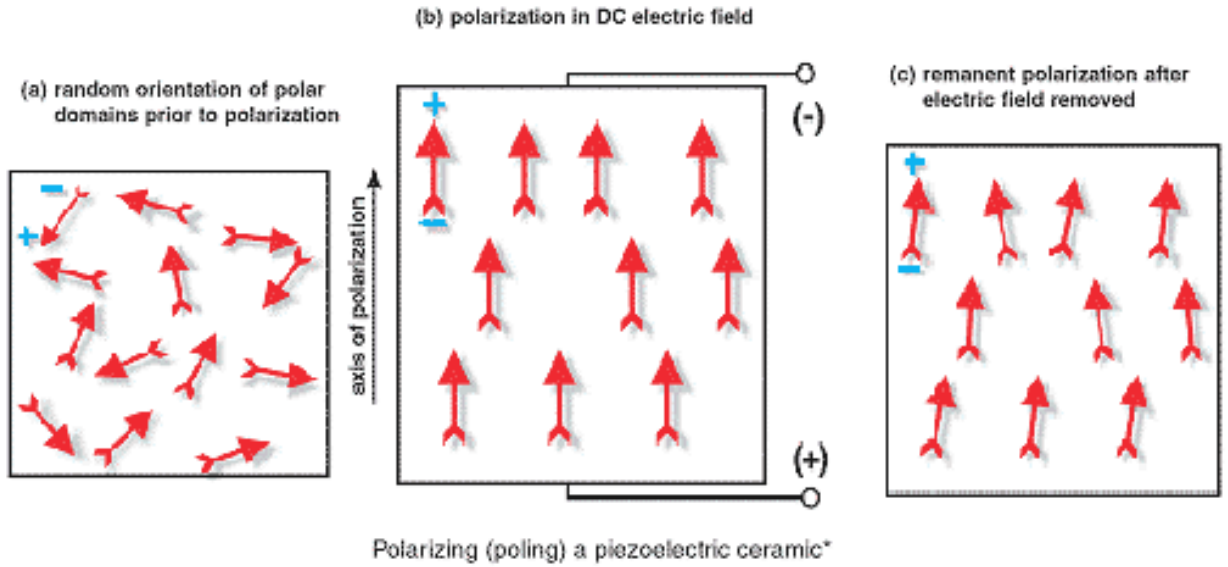
وهو بلور ذو خواص كهرضغطية يستخدم في صنع مبدلات الطاقة فوق الصوتية وله المزايا والحدود التالية:

المزايا:
•يعتبر أفضل مستقبلات الأمواج فوق الصوتية وبمردود عالي.
•يمكن تخميده بسهولة وذلك بسبب ممانعته الصوتية المنخفضة.
•لا تتغير مواصفاته الصوتية مع الزمن.
•ذو تأثير ضعيف جداً بالتحول النمطي للموجة.

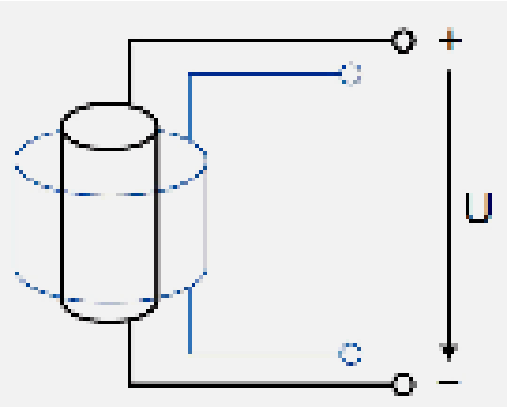
الحدود:
•سهل الكسر.
•قابل للانحلال في الماء.
•يستخدم فقط عند درجات الحرارة الأقل من 75 Cº درجة مئوية.

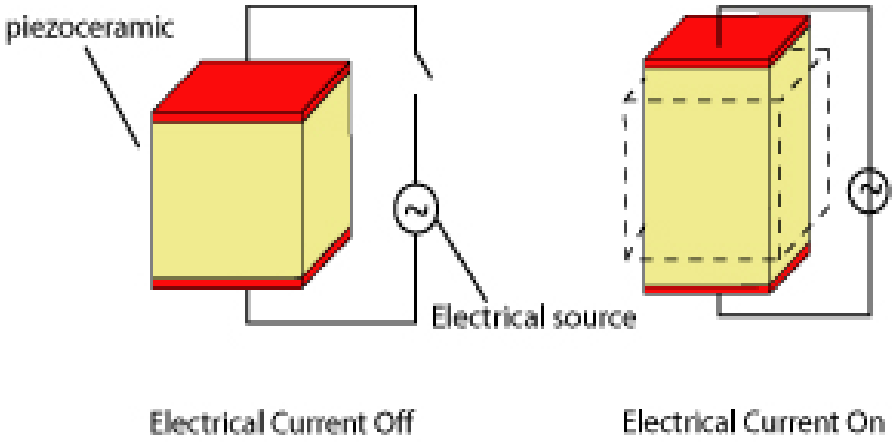
مبدلات الطاقة المصنوعة من السيراميك المستقطب (Polarized Ceramic Transducers)

تصنع مبدلات الطاقة هذه من **المواد الكهرحديدية** (Ferroelectric materials)التي تتألف من مجالات عديدة حيث يضم كل مجال عدد كبير من الجزيئات ويكون ذو شحنة ثابتة. تكون المجالات موجة بشكل عشوائي يلغي مفعول إحداها الأخر عند عدم تطبيق جهد وتظهر أنها لا تملك خواص استقطاب، وتتوجه هذه المجالات باتجاه الحقل عند تطبيق جهد كهربائي عليها،

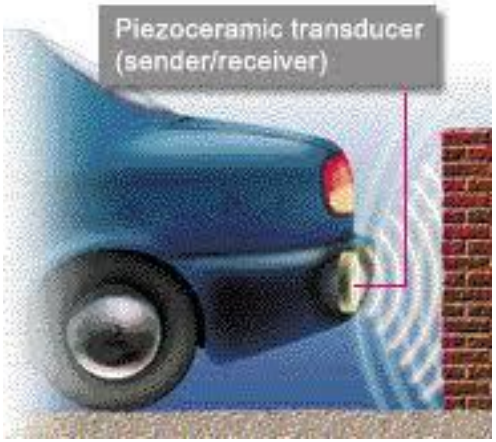


وبما أن شكل المجالات يكون أطول في اتجاه الاستقطاب منه في اتجاه الثخانة كما هو مبين في الشكل وبالتالي فإن المادة ككل تتمدد وعند عكس اتجاه الجهد ينعكس اتجاه المجالات مما يؤدي إلى تمدد المادة من جديد مما يجعل هذه المواد على تباين من المواد الكهرضغطية التي تتمدد باتجاه محدد للجهد وتتقلص بالاتجاه الآخر.





