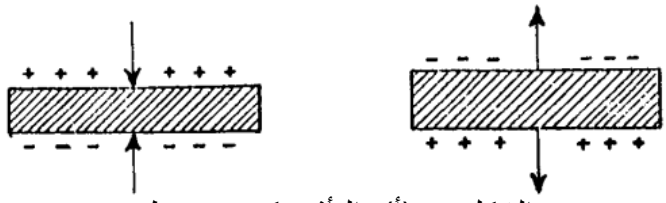
مسابر الأمواج فوق الصوتية

1. المبادئ الخاصة بمسابر الأمواج فوق الصوتية

1.1. التأثير الكهروضغطي على الكريستالة (PIEZOELECTRIC EFFECT ON THE CRYSTAL)

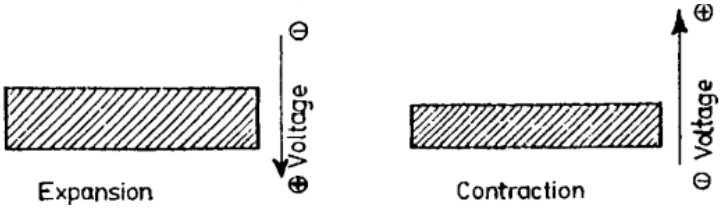
المسبار هو جهاز يحوّل أحد أشكال الطاقة إلى شكل آخر. تقوم مسابر الأمواج فوق الصوتية بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة فوق صوتية والعكس صحيح من خلال استخدام ظاهرة تُعرف باسم التأثير الكهروضغطي. تُعرف المواد التي تظهر هذه الخاصية بالمواد الكهروضغطية.

في التأثير الكهربي الانضغاطي المباشر ، الذي اكتشفه الأخوان كوري لأول مرة في عام 1880، ستولّد مادة كهرضغطية عند تعرّضها لضغط ميكانيكي جهداً كهربائياً عبرها كما في الشكل 1 (أ).



الشكل. 1 (أ). التأثير كهروضغطي

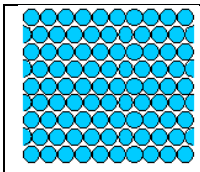
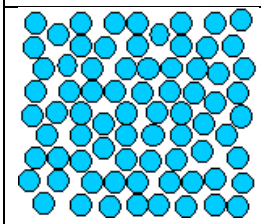
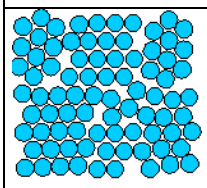
يبين الشكل 1 (ب).التأثير الكهربائي الانضغاطي العكسي ، الذي تنبأ به ليبمان لأول مرة في عام 1881 وأكّده الأخوان كوري لاحقاً تجريبياً في نفس العام ، يتم انتاج التشوّه الميكانيكي وبالتالي الاهتزاز في المواد الكهروضغطية كلما تم تطبيق جهد كهربائي عليها. يستخدم التأثير الكهروضغطي المباشر في الكشف والتأثير الكهروضغطي العكسي في توليد الأمواج فوق الصوتية.



الشكل.1 (ب). تأثير كهروضغطي معكوس

2.1 تصنيف المسابر الكهروضغطية

يمكن تصنيف المسابر الكهروضغطية إلى مجموعتين. يتم التصنيف بناءً على نوع المادة الكهروضغطية المستخدمة في تصنيع المسبار. إذا كانت المسابر مصنوعة من مادة بلوريّة مفردة يحدث فيها التأثير الكهروضغطي بشكل طبيعي ، و تصنّف على أنها مسابر بلورة كهروضغطية. من ناحية أخرى ، تسمى المسابر المصنوعة من مواد متعددة البلورات (polycrystalline)، والتي

	الهياكل مفردة البلورة (Crystalline) مرتبة للغاية وشبكتها متصلة وغير منقطعة .
	المواد غير المتبلورة (amorphous) يمكن أن يكون اتجاه البلورات عشوائياً بدون اتجاه مفضّل ، يسمى نسيج عشوائي ، أو موجهاً ، بسبب ظروف النمو والمعالجة. معظم المواد متعددة البلورات ، مصنوعة من عدد كبير من البلورات المتماسكة معاً بواسطة طبقات رقيقة من مادة صلبة غير متبلورة.
	الهياكل متعددة البلورات (Polycrystalline) والمراحل البلورية (para crystalline) تكون بين هاتين البنيتين. وهي مواد صلبة تتكوّن من العديد من البلورات ذات الأحجام والاتجاه المتفاوت.

يجب أن يحدث فيها التأثير الكهروضغطي عن طريق الاستقطاب ، على أنها مواد electrostrictive أو المسابر سيراميكية مستقطبة.

3.1. مواد المسابر الكهروضغطية مفردة البلورة (Piezoelectric crystal)

من المواد أحادية البلورة التي يحدث فيها التأثير الكهروضغطي بشكل طبيعي الكوارتز والتورمالين وكبريتات الليثيوم و باريوم تيتانيت و كبريتيد الكادميوم و ليد زيركونيت تيتانيت و أكسيد الزنك .

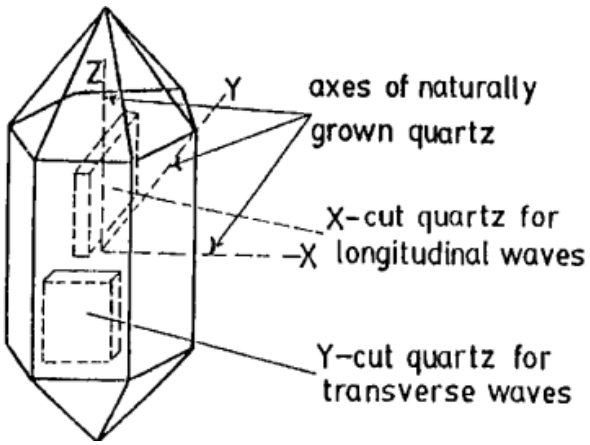
كوارتز	Quartz (SiO_2)
ليثيوم سولفايت	Lithium Sulphate (Li_2SO_4)
باريوم تيتانيت	Barium Titanate ($BaTiO_3$)
ليد زيركونيت تيتانيت	Lead Zirconate Titanate ($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$)

الكوارتز وكبريتات الليثيوم هي الأكثر استخداماً في تصنيع مسابر الأمواج فوق الصوتية.

أ) الكوارتز (SiO_2) Quartz

بلورات الكوارتز الطبيعية أو الإصطناعية لها شكل محدّد موصوف بواسطة محاور البلورة ، و هي المحاور X و Y و Z .

لا يمكن تحقيق التأثير الكهروضغطي في الكوارتز إلا عندما يتم قطع الشرائح الصغيرة المتعامدة إما على المحور X أو المحور Y من بلورة الكوارتز. وتسمى هذه البلورات أو المسابر بتقنية القطع X-cut أو Y-cut .



الشكل. 2. نظام محاور في بلورة كوارتز (مبسّطة) موضوع عند قطع X و Y في بلورة

تُستخدم بلورات X-cut لتوليد واستقبال الأمواج فوق الصوتية الطوليّة بينما تُستخدم بلورات القطع Y-cut لتوليد واستقبال الأمواج فوق الصوتية العرضيّة.

يمكن انتاج الأمواج العرضيّة والسطحية من بلورة مقطوعة بشكل X من خلال الاستفادة من ظاهرة تحوّل الطور (mode conversion).

فيما يلي بعض مزايا وقيود الكوارتز عند استخدامه كمسبار أمواج فوق صوتية:

المزايا

(1) شديد المقاومة للتآكل ؛

(2) غير قابل للذوبان في الماء ؛

(3) لديه استقرار ميكانيكي وكهربائي عالٍ ؛

(4) يمكن تشغيله في درجات حرارة عالية.

القيود

(1) أنه مكلف نسبياً ؛

(2) وهو أقل كفاءة في توليد طاقة الأمواج فوق الصوتية ؛

(3) يعاني من تحوّل الطور - عند استخدام الكوارتز المقطوع بشكل X لتوليد موجات طوليّة فإنه يُولّد موجات عرضية أيضاً. (يتم انتاج الأمواج العرضيّة لأن البلورة المقطوعة بشكل X عند ضغطها تتمدّد في اتجاه Y أيضاً. ينتج عن تولّد الأمواج العرضيّة إشارات زائفة بعد النبضة الرئيسية).
(4) تتطلّب جهداً عالياً لتشغيلها (high voltage).

ب) كبريتات الليثيوم (Li_2SO_4) Lithium Sulphate

كبريتات الليثيوم هي بلورة كهروضغطية أخرى تستخدم عادةً في تصنيع مسابر الأمواج فوق الصوتية. فيما يلي بعض مزايا وقيود مسابر كبريتات الليثيوم:

المزايا

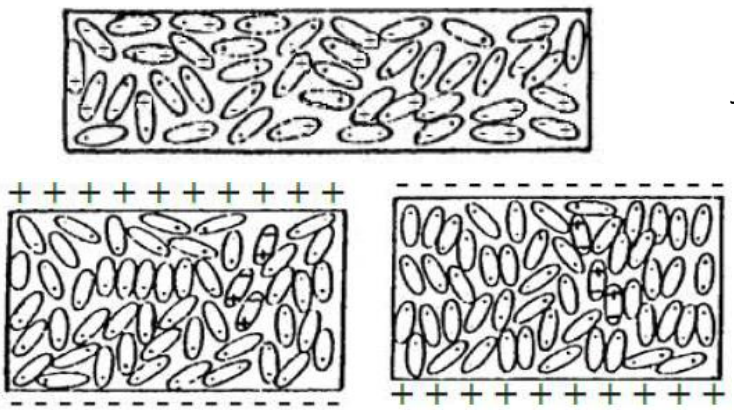
(1) هي أفضل مستقبل كفاءةً للأمواج فوق الصوتية ؛
(2) يمكن تخميدها بسهولة بسبب مقاومتها الصوتية (acoustic impedance) المنخفضة ؛
(3) ليس لها عمر فعالية محدّد؛
(4) تتأثر قليلاً جداً من تحويل الطور.

القيود

(1) إنها هشّة للغاية ؛
(2) قابلة للذوبان في الماء ؛
(3) يقتصر استخدامها على درجات حرارة تقل عن 75 درجة مئوية.

ج) المسابر السيراميكة المستقطبة

استبدلت المسابر السيراميكة المستقطبة الكوارتز بالكامل تقريباً وهي في طريقها لاستبدال البلورات المنتجة صناعياً كـ كريستالة للمسابر. مواد المسابر السيراميكة المستقطبة ذات طبيعة حديدية كهربائية (ferroelectric). تتكوّن المواد الفيروكهربائية من العديد من المجالات "domains " التي يتضمّن كل منها عدداً كبيراً من الجزيئات ، ولكلٍ منها شحنة كهربائية صافية. في حالة عدم وجود تدرّج جهد في المادة، تتوجّه هذه الـ domains بشكل عشوائي الشكل. 3. إذا تم تطبيق جهد ما ، فإن الـ domains تميل إلى الاصطفاف في اتجاه المجال. نظراً لأن شكل الـ domains أطول في اتجاه الاستقطاب منه عن اتجاه سماكته ، فإن المادة ككل تتمدّد.
إذا تم عكس اتجاه الجهد ، فإن الـ domains أيضاً تعكس الاتجاه و تتمدّد المادة مرة أخرى. هذا على عكس المواد البلورية الكهروضغطية التي تنكمش لجهد في اتجاه واحد وتتمدّد للجهد في الاتجاه المعاكس.



الشكل. 3. الـ Domains في المواد الفيروكهربائية

يمكن تغيير الوضع الفيروكهربائي (أي التمدّد لكل من الجهد الموجب والسالب) بسهولة إلى الوضع الكهروضغطي عن طريق تسخين المادة الكهروضغطية إلى نقطة كوري (درجة الحرارة التي تفقد فوقها المادة الفيروكهربائية خصائصها الفيروكهربائية) ثم تبريدها تحت تأثير جهد متحيّز (bias voltage) يبلغ حوالي 1000 فولت لكل مم. وبهذه الطريقة ، يتم تجميد الـ domains الفيروكهربائية بشكل فعّال في اتجاهات مجال التحيّز الخاصة بها ويمكن بعد ذلك معالجة المادة المستقطبة على أنها كهروضغطية.

يتم انتاج المسابر السيراميكية المستقطبة ، كما يوحي الاسم ، مثل الأطباق الخزفية. وهي مصنوعة من مساحيق مختلطة معاً ثم يتم حرقها أو تسخينها إلى مادة صلبة.

يتم التحكم في الخصائص المميزة المطلوبة للمسبار لتطبيقات معينة عن طريق إضافة مركبات كيميائية مختلفة بنسب مختلفة.

نظراً لأنه قبل الاستقطاب ، تكون المسابر السيراميكية هذه متجانسة الخواص (isotropic)، فلا تتطلّب قطعاً بالإتجاه إلى أي محور معين.

وبالتالي من الممكن تشكيلها بأي شكل مناسب ، على سبيل المثال يمكن انتاج مسبار مقعّر قادر على تركيز الأمواج فوق الصوتية دون صعوبة. بعض مزايا وقيود المسابر السيراميكية هي:

المزايا

(1) إنها مولّدات فعّالة للأمواج فوق الصوتية ؛

(2) تعمل بجهد منخفض ؛

(3) يمكن استخدام بعضها لتطبيقات درجات الحرارة العالية ، مثلاً تبلغ نقطة كوري 550 Cº للـ lead metaniobate .

القيود

(1) قد تنخفض خاصية الكهروضغطية مع الزمن ؛

(2) لديها مقاومة منخفضة للإهتراء ؛

(3) تعاني من تحوّل الطور.

4.1. مقارنة بين المسابر الكهروانضغاطيّة

ثابت التشوّه الكهربي الانضغاطي "H " هو مقياس لقدرة المسبار على العمل كمستقبل للأمواج فوق الصوتية. تُظهر قيم H العالية القدرة الأكبر للمسبار كمستقبل. من الجدول ادناه ، يتضح أن كبريتات الليثيوم هي أفضل مستقبل للأمواج فوق الصوتية.

يوضّح عامل الاقتران الكهروميكانيكي "K " كفاءة المسبار لتحويل الجهد الكهربائي إلى إزاحة ميكانيكية والعكس صحيح. هذه القيمة مهمة لتقنية صدى النبضة (pulse echo) حيث يعمل المسبار كمرسل ومستقبل.

تعني القيم الأعلى لـ "K " أن الكفاءة الإجمالية للمسبار كجهاز إرسال وجهاز استقبال أفضل.

تكمن قيم lead metaniobate و lead zirconate-titanate و barium-titanate في ترتيب مماثل. تتطلّب قدرة الدّقة (resolution) المُرضية أن يكون عامل الاقتران (coupling) للتذبذب المحوري "Kp " منخفضاً قدر الإمكان.

"Kp " هو مقياس لظهور التذبذبات المحورية المزعجة التي تعمل على توسيع (widen) الإشارات. هذه التذبذبات المحورية ناتجة عن اضطرابات تحويل النمط للمسابر. من وجهة النظر هذه ، كبريتات الليثيوم و الـ lead metaniobate هي أفضل المواد للمسبار.

نظراً لأنه في حالة التلامس بالإضافة إلى اختبار الغمر ، يلزم وجود مادة اقتران (Couplant) سائلة ذات مقاومة صوتية منخفضة "Z " (acoustic impedances)، يجب أن تحتوي مادة المسبار على معاوقة صوتية من نفس الترتيب لإعطاء نقل أفضل لطاقة الأمواج فوق الصوتية إلى كائن الاختبار. في هذا الصدد ، فإن أفضل الخيارات هي كبريتات الليثيوم أو metaniobate lead أو الكوارتز لأن كل منهم لديه مقاومة صوتية منخفضة.

يُوضّح الجدول التالي بعض خصائص المسابر الكهروانضغاطية المشتركة

	Lead zirconate titanate	Barium titanate	Lead metaniobate	Lithium sulphate	Quartz	Lithium niobate
Sound velocity 'v' m/s	4000	5100	3300	5460	5740	7320
Acoustic impedance 'Z' 10^6 kg/m^2s	30	27	20.5	11.2	15.2	34
Electromechanical coupling factor 'K'	0.6 - 0.7	0.45	0.4	0.38	0.1	0.2
Piezoelectric modulus 'd'	150 - 591	125 - 190	85	15	2.3	6
Piezoelectric deformation constant 'H'	1.8 - 4.6	1.1 - 1.6	1.9	8.2	4.9	6.7
Coupling factor for radial oscillations 'K_p'	0.5 - 0.6	0.8	0.07	0	0.1	-

2. مكونات مسابر الأمواج فوق الصوتية

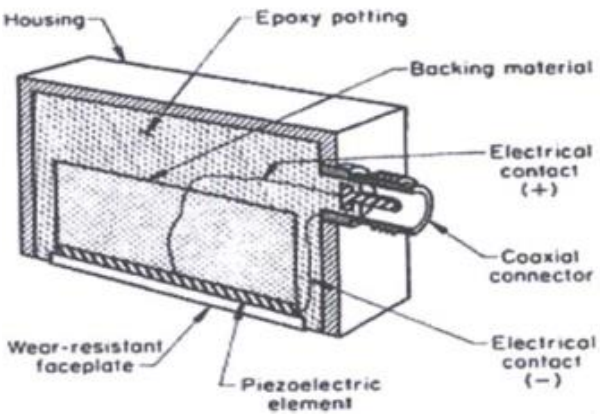
يستخدم مصطلح المسبار في الإختبار بالأمواج فوق الصوتية للأداة المستخدمة لارسال واستلام الأمواج فوق الصوتية. يسمى أيضاً وحدة بحث أو مجس (search unit, transducer , probe). يتكوّن مسبار الأمواج فوق الصوتية (الشكل 4) من:

(أ) بلورة كهرضغطية أو كريستالة (piezoelectric crystal) ؛

(ب) مادة حشو (backing material)؛

(ج) محوّل مطابقة (matching transformer) يطابق الممانعة الكهربائية للمسبار الكهروضغطي مع الممانعة الكهربائية للكابل و جهاز الأمواج فوق الصوتية من أجل نقل الطاقة القصوى من الكبل إلى المسبار والعكس بالعكس

(د) العلبة وهي مجرد حاوية بأبعاد وتركيب مناسبين.



