

ГАЛУЗЬ ТЕХНІКИ

Ця заявка стосується способу виявлення та класифікації тріщин у трубопроводах для рідини або газу. Ця заявка також стосується пристрою для перевірки трубопроводу на наявність тріщин.

РІВЕНЬ ТЕХНІКИ

У всьому світі існує близько 4000000 км транспортних трубопроводів для рідин і газу. Оператори мають програми інспекцій і ремонту для оцінки цілісності цих трубопроводів, щоб гарантувати безпечну роботу в рамках економічно визначених параметрів.

Найбільш широко використовуваним способом проведення інспекції на закопаних трубопроводах великої довжини є так званий "інтелектуальна діагностика й очищення" або "внутрішньотрубна дефектоскопія" з використанням інтелектуальних засобів діагностики й очищення. Інтелектуальні засоби діагностики й очищення - це прилади, оснащені датчиками, які збирають інформацію про геометрію трубопроводу та його дефекти, які можуть включати деформацію, тріщини, корозію та відшаровування покриття. Ці прилади є автономними і зазвичай містять бортовий комп'ютер, блок живлення та датчики. Дані зображень, отримані цими приладами, зазвичай завантажуються після отримання з приладу для аналізу. Для коротких трубопроводів, таких як навантажувальні труби або стояки, загалом використовуються прив'язні засоби діагностики й очищення.

Відомі методи проведення інтелектуальної діагностики й очищення ґрунтуються на використанні витоків потоку магнітної індукції (MFL) та ультразвукових перетворювачів (UT).

Прилади MFL використовують намагнічування для виявлення більшості типів корозійних дефектів у трубопроводі. Виявлення таких дефектів ґрунтується на вимірюванні товщини стінки трубопроводу. Однак тріщини в стінках трубопроводів, спричинені корозійним розтріскуванням під напругою, не можуть бути надійно виявлені приладами MFL. Тріщина або пучок тріщин зазвичай починаються на поверхні внутрішньої або зовнішньої стінки трубопроводу і проникають на певну глибину. Тріщини в трубопроводах і зварних швах викликають серйозне занепокоєння, оскільки тріщини можуть призвести до проблем з витокami або навіть до раптових розривів із вивільненням рідини або газу під високим тиском, що може призвести до небезпечних ситуацій і великої шкоди.

Прилади UT генерують акустичну хвилю, яка передається на стінку трубопроводу. При певній орієнтації, в якій випромінюється акустична хвиля, її можна використовувати для вимірювання товщини стінки для виявлення корозійних дефектів. Прилади UT також можна використовувати для перевірки трубопроводу на наявність тріщин. Однак прилади UT мають обмежене застосування для інспекції трубопроводів для газу, оскільки акустична хвиля, яка генерується приладом UT, як правило, потребує наявності рідини як середовища зв'язку між випромінювачем і субстратом.

Запропоновано методи, що використовують електромагнітні акустичні перетворювачі (EMAT), які дозволяють виявляти тріщини як у трубопроводах для рідких речовин, так і в газопроводах. EMAT генерує акустичну хвилю, яка взаємодіє з дефектами в трубопроводі, якщо вони є. Пропущену або відбиту хвилю вимірюють та аналізують для виявлення дефекту.

Відомі методи, що використовують технологію EMAT, розкриті, наприклад, у заявці на патент США US 2011/0167914 (US'914), патенті США US 7,819,010 (US'010) та заявці на патент США US 2011/041612 (US'612). Прилади для інспекції трубопроводів відповідно до US'914 і US'010 використовують EMAT, які генерують спрямовані хвилі. Однак використання спрямованих хвиль приводить до отримання даних зображень, які мають відносно обмежену просторову роздільну здатність. Запропонований у US'612 метод використовує горизонтальні зсувні хвилі та хвилі Лемба і може використовуватись для виявлення та ідентифікації всіх видів дефектів трубопроводів, але він не є дуже чутливим лише до тріщин. Крім того, прилади для інспекції трубопроводів, принаймні відповідно до US'914, US'010, не можуть одночасно виявляти тріщини, орієнтовані в різних напрямках, наприклад у коловому і осьовому напрямку трубопроводу. Проте бажаним є раннє і надійне виявлення всіх видів тріщин. Крім того, відомі прилади для інспекції трубопроводів EMAT можуть бути чутливими до відбитих хвиль від шарів всередині стінки труби та в місцях, де зовнішнє покриття відділилося від стінки труби. Такі сигнали може бути важко розрізнити, що заважає класифікації тріщин у отриманих даних зображень. Таким чином, вищезазначені методи, які використовують технологію EMAT для виявлення та класифікації тріщин у трубопроводах, не забезпечують потрібну надійність, що є однією з головних причин того, чому комерційні прилади EMAT поки що мають обмежене визнання на ринку.