تصنع مواد السيراميك المستقطب من خليطة من البودرة على شكل أقرص حيث تسخن إلى درجة حرارة عالية لتتصلب.
ويتم التحكم بالخواص المطلوبة لمبدل الطاقة من أجل تطبيق محدد عن طريق التحكم بنوع ونسب خلط بودرة العناصر المكونة للمادة المستقطبة. وقبل الاستقطاب يكون السيراميك موحد الخواص في كافة الاتجاهات (Isotropic) وبالتالي لا داعي لقطعة وفقاً للمحاور للحصول على نوع الأمواج المولده المطلوبة منه وكذلك من الممكن تشكيله بسهولة وفقاً للمطلوب لصناعة مبدلات الطاقة المقعرة أو المحدبة.



من البودرة إلى عناصر توليد واستقبال أمواج فوق صوتية

مزايا وحدود محولات الطاقة السيراميكية:

المزايا:

- توليد الأمواج فوق الصوتية بمردود عالي.
- تعمل عند جهود منخفضة.
- يمكن استخدام بعضها عند درجات حرارة عالية.

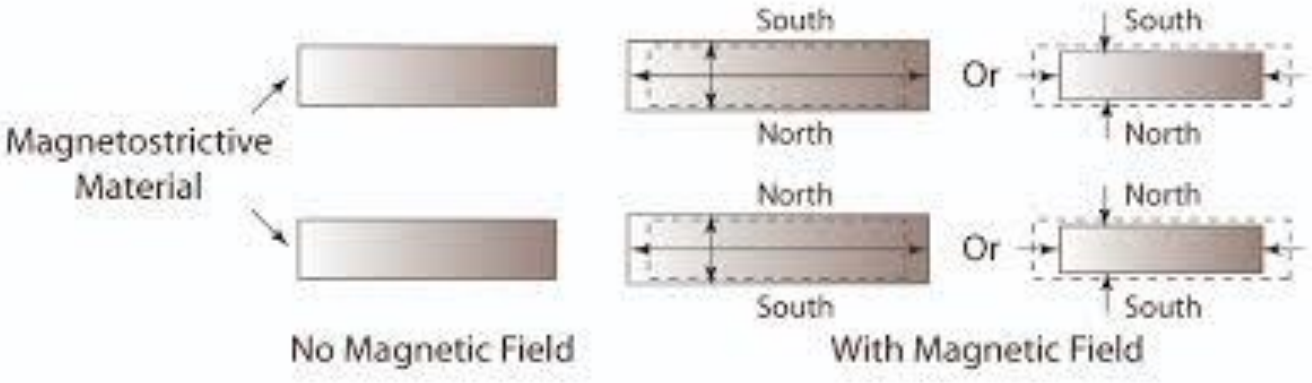
الحدود:

- تدهور الخواص الكهرضغطية مع الزمن.
- ذو مقاومة ضعيفة للإهتراء.

يتم فيها التحول النمطي للأمواج فوق الصوتية.

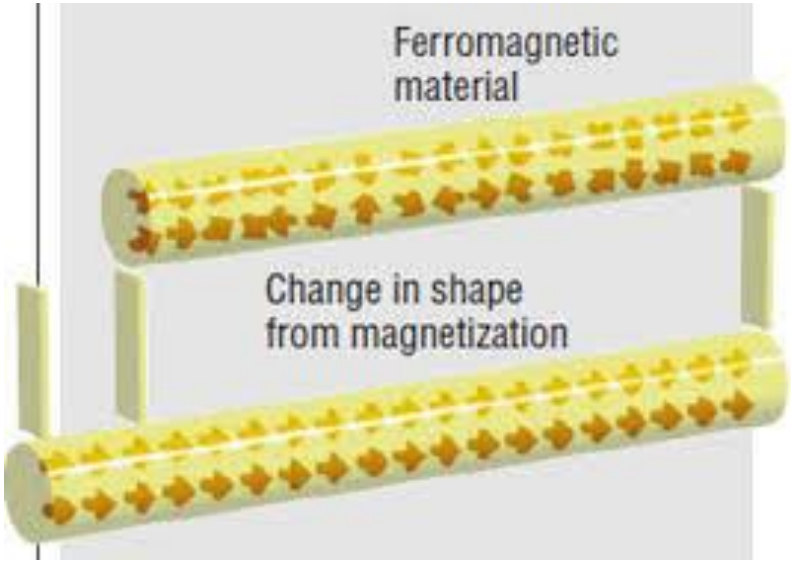
مبدلات الطاقة ومفعول التخصر المغنطيسي:

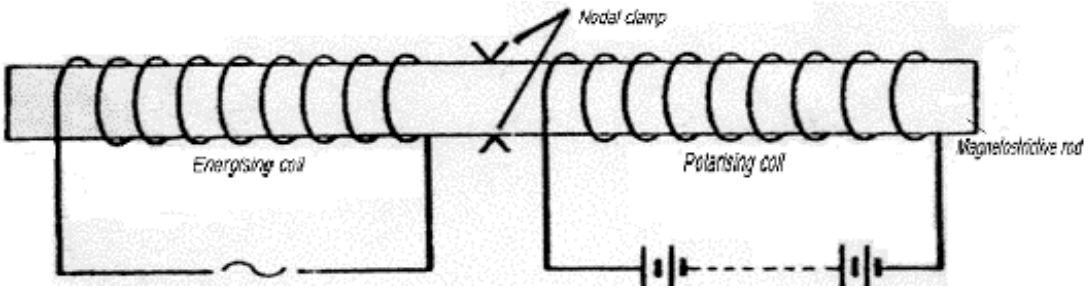
تصنع مبدلات الطاقة ذات التخصر المغنطيسي من **المواد الحديدية المغنطيسية** كالنيكل والكوبالت والحديد والتي يمكن مغنطتها بسهولة والتي تظهر تغيير بسيط في طولها عند مغنطتها ويعرف ذلك باسم مفعول جول (Joule effect). فعند وضع قضيب من هذه المواد في حقل مغنطيسي يخضع لتغير في طوله سواء بالزيادة أو بالنقصان وفقاً لطبيعة المادة وشدة الحقل المغنطيسي. مهما يكن الانفعال موجباً أو سالباً فأنه مستقل عن اتجاه الحقل وبالتالي فإذا ما تم عكس اتجاه الحقل المغنطيسي فإنه لا يحدث أي تغير في اتجاه الانفعال. فمثلاً إن الزيادة في الطول تبقى دوماً زيادة في الطول مهما يكن اتجاه الحقل المغنطيسي.