الشكل 4. مسبار حزمة مستقيمة (موجة طولية)

1.2. توليد الأمواج في المسابر الكهروضغطية

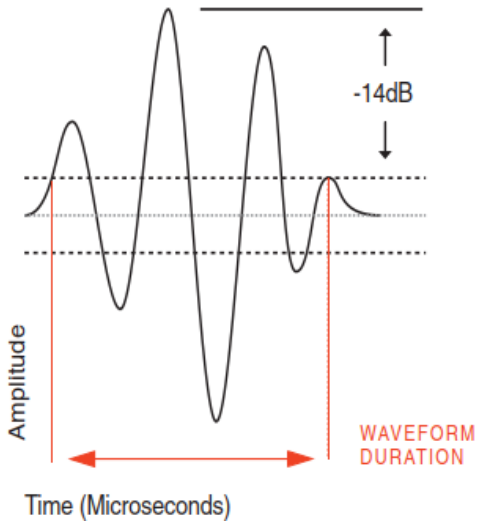
يتم تحفيز مسبار الأمواج فوق الصوتية بشكل عام بواسطة نبضة جهد تقل مدتها الزمنية عن 10 ميكرو ثانية. تتكوّن نبضة الجهد القصيرة من طيف من الترددات. من بين هذه الترددات ، تهتز الكريستالة بأقصى سعة عند التردد المعروف باسم تردد الرنين للمسبار ، والذي يرتبط بسماكة الكريستالة على النحو التالي: $f_r = v / 2t$ (1)

حيث: f_r = تردد الرنين للكريستالة و t = سماكة الكريستالة و
v = سرعة الأمواج الطولية للأمواج فوق الصوتية في مادة الكريستالة.

يتم استخدام المعادلة (1) لتحديد سماكة كريستالة المسبار المطلوبة لإنشاء مسبار فوق صوتي بتردد معين. على سبيل المثال ، لعمل مسبار بتردد 1 ميجاهرتز ، ستكون سماكة بلورة الكوارتز 2.98 مم. و ستبلغ السماكة لتردد 10 ميجاهرتز 0.298 مم ، بينما ستكون للتردد 20 ميجاهرتز 0.14 مم. مع الأخذ بالاعتبار أن حساسية كشف الخلل ستتحسّن كثيراً باستخدام مسبار 20 ميجاهرتز ، لكن الكريستالة في هذه الحالة ستكون رفيعة للغاية وبالتالي هشّة للغاية ويصعب التعامل معها. (عند هذا التردد ، يكون طول الموجة = 0.298 مم وحساسية كشف الخلل في حدود λ/ 3 = 0.1 مم)
لذلك ، من الناحية العملية ، يجب إجراء حل وسط بين سماكة الكريستالة التي يمكن إدارتها بشكل ملائم وحساسية كشف الخلل التي يجب تحقيقها. في الحالات التي تتطلّب حساسية عالية بشكل أساسي ، يتم غمر المجسات في سائل ويتم إجراء معظم الاختبارات باستخدام المسبار الذي يتلقى أقل قدر ممكن من الاضطراب.
المعلومة المهمة الأخرى للكريستالة التي تؤثّر على الحزمة فوق الصوتية هي قطرها (D)، يعتمد قطر الكريستالة على طول الحقل القريب ، وتباعد الحزمة وعرض الحزمة عند نقطة معينة.
تحتوي معظم المسابر على أسطح محورية دائرية بأقطار تتراوح من 5 إلى 40 مم تقريباً.
تعتبر الأقطار الأكبر من 40 مم غير مناسبة لمعظم حالات الاختبار نظراً لعدم توفّر سطح ملامسة مسطّح مطابق. عيب الأقطار الأصغر ، خاصة في حالة الترددات المنخفضة ، هو الإنبعاث الأكبر للموجات العرضيّة الجانبية والأمواج السطحية.هناك صعوبة أخرى تنشأ عن استخدام المسابر ذات الأقطار الصغيرة وهي الحساسية المنخفضة بشكل كبير.
لتزويد البلورة بالنبضات الكهربائية ، يجب توصيل وجهيها كهربائياً باستخدام الأسلاك. لهذا الغرض ، يتم طلاء وجهي الكريستالة بالفضة ، ثم يتم توفير الوصل الكهربائي عن طريق لحام الأسلاك المتصلة بهذه الطبقة الفضية.
لمنع تآكل الكريستال يتم توفير وجه تآكل من طبقات رقيقة من أكسيد الألومنيوم ، أو الياقوت أو البورون أو الكربيدات.

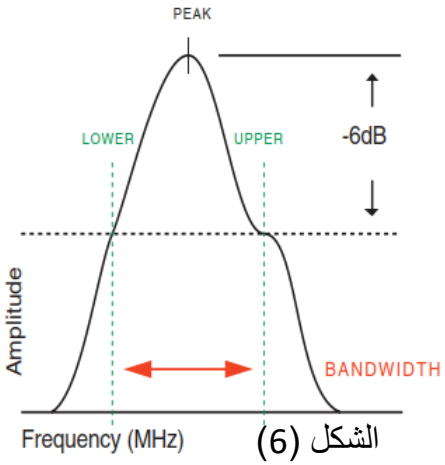
1.1.2. الشكل الموجي للكريستالة والطيف

يتم إجراء تحليل الطيف والشكل الموجي للكريستالة وفقاً لظروف الاختبار وتعريفات ASTM E1065 .
الوحدات النموذجية هي الـ mHz لتحليل التردد ، والميكروثانية لتحليل شكل الموجة ، و الـ db لهبوط مطال الذروة. يوضّح الشكل (5) مدة شكل الموجة عند مستوى -14 ديسيبل أو مطال 20٪ للذروة.
تقابل مدة شكل الموجة -40 ديسيبل مطال 1٪ للذروة.



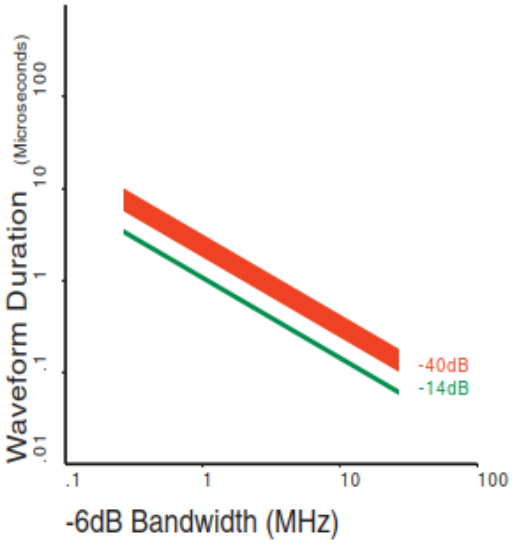
الشكل (5)

يوضح الشكل (6) قياسات ذروة التردد والترددات العلوية والسفلية -6 ديسيبل وقياسات عرض نطاق الحزمة بالميجاهرتز.



الشكل (6)

العلاقة بين عرض نطاق الحزمة بالـ mHz ومدة شكل الموجة مبينة في الشكل (7).
يكون التشتت أوسع عند -40 ديسيبل لأن الطرف الخلفي بنسبة 1٪ لشكل الموجة يحتوي على القليل جداً من الطاقة وبالتالي يكون له تأثير ضئيل جداً على تحليل عرض النطاق الترددي للحزمة. بسبب الانتشار ، من الأنسب تحديد أشكال الموجة في المجال الزمني (ميكروثانية) والأطياف في مجال التردد.



الشكل (7)

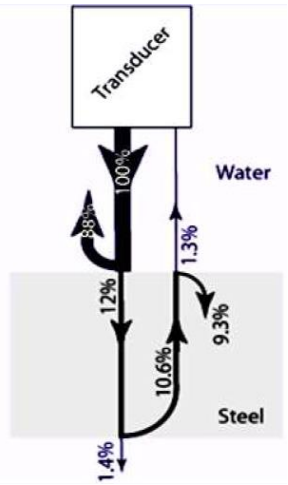
يمكن استخدام العلاقات التقريبية الموضحة في الشكل (7) للمساعدة في اختيار المسبار. على سبيل المثال ، إذا كانت هناك حاجة إلى مدة شكل موجة - 14 ديسيبل تبلغ ميكروثانية واحدة ، فما هو تردد المسبار الذي يجب اختياره؟
من الرسم البياني ، يتوافق عرض النطاق الترددي من حوالي 1 إلى 1.2 ميغا هرتز مع مدة شكل موجة تبلغ 1 ميكروثانية تقريباً - 14 ديسيبل.
بافتراض وجود مسبار عرض نطاق جزئي اسمي بنسبة 50٪، فإن هذا يحسب إلى تردد مركزي اسمي يتراوح من 2 إلى 2.4 ميغا هرتز.لذلك ، قد يكون مسبار2.25 mHz أو 3.5 mHz قابلاً للتطبيق.

2.1.2. الممانعة الصوتية ، الانعكاس والتوهين:

المعاوقة الصوتية للمادة هي مقاومة إزاحة جسيماتها بالصوت وتحدث في العديد من المعادلات.
يتم حساب المعاوقة الصوتية على النحو التالي:

$$Z = C\rho$$ (معادلة. 2)

Z = المعاوقة الصوتية، c = سرعة الصوت بالمادة
ρ = كثافة المادة



تسمى الحدود بين مادتين من ممانعات صوتية مختلفة بالواجهة الصوتية (acoustic interface). عندما يضرب الصوت واجهة صوتية بـ ورود شاقولي (normal) ، ينعكس قدر من الطاقة الصوتية وينتقل مقدار ما عبر الحدود. يُعطى فقدان الطاقة بالديسيبل عند إرسال إشارة من الوسط 1 إلى الوسط 2 من خلال:

$$dB\ loss = 10\ Log_{10}\ [4Z_1Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2]$$ (معادلة 3.أ)

Z_1= المعاوقة الصوتية للمادة الأولى ، Z_2 = المعاوقة الصوتية للمادة الثانية

يُعطى فقدان الطاقة db لإشارة الصدى في الوسط 1 المنعكس من حد السطح البيني مع الوسط 2 من خلال العلاقة:

$$dB\ loss = 10\ Log_{10}\ [(Z_2 - Z_1)^2 / (Z_1 + Z_2)^2] \qquad \text{(معادلة. 3 ب)}$$

على سبيل المثال:

خسارة الـ db عند الإرسال من الماء (Z = 1.48) إلى الفولاذ 1020 (Z= 45.41) تساوي = - 9.13 db ؛ و هي أيضاً الخسارة التي تنتقل من الفولاذ 1020 إلى الماء.

فقدان الديسيبل لصدى الجدار الخلفي في الفولاذ 1020 في الماء هو -0.57 ديسيبل ؛ و أيضاً هو فقدان الديسيبل للصدى الخارج من الفولاذ 1020 في الماء. يتم عكس شكل موجة الصدى عندما يكون $Z_2 < Z_1$.

أخيراً ، تضعف الموجات فوق الصوتية لأنها تتقدّم عبر الوسط. بافتراض عدم وجود انعكاسات كبيرة ، هناك ثلاثة أسباب للتوهين (attenuation): الانعراج (diffraction)، و التبعثر (scattering) والإمتصاص (absorption).

يمكن أن يلعب مقدار التوهين خلال مادة ما دوراً مهماً في اختيار المسبار لتطبيق ما.

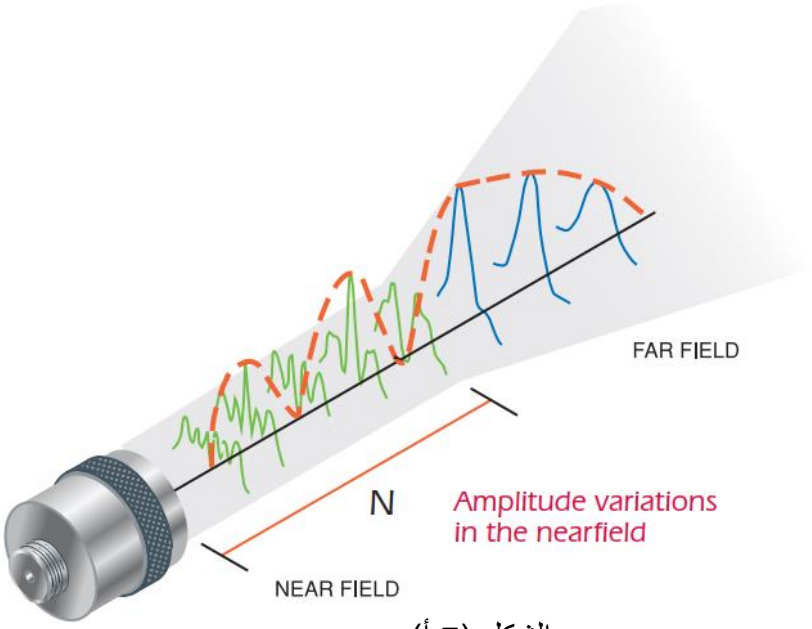
3.1.2. حقل الصوت

ينقسم حقل الصوت لمسبار إلى منطقتين (الشكل 7 أ) ؛ الحقل القريب والحقل البعيد.

الحقل القريب هو المنطقة الواقعة مباشرة أمام المسبار حيث يمر مطال الصدى عبر سلسلة من الحدود القصوى والصغرى وينتهي عند الحد الأقصى الأخير ، على مسافة n من المسبار.

في شكل الحزمة أدناه ، الشكل 7 ، يمثل اللون الأحمر مناطق ذات أعلى طاقة ، بينما يمثل اللون الأخضر والأزرق طاقة أقل.

الشكل (7)



الشكل (7 أ)

يُعرف موقع الحد الأقصى الأخير بمسافة الحقل القريب (N أو+Y0) وهو المحرق الطبيعي للمسبار. الحقل البعيد هو المنطقة التي تتجاوز N حيث ينخفض ضغط حقل الصوت تدريجياً إلى الصفر.

بسبب الاختلافات داخل الحقل القريب ، قد يكون من الصعب تقييم العيوب بدقة باستخدام التقنيات القائمة على المطال. مسافة الحقل القريب هي تابع لتردد المسبار وقطر الريستالة وسرعة الصوت بمادة الاختبار كما هو موضح في المعادلة 4:

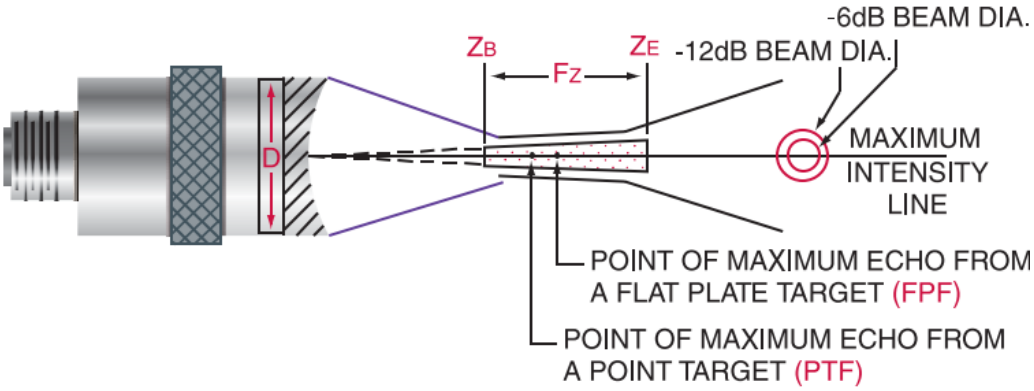
$N=D^2f/4c$ معادلة. 4 $N=D^2/4\lambda$ معادلة. 4 أ

N = مسافة المجال القريب ، D = قطر الريستالة ، f = التردد

c = سرعة الصوت بالمادة ، λ = طول الموجة

4.1.2. متغيرات أخرى لحزمة الصوت

هناك عدد من متغيرات حقل الصوت المفيدة في وصف خصائص المسبار. بالإضافة إلى الحقل القريب ، قد تكون معرفة عرض الحزمة والمنطقة المحرقية ضرورية لتحديد ما إذا كان مسبار معين مناسباً لفحص محدّد. يُعطي الشكل (8) تمثيلاً بيانياً لهذه المتغيرات:



Z_B= بداية المنطقة المحرقية ، F_z = المنطقة المحرقية، Z_E = نهاية المنطقة المحرقية

D= قطر العنصر

الشكل (8)

لاحظ أن المسافة إلى أقصى صدى من هدف الصفيحة المستوية والحد الأقصى للصدى من الهدف النقطي ليسا متماثلين ، على الرغم من أن كليهما سيحدث ضمن المنطقة المحرقية المحسوبة 6- ديسيبل.