Інший прилад для інспекції трубопроводів розкритий у заявці на патент США US 2014/028300 A1. Проте прилад згідно з цим винаходом не налаштований на класифікацію тріщин, а скоріше призначений для виявлення широкого спектру дефектів, які в іншому випадку потребували б комбінації різних методів інспекції з використанням кількох різних приладів. Відповідно, кілька сигналів EMAT окремо та незалежно відбираються та аналізуються для виявлення вказаного широкого діапазону дефектів.

Заявка щ патент США US 7,697,375 B2 стосується приладу, що використовує технологію EMAT для інспекції зв'язку цементу з колоною в свердловинах. Однак цей прилад не налаштований на виявлення та класифікацію тріщин.

ОБ'ЄКТ ВИНАХОДУ

Цей винахід стосується приладів для інспекції трубопроводів, які здатні надійно виявляти та класифікувати тріщини в різних напрямках у трубопроводі.

СУТЬ ВИНАХОДУ

Відповідно до принципів цього винаходу можливе одночасне виявлення та класифікація різних видів тріщин у трубопроводах, зокрема поздовжніх, осьових та спіральних тріщин. Крім того, цей винахід пропонує спосіб та пристрій для виявлення та класифікації тріщин будь-якого виду, при цьому вони не чутливі або мають обмежену чутливість до інших видів дефектів трубопроводу.

Цей винахід є застосовним як до трубопроводів великої довжини, так і малої.

Загалом зазначене виявлення та класифікація досягаються з використанням протоколу вимірювань, відповідно до якого генерується перша зсувна хвиля вздовж області інспекції на трубопроводі. Вказана область може містити тріщину, орієнтовану в будь-якому напрямку, наприклад в осьовому або коловому напрямку трубопроводу. Перша зсувна хвиля поляризується в першому напрямку, наприклад напрямку, паралельному орієнтації тріщини, що представляє інтерес (наприклад, осьовий або коловий напрямок). Генерується друга зсувна хвиля, яка поляризується в напрямку під мінімальним кутом, приблизно на 10° відмінним від першого напрямку, переважно під кутом приблизно 30° або більше, більш переважно під кутом приблизно 45° або більше, ще більш переважно під кутом приблизно 60° або більше і найбільш переважно під кутом приблизно 90° . Першу і другу зсувні хвилі приймають для аналізу, в якому досліджують анізотропію прийнятих хвиль шляхом порівняння властивостей (амплітуда, довжина хвилі, частота, фаза) вказаних прийнятих хвиль. Таке порівняння можна здійснити шляхом обчислення коефіцієнта анізотропії затухання хвилі. Іншими словами, анізотропія першої та другої прийнятих зсувних хвиль досліджується шляхом порівняння принаймні однієї властивості вказаних першої та другої прийнятих зсувних хвиль, що дозволяє виявляти та класифікувати тріщини в досліджуваному трубопроводі.

Перша і друга випромінювані зсувні хвилі можуть мати частоту близько 0,5-5 МГц.

Наприклад, зсувні хвилі можна генерувати з використанням EMAT. Перша та друга зсувні хвилі можуть бути згенеровані та детектовані з використанням одного EMAT. Крім того, кілька різних EMAT можна використовувати для генерації та детектування першої та другої зсувних хвиль.

Згідно з першим варіантом здійснення цього винаходу перша та друга випромінювані зсувні хвилі випромінюються в напрямку, по суті, ортогональному до внутрішньої поверхні стінки трубопроводу. Коли для генерування та детектування зсувних хвиль використовується технологія EMAT, для генерування та детектування першої та другої зсувних хвиль можна використовувати один EMAT. В альтернативному варіанті здійснення цього винаходу можна використовувати різні EMAT. Наприклад, перший EMAT генерує та детектує першу зсувну хвилю, а другий EMAT генерує та детектує другу зсувну хвилю.

Якщо для генерації та детектування першої та другої зсувних хвиль використовується один EMAT, після генерації та детектування першої зсувної хвилі EMAT повертається у просторі, щоб згенерувати та детектувати другу зсувну хвилю.

Згідно з другим варіантом здійснення цього винаходу перша зсувна хвиля випромінюється в осьовому напрямку трубопроводу, а друга зсувна хвиля випромінюється в напрямку, по суті, по колу стінки трубопроводу. Кожна зсувна хвиля може бути згенерована окремим випромінюючим EMAT, і кожна зсувна хвиля може бути детектована окремим приймаючим EMAT, що відрізняється від випромінюючого EMAT.