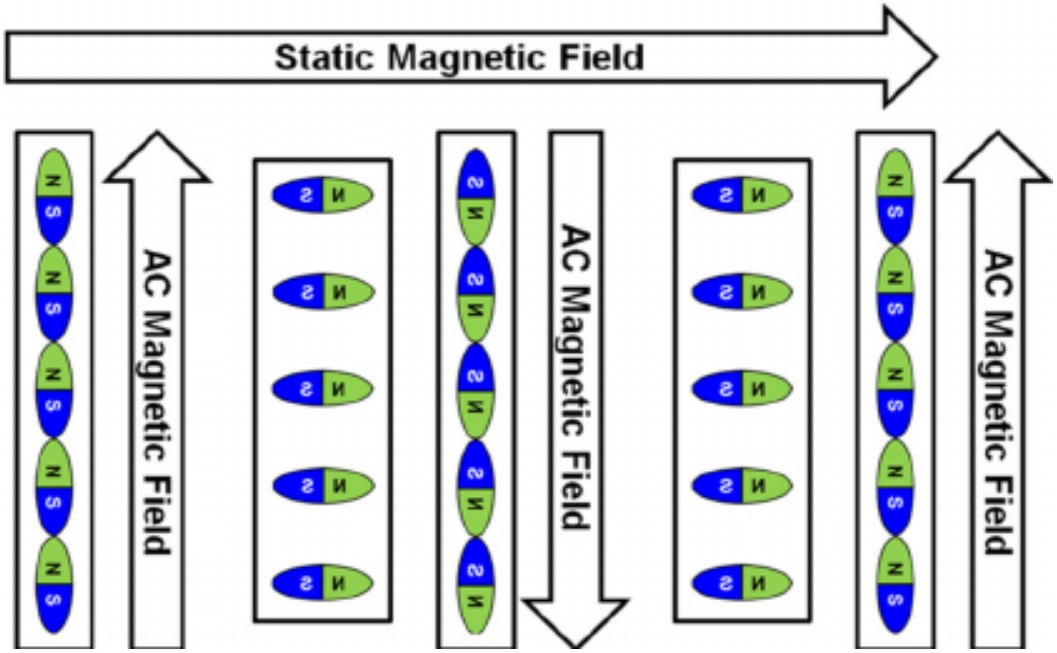
تستخدم مبدلات الطاقة العاملة على مبدأ التخصر المغنطيسي فقط في صناعة المسابر المولدة للأمواج السطحية المسماة (Lamb wave) إلا أنها تستخدم كثيراً في تطبيقات الأمواج فوق الصوتية لإغراض الثقب (Drilling) والتنظيف (Cleaning).

مقطع في مسبار يعتمد خاصة التخصر المغنطيسي مؤلف من قضيب من المادة المتخصرة مغنطيسياً في المركز وملف مغنطة وغلاف.





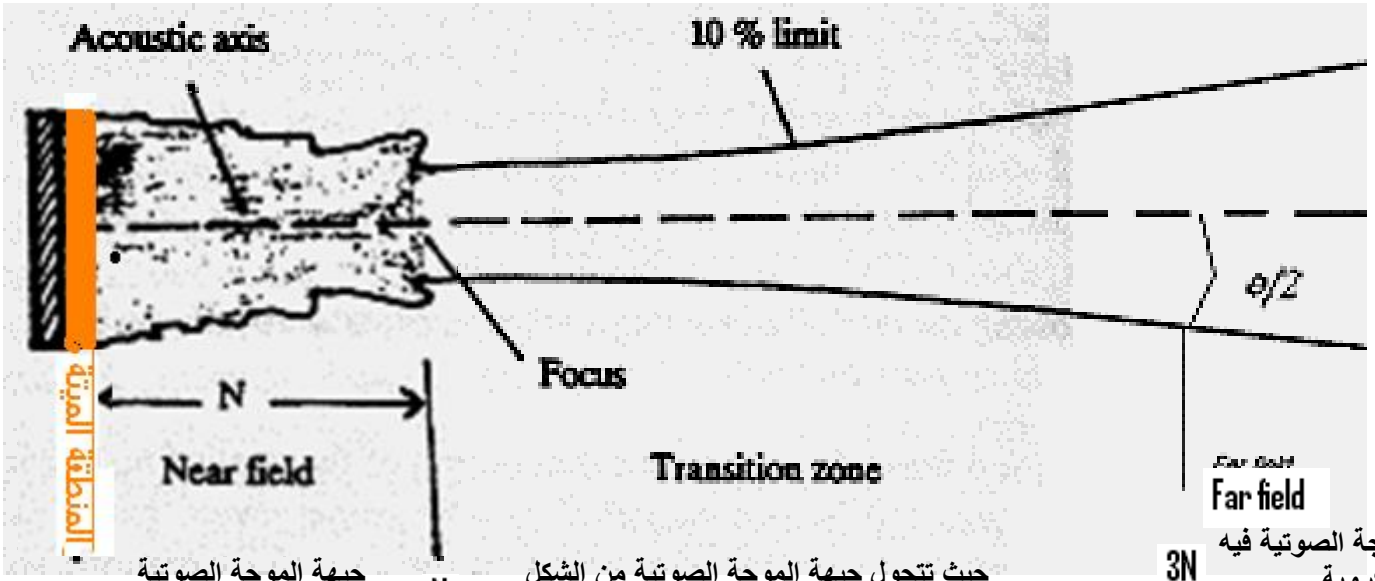
مخطط يوضح كيفية تحريض مبدل طاقة على شكل قضيب يعمل على مبدأ التخصر المغنطيسي



توهين الأمواج فوق الصوتية

يبين الشكل شكلاً مبسطاً لحزمة الموجة فوق الصوتية ويمكن تصورها كالمخروط. يمكن من شكل الموجة تمييز منطقتين تدعى إحداهما بالحقل القريب Near field وتدعى الأخرى بالحقل البعيد Far field

لا **تبقى طاقة الحزمة موزعة على شكل اسطواني وإنما تنفرج وتنتشر إلى خارج الاسطوانة بشكل مخروطي**



جبهة الموجة الصوتية فيه مسطحة

حيث تتحول جبهة الموجة الصوتية من الشكل المسطح إلى الشكل الكوي

جبهة الموجة الصوتية فيه كروية

-**المنطقة الميتة** (Dead zone): وهي المنطقة الملاصقة لسطح المسبار وهي منطقة هامدة لا يمكن الكشف عن العيوب فيها وتشكل بداية المنطقة القريبة.

- **المنطقة القريبة** (Near field): وهي الجزء القريب من مسبار الاختبار وتتميز بتناوب قيم الضغط والشدة الصوتية فيها من قيم عظمى ودنيا على طول الحزمة وفي النقاط المختلفة للمقطع العرضي الواحد، وفي هذه المنطقة لا تكون إشارة العيب دقيقة. تتحدد طول المنطقة القريبة من الحقل الصوتي بالعلاقة:

$$N = D^2/4\lambda = D^2 \times f/4\nu$$

حيث:

N = طول الحقل القريب.

D = قطر المسبار.

ν = سرعة الصوت في المادة المختبرة.

f= التردد.