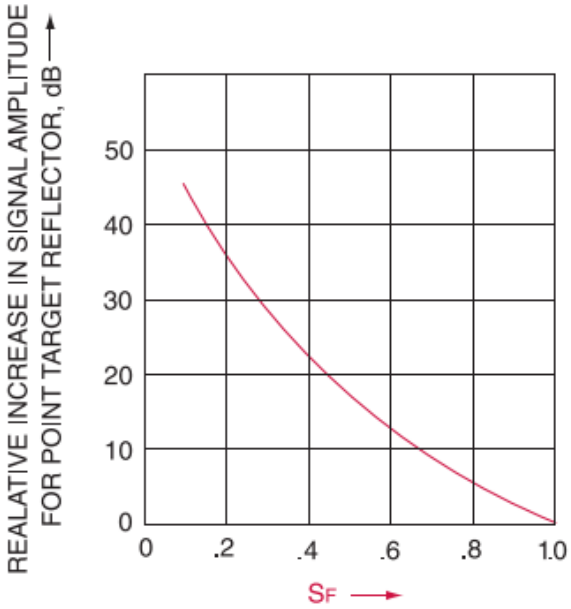
5.1.2. قطر الحزمة

تتأثر حساسية المسبار بقطر الحزمة عند نقطة الاهتمام. كلما كان قطر الحزمة أصغر ، زادت كمية الطاقة التي ينعكس عليها الخلل. يمكن حساب قطر حزمة صدى النبضة 6- ديسيبل عند المحرق باستخدام المعادلة 5 أو 5 أ. بالنسبة لمسبار مستوي ، استخدم المعادلة 5 أ مع SF = 1

$BD(-6dB) = 1.02Fc/fD$ معادلة. 5

$BD(-6dB) = 0.2568\ DSf$ معادلة. 5 أ

BD = قطر الحزمة
F = الطول المحرقي
c = سرعة الصوت بالمادة
f = التردد
D = قطر العنصر
S_F = الطول المحرقي المنمزج (S_F=F/N)
n = الحقل القريب



الشكل (9)

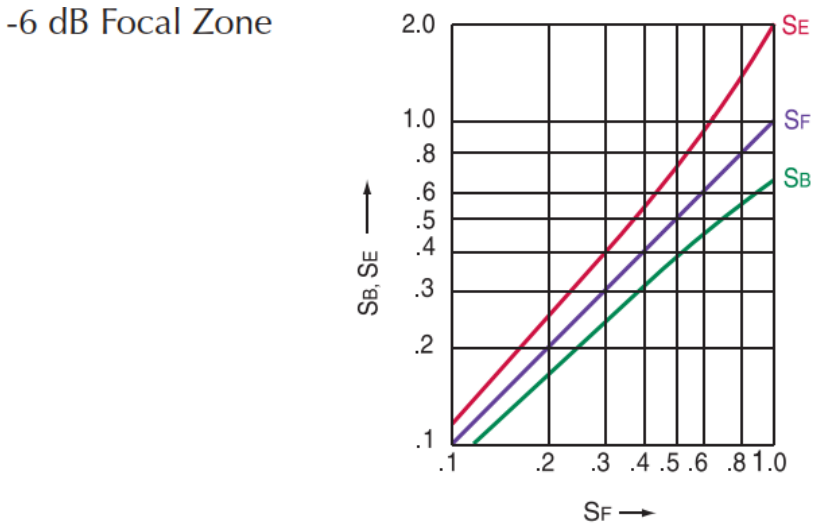
6.1.2. المنطقة المحرقية

تقع نقطتا البداية والنهاية للمنطقة المحرقية حيث ينخفض مطال إشارة صدى النبضة على المحور إلى - 6 ديسيبل من المطال عند نقطة التركيز (نقطة المحرق) . يعطى طول المنطقة المحرقية بالمعادلة 6:

$$F_Z=N*S_F^2\ [2/(1+0.5S_F)]$$ معادلة. 6

F_Z = المنطقة المحرقية ، N = الحقل القريب ، S_F = الطول المحرقي المنمزج

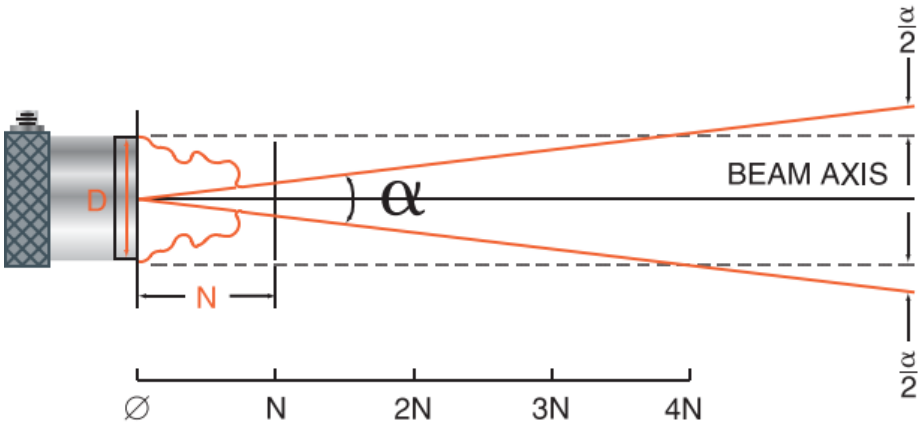
يوضح الشكل (7) البداية المنمزجة (S_B) ونقطة النهاية (S_E) للمنطقة المحرقية -6 ديسيبل مقابل عامل التركيز (focusing factor).



الشكل (7)

7.1.2. انتشار الحزمة ونصف الزاوية

تتباعد جميع الحزم فوق الصوتية. بعبارة أخرى ، جميع المسابر لها حزمة منتشرة. يعطي الشكل (8) عرضاً مبسطاً لحزمة الصوت لمسبار مستوي. في الحقل القريب ، يكون للحزمة شكل معقد يضيق. و في المجال البعيد تتباعد الحزمة.



الشكل (8)

بالنسبة للمسابرالمستوية كما هو موضح في الشكل (8) ، تُعطى زاوية الانتشار لحزمة صدى النبض - 6 ديسيبل بالمعادلة (7):

$$\sin(\alpha/2)=0.514c/fD$$ معادلة. 7

α/2 = انتشار نصف الزاوية بين نقاط -6 ديسيبل

يمكن أن نرى من هذه المعادلة أن انتشار الحزمة من مسبار يمكن تقليله عن طريق اختيار مسبار بتردد أعلى أو قطر كريستالة أكبر أو كليهما.

3. تصميم المسابر

1.3. مكونات مسبار الأمواج فوق الصوتية

المسبار هو أي جهاز يحوّل أحد أشكال الطاقة إلى شكل آخر. يحوّل مسبار الأمواج فوق الصوتية الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية ، على شكل صوت ، والعكس صحيح.

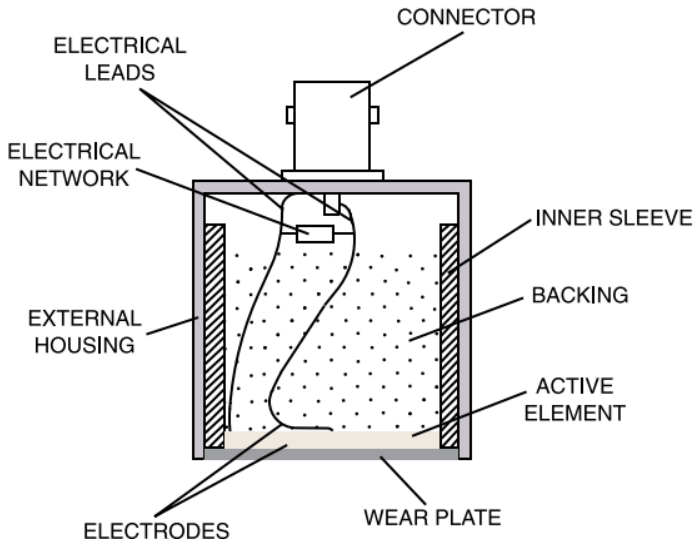
المكونات الرئيسية هي :

أ) العنصر النشط ،

ب) مادة الحشو والتخميد،

ج) صفيحة التآكل.

د) الوجه الواقي والعلبة



الشكل (9)

أ. العنصر النشط (The Active Element)

العنصر النشط ، وهو مادة بيزو (piezoelectric) أو مادة كهروحديدية (ferroelectric)، يحوّل الطاقة الكهربائية مثل نبضة الإثارة من جهاز كاشف العيوب إلى طاقة فوق صوتية.
المواد الأكثر استخداماً هي السيراميك المستقطب الذي يمكن قصه بطرق متنوعة لإنتاج أنماط موجيّة مختلفة. يتم أيضاً استخدام مواد جديدة مثل البيزو بوليمرات الانضغاطية والمواد المركبة للتطبيقات حيث توفّر ميزات للمسبار ولأداء النظام.

ب. مادة الحشو (Backing material)

عادةً ما يكون الحشو عبارة عن مادة مُوَهّنة (attenuative) للغاية وعالية الكثافة تُستخدم للتحكم في اهتزاز الكريستالة عن طريق امتصاص الطاقة المنبعثة من الوجه الخلفي للعنصر النشط.
عندما تتطابق المعاوقة الصوتية للحشوة مع الممانعة الصوتية للعنصر النشط ، فإن النتيجة ستكون مسبار مُخمّد بشدة ، يُظهر دقة مجال جيدة ولكن قد يكون أقل في مطال الإشارة. إذا كان هناك عدم تطابق في المعاوقة الصوتية بين العنصر والحشو ، سوف تنعكس المزيد من الطاقة الصوتية إلى الأمام في مادة الاختبار. النتيجة النهائية هي مسبار أقل دقة نظراً لطول مدة شكل الموجة ، ولكن قد تكون أعلى في مطال الإشارة أو أكبر في الحساسية.
تُستخدم المادة الداعمة في المسبار للتحكم في خاصيتي الأداء الأساسيتين وهما الدقة والحساسية.
حساسية المسبار هي المقدرة على فصل إشارتي صدى (Echo) من عيبين قريبين من بعضهما في عمق المادة. يتم تعريف دقة المسبار على أنها قدرة المسبار على اكتشاف أصداء من عيوب صغيرة. للحصول على مسبار عالي الدقة ، يجب إخماد اهتزاز كريستالة المسابر في علبة المجس بأسرع ما يمكن ، ولكن للحصول على مسبار عالي الحساسية ، يجب أن يكون تخميد اهتزازات المسبار منخفضاً قدر الإمكان. المتطلّبان متناقضان مع بعضهما البعض وبالتالي يجب تقديم حل وسط. يتحقّق التخميد الأقصى لاهتزاز الكريستالة عندما يكون لمادة الحشو نفس الممانعة الصوتية الخاصة بالكريستالة.
تسمح هذه المطابقة للممانعات الصوتية للكريستالة و مادة الحشو للموجات فوق الصوتية بالمرور بسهولة من الكريستالة إلى مادة الحشو. يجب أن توفّر مادة الحشو أيضاً درجة عالية من التوهين والامتصاص لتبديد الأمواج فوق الصوتية المرسلة بحيث لا تنعكس من الجزء الخلفي من مادة الحشو لتكوين إشارات زائفة. غالباً ما تُصنع مواد حشو مجسات صدى النبض من لدائن ليفيّة أو مساحيق معدنية ممزوجة بمواد بلاستيكية مختلفة. يمكن التحكّم في التوهين عن طريق حجم حبيبات المسحوق والمقاومة بحسب نسب مسحوق المعدن والبلاستيك.

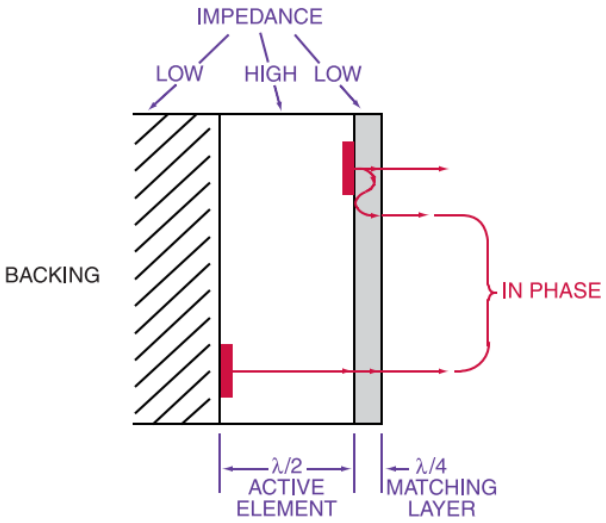
ج. صفيحة التآكل (Wear Plate) [محوّل مطابقة المسابر(Matching transformer)]

تحتوي جميع أنواع المجسات أيضاً على عناصر مطابقة كهربائية (مكثفات ومُحثات) من أجل تعظيم الاقتران الكهربائي للمسبار بمدخل مضخّم الصوت. بعبارة أخرى ، يطابق محوّل المسبار الممانعة الكهربائية لكريستالة المسبار الكهروضغطية مع المقاومة الكهربية للكابل ومع جهاز كشف العيوب من أجل نقل الطاقة القصوى من الكبل إلى المسبار والعكس صحيح.
الغرض الأساسي من صفيحة تآكل المسبار هو حماية عنصر المسبار من بيئة الاختبار.
في حالة مسابر التلامس ، يجب أن تكون صفيحة التآكل من مادة متينة ومقاومة للتآكل من أجل مقاومة الإحتكاك الناجم عن استخدامها على مواد مثل الفولاذ.

بالنسبة لمسابر الغمر وحزمة الزاوية وخط التأخير ، فإن صفيحة التآكل لها غرض إضافي يتمثّل في العمل كمحوّل صوتي أو طبقة مطابقة بين المعاوقة الصوتية العالية للعنصر النشط والماء أو الحذاء أو خط التأخير ، وكلها ذات معاوقة صوتية أقل.

يتم تحقيق ذلك عن طريق اختيار طبقة مطابقة بسماكة ¼ طول الموجة (λ/4) ومن الممانعة الصوتية المرغوبة (العنصر النشط هو اسمياً ½ طول الموجة).

يعتمد اختيار سماكة سطح التآكل على فكرة التراكب الذي يسمح للموجات الناتجة عن العنصر النشط أن تكون في الطور مع ارتداد الموجة في طبقة المطابقة كما هو موضح في الشكل (10).



الشكل (10)

عندما تكون الإشارات في الطور (in phase)، تجمع مطالاتها، وبالتالي تدخل موجة بمطال أكبر إلى قطعة الاختبار. يوضح الشكل (10) العنصر النشط وصفيحة التآكل ، ومتى يكونان في الطور. إذا لم يتم التحكم في المسبار بدقة أو تصميمه بعناية والمواد المناسبة ، ولم تكن الموجات الصوتية في الطور ، فإنها تتسبّب في حدوث اضطراب في مقدمة الموجة.

د) الوجه الواقي والعلبة (Protective face and housing)

يتم تغليف العناصر الأساسية لمسبار الأمواج فوق الصوتية في غلاف معدني وعادةً ما يتم توفيره بواجهة أو غطاء واقٍ. لا يحمي الوجه الواقي للمسبار المسبار الحساس من الاتصال المباشر بسطح قطعة الاختبار فحسب ، بل يُحسّن أيضاً المطابقة الصوتية لقطعة الاختبار.

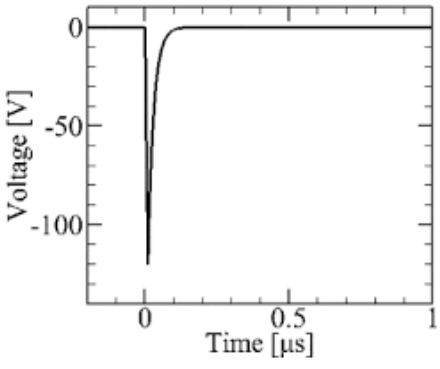
2.3. إرشادات التهييج للمسابر

كقاعدة عامة ، تم تصميم جميع مسابر الأمواج فوق الصوتية لنبضة إثارة سالبة (spike). يجب أن يقتصر الحد الأقصى لجهود الإثارة السالبة (spike)على حوالي 50 فولت لكل 0.0254 مم من سماكة الكريستالة الكهرضغطية.

تكون العناصر ذات التردد المنخفض سميكة ، والعناصر عالية التردد رقيقة.

يمكن استخدام زمن صعود سريع سالب 600 فولت ، ولمدة قصيرة ، و بنبضة إثارة سالبة (spike) عبر نهايات (terminals) المسابر ذات التردد 5.0 ميجا هرتز وأقل.

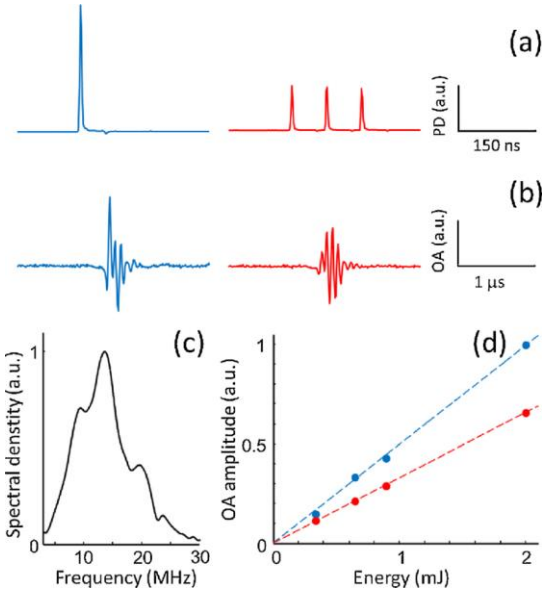
بالنسبة للمسابر التي تبلغ 10 ميغا هرتز ، يجب خفض الجهد المستخدم عبر النهايات إلى النصف إلى حوالي 300 فولت كما تم قياسه عبر النهايات.