Згідно з ідеями цього винаходу додатково передбачено пристрій для виявлення та класифікації тріщин у трубопроводі, причому вказаний пристрій містить перший випромінюючий EMAT для випромінювання першої зсувної хвилі вздовж області інспекції, причому перша зсувна хвиля поляризується в першому напрямку; перший приймаючий EMAT для прийому першої зсувної хвилі;

другий випромінюючий EMAT для випромінювання другої зсувної хвилі вздовж області інспекції, причому друга зсувна хвиля поляризується в другому напрямку під мінімальним кутом, приблизно на 10° відмінним від першого напрямку; другий приймаючий EMAT для прийому другої зсувної хвилі; вбудований або зовнішній процесорний блок для обробки даних від першого та другого приймаючих EMAT, включаючи дослідження анізотропії першої та другої прийнятих зсувних хвиль шляхом порівняння принаймні однієї властивості вказаних першої та другої прийнятих зсувних хвиль для виявлення і класифікації тріщин у області інспекції.

Такий пристрій може бути виконаний із можливістю здійснення способів відповідно до цього винаходу.

Відповідно до цього винаходу додатково передбачено прилад для інспекції трубопроводів, що містить трубопровідний транспортний засіб; блок датчиків, встановлений на трубопровідному транспортному засобі, що містить принаймні один пристрій відповідно до цього винаходу; принаймні один блок живлення для подачі енергії принаймні на вказаний блок датчиків.

Вказаний прилад для інспекції трубопроводів може бути виконаний із можливістю переміщення в трубопроводі вздовж осьового напрямку трубопроводу, переважно зі швидкістю близько 0,1-4 метри

на секунду.

Буде зрозуміло, що принципи та ідеї цього винаходу можуть використовуватися для виявлення та класифікації тріщин. Зокрема, можливе одночасне виявлення та класифікація поздовжніх, осьових та спіральних тріщин.

Буде зрозуміло, що у контексті цього документа вираз "виявлення тріщин" включає визначення наявності тріщин на основі отриманих даних. Крім того, слід розуміти, що з огляду на контекст цього документа вираз "класифікація тріщин" включає визначення типу тріщини (включаючи розмір, орієнтацію) на основі отриманих даних.

Далі буде вказано, що відповідно до варіантів здійснення цього винаходу, розкритих у цьому описі, використовуються горизонтально поляризовані зсувні хвилі (які також називаються "горизонтальними зсувними хвилями" або "SH-хвилями"), що зазначаються тут як "зсувна хвиля (зсувні хвилі)". Тобто, частинки в решітці досліджуваного матеріалу виводяться з рівноваги й коливаються в площині, паралельній поверхні досліджуваного матеріалу, наприклад поверхні стінки трубопроводу, коли збурення поширюється у вигляді хвилі в напрямку, перпендикулярному до вказаної площини.

Крім того, незважаючи на те, що у розкритих прикладах варіантів здійснення цього винаходу використовується технологія EMAT, фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що даний винахід не обмежується такою технологією. Тобто будь-який (майбутній) генератор, здатний генерувати зсувні хвилі в (газо)трубопроводах, є придатним для виконання протоколу вимірювань, як розкрито тут. Крім того, даний винахід не обмежується інспекцією трубопроводів, які транспортують воду, нафту або газ на великі або короткі відстані, а може використовуватися для інших застосувань, де використовуються металеві труби, включаючи буріння свердловин.

КОРОТКИЙ ОПИС ГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Даний винахід описано з посиланням на приклади варіантів здійснення цього винаходу і, відповідно, графічні матеріали, на яких:

на Фіг. 1A проілюстровано приклад варіанта здійснення цього винаходу EMAT;

на Фіг. 2A проілюстровано систему координат, яка використовується в інших прикладах варіантів здійснення цього винаходу, що описані в цьому документі;

на Фіг. 2B проілюстровано приклад колової тріщини в трубопроводі;

на Фіг. 2C проілюстровано приклад осьової тріщини в трубопроводі;

на Фіг. 2D проілюстровано приклад колової тріщини та колонії кільцевих тріщин у трубопроводі;

на Фіг. 2E проілюстровано приклад осьової тріщини та пучка осьових тріщин у трубопроводі;

на Фіг. 2F проілюстровано приклад спіральної тріщини в трубопроводі;

Фіг. 3A і 3B стосуються першого варіанту здійснення цього винаходу, описаного в цьому документі;

Фіг. 4A і 4B стосуються другого варіанту здійснення цього винаходу, описаного в цьому документі;

Фіг. 4C і 4D стосуються ілюстрації випромінюваних зсувних хвиль, які поляризовані в цілому в різних напрямках;

на Фіг. 5 схематично проілюстровано прилад для інспекції трубопроводів, який рухається по трубопроводу з певною швидкістю.