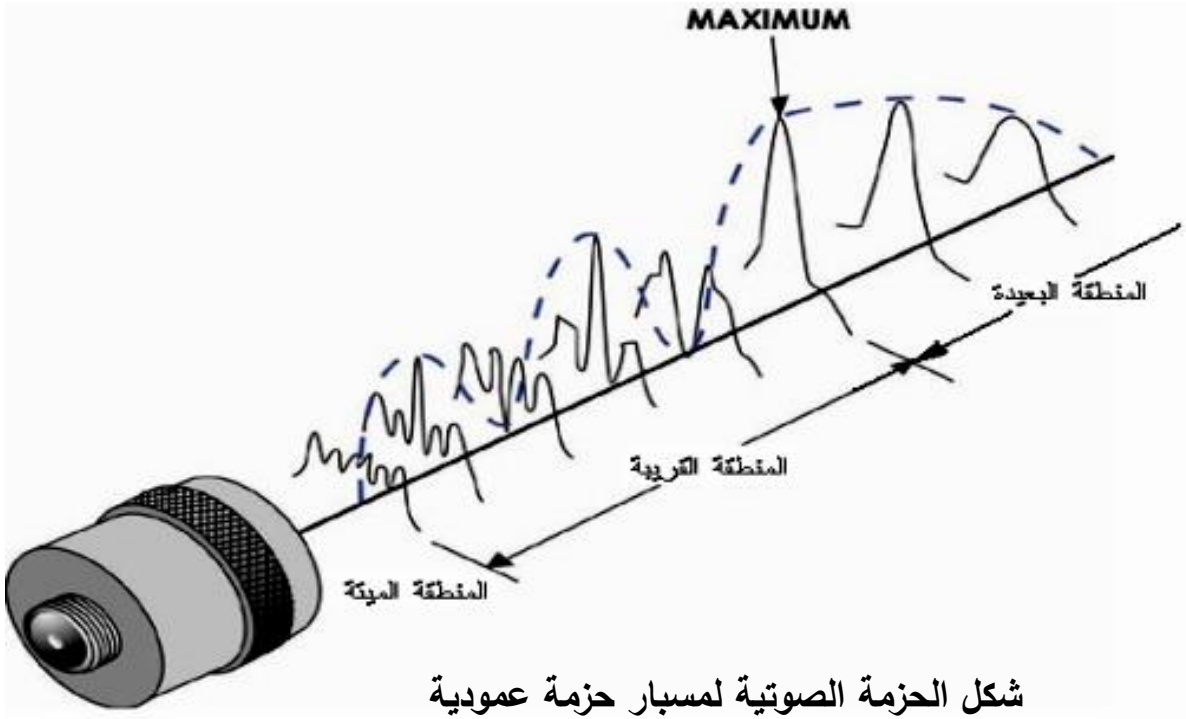
λ = طول الموجة.

.

المنطقة البعيدة (Far field):

وهي المنطقة التي تلي المنطقة القريبة وتتميز بتباعد الأمواج فوق الصوتية بزاوية ثابتة واختفاء ظاهرة تداخل الأمواج فوق الصوتية، ويتناسب الضغط الصوتي، مطال الإشارة على الجهاز، عكساً مع المسافة في حالة العواكس الكبيرة.

عندما تكون المسافة T>3N فإنه يمكن تطبيق قانون انتشار الموجة من أجل عاكس كبير حيث يكون ارتفاع النبضة متناسباً عكساً مع المسافة وبالتالي فإذا ما تم مضاعفة المسافة فإن ارتفاع النبضة ينخفض إلى النصف أو ما يعادل انخفاض بمقدار (6dB) أي أن قيمة معامل التوهين الناتج عن الانتشار هو $\Delta HBs = 6dB$ عند مضاعفة المسافة في الحقل البعيد.



شكل الحزمة الصوتية لمسبار حزمة عمودية

تكون شدة الحزمة الصوتية أعظمية على المحور المركزي للحزمة الصوتية وتتناقص طرداً مع المسافة عن المركز، يمكن حساب زاوية انتشار أو انفراج الحزمة الصوتية $\theta/2$ بالعلاقة:

$$\theta_n/2 = \mathrm{Sin}^{-1} K_n \lambda/D = \mathrm{Sin}^{-1} (K_n v/D.f)$$

الجدول (٢): قيمة الثابت K من أجل مسابر ذات بلور دائري أو مستطيل من أجل تقنية الانتقال

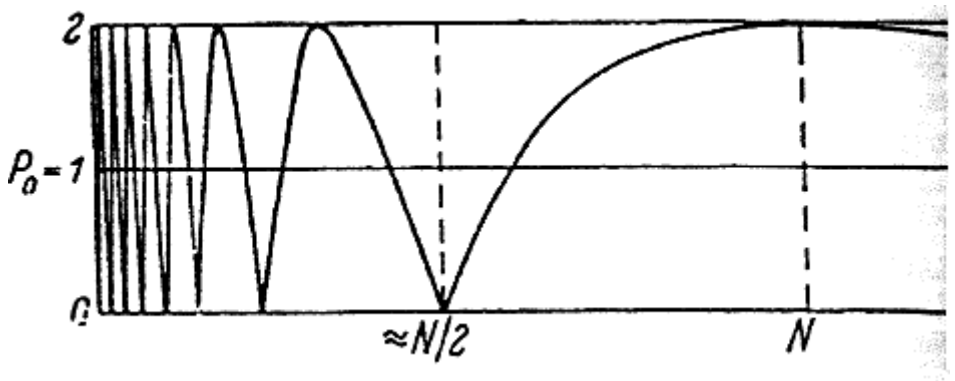
D = هو قطر مسبار الاختبار في حال كونه دائري.

K = ثابت يحدد كما يلي:

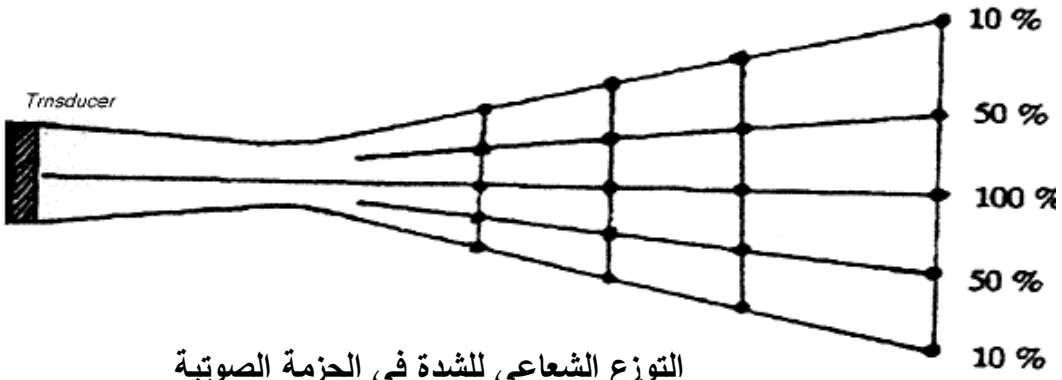
– يتم تحديد قيمة الثابت K في المواقع التي يتم فيها انخفاض الشدة الصوتية إلى 50% أو ما يعادل (6dB) من مطالها الأعظمي وكذلك انخفاض إلى 10% أو ما يعادل (20dB) من مطالها الأعظمي وانخفاض حتى 0% على الحافة البعيدة للحزمة الصوتية. ويشير الرقم n في θ_n وكذلك في K_n إلى الحافة المعتبرة مثلاً θ_6 وهو انفراج الزاوية من أجل حافة ٦dB. و θ_{20} هو انفراج الزاوية من أجل حافة ٢٠dB.