الشكل (11)

على الرغم من أنه يوصى بإثارة ارتفاع سلبية ، إلا أنه يمكن استخدام موجة مستمرة أو إثارة مفاجئة (tone burst excitations). ومع ذلك، هناك قيود يجب مراعاتها عند استخدام هذه الأنواع من الإثارة. أهمها ، يجب ألا يتجاوز متوسط تبديد الطاقة للمسبار 125 ميللي واط لتجنّب ارتفاع درجة حرارة المسبار وإفساد الكريستالة.

نظراً لأن متوسط القدرة الإجمالية يعتمد على عدد من العوامل مثل الجهد ودورة العمل والمقاومة الكهربائية للعنصر ، يمكن استخدام المعادلات التالية لتقدير أقصى مدة للإثارة بالإضافة إلى عدد دورات الاطلاق للبقاء ضمن حدود الطاقة الإجمالية :



الشكل (12)

$$V_{rms} = 1/2(0.707)Vp\text{-}p$$ معادلة. 8

$$P_{tot} = \frac{(\text{Duty Cycle})(V_{rms})^2 \cos(\text{phase angle})}{Z}$$ معادلة. 9

$$\text{No. of Cycles in a Burst} = \frac{(\text{Freq.})(\text{Duty Cycle})}{\text{Rep Rate}}$$ معادلة. 10

4. أنواع مسابر الأمواج فوق الصوتية

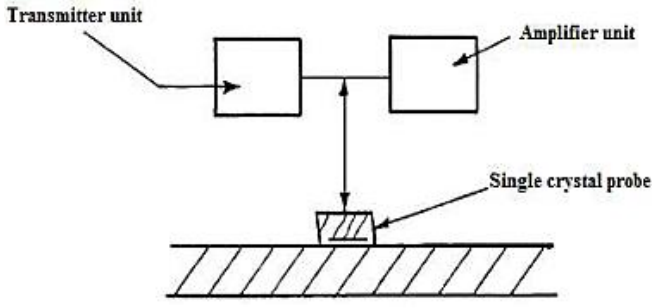
تستخدم مسابر الأمواج فوق الصوتية في الاختبار غير التخريبي موجات صوتية عالية التردد لقياس معلومات معينة. يستخدمها المفتشون في مجموعة من التطبيقات الصناعية ، بما في ذلك الكشف عن العيوب وقياس السماكة وفحص اللحام.

تأتي مسابر الأمواج فوق الصوتية في مجموعة متنوعة من الأشكال والأحجام ، هنالك خمسة أنواع شائعة من مسابر الأمواج فوق الصوتية الصناعية.

1.4. مسابر الاتصال المباشر أو التلامس

تستخدم هذه المجسات كريستالة واحدة كجهاز ارسال واستقبال للموجات فوق الصوتية. يحتوي المسبار هذا على اتصال مشترك بوحدات الإرسال والمضخم في كاشف الخلل (الشكل 13).

بسبب هذا الاتصال المشترك بوحدة الإرسال والاستقبال ، فإن مجسات الكريستالة الواحدة لها نبضة أولية أو نبضة ارسال كبيرة تؤدي إلى منطقة ميتة (dead zone) كبيرة للمسبار بشكل عام مما يجعل المسبار عديم الفائدة لاكتشاف الخلل القريب من السطح وقياس سماكة الجدار الرقيق. تتوفّر الآن مجسات بطول نبضة قصيرة والتي تحتوي على مناطق ميتة أقصر مما يجعلها أكثر



الشكل (13) مسبار أحادي العنصر

فائدة لاختبار المواد الرقيقة. المنطقة الميتة هي منطقة لا يمكن فيها اكتشاف العيوب. تظهر المنطقة الميتة كإشارة ارسال في بداية القاعدة الزمنية (time base). تزداد المنطقة الميتة عندما ينخفض التردد ، وبالتالي فإن المسبار ذو كريستالة واحدة 5 ميجاهرتز سيكون له منطقة ميتة أصغر من مسبار 2.5 ميجاهرتز.

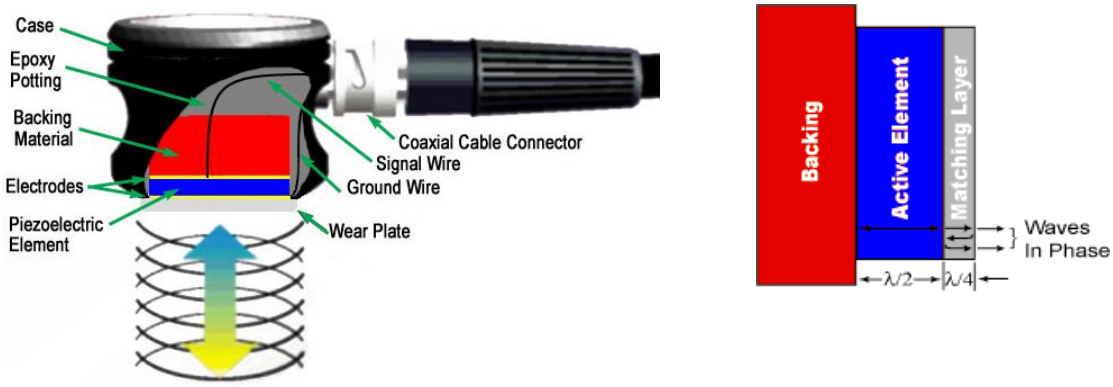
مسابر التلامس هي مسابر أمواج طولية ذات عنصر واحد مصممة للاستخدام في اتصال مباشر مع الجزء أو المكوّن الذي يتم فحصه. يحتوي المسبار على عنصر فردي له سطح مقاوم للتآكل مُحسّن للتلامس مع معظم المعادن - مما يجعله متيناً للاستخدام في البيئات الصناعية الخشنة.

يتوفّر هذا النوع من المسابر في مجموعة متنوعة من الأنماط والتكوينات ، كالأنواع الصغيرة (Fingertip) للمناطق التي يصعب الوصول إليها.

يستخدم المفتشون مسابر الأمواج التلامسية للعديد من التطبيقات ، بما في ذلك:

- ✓ كشف العيوب باستخدام الحزمة المستقيمة
- ✓ قياس السماكة
- ✓ كشف وتحديد حجم عدم الالتصاق
- ✓ فحص الألواح و القضبان ، والمكونات المعدنية وغير المعدنية الأخرى
- ✓ قياسات سرعة الصوت في المواد
- ✓ للاستخدام المستمر على مواد حتى 50 درجة مئوية

الشكل (14) مسبار أحادي العنصر



الشكل (15) بنية مسبار أحادي

يظهر في الشكل مقطع مسبار اتصال نموذجي. للحصول على أكبر قدر ممكن من الطاقة من المسبار ، يتم لصق طبقة ممانعة صوتية (matching layer - الطبقة الملتصقة) محددة بين العنصر النشط و وجه المسبار.

كما سبق و ذكرنا يتم تحقيق مطابقة الممانعة المثلى عن طريق تغيير حجم الطبقة الملتصقة بحيث يكون سمكها ¼ طول الموجة المطلوبة.هذا يحافظ على الموجات التي تنعكس داخل الطبقة الملتصقة أن تكون في الطور عندما تخرج من الطبقة. بالنسبة للمسابر التلامسية ، تتكوّن الطبقة الملتصقة من مادة لها مقاومة صوتية بين العنصر النشط والفولاذ.

تحتوي المسابر الغاطسة على طبقة ملتصقة ذات مقاومة صوتية بين العنصر النشط والماء. تشتمل المسابر التلامسية أيضاً على صفيحة مقاومة للتآكل (wear plate) لحماية الطبقة الملتصقة والعنصر النشط من الخدش.

لمادة التخميد (backing material) التي تدعم البلورة تأثير كبير على خصائص التخميد للمسبار. إذ إن استخدام مادة تخميد ذات مقاومة مماثلة لتلك الموجودة في العنصر النشط ستنتج التخميد الأكثر فعالية. و يكون لهذا المسبار عرض مجال حزمة أوسع ينتج عنه حساسية أعلى ودقة أعلى (أي القدرة على تحديد العيوب بالقرب من السطح أو لعيبين بالقرب من بعضهما في المادة). مع زيادة عدم التطابق في الممانعة الصوتية بين العنصر النشط ومادة التخميد ، يزداد نفاذ الصوت في المواد ولكن تقل حساسية المسبار.

يشير عرض مجال الحزمة إلى نطاق الترددات المرتبطة بالمسبار. التردد المدوّن على المسبار هو التردد المركزي ويعتمد بشكل أساسي على مادة التخميد. تستجيب المسابر عالية التخميد للترددات فوق وتحت التردد المركزي.

يوفّر مجال التردد الواسع مسباراً ذا قدرة تحليل عالية. ستظهر المسابر الأقل تخميداً نطاق تردد أضيق وقدرة تحليل أقل ، ولكن نفاذاً أكبر.

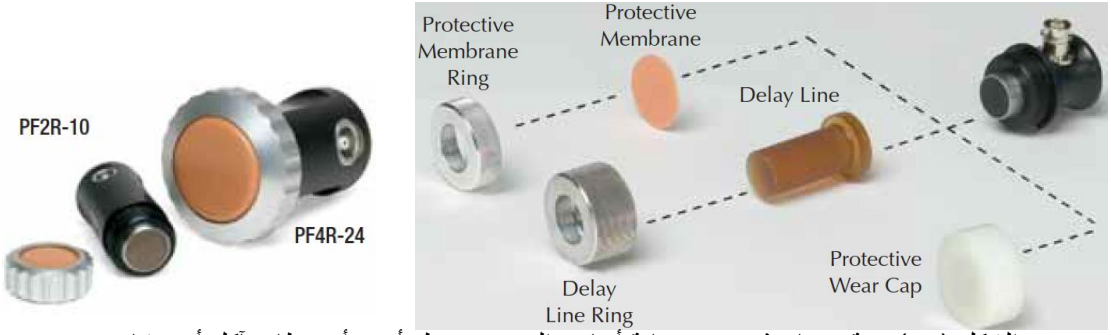
سيحدّد التردد المركزي أيضاً قدرات المسبار. توفّر الترددات المنخفضة (0.5 ميجاهرتز - 2.25 ميجاهرتز) طاقة و نفاذاً أكبر في المادة ، بينما توفّر البلورات عالية التردد (15.0 ميجاهرتز - 25.0 ميجاهرتز) اختراقاً أقل ولكن حساسية أكبر للانقطاعات الصغيرة.

يمكن لمسابر عالية التردد ، عند استخدامها مع الأجهزة المناسبة ، تحسين دقة تحديد العيوب وقدرات قياس السماكة بشكل كبير. المسابر ذات المجال العريض بترددات تصل إلى 150 ميجاهرتز متوفّرة تجارياً.

تم تصميم المسابر لتحمّل بعض الخشونة في التعامل ، ولكن يجب التعامل معها بحذر. يمكن أن يتسبّب سوء الاستخدام ، مثل السقوط ، في تشقق صفيحة التآكل أو العنصر أو مادة التخميد. غالباً ما يُلاحظ تلف المسبار في العرض التقديمي A-scan كتضخّم للنبضة الأولية.

1.1.4. المسابر ذات وجه حماية: هي مسابر طوليّة مكوّنة من عنصر واحد مزوّد بغطاء ملولب، والتي تسمح بوجود خط تأخير أو غطاء تآكل أو غشاء.

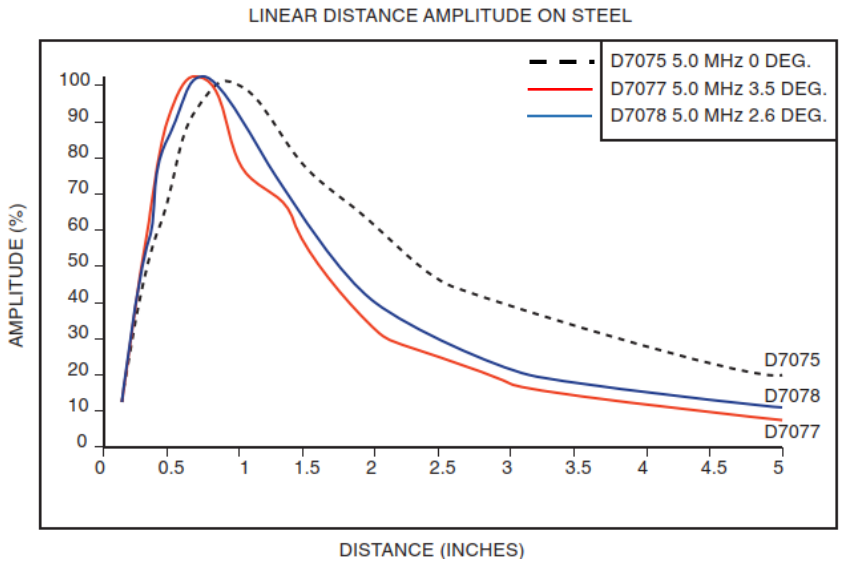
هذا يجعلها متعدّدة الاستخدامات للغاية وقادرة على تغطية مجموعة واسعة جداً من التطبيقات. يمكن أيضاً استخدام المسابر المحمية الوجه كمسبار اتصال مباشر على مواد مقاومة منخفضة مثل المطاط أو البلاستيك من أجل مطابقة مقاومة صوتية محسّنة.



الشكل (16) بنية مسبار ذو وجه حماية أحادي العنصر بخط تأخير أو غطاء تآكل أو غشاء

2.4. المسابر ثنائية العنصر

تستخدم المسابر ثنائية الكريستالة عناصر ارسال واستقبال منفصلة ، مثبتة على خطوط تأخير يتم قطعها عادةً بزاوية. يحسّن هذا التكوين دقة السطح القريب من خلال القضاء على مشاكل التغيّرات الرئيسية بالطاقة قرب سطح المسبار. بالإضافة إلى ذلك، يوفّر تصميم الحزمة المتقاطع تركيزاً زائفاً يجعل المسبار الثنائي أكثر حساسية للأصداء من العواكس غير المنتظمة مثل التآكل والنخر. تتمثّل احدى نتائج تصميم العنصر الثنائي في منحنى المسافة / المطال المحدّد بدقة. بشكل عام ، سيؤدي انخفاض زاوية السقف أو زيادة حجم عنصر المسبار إلى مسافة محرقية زائفة أطول وزيادة في المجال المفيد ، كما هو موضح في الشكل (17).



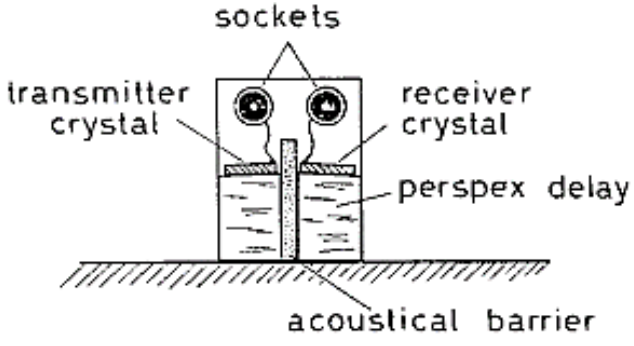
الشكل (17)

وأيضاً هي مسابر أمواج طولية ، تتكوّن من بلورتين موجودتين في نفس الحالة ، ويفصل بينهما حاجز صوتي. يولّد أحد العناصر الموجات فوق الصوتية ، ويعمل العنصر الآخر كمستقبل لها. يميل العنصران إلى بعضهما البعض لإنشاء مسار صوت على شكل حرف V في مادة الاختبار. تعبر حزم الإرسال والاستقبال تحت سطح الفحص. يؤدي هذا إلى إنشاء تأثير تركيز ، مما يعزز الدقة في المنطقة المحرقية.

تُعدُّ الحساسية المتزايدة من تأثير التركيز الزائف مفيدة بشكل خاص لفحص الأجزاء ذات الأسطح الخشنة للجدار الخلفي.

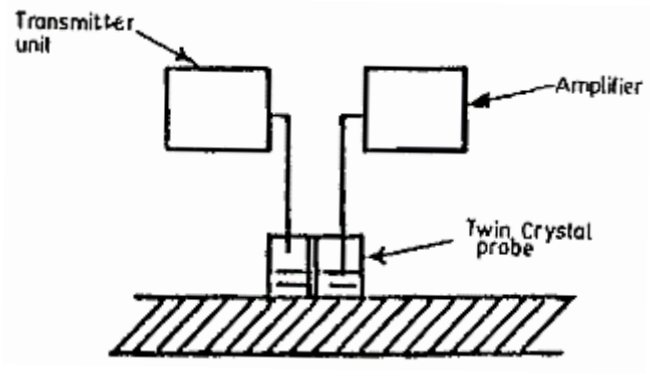
لتجنّب القيود التي تمّت مواجهتها في استخدام مجسات الحزمة العادية للمسبار أحادي الكريستالة لاجراء قياسات سماكة الجدار الرقيق وكشف الخلل القريب من السطح ، يتم استخدام مجسات الحزمة العادية المزدوجة الكريستالة.