ДОКЛАДНИЙ ОПИС ВИНАХОДУ

Слід розуміти, що для простоти та ясності ілюстрації, якщо це вважається доцільним, номери позицій можуть повторюватися на різних фігурах, позначаючи відповідні або аналогічні елементи чи етапи. Крім того, для забезпечення повного розуміння варіантів реалізації, описаних у контексті цього винаходу, наведено ряд конкретних деталей. Однак фахівцю в даній галузі техніки зі звичайним рівнем підготовки буде зрозуміло, що описані варіанти реалізації винаходу можуть бути застосовані на практиці без цих конкретних деталей. Крім того, цей опис не слід розглядати як такий, що обмежує обсяг описаних варіантів здійснення цього винаходу, а скоріше як просто опис наведених у цьому документі варіантів реалізації цього винаходу. Крім того, слід розуміти, що посилання на подібні ознаки можуть позначатися різними посиланнями на різних фігурах, описаних у цьому документі.

На Фіг. 1 показано матеріал 101, який є предметом дослідження. Матеріал 101 може бути провідним матеріалом і/або феромагнітним матеріалом. Відповідно до варіантів здійснення цього винаходу, розкритих у цьому документі, матеріал 101 може бути матеріалом, з якого зазвичай виготовляють стінку трубопроводу, таким як метал, наприклад сталь, вуглецева сталь або залізо.

На Фіг. 1 показані основні компоненти наведеного як приклад електромагнітного акустичного перетворювача 102 (EMAT), який знаходиться поблизу, але не торкається матеріалу 101. Загалом, EMAT 102 містить принаймні одну електричну котушку 104 і принаймні одне магнітне джерело 103. У прикладі на Фіг. 1 магнітне джерело 103 містить один постійний магніт, що має південний полюс 103A і північний полюс 103B. В альтернативному варіанті здійснення магнітне джерело 103 може містити, наприклад, електромагніт. Крім того, на Фіг. 1 показані дві спіральні електричні котушки 104, хоча фахівець у цій галузі техніки зрозуміє, що EMAT може містити більше або менше котушок та інших типів котушок, наприклад котушки, що має звилисту або зигзагоподібну структуру, залежно від конкретного застосування. Котушки 104, як правило, є РЧ-котушками, через які посиляється

імпульсний або змінний струм у вигляді згладжених коливань. Відповідно до цього винаходу переважно генеруються ультразвукові хвилі, переважно в діапазоні від близько 20 кГц до близько 50 МГц, більш переважно в діапазоні від близько 0,2 МГц до близько 20 МГц, ще більш переважно в діапазоні від близько 0,5 МГц до близько 5 МГц.

Хоча на Фіг. 1 показано ЕМАТ 102, що має один постійний магніт, фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що ЕМАТ може містити інші сусідні постійні магніти, наприклад послідовність із шести магнітів із змінними напрямками магнітних полюсів. В альтернативному варіанті здійснення ЕМАТ 102 може містити кілька електромагнітів. Крім того, фахівцю буде зрозуміло, що, залежно від конкретного застосування, можуть генеруватися різні типи хвиль з використанням різних комбінацій котушок і магнітних джерел. Наприклад, ЕМАТ може генерувати різні види ультразвукових хвиль, включаючи зсувні хвилі, поверхневі хвилі, такі як так звані хвилі Релея, і спрямовані хвилі, такі як так звані хвилі Лемба. Відповідно до цього винаходу ЕМАТ призначені для створення зсувних хвиль.

ЕМАТ можна використовувати для генерації ультразвуку в провідному та/або феромагнітному матеріалі, такому як трубопровід з вуглецевої сталі. Перевага використання ЕМАТ для генерації ультразвуку полягає в тому, що ЕМАТ не потребує середовища зв'язування, наприклад рідини. Таким чином, ЕМАТ дозволяють проводити інспекцію трубопроводів для рідини та газу. Навпаки, при використанні, наприклад, п'єзоелектричних ультразвукових перетворювачів для генерації ультразвуку, як правило потрібен фізичний контакт (часто через шар рідини) перетворювача з досліджуванним матеріалом.