يبين الجدول قيمة الثابت K من أجل مسابر ذات بلور دائري أو مستطيل من أجل تقنية صدى النبضة

Edge % (dB)	K circular	K rectangular
0 %	1.22	1.00
10 % (20 dB)	1.08	0.60
50 % (6 dB)	0.54	0.91



توزع الشدة الصوتية على طول المسافة المحورية في منطقة الحقل القريب



التوزع الشعاعي للشدة في الحزمة الصوتية

إن القيم التي تصف شكل الحقل الصوتي بتقريب عملي هما طول الحقل القريب N وزاوية الانفراج γ وهما تابعين لقطر كريستال المسبار D والتردد f وسرعة الصوت في وسط الانتشار v.

توهين الصوت Attenuation of sound

التوهين هو الضياع في طاقة الحزمة الصوتية، حيث أن طاقة الموجة الصوتية المستقبلة هي أقل بكثير من طاقة الموجة المرسلة من المسبار والتي تدعى بالنبضة الأولية (Initial pulse).

ينتج التوهين عن العوامل الخمسة التالية:

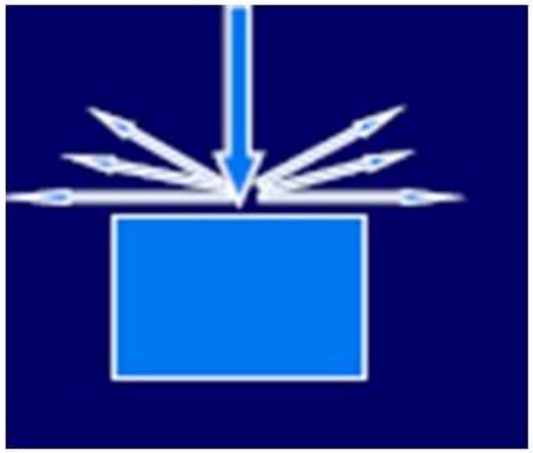
- التبعثر (scattering)
- الامتصاص (Absorption)
- تعرج السطح (Surface roughness)
- الانعراج (Diffraction)
- الانتشار (Spreading).

توهين الأمواج فوق الصوتية نتيجة التبعثر

ينشأ تبعثر الأمواج فوق الصوتية نتيجة لعدم التجانس التام للمادة التي تمر فيها الأمواج فوق الصوتية. وذلك لوجود المسببات التي تؤدي إلى نشوء حدود فصل ما بين مادتين متباينتين بالمعاوقة الصوتية كوجود المتضمنات أو الفقاعات في المادة أو حتى بسبب وجود حدود لحبيبات المادة التي قد تحتوي على ملوثات.

كما يتواجد مواد عديدة هي غير متجانسة عند التصنيع كحديد الصب المكون من نسيج من الحبيبات والفحم المختلفين بالكثافة ومعامل المرونة حيث ينتج عن كل حبيبة من النسيج تبعثر للموجة الصوتية.

كما يمكن مصادفة التبعثر في المواد وحيدة البلورة متباينة الخواص (Anisotropic) والتي تكون خواصها غير متجانسة في جميع الاتجاهات والتي تظهر مثلاً اختلاف في سرعة الصوت عند قياس السرعة باتجاهات مختلفة على محاور المادة.

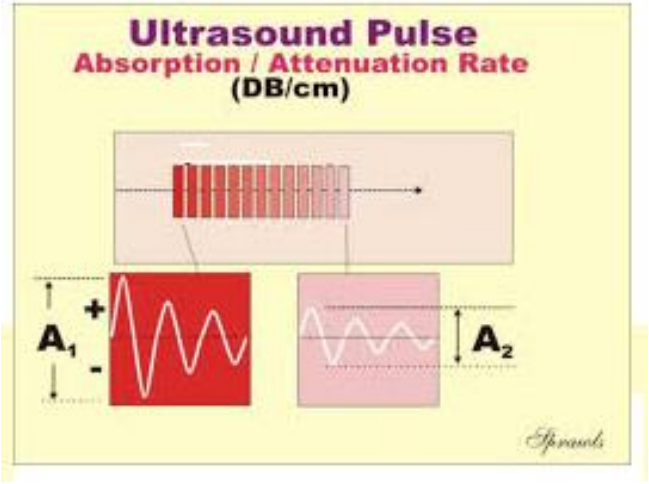


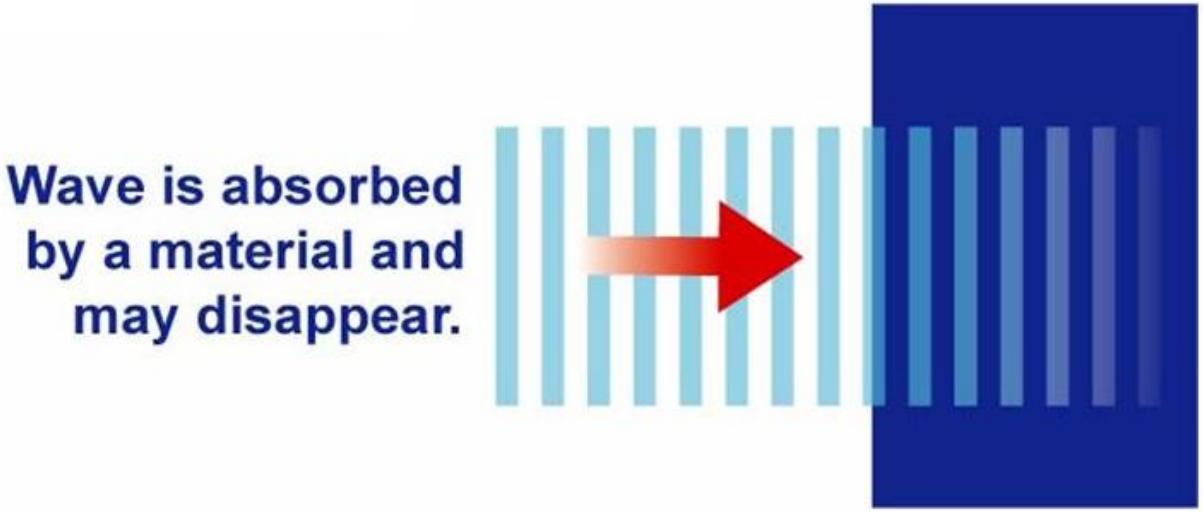
يمكن تجنب حدوث التبعثر عند العمل على أطوال أمواج صوتية أكبر من أبعاد جزيئات أو حبيبات المادة. فمثلاً العمل على طول موجة أكبر بعشر مرات على الأقل من أبعاد جزيئات أو حبيبات المادة المختبرة.