وتسمى أيضاً مجسات البلورة المزدوجة أو مجسات الـ TR. وهي مجسات تتضمّن مسبارين في علبة واحدة. يتم فصل هذه المسابر صوتياً وكهربائياً عن بعضها البعض بواسطة حاجز صوتي. يتم وصل احدى الكريستالات بوحدة الإرسال والأخرى بوحدة الاستقبال



الشكل 18. مسبار من النوع مزدوج

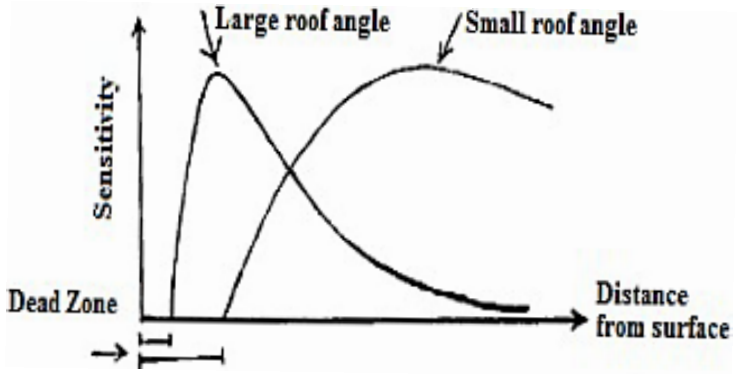
الخاصة بجهاز كاشف العيوب ، كما هو موضّح في الشكل 18أ ، وبالتالي يتم التخلّص من نبضة الإرسال.



الشكل 18أ. مسبار من النوع المزدوج

الميزات الخاصة التي يجب ملاحظتها في بناء المسبار مزدوج الكريستالات هي ميل المسابر وكتل التأخير الطويلة. يعطي ميل المسابر تأثير تركيز ويمكن الحصول على أقصى حساسية عند نقطة معينة في العينة لزاوية ميل معينة ، أي "زاوية السقف roof angle" ، الشكل.19.

تسمح كتل التأخير الطويلة المصنوعة من البرسبيكس ، أو من مادة خزفية مقاومة للحرارة (لفحص الأسطح الساخنة)، للحزمة فوق الصوتية بدخول عينة الاختبار في جزءها المستقر (أي في الحقل البعيد Far Zone).

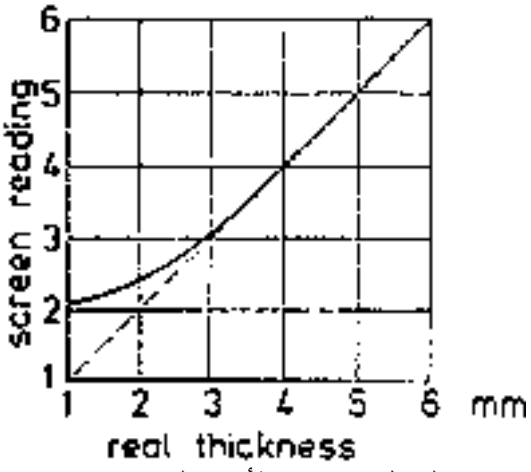


الشكل 19. تأثير زوايا السقف على حساسية المسبار المزدوج البلورات البلورة.ببلورية واحدة

هذا يزيل صعوبات تقييم الخلل الذي يقع في الحقل القريب ويساعد أيضاً في انتاج منطقة ميتة أقصر للمسبار لزاوية سقف أكبر.

يتم تحديد المسافة الدنيا التي يمكن من خلالها الكشف عن صدى العيوب ببداية المنطقة التي تتداخل فيها الحزمة الصوتية للمرسل وخصائص الاستقبال الخاصة بالمستقبل. نتيجة لهذه الحقيقة، باستخدام مجسات TR ، يمكننا تحديد منطقة على شكل أنبوب ذات حساسية قصوى والتي يتم الاطلاع عليها في أوراق بيانات مسبار الـ TR.

تنجم الحساسية العالية في المنطقة تحت السطحية عن زاوية سقف البلورتين. من ناحية أخرى ، مع اعدادات الربح العالي ، يؤدي هذا إلى صدى تداخل، يُعرف باسم صدى التداخل المتقاطع (cross talk echo) والذي لا ينبغي تفسيره بشكل خاطئ على أنه عيب.



الشكل. 20. خطأ في المسار V مع مجسات TR

يجب إيلاء مزيد من الاهتمام لحقيقة أنه مع انخفاض سماكة قطعة العمل (الصفيحة) أو قرب موقع الخلل من السطح، قد يحدث خطأ قياس كبير، يُعرف باسم خطأ مسار V كما في الشكل.20 .

لا يحدث أبداً مع وجود مسافات بين الخطوتين المستخدمتين لبلوك المعايرة إذا كانت نسبة سماكة الخطوتين لا تتجاوز 2: 1.

يمكن حساب النسبة المئوية للخطأ في القياس بسبب هذا التأثير من الصيغة:

$$\%\,error = \frac{S-T}{T} \times 100 = \left(\frac{\sqrt{T^2+0.25c^2}-T}{T}\right) \times 100 \quad (11)$$

حيث:

T= سماكة العينة

S= طول مسار الحزمة الفعلي

c= المسافة بين مؤشرات المسبار لمخرج الأمواج فوق الصوتية ومدخل الأمواج فوق الصوتية

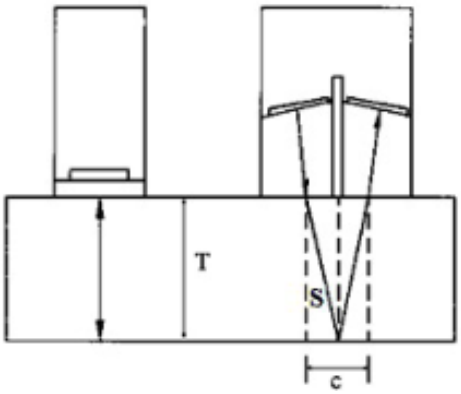
غالباً ما تستخدم مجسات TR في الاختبار بالأمواج فوق الصوتية من أجل:

(1) للتحقّق من أبعاد قطع العمل (مثل الصفائح) ؛

(2) قياسات سماكة الجدار المتبقية ؛

(3) الكشف عن العيوب الداخلية وموقعها وتقييمها ؛

(4) مسح العيوب الكبيرة (التصفيح).

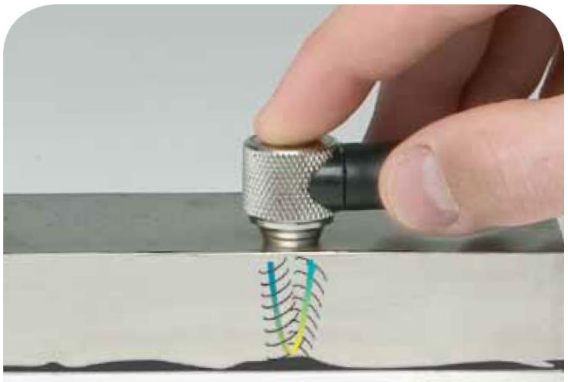


الشكل 21. مسبار الـ TR و المسبار ببلورية واحدة

الشكل (22) مسابر ثنائية

توفّر مسابر الأمواج هذه العديد من المزايا ، بما في ذلك الدقة المحسنة بالقرب من السطح ، والاقتران الجيد للأسطح الخشنة ، وتقليل ضوضاء التشتت الخلفي في المواد ذات الحبيبات الخشنة أو المشتّتة. مما يجعل هذه المسابر هي المعيار الصناعي لقياس سماكة الجدار المتبقية في تطبيقات التآكل.

تشمل التطبيقات الشائعة الأخرى:



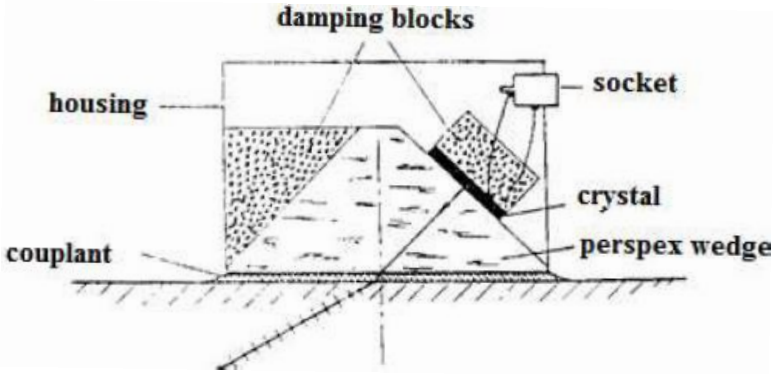
الشكل (23) حزمة مسبار ثنائي العنصر

- ✓ قياس سماكة الجدار المتبقية ، ومراقبة التآكل / الإهتراء .
- ✓ فحص تراكب اللحام (weld overlay)
- ✓ فحص التصاق التصفيح (cladding bond).
- ✓ التصفّح (laminations) في المسبوكات والمطروقات و الصفائح.
- ✓ الكشف عن المسامية والشوائب المتضمنة والشقوق
- ✓ كشف الكسور في البراغي والأشياء الأسطوانية الأخرى
- ✓ تطبيقات درجات الحرارة العالية
- ✓ قدرة درجة الحرارة القصوى 425 درجة مئوية لـ 5.0 ميغاهيرتز وأدناه ؛ 175 درجة مئوية لـ 7.5 ميجا هرتز و 10 ميجا هرتز.

(دورة العمل الموصى بها لدرجات حرارة السطح من درجة 90 Cº إلى 425 Cº هي عشر ثوان كحد أقصى من التلامس متبوعاً بدقيقة واحدة على الأقل من تبريد الهواء (لا ينطبق على المسبار المصغّر المزدوج).

3.4. مسابر الحزمة الزاويّة

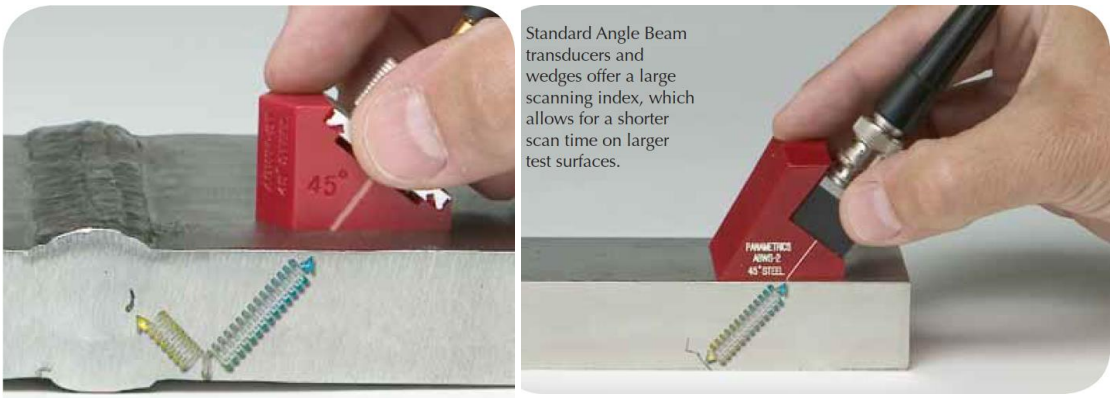
في مجسات الزاوية ، يتم استخدام انكسار وتحويل أنماط الأمواج لنقل الأمواج فوق الصوتية إلى عينة الاختبار بزوايا مختلفة على السطح. يوضح الشكل.24 البناء النموذجي لمسبار من نوع حزمة تلامس زاويّة.



الشكل. 24. تصميم مسبار حزمة زاوية

الشكل (25) مسبار الحزمة الزاويّة المتكامل

ينقل مسبار الزاوية موجات طولية من خلال كتلة تأخير البرسبيكس بزاوية ورود محدّدة على سطح العينة.
تكون زاوية الورود المختارة أكبر من الزاوية الحرجة الأولى بحيث لا تدخل العينة إلا الأمواج العرضيّة. ينعكس جزء من الأمواج الطولية مرة أخرى في المسبار ويتم توهينه بواسطة كتلة التخميد وبالتالي يتم تجنّب المؤشرات الزائفة التي قد تنشأ بسبب وجود الأمواج الطولية.
تكون زاوية الانكسار لعينة من الفولاذ ونقطة خروج الحزمة، والمعروفة عموماً بمؤشر المسبار (index point) موضحة على العلبة المعدنية للمسبار.
مسابر الزاوية أحادية العنصر وتستخدم مع حذاء لإدخال موجة قص (عرضية) منكسرة أو موجة طولية في قطعة الإختبار. يقدّم الحذاء القابل للإزالة أو المتكامل صوتاً بزاوية في الجزء قيد الفحص.
يمكن شراء المسابر في مجموعة متنوعة من الزوايا الثابتة (عادةً 45º ,60º,70º) أو في إصدارات قابلة للتعديل حيث يحدّد المستخدم زوايا الورود والانكسار.
في إصدارات الزاوية الثابتة ، تكون زاوية الانكسار التي تم تمييزها على المسبار دقيقة فقط لمادة معينة ، والتي تكون عادةً من الفولاذ. يسمح مسار الصوت الزاوي بانعكاس حزمة الصوت من الجدار الخلفي لتحسين إمكانية اكتشاف العيوب في المناطق الملحومة وحولها. كما أنها تُستخدم لتوليد موجات سطحية لاستخدامها في اكتشاف العيوب على سطح أحد المكونات.
تستخدم مسابر الحزمة الزاويّة بشكل شائع في فحص اللحام.لأن فحص اللحام يتطلّب توجيه الموجات الصوتية بزاوية.

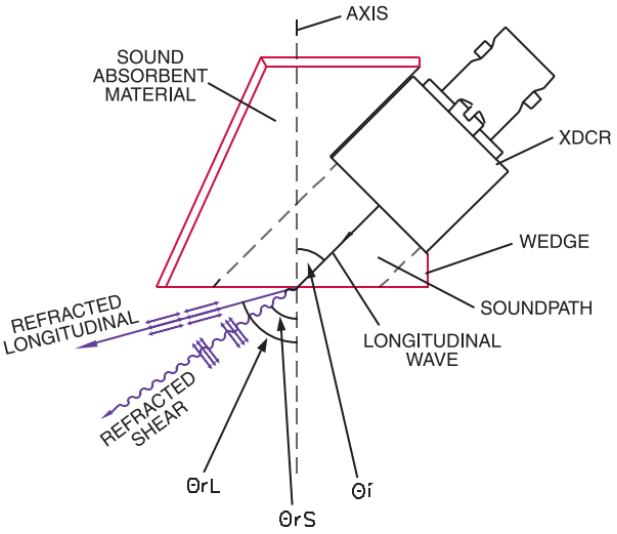


الشكل (26) مسبار الحزمة الزاويّة غير المتكامل

يمكن حساب زاوية الورود اللازمة لإنتاج موجة منكسرة مرغوبة (كموجة بزاوية 45° في الفولاذ) من قانون سنيل كما هو موضح في المعادلة (12).
نظراً لتأثيرات انتشار الحزمة ، فإن هذه المعادلة لا تصمد عند التردد المنخفض وصغر حجم العنصر النشط.

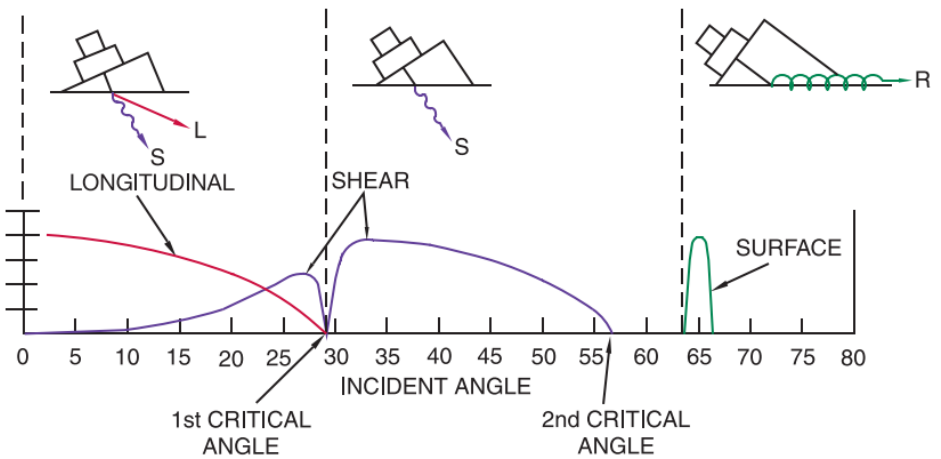
معادلة. 12 $$Sin\Theta_i/c_i = Sin\Theta_{rl}/c_{rl} = Sin\Theta_{rs}/c_{rs}$$

Θ_i = زاوية الورود للحذاء
Θ_{rl} = زاوية الموجة الطولية المنكسرة
Θ_{rs} = زاوية موجة القص المنكسرة
c_i = سرعة مادة الورود (طولية)
c_{rl} = سرعة الصوت بالمادة (طولية)
c_{rs} = سرعة مادة الاختبار (القص)



الشكل (27) تحويل النمط لإنتاج موجات منكسرة أو طولية

يوضح الشكل (28) العلاقة بين زاوية الورود والمطالات النسبية للموجات المنكسرة أو الموجات الطولية وموجات القص والموجات السطحية التي يمكن انتاجها من حذاء بلاستيكي في الفولاذ.



الشكل (28)

تُستخدم مسابر الحزمة الزاويّة عادةً لتحديد و / أو حجم العيوب الموجّهة بشكل غير موازٍ لسطح الاختبار.
عندما يتم استخدام مسبار الحزمة الزاويّة المصمم للفولاذ لمادة أخرى ، يجب مراعاة التغيير في زاوية الانكسار. يجب أيضاً أن يكون الحذاء مصنوعاً من مادة تكون سرعة الموجة الطولية فيها أصغر من سرعة الموجة العرضيّة في قطعة الاختبار لكسر الحزمة الواردة بعيداً عن الشاقول.