Як показано на Фіг. 1, у випадку, коли матеріал 101 є провідним матеріалом, генерація зсувної хвилі 105 у матеріалі 101 може відбуватися за таких умов. ЕМАТ розташовують біля поверхні 101А матеріалу 101. РЧ-струм спрямовується через котушки 104, що приводить до індукції вихрових струмів у матеріалі 101 на поверхні 101А і поблизу неї. На електрони вихрових струмів діє сила Лоренца, спричинена магнітним полем від магнітного джерела 103. Таким чином, напрямок магнітного поля, що генерується, по суті ортогональний до поверхні 101 А. На макроскопічному рівні частинки на поверхні 101А і поблизу неї починають коливатися в напрямку 105В (позитивний і негативний напрямки у), таким чином змушуючи сусідні частинки в масі розпочати коливатися в тому ж напрямку 105В. Таким чином, у решітці виникає спотворення, яке поширюється у вигляді пружної хвилі 105 через провідний матеріал 101, наприклад, у напрямку 105А (негативний напрямки х).

Детектування ультразвукової хвилі 105 може здійснюватися з використанням зворотного процесу. Наприклад, згенерована ультразвукова хвиля може поширюватися в область поблизу другого приймаючого ЕМАТ (не показано), що індукує вихрові струми і, отже, індукційний струм у вказаному приймаючому ЕМАТ. В альтернативному варіанті здійснення перший випромінюючий ЕМАТ є також приймаючим ЕМАТ. Наприклад, детектована ультразвукова хвиля може бути відбиттям від дефекту в матеріалі 101 або відлунням від стінки з матеріалу 101.

Ультразвукова хвиля 105 буде взаємодіяти з дефектами провідного матеріалу 101, наприклад тріщиною 106. Отже, аналіз прийнятої ультразвукової хвилі може вказати на наявність дефектів у провідному матеріалі 101.

У випадку, якщо матеріал 101 є феромагнітним матеріалом, ультразвукові хвилі генеруються з використанням механізму магнітострикції. Тобто РЧ-струм проходить через котушки 104 і створює магнітострикцію на ультразвуковій частоті в матеріалі 101. Це генерує ультразвукову хвилю 105 у масі матеріалу 101. Детектування ультразвукової хвилі 105 може здійснюватися з використанням зворотного процесу.

Зазвичай феромагнітний матеріал також є провідним. Сталь є прикладом провідного феромагнітного матеріалу. Фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що генерація ультразвукових хвиль у таких матеріалах зазвичай приводить до посиленого генерування сигналу.

Тепер розглянемо Фіг. 2А, 2В і 2С. На Фіг. 2А схематично показаний трубопровід 201, що має діаметр D , товщину стінки t і зовнішню межу 202, на якій позначено коловий напрямок θ і осьовий напрямок z . Трубопровід 201 має внутрішню стінку 203А і зовнішню стінку 203В. Напрямки, вказані у варіантах здійснення цього винаходу, розкритих у цьому документі, будуть посилалися на вказану систему координат.

На Фіг. 2В і 2С показано поперечний переріз трубопроводу 203, де трубопровід 203 має внутрішню стінку 203А і зовнішню стінку 203В. На Фіг. 2В показаний приклад колової тріщини 204 у площині 204А, вирівняній в коловому напрямку θ . На Фіг. 2С показано приклад осьової тріщини 204' у площині 204А', вирівняній в осьовому напрямку z . Відзначається, що на трубопроводах часто спостерігаються осьові тріщини, тоді як на зварних з'єднаннях всередині трубопроводу можуть з'являтися колові тріщини.

На Фіг. 2D-2F проілюстровано трубопровід 203. На Фіг. 2D показано інший приклад колової тріщини 204. Такі тріщини зазвичай спостерігаються в зварних з'єднаннях. Крім того, колові тріщини зазвичай спостерігаються всередині пучків множинних орієнтованих по колу тріщин 204-1.

На Фіг. 2Е показано інший приклад осьової тріщини 204'. Осьові тріщини зазвичай трапляються в матеріалі трубопроводу і можуть починатися на зовнішній межі трубопроводу й проникати на певну

глибину. Крім того, такі тріщини зазвичай спостерігаються всередині пучків множинних осьових тріщин 204-2.

На Фіг. 2F показана труба зі спіральним зварним швом 204" і представлено інший тип тріщини, який іноді спостерігається в трубопроводах. Цей тип тріщин відомий як спіральна тріщина. Спіральна тріщина простягається в осьовому напрямку z , при цьому змінюючи