توهين الأمواج فوق الصوتية نتيجة للامتصاص:

ينتج هذا النوع من التوهين نتيجة لتحول جزء من طاقة الموجة الصوتية إلى حرارة،
حيث تتحرك جزيئات المواد عندما لا تكون بدرجة حرارة الصفر المطلق في حركة مستمرة عشوائية نتيجة للحرارة المتواجدة فيها، وتزداد حركة الجزيئات مع ارتفاع درجة حرارة المادة. فعند انتشار الموجة الصوتية في المادة تحرض العديد من الجزيئات فتنقل لها طاقة لتنوس ولتتحرك بسرعة أعلى ولمسافة أكبر وتستمر هذه الحركة حتى بعد مرور الموجة الصوتية، نتيجة للاصطدام الجزيئات المحرضة مع جزيئات غير متحرضة، وبالتالي فإن جزء من طاقة الموجات الصوتية قد تم تحويلها إلى طاقة حرارية في المادة.

يزداد توهين طاقة الحزمة الصوتية بالامتصاص مع ازدياد سرعة نوسان وحركة جزيئات المادة وتكون هذه الزيادة متناسبة طرداً مع ارتفاع التردد.



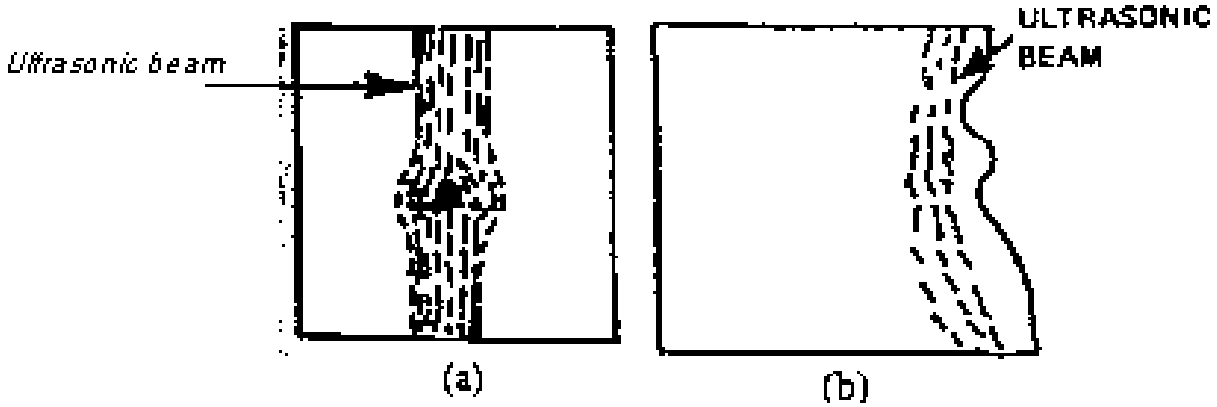


توهين الأمواج فوق الصوتية نتيجة لوجود المادة الرابطة وخشونة السطح

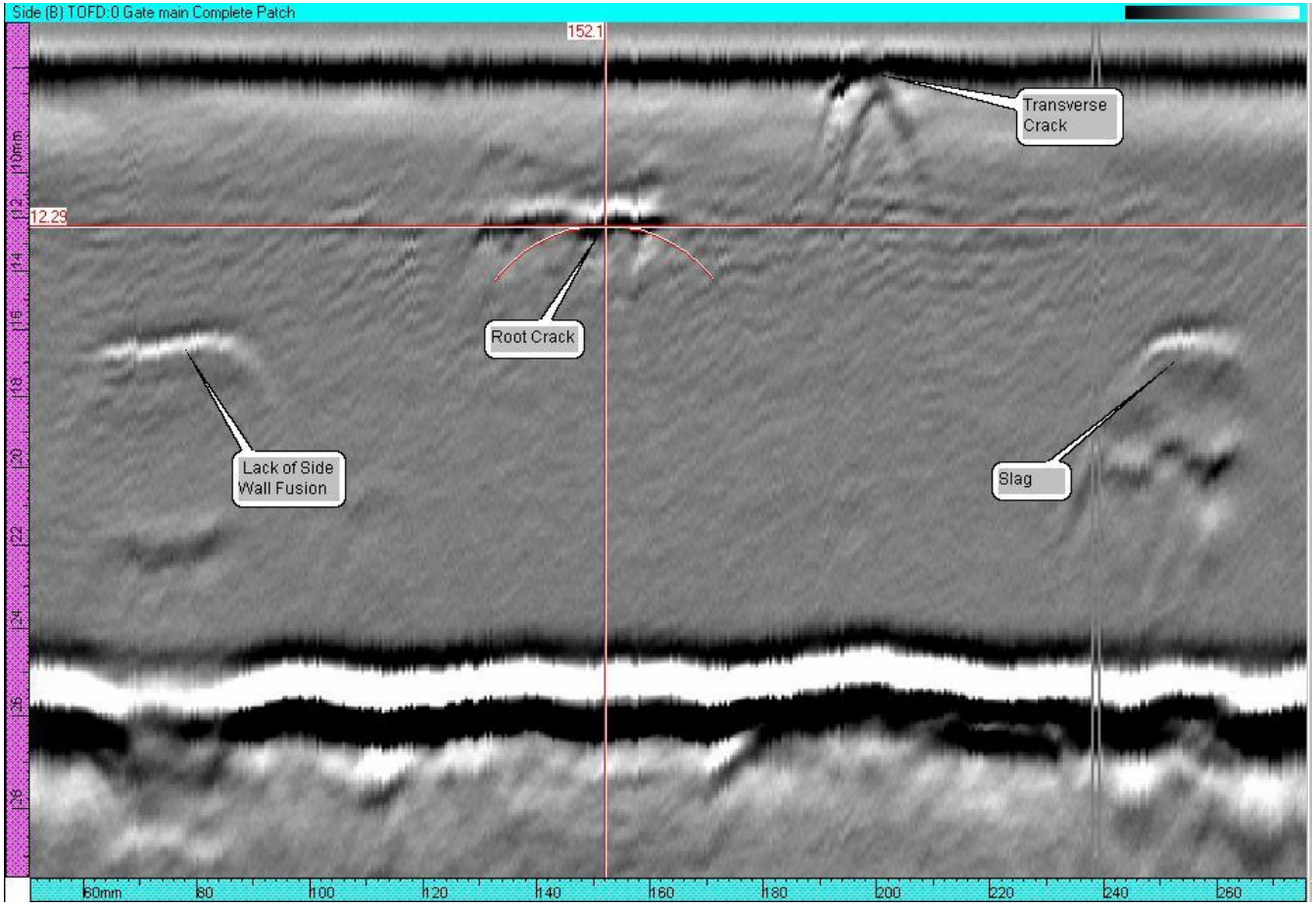
عند وضع مسبار الاختبار على عينة ذات سطح ناعم جداً فإن ارتفاع الموجة المرتدة من السطح الخلفي للعينة يتغير مع ثخانة العينة ونوع سائل الربط ويكون هذا الارتفاع أعلى من ارتفاع الموجة المرتدة من على سطح خلفي لعينة مماثلة ذات سطح خشن.

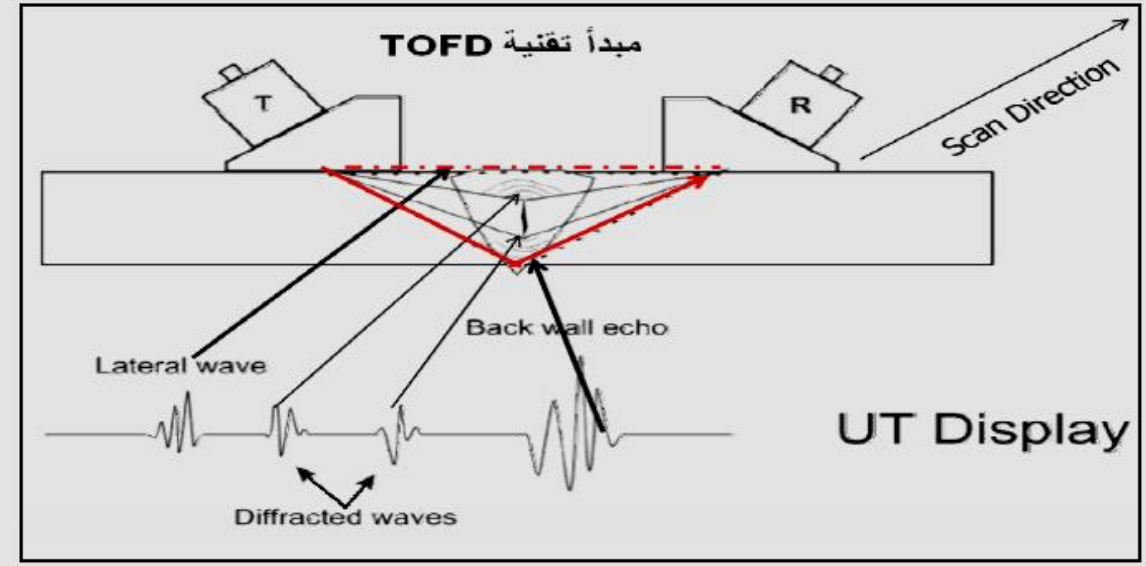
توهين الأمواج فوق الصوتية نتيجة للإنعراج:

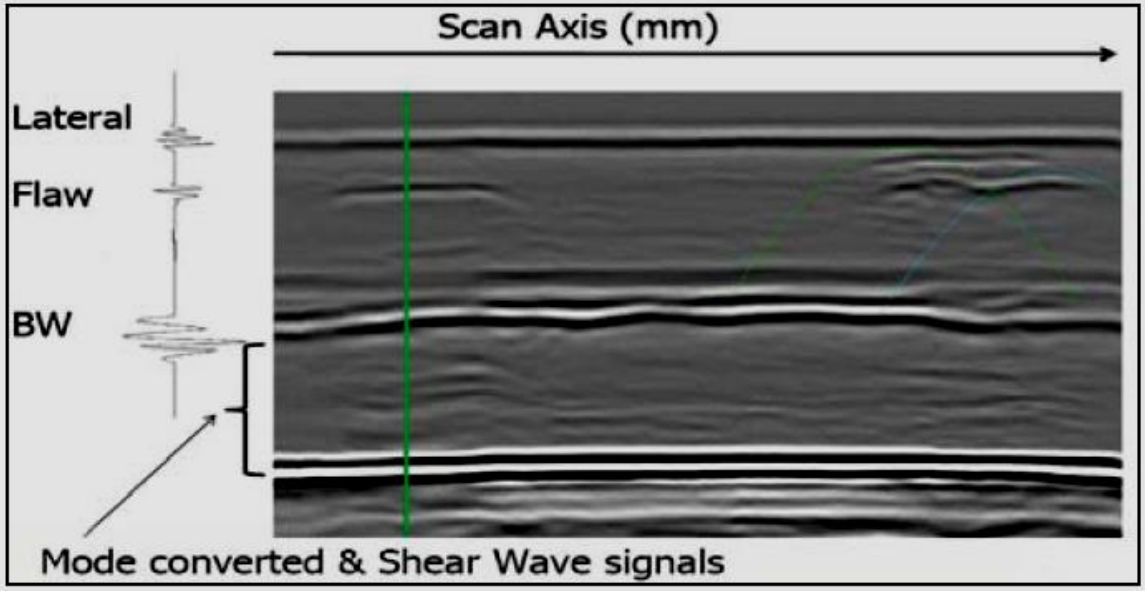
للأمواج فوق الصوتية خاصة هامة تتمثل بقابليتها على الانحناء الدائري وتجاوز العوائق ذات الأبعاد القريبة من طول الموجة. فمثلاً يحدث الانعراج عند اصطدام الموجة بمتضمن خبثي صغير أو فقاعة غازية في المعدن حيث ينحني جزء من الموجة حول العيب مما يؤدي إلى إضعاف الانعكاس. ومثال آخر يتمثل في أنعرج الحزمة فوق الصوتية بالقرب من حافة عينة كما هو مبين في الشكل



انعراج حزمة الأمواج فوق الصوتية حول العيب وبالقرب من الحافة

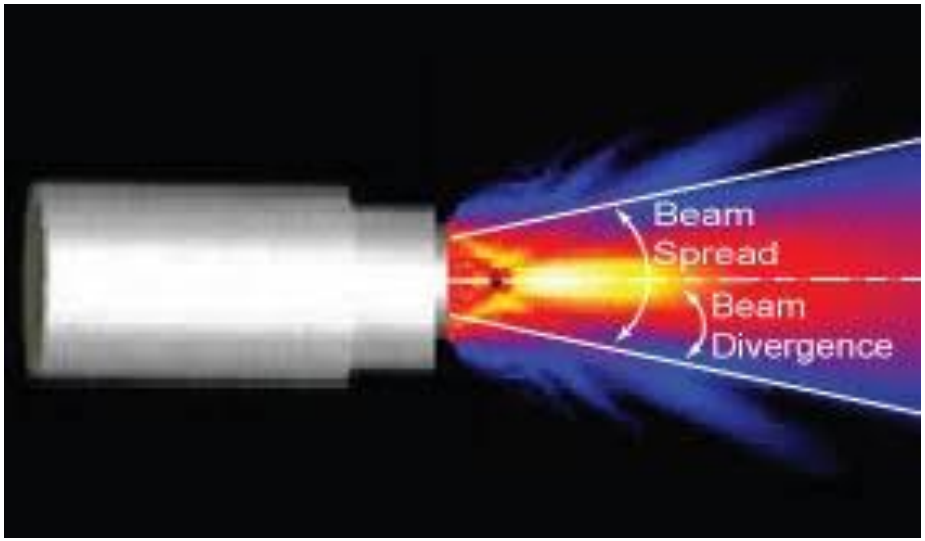

Side (B) TOFD:0 Gate main Complete Patch
152.1
12.29
Transverse Crack
Root Crack
Lack of Side Wall Fusion
Slag
60mm
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260


TOFD مبدأ تقنية
T
R
Scan Direction
Back wall echo
Lateral wave
UT Display
Diffracted waves


Scan Axis (mm)
Lateral
Flaw
BW
Mode converted & Shear Wave signals

توهين الأمواج فوق الصوتية نتيجة للإنتشار:

تتوهن الأمواج فوق الصوتية نتيجة لتوسع مسار الحزمة بفعل انتشارها المخروطي في العينة.



- the energy in the beam does not remain in a cylinder, but instead spreads out as it propagates through the material.
- beam spread is twice the beam divergence.

مؤشرات عملية:

•كقاعدة عامة يمكن أن يتم وصف عيب ما متواجد ضمن مادة ذات بنية حبيبة ناعمة بأنه قابل للكشف إن كان أكبر أو يساوي **λ/3** من طول الموجة.

•يمكن إهمال التوهين في طاقة الحزمة الصوتية عند اختبار **المواد ذات التوهين الضعيف** كالمطروقات من الفولاذ منخفض الخلط ومصبوبات الألمنيوم منخفض الخلط مع المغنزيوم ومشغولات الفولاذ مع النيكل حيث أن قيمة التوهين في هذا النوع من المعادن أقل من **[dB/m] ١٠**.

•من بين المواد ذات **التوهين المتوسط** التي تصل نسبة التوهين فيها إلى **100[dB/m]** الفولاذ عالي الخلط، النحاس والرصاص والمعادن القاسية والمعادن المحضرة بالتلبيد (Sintered metals)

•من بين **المواد عالية التوهين** التي تزيد نسبة التوهين فيها عن **100[dB/m]** البلاستيك والمطاط والبيتون والسيرميك والخشب ومصبوبات الفولاذ عالي الخلط ومصبوبات الألمنيوم عالي الخلط مع المغنيزيوم، مصبوبات النحاس، مصبوبات التوتياء، مصبوبات البراس، مصبوبات البرونز. فمن الصعب اختيار هذه المواد إن لم تكن ذات ثخانة ضعيفة.

يمكن عند تعذر اختبار هذه المواد بتقنية صدى النبضة اللجوء إلى محاولة اختبارها بتقنية العبور (Through Transmission Technique)

عندما تكون المسافة $T>3N$ فإنه يمكن تطبيق قانون انتشار الموجة من أجل عاكس كبير **حيث يكون ارتفاع النبضة متناسباً عكساً مع المسافة** وبالتالي فإذا ما تم مضاعفة المسافة فإن ارتفاع النبضة ينخفض إلى النصف أو ما يعادل انخفاض بمقدار (6dB) أي أن قيمة معامل التوهين الناتج عن الانتشار هو $\Delta HBs = 6dB$

لتحديد الأبعاد الحقيقة للعيب وحجمه يجب تحديد الارتفاع الحقيقي للنبضة على شاشة الجهاز وذلك بتعويض الطاقة الصوتية التي فقدتها النبضة بنتيجة التوهين، وهذا يتطلب معرفة عامل التوهين للعينة المختبرة وعامل التوهين لبلوك المعايرة عند اللزوم.

يحسب عامل التوهين للضغط الصوتي الناتج عن التبعثر والامتصاص من العلاقة:

$$\alpha = (20/d) .\log(p_o/p) \qquad [dB/m]$$

حيث:

α = عامل التوهين ويقاس بـ [dB/m] أو [dB/mm].

p_o= الضغط الصوتي الأولي على مسافة d=0.

P = الضغط الصوتي على مسافة d في العينة.

ولما كان ضغط الصوت متناسباً مع ارتفاع إشارة صدى العيب على شاشة الجهاز وبالتالي فإنه يمكن كتابة العلاقة كما يلي:

$$\alpha = (20/d) .\log(H_o/H) \qquad [dB/m]$$

من أجل التطبيقات العملية ولكل اختبار، يجري حساب التوهين بالمقارنة ما بين مطالات الصدى للجدار الخلفي (Back wall echoes)

مبدأ قياس التوهين:

لدى اختبار صفيحة من الفولاذ كان الفرق بين مطال الصدى الخلفي الأول (H_{B1}) والصدى الخلفي الثاني (H_{B2}) مساوياً إلى:

$$\Delta H = H_{B1} - H_{B2}$$

يمكن اعتبار الفرق في مطال الصدى ناتجاً عن مجموع التوهين بسبب الانتشار (ΔHbeam spred) والتوهين الناتج عن التبعثر والامتصاص ΔHbeam(ab+s) خلال المسار بين النبضتين أي:

$$\Delta Hbeam\ spred + \Delta Hbeam(\ ab+s) = \mathbf{\Delta H}$$

عندما تكون المسافة T>3N فإنه يمكن تطبيق قانون انتشار الموجة من أجل عاكس كبير حيث يكون ارتفاع النبضة متناسباً عكساً مع المسافة. وبالتالي فإذا ما تم مضاعفة المسافة فإن ارتفاع النبضة ينخفض إلى النصف **أو ما يعادل انخفاض بمقدار (6dB)** أي أن قيمة معامل التوهين الناتج عن الانتشار هو ΔHbeam spred = 6dB

وينتج عامل التوهين α بتقسيم ΔHbeam(ab+s) على المسافة الكلية التي قطعتها الموجة في العينة

$$\alpha = \Delta Hbeam(\ ab+s)\ /2T = (\Delta H\ -6)/2T \quad [dB/m]$$

وبالتالي يحسب عامل التوهين بالعلاقة:

$$\mathbf{\alpha = (\Delta H\ -6)\ /\ 2T \qquad [dB/m]}$$

حيث: $T \geq 3N$

مثال:

تم اختبار عينة من الفولاذ ذات ثخانة 30mm بمسبار ذو قطر 10mm يعمل على تردد 4MHz أوجد معامل التوهين للعينة α ، علماً بأن الفرق ما بين مطال النبضة الثانية والرابعة على شاشة جهاز الاختبار تساوي إلى [dB] 10.

الحل:

حساب طول الحقل القريب:

$$N = D^2/4\lambda = D^2.f/4v = 100.4.10^6/4\times5940\ .1000 = 17mm$$

إن المسافة التي تقطعها الموجة الأولى للحصول على موجة الصدى الثانية للجدار الخلفي هي:

$$T = 60mm$$

أن $T>3N$ وبالتالي فإن إشارة الصدى الخلفي الثانية والرابعة مختلفتين بالمطال بمقدار 6dB ومنه:

$$\alpha = (\Delta H - 6)\ 2T$$

$$=(10 - 6) / 2 \times 60$$

$$= 4/120 = 1/ 30\ [dB/mm] = 33\ [dB/m]$$

وهذه العينة تنتمي إلى المواد ذات التوهين المتوسط.