1.3.4. مسابر الحزمة الزاويّة المزدوجة البلورة:

الشكل (29) مسبار الحزمة الزاويّة مزدوج البلورة

تحتوي مسابر الحزمة الزاويّة المزدوجة البلورة على بلورتين مركبتين في زوايا داخلية توفّر دقّة محسّنة بالقرب من السطح ونسبة إشارة إلى الضوضاء فائقة.
وهي مثالية لفحص المواد الرقيقة بحثاً عن العيوب الصغيرة التي تحدث مباشرة تحت السطح.
تولّد حزمة قص مزدوجة الزاوية من بلورات مستطيلة مقاس 3.5 مم × 10 مم ومصممة وفقاً للمعايير الأوروبية.

2.3.4. مسبار الموجة السطحية

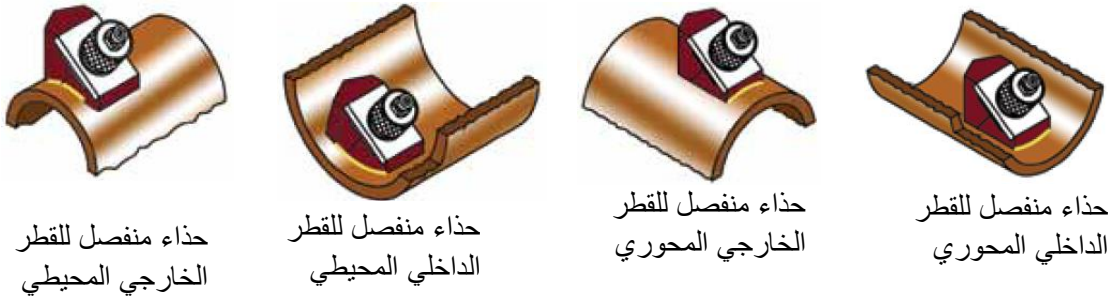
هو مسبار حزمة زاوية بقدر ما يستخدم حذاء (wedge) لوضع المسبار بزاوية على سطح العينة. يتم اختيار زاوية الحذاء بحيث تكون زاوية انكسار موجة القص 90 درجة والموجة الناتجة عن تحويل النمط تنتقل على طول السطح.

3.3.4. أحذية مسابر الحزمة الزاويّة

تأتي الأحذية بأحجام مختلفة لتلبية الاحتياجات الخاصة. على سبيل المثال ، توفّر بعض الأحذية مسافة اقتراب أقصر بينما يناسب البعض الآخر تطبيقات درجات الحرارة العالية. يمكنك أيضاً تخصيص الأحذية المحددة لإنشاء زوايا وانكسارات غير قياسية.

الشكل (30) مسابر الحزمة الزاويّة و الأحذية المنفصلة

كما تتوفّر أحذية منحنية لتحسين الإتصال على الأسطح المنحنية.



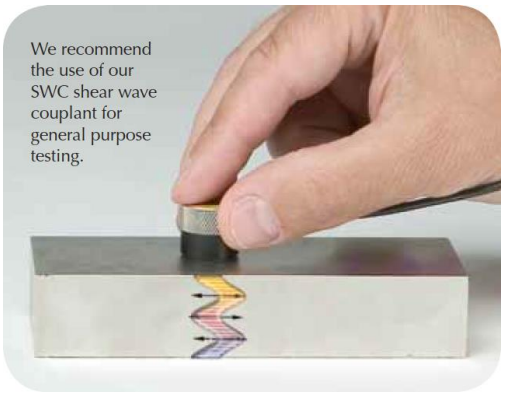
الشكل (31) مسابر الحزمة الزاويّة و الأحذية المنحنية

4.3.4. مسابر زاوية (موجة قص) ذات الورود العادي:

تقوم مسابر موجات القص ذات الورود الشاقولي لعنصر واحد بإدخال موجات القص مباشرة في قطعة الاختبار دون استخدام تحويل وضع الموجة المنكسرة.

مزايا:

- ✓ توليد موجات القص التي تنتشر بشكل عمودي على سطح الاختبار
- ✓ نسبة مكونات الموجة الطولية إلى موجات القص بشكل عام أقل من -30 ديسيبل



الشكل (32) مسبار موجة زاوية ذو ورود عادي

التطبيقات:

- ✓ قياسات سرعة موجة القص
- ✓ حساب معامل يونج للمرونة ومعامل القص.
- ✓ توصيف البنية الحبيبية للمادة

4.4. مسابر خط تأخير

مسبار خط التأخير هو مسبار ذو عنصر واحد مصمم للاستخدام مع خط تأخير قابل للاستبدال. كما يوحي الاسم ، يقدّم مسبار الأمواج هذا تأخيراً زمنياً بين توليد الموجة الصوتية ووصول الموجات المنعكسة ، مما يساعد على تحسين الدقة القريبة من السطح.

الشكل (33) مسابر أحادية العنصر مع خط تأخير

يعتبر مسبار الأمواج ذو التردد العالي مثالياً لفحص أو قياس المواد الرقيقة ، بالإضافة إلى تحديد العيوب الصغيرة أثناء استخدام طريقة الاتصال المباشر.

مع خط التأخير القابل للاستبدال، فإن هذا المسبار مناسب تماماً لمجموعة متنوعة من التطبيقات الصناعية كـ:

- ✓ قياس سماكة المواد الرقيقة بدقة
- ✓ الكشف عن الخلل في المواد الرقيقة
- ✓ فحص الأجزاء ذات مناطق التلامس المحدودة
- ✓ تطبيقات درجات الحرارة العالية

الشكل (34) قياس السماكة بمسبار أحادي مع خط تأخير

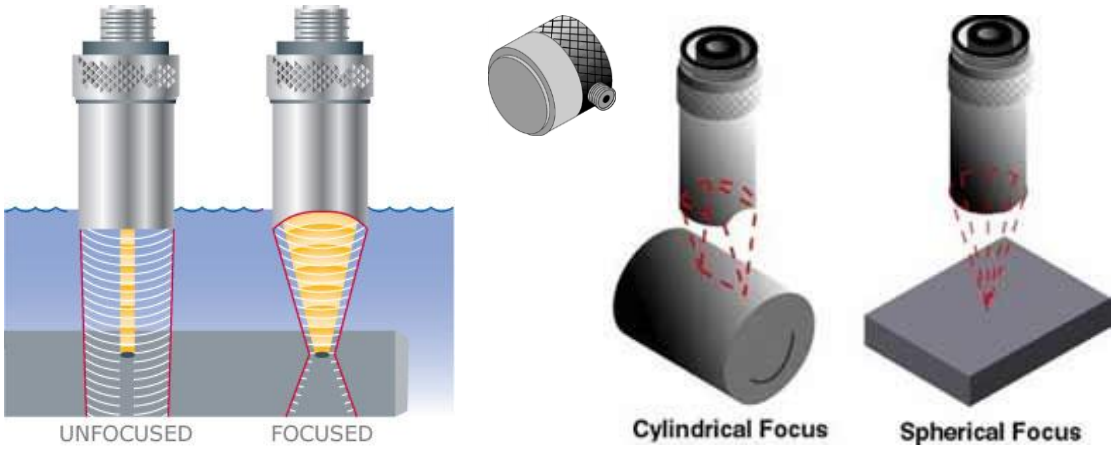
5.4. مسابر الغمر

هو مسبار غاطس ذو عنصر واحد مصمّم للعمل في الماء. بدلاً من الاتصال المباشر بقطعة الإختبار ، تستخدم هذه المسابر عموداً أو حماماً من الماء لربط الأمواج الصوتية بالمادة.
إن انشاء مسبار من النوع الغاطس هو في الأساس نفس بناء مسبار الحزمة العادية من نوع الاتصال. ومع ذلك ، نظراً لأن المجسات من نوع الغمر تكون دائماً على اتصال بالماء ، فإنها تحتاج إلى أن تكون مقاومة للماء ولا تحتاج أيضاً إلى وجود صفيحة واقية من التآكل في المقدمة.

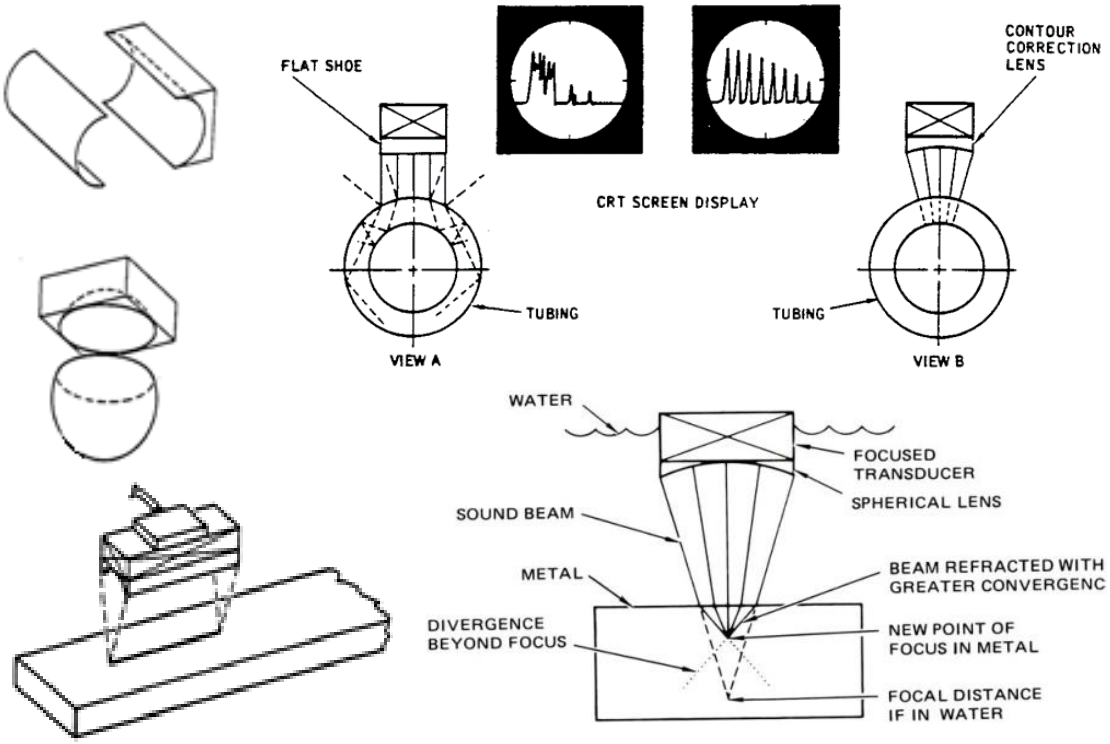
الشكل (35) مسبار الغمر أحادي العنصر

تتيح تقنية الغمر اقتراناً موحداً وسريعاً بحيث يمكن للمفتشين مسح الأجزاء صوتياً بسرعة. يمكن للمفتشين اختيار مسابر مركّزة لزيادة الحساسية والأداء في منطقة معينة من الجزء.
غالباً ما تُستخدم هذه المسابر الغاطسة في الاختبارات على خطوط الإنتاج (in-line process) على الأجزاء المتحركة ، وللمسح الآلي ، لتحسين اقتران الصوت للأقطار الحادة ، أو الأخاديد ، أو القنوات في قطع الاختبار ذات الهندسة المعقدة.
تشمل التطبيقات:

- ✓ قياس السماكة
- ✓ كشف الخلل بسرعة عالية
- ✓ الإختبار القائم على المطال و زمن الحيود (Time-of-flight and amplitude-based)
- ✓ تحليل المواد وقياسات السرعة
- ✓ اختبار العبور (Through-transmission testing)



الشكل (36) مسبار الغمر أحادي العنصر المركّز



الشكل (37) مسبار الغمر أحادي العنصر المركّز

يتم تصنيع أحذية صوتية خاصة كروية أو اسطوانية لمسابر الاختبارالمغمور لـ:

- ✓ لتحسين الحساسية و الدقة .
- ✓ لتعوّض و تتلاءم مع شكل و حدود الجسم المفحوص.
- ✓ للحرص على فحص العمق المطلوب للجزء المفحوص .
- ✓ تركّز العدسة الاسطوانية طاقة الصوت على شكل خط.
- ✓ و العدسة الكروية تركّز طاقة الصوت على شكل نقطة.

تستخدم العدسة الاسطوانية بطريقتين:

1- لزيادة الحساسية و دقة المسبار .

2- لتصحيح الشكل ومطابقة الشكل المنحني للجسم المفحوص لتوجيه طاقة الصوت .

والعدسة الكروية تركّز طاقة الصوت على شكل حزمة مخروطية ما يزيد من شدة الصوت و لكن يقلّص مجال الحزمة المفيد . يكون للعدسة الاسطوانية عرض كبير بينما للعدسة الكروية حساسية أكبر.غالباً ما تستخدم العدسة الكروية في اختبار الاجسام ذات السطح الخشن في الاختبار المغمور. يذكر على المسابر المركّزة الحزمة البعد المحرقي، فذات البعد القصير تستخدم لفحص المنطقة من الجسم القريبة من السطح. و ذات البعد الطويل لفحص المنطقة العميقة من الجسم .

لتركيز الحزمة في المجسات العادية ببلورية واحدة مركزة باستخدام إما صفيحة كهروضغطية منحنية من مادة السيراميك ، أو يتم لصق طبقة منحنية بمبدأ تأثير العدسة على الصفيحة المسطّحة. تزيد الطريقة الأخيرة بشكل كبير من الحساسية مباشرة تحت السطح في حالة المجسات المستخدمة وفقاً لتقنية الغمر كما في الشكل 37 حيث لا تتعرّض طبقة التركيز هذه للتآكل. في حالة أسطح الاختبار المقعّرة والاتصال المباشر ، ستنتشر حزمة الصوت بشكل واسع ، مما ينتج عنه حساسية منخفضة للعمق. يمكن تحسين ذلك عن طريق ادخال جسم على شكل عدسة بين المسبار وسطح الاختبار. سينتج عن ذلك منطقة اضطراب معينة يجب قبولها ، حتى إذا تم استخدام مادة ماصة على العدسة ، مثل المطاط (vulcanized rubber) الذي قد تحتوي على مادة ملئ (filler).

6.4. المسابر المخصصة: تُقدّم عدة شركات أنواع مسبار أمواج فوق صوتية تختلف بالتردد وقطر العنصر ونمط الموصل بحسب الحاجة.
هناك تباين كبير في طبيعة مشاكل الاختبار في الصناعة. لذلك لا يمكن أن تكون هناك مجموعة من المسابر للأغراض العامة التي يمكن استخدامها عالمياً لحل هذه المشاكل المتنوّعة. يتطلّب كل نوع من حيث المبدأ مسباراً خاصاً للاختبار وتقديم الحلول.
هناك مجموعة كبيرة ومتنوعة من المكونات والهياكل ذات التصميمات والأشكال المختلفة التي تحتاج إلى اختبار. لذلك هناك حاجة مقابلة لوجود مجسات خاصة لتلبية متطلّبات التفتيش المحدّدة.
قد تختلف المواد اختلافاً كبيراً في تكوينها وحجم حبيباتها ، وبالتالي يكون لها درجات مختلفة من توهين الصوت داخلها. وبالتالي هناك حاجة إلى مجسات خاصة لفحص أنواع مختلفة من المواد.
كما تختلف أحجام العيوب المسموح بها وبالتالي حساسية الكشف عن العيوب وكذلك متطلّبات الدقة باختلاف المواد والتطبيقات. في كثير من الحالات ، قد يتسبّب تطبيق مادة اقتران في حدوث مشاكل خطيرة أو قد يلزم توفير مادة اقتران بشكل مستمر لتحسين سرعة الفحص. قد يتعيّن إجراء الاختبار بالأمواج فوق الصوتية في بعض المواقف في بيئات قاسية مثل ، الأسطح الساخنة والخشنة ، والبيئة المسبّبة للتآكل ، والمناطق التي فيها مستويات عالية من الإشعاع النووي ، والتفتيش تحت الماء وكذلك في المواقع التي يصعب الوصول إليها مثل المحركات والتركيبات المعقدة. قد يكون هناك حاجة لفحص عالي السرعة كما في حالة الاختبار الآلي للقضبان والأنابيب والألواح والأشياء الأخرى ذات الشكل المنتظم.
كل هذه المواقف تتطلّب مسابر استشعار محددة وخاصة. يتم اختيار المسبار لتطبيق معين على أساس حجم البلورة والتردد وعرض النطاق الترددي ونوع كاشف العيوب.
تُظهر المواد المختلفة خصائص مقاومة كهربائية مختلفة. قد تكون هناك حاجة إلى ملفات ضبط (Tuning coils) أو محولات مطابقة (matching transformers).
ترتبط كل من كمية الطاقة الصوتية المنقولة إلى المادة التي يتم فحصها وتباعد الحزمة ارتباطاً مباشراً بحجم عنصر المسبار. وبالتالي ، يُنصح أحياناً باستخدام مسبار أكبر للحصول على عمق اختراق أكبر أو مساحة أكبر لحزمة الصوت.
تُظهر المسابر ذات النطاق الترددي الضيق حساسية و قدرة اختراق جيدتين ، ولكن تكون بدقة ضعيفة نسبياً. (تذكير :الحساسية هي القدرة على اكتشاف العيوب الصغيرة ؛ الدقة هي القدرة على فصل الصدى بين عاكسين أو أكثر متقاربين في العمق).
تُظهر المسابر ذات النطاق الترددي العريض دقة أكبر، ولكن حساسية أقل وقدرة اختراق أقل من المسابر ذات النطاق الترددي الضيّق.
يجب تحديد كل من تردد التشغيل وعرض النطاق وحجم العنصر النشط على أساس أهداف الاستقصاء. على سبيل المثال ، قد تكون قوة الاختراق العالية هي الأكثر أهمية في الفحص القطري للمحاور الطويلة. قد يكون من الأفضل اختيار المسبار بقطر كبير ، وعرض نطاق ضيق، وتردد منخفض لهذا التطبيق ، على الرغم من أن المسبار هذا سيكون له حساسية منخفضة (بسبب التردد المنخفض والحجم الكبير) ودقة منخفضة (بسبب ضيق عرض النطاق).
عندما تكون الدقة أمراً مهماً ، كما هو الحال في فحص الانقطاعات القريبة من السطح ، يكون استخدام المسبار واسع النطاق أمراً ضرورياً. من المحتمل ألا تكون قدرة الاختراق مهمة جداً ، لذا فإن قوة الاختراق المنخفضة نسبياً المصاحبة للنطاق الترددي العريض لن تكون عيباً.
إذا لزم الأمر ، يمكن تحقيق حساسية عالية باستخدام مسبار صغير وعالي التردد وعريض النطاق؛ تتطلّب الزيادة في كل من الحساسية وقوة الاختراق استخدام مسبار كبير عالي التردد ، والذي من شأنه أن يصدر حزمة موجات فوق صوتية أكثر توجيهاً.

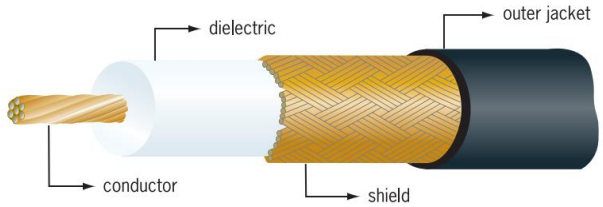
7.4. كابلات مسابر الأمواج فوق صوتية

تتوفّر كبلات مسابر الأمواج فوق صوتية في مجموعة متنوعة من أنماط الموصلات ، بما في ذلك BNC و ®LEMO و UHG و ™ Microdot ومجموعة متنوعة من الأنواع ، مثل الكابلات شديدة التحمّل والمقاومة للماء والكابلات ذات المقابض والفولاذ المقاوم للصدأ المزدوج والمدرّع والدرع المزدوج.

أطوال الكابلات القياسية هي: 1 متر (3.3 قدم) و 1.2 متر (4 قدم) و 1.8 متر (6 قدم) ، لكن الأطوال المخصّصة متوفّرة. جميع الكابلات ذات مقاومة 50 أوم ما لم ينص على خلاف ذلك.

الشكل (38) كابلات مسابر الأمواج فوق الصوتية

يتكوّن الجزء الداخلي من الكابل من ثلاثة مكونات رئيسية. هي الموصل، والعازل ، والدرع / جديلة. ثم يتم إحاطة هذه المكونات بغطاء خارجي واقي. يوضح الشكل (39) عرض مقطعي لكابل نموذجي. يعمل الموصل كاتصال إيجابي للكابل بينما يعمل الدرع كأرضي. يقوم العازل بعزل الموصل عن الدرع. تحتوي معظم الكابلات على طبقة واقية / مضفرة واحدة. ومع ذلك ، لمنع التداخل الكهربائي بشكل أفضل من البيئة المحيطة، تحتوي الكابلات المحمية المزدوجة على طبقة حماية / مضفرة إضافية تلامس الأخرى.



الشكل (39) بنية كابلات مسبار الأمواج فوق صوتية

Standard **Heavy Duty** **Armored**

Standard RG174
Microdot® Connector

Standard RG174
Right Angle Microdot Connector

Standard RG58
LEMO® 1 Connector

Double Shielded RG58 (DS)
Waterproof UHF Connector

RG188 Heavy Duty Teflon
Coated (HD)

RG188 Heavy Duty Teflon
Coated (HD)

RG188 Heavy Duty Teflon
Coated (HD)

RG188 Heavy Duty Teflon
Coated (HD)

RG188 Heavy Duty Armored
PVC (HDAP)
LEMO® 00 Connector

RG188 Heavy Duty Armored Super
Flexible Silicone (HDAS)
Microdot Connector

RG188 Armored Stainless
Steel (SSA)
Microdot Connector

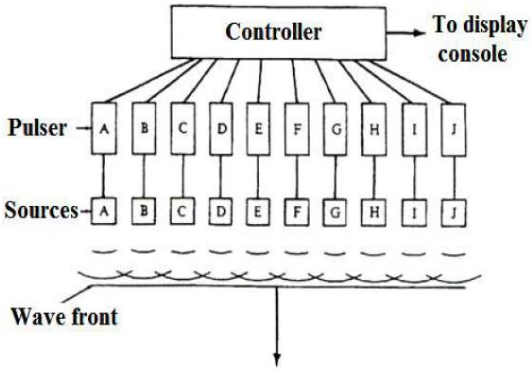
الشكل (40) أنواع كابلات مسبار الأمواج فوق صوتية

8.4. نظام المسابر المصفوفة الطوريّة

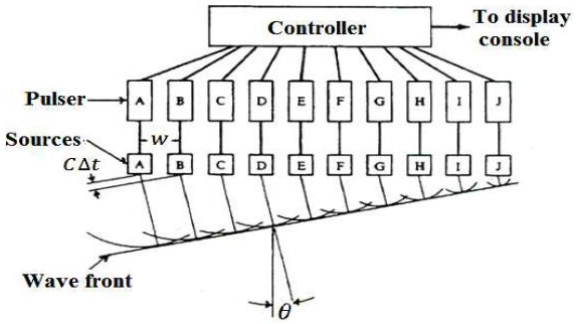
في السنوات الأخيرة ، كانت هناك حاجة متزايدة لزيادة سرعة عمليات الفحص بالأمواج فوق الصوتية. و أسرع وسيلة للمسح هي استخدام مجموعة من المسابر تمسح إلكترونياً عن طريق تشغيل كل من هذه المسابر بالتتابع.

تتكوّن هذه المسابر من عدّة بلورات موضوعة في نمط معين ويتم تشغيلها واحداً تلو الآخر إما يدوياً أو بواسطة مُضاعِف (multiplexer).

يظهر الشكل.41 دارة نموذجية لمُضاعِف (multiplexer) وصفيف من المسابر. في هذه الحالة، تتكوّن كل دارة من A إلى J من مولّد نبضة ومسبار منفصلين. يُفترض أن يكون كل عنصر مسبار نقطة ، أو مصدراً صغيراً جداً ، ويتم التحكم في تسلسل إطلاق النبضا ت من خلال دارات أخرى.



الشكل 41. ترتيب المصفوفة الطوريّة. تظهر الموجة الطولية المنكسرة بشكل عامودي.



الشكل.42. زاوية الحزمة θ لنظام متعدّد المسابر كمجموعة مصفوفة.

يمكن أن يؤدي مولّد النبضات للمسابر في تسلسل طوري إلى انشاء مجموعة متنوعة من أنماط الحزمة ، بما في ذلك تكوينات حزمة الزاوية والتركيز. على سبيل المثال ، تنتج الحزمة الزاويّة الموضحة في الشكل.41 عندما يتم توزيع تسلسل إطلاق التهييج على شكل أطوار من "A " إلى "J ." للحصول على زاوية الميل θ التي تُعطى من خلال:

$$\theta = sin^{-1}\frac{C\Delta t}{w} \qquad (13)$$

حيث:

C= سرعة الطور في المادة،

Δt = تأخير الطور في نبض كل مسبار

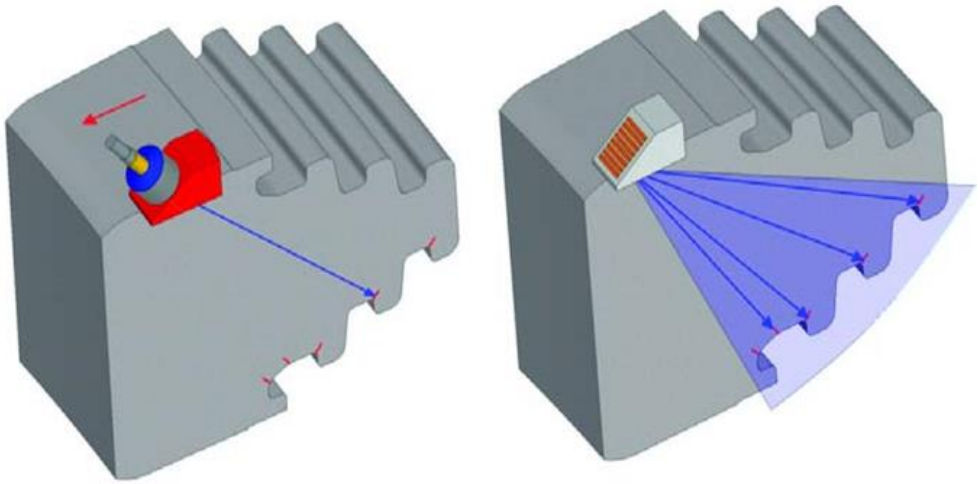
w = تباعد الخط المركزي للمسبار

يؤدي تغيير التأخير" Δt" بين النبضات إلى تغيير الزاوية " θ ". و إطلاق النبضات بالترتيب العكسي ، "J " إلى " A "، سيؤدي إلى حزمة زاويّة بالاتجاه المعاكس. علاوة على ذلك ، فإن إطلاق النبضات من الخارج إلى الداخل ، أي " A" و " J" في وقت واحد، ثم "B " و " I" ، وما إلى ذلك ، سيخلق حزمة مُركّزَة.

يمكن استخدام مجموعة متنوعة من المصادر المولّدة (sources) لبناء مجموعة المسبار ، بما في ذلك عناصر كهروضغطية بالإضافة إلى EMAT ومصادر الليزر. يتم زيادة تكلفة النظام بشكل كبير لأن كل دارة هي في الأساس نظام منفصل بالأمواج فوق الصوتية يتحكّم فيه مولّد الإرسال المتعدّد (multiplexer). ومع ذلك ، فإن السرعة المتزايدة وتعدّد استخدامات الفحص التي تسمح بها المسابر المصفوفة قد توفّر مزايا لكن تزيد النفقات الإضافية للنظام.

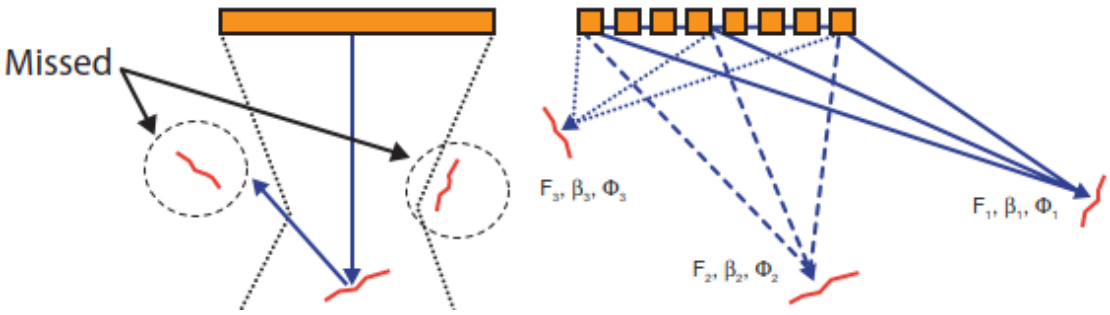
9.4. مسبار الأمواج فوق الصوتية ذو الصفيف الطوري

الميزة الأساسية لتقنية الأمواج فوق الصوتية ذات الصفيف الطوري هو إمكانية التحكّم بالتهييج (التأخير والمطال) عن طريق الحاسب للعناصر المفردة في مسبار متعدّد العناصر.
يمكن أن يُوّلد تهييج العناصر البيزومركبة (piezocomposite) حزمة مركّزة من الأمواج مع إمكانية تغيير محدّدات الحزمة مثل الزاوية والمسافة المحرقية وحجم البقعة المحرقية من خلال سوفت وير. يتم التحكّم بزاوية المسح واتجاهها لالتقاط الكسور المنتشرة عشوائياً الشكل (43).

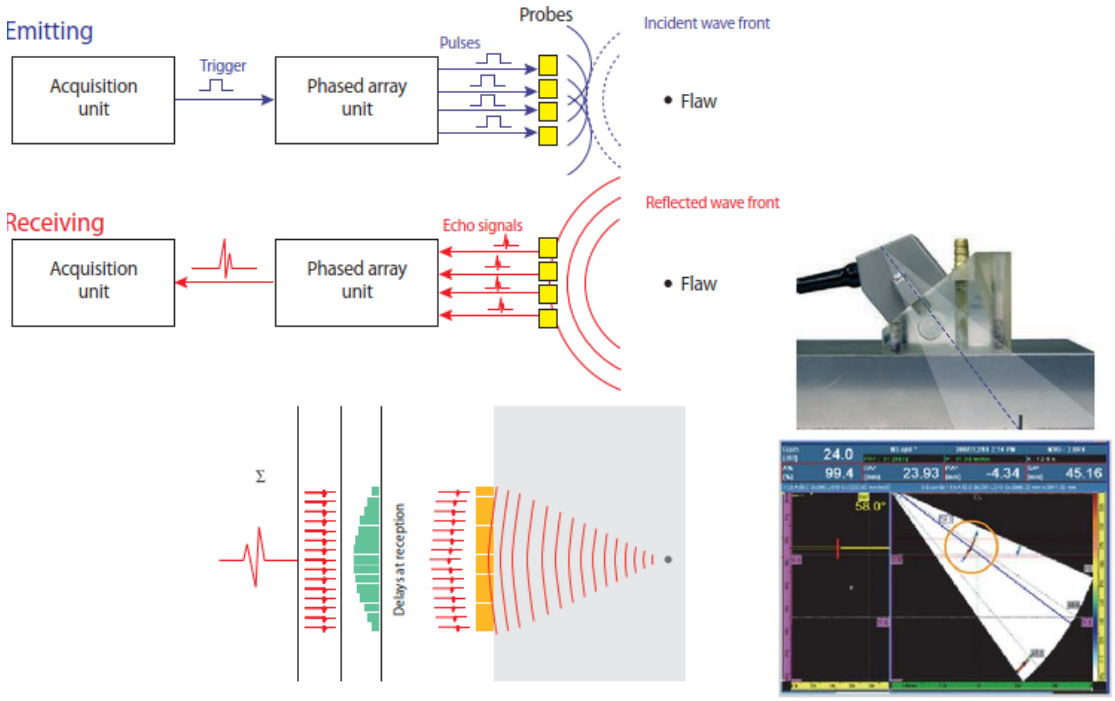


الشكل (43) مثال على تطبيق تقنية الأمواج فوق الصوتية ذات الصفيف الطوري على مكوّن هندسي معقد.

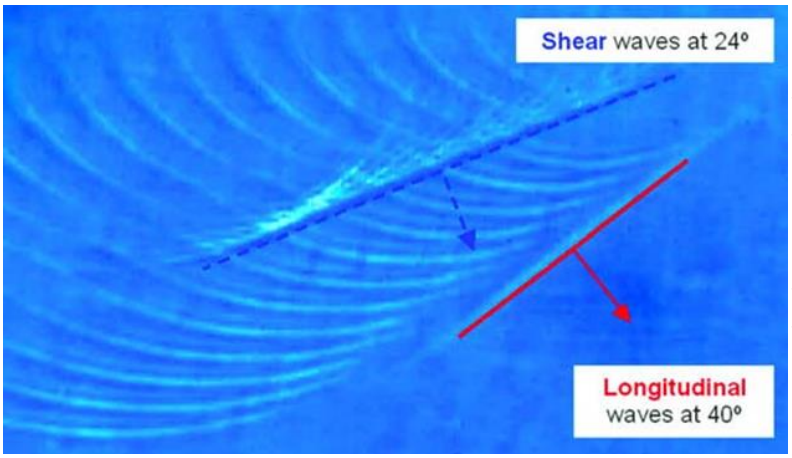
أن تقنية الصفيف الطوري هي نظام تحكم حاسوبي للعناصر المفردة في مسبار متعدّد العناصر (Elements) ، وعند تهييج هذه العناصر يمكن أن يُولِّد حِزماً بخصائص محدّدة مثل الزاوية و حجم البقعة المحرقية . لتوليد حزمة بطور ما لتصل بالشكل المطلوب للهدف، يجب أن يكون لكل مقدمة الأمواج نفس زمن الوصول لنقطة الهدف.
يمكن أن يتم ذلك إذا تم تطبيق نبضة على العناصر النشطة المحدّدة بفارق زمني مختلف قليلاً ومحدّد بدقة.
الصدى المستقبل على المسبار من النقطة المحدّدة سيصدم عناصر المسبار أيضاً بفارق زمني ما بحيث أن كل عنصر مفرد يستقبل نبضة واحدة قبل أن يُجمعوا معاً لتُرسل الاشارة الى معالج الجهاز. تعتمد قيمة التأخير لكل عنصر على كلٍ من طول العناصر النشطة في المسبار (العدسة النشطة) و نوع الموجة و زاوية الانعكاس و البعد المحرقي .
لتوليد حزمة بطور متزامن وجبهة مواجهة واحدة يتم تنشيط عناصر المسبار بأزمنة مختلفة عن بعضها قليلاً.



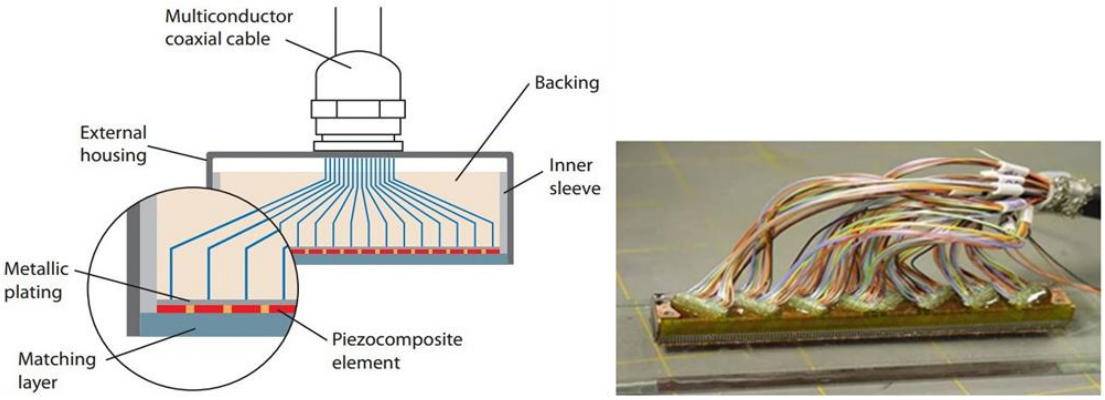
شكل (44) الكشف عن الشقوق المنحرفة بواسطة مسبار أحادي البلورة يساراً ومتعددة العناصر يميناً



الشكل (45) تشكيل الحزمة والتأخير الزمني لنبض واستقبال حزم متعدّدة (نفس الطور والسعة).



الشكل (46) مثال على اظهار أمامي لموجة مرنة ضوئياً في كتلة زجاجية لمسبار خطي بتردد 7.5 ميجاهرتز ، مكوّن من 12 عنصراً بخطوة 2 مم.
تلي الموجات الطولية المنكسرة 40° مقدمة موجة القص عند 24° .



الشكل (47) أسلاك توصيل مسبار صفيف طوري

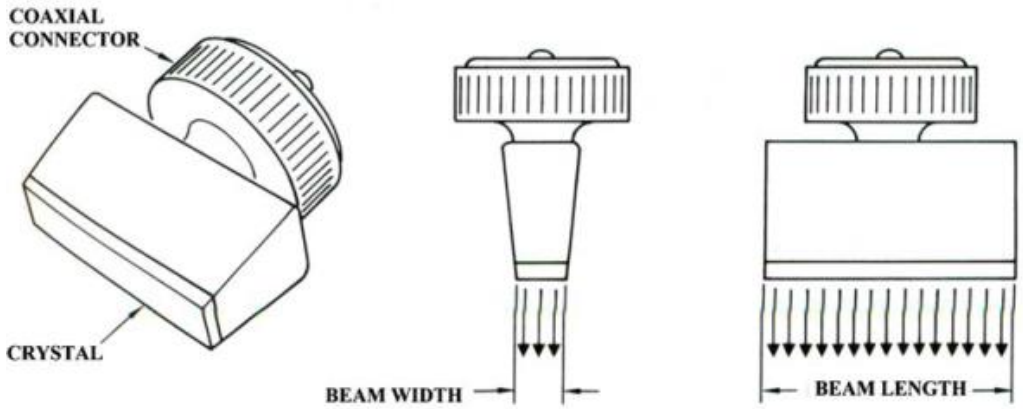
9.4. مسابر الفرشاة (Paintbrush transducers)

عادةً ما يتم انشاء مسابر الفرشاة من فسيفساء أو سلسلة من العناصر البلورية المتطابقة. الشرط الأساسي لمسبار الفرشاة هو أن شدّة نمط الحزمة لا تختلف اختلافاً كبيراً على طول المسبار بالكامل.

تم تصميم مسابر الفرشاة لتكون أجهزة مسح ؛ وتتمثّل مهمتهم الأساسية في تقليل زمن الفحص مع توفير التغطية الكاملة.

هذه ميزة كبيرة حيث أن فحص المساحات الكبيرة باستخدام مسبار صغير أحادي العنصر عملية طويلة ومملة.

بعد إجراء مسح باستخدام مسابر الفرشاة ، فإذا أشار الاختبار إلى وجود حالات انقطاع ، يمكن إجراء مزيد من التحقيق في هذه الانقطاعات لمعرفة حجمها وموقعها باستخدام مجسات قياسية.



الشكل 48. مسبار فرشاة نموذجي مصفوفة.

5. صيانة المجسات

قد تتعرّض المجسات أثناء الاستخدام لأضرار معينة. لذلك يجب أن يكون المستخدم على دراية جيدة بالأسباب والتأثيرات المحتملة لهذه الأضرار. نذكرها بإيجاز :

(1) قد يتضرّر المسبار ميكانيكياً بسبب السقوط أو تثبيت المسبار بشدة أو عن طريق تطبيق حمل أكثر من اللازم على سطح الإقتران. يمكن أن يؤدي ذلك إلى تغيير مجال الصوت وتقليل الحساسية أو فقدانها ؛

(2) يمكن أن تنفصل البلورة عن الوجه الواقي أو كتلة التأخير (delay block) بسبب تغلغل السوائل في المسبار أو بسبب ارتفاع درجات حرارة المسبار. كما يمكن أن يؤثر هذا أيضاً على مجال الصوت وحساسية المجسات ؛

(3) قد يحدث التآكل الطبيعي للوجه الواقي وكتلة التأخير المصنوعة من البرسبيكس في حالة مجسات نوع الاتصال المباشر. قد ينتج عن ذلك زيادة في نقطة انبعاث الصوت من المسبار (Index) وتغيير في زاوية المسبار. في حالة مسابر الـ TR ، يمكن حدوث تغيير في مجال الصوت ، يمكن أن تحدث زيادة في الصدى البيني (cross talk) وتقليل الحساسية ؛

(4) يمكن أن تؤدي الفولتية العالية للغاية (نبض الإرسال) في المسبار إلى انهيار عازلية مما يؤدي إلى تدمير البلورة بالكامل. تتحمّل المجسات القياسية بشكل طبيعي مثل هذه الفولتية العالية. تُصنع مجسات خاصة مصممة للعمل عند الفولتية المنخفضة (على سبيل المثال مجسات مقاييس السماكة الرقمية) وقد تتأثرعند توصيلها بجهاز ارسال عالي الطاقة.

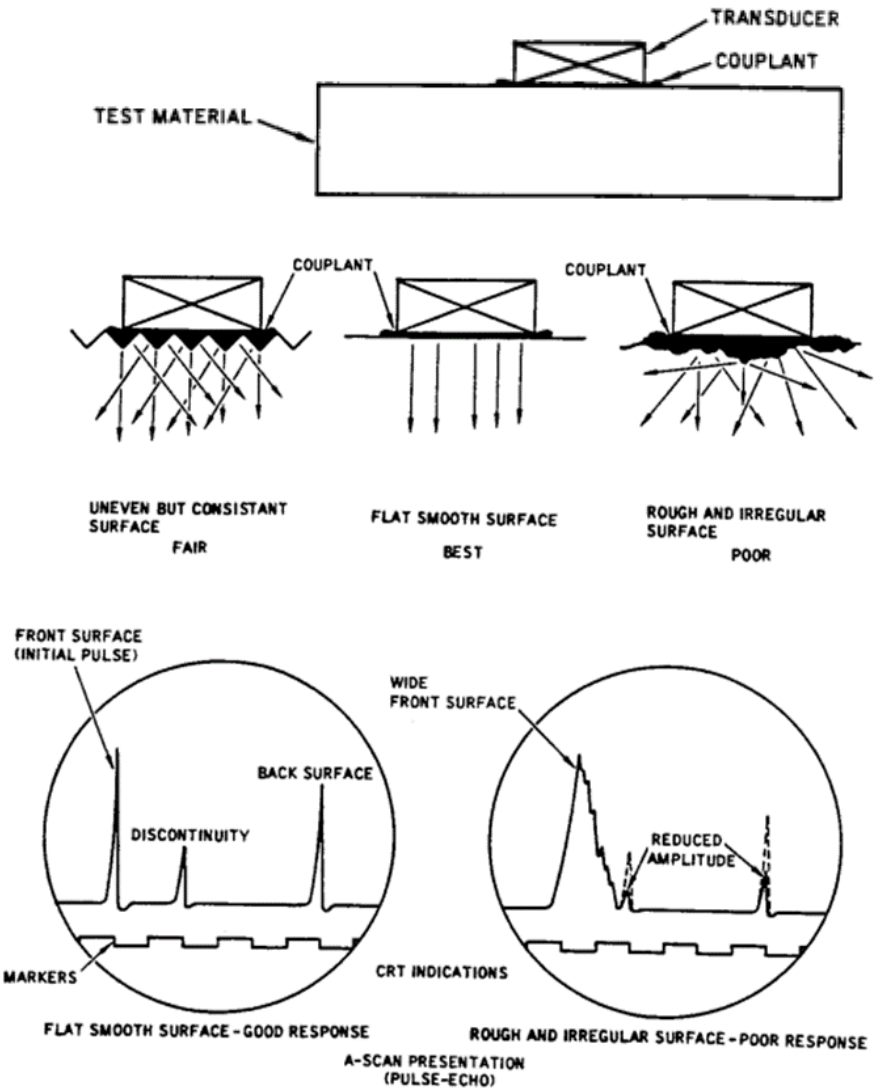
6. وسيط الاقتران في اختبار التلامس بالأمواج فوق الصوتية (Couplant) .

الغرض الأساسي من وسيط الاقتران هو توفير مسار سليم مناسب بين المسبار وسطح الاختبار بحيث يحقق ما يلي:

1. يبلّل بشكل فعّال أو يحقّق تلامس تام لكلاٍ من سطح المسبار وجزء الاختبار.
2. يستبعد كل الهواء من بين الأسطح حيث أن الهواء هو موصل ضعيف جداً للصوت.
3. يملأ عدم الإنتظام على سطح الجزء
4. يساعد في حركة المسبار فوق السطح في اختبار التلامس.
5. أن يكون سهل التطبيق والإزالة.
6. يجب أيضاً أن يكون غير ضار بأسطح الأجزاء المفحوصة.

يشيع استخدام وسيط اقتران كالزيت أو الماء الممزوج بالجلسرين (جزءان من الماء وجزء واحد من الجلسرين). حتى معجون ورق الحائط له مزايا كوسيط اقتران.

يمكن استخدام وسيط اقتران أثقل ، مثل الشحوم أو الزيت الثقيل ، على الأسطح الخشنة أو الشاقولية. كما يتوفّر أيضاً وسيط اقتران كمعجون مصمم خصيصاً من الشركات المصنعة للمعدات فوق الصوتية.



الشكل (49) الاختلافات في مطال الإشارة تبعاً لخشونة السطح.

في جميع الحالات ، يجب أن يكون وسيط الإقتران رقيق قدر الإمكان ، إذا كانت ثخانة وسيط الإقتران مفرطة ، فقد تعمل بمثابة حذاء وتغيّر اتجاه حزمة الصوت.

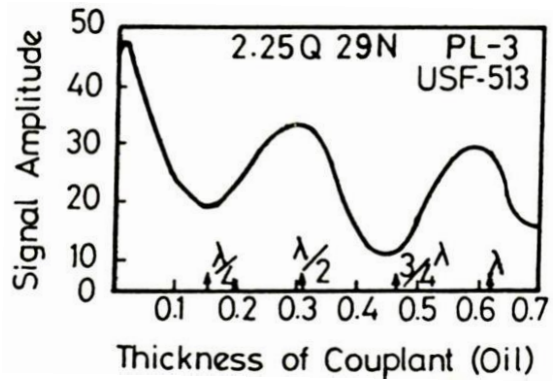
يمكن أن يؤثّر سطح عينة الاختبار بشكل كبير على انتشار الأمواج فوق الصوتية ، و يمكن أن تسبّب الأسطح الخشنة تأثيرات غير مرغوب فيها مثل تقليل مطال الانقطاع و تقليل مطال السطح الخلفي بسبب تشويه توجيه الموجة.

يجب أن نختار وسيط الإقتران للإختبار بالأمواج فوق الصوتية كالتالي:

للسطح الأملس : ماء ، زيت ، جل

للسطح متوسط الخشونة: زيت ، جل

للأسطح الخشن : شحم



الشكل (50) الاختلافات في مطال الإشارة وسماكة وسيط الاقتران

1.6. خسارة الطاقة (التوهين) بسبب وسيط الإقتران وخشونة السطح

سبب التوهين هو خسارة طاقة الإرسال بسبب وسيط الاقتران وخشونة السطح. عندما يتم وضع المسبار على سطح أملس جداً لعينة باستخدام أداة اقتران ، فإن مطال الإشارة من السطح الخلفي يختلف باختلاف سماكة ونوع وسيط الاقتران. يظهر مثال نموذجي في الشكل 51 و الشكل 52.

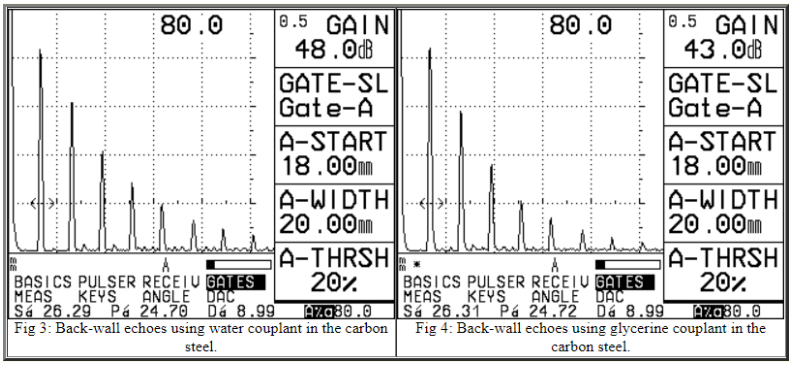
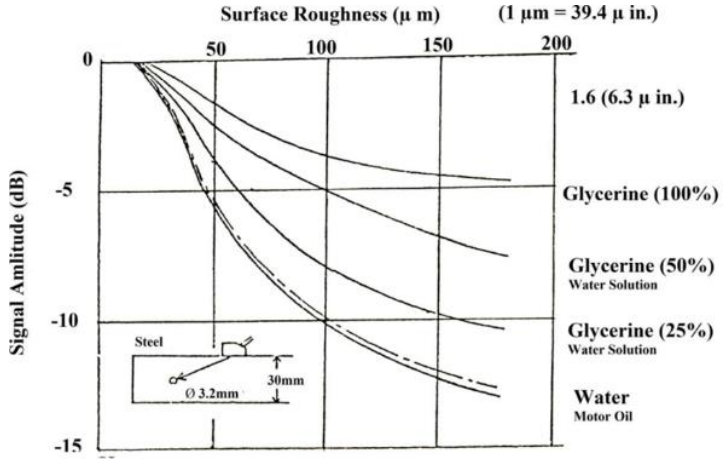


Fig 3: Back-wall echoes using water couplant in the carbon steel.

Fig 4: Back-wall echoes using glycerine couplant in the carbon steel.

الشكل (51) تباين الربح مع نوع وسيط الإقتران



الشكل (52) تباين الإشارة مع نوع وسيط الإقتران لمختلف أنواع خشونة السطح.

الفهرس

1. المبادئ الخاصة بمسابر الأمواج فوق الصوتية.....1
1.1 التأثير الكهروضغطي على الكريستالة 1
2.1 تصنيف المسابر الكهروضغطية.....1
3.1 مواد المسابر الكهروضغطية مفردة البلورة..... 2
4.1. مقارنة بين المسابر الكهروانضغاطية.....4
2. مكونات مسابر الأمواج فوق الصوتية.....5
1.2. توليد الأمواج في المسابر الكهروضغطية.....5
1.1.2. الشكل الموجي للكريستالة والطيف.....6
2.1.2. الممانعة الصوتية ، الانعكاس والتوهين.....7
3.1.2. حقل الصوت.....8
4.1.2. متغيرات أخرى لحزمة الصوت.....9
5.1.2. قطر الحزمة.....9
6.1.2. المنطقة المحرقية.....10
7.1.2. انتشار الحزمة ونصف الزاوية.....11
3. تصميم المسابر.....11
1.3. مكونات مسبار الموجات فوق الصوتية.....11
2.3. إرشادات التهييج للمسابر.....13
4. أنواع مسابر الأمواج فوق الصوتية.....14
1.4. مسابر الاتصال المباشر أو التلامس.....14
1.1.4. المسابر ذات وجه حماية.....16
2.4. المسابر ثنائية العنصر.....17
3.4. مسابر الحزمة الزاويّة.....20
1.3.4. مسابر الحزمة الزاويّة المزدوجة البلورة.....22
2.3.4. مسبار الموجة السطحية.....22
3.3.4.أحذية مسابر الحزمة الزاويّة.....22
4.3.4. مسابر موجة قص (زاوية) ذات الورود العادي.....23
4.4. مسابر خط تأخير.....23
5.4. مسابر الغمر.....24
6.4. المسابر المخصصة.....26
7.4. كابلات مسبار الأمواج فوق صوتية.....27
8.4. نظام المسابر المصفوفة الطوريّة.....28
9.4. مسبار الأمواج فوق الصوتية ذو الصفيف الطوري.....29
9.4. مسابر الفرشاة.....31
5. صيانة المجسات.....31
6. وسيط الاقتران في اختبار التلامس بالأمواج فوق الصوتية 32
1.6. خسارة الطاقة (التوهين) بسبب وسيط الإقتران وخشونة السطح.....33
الفهرس.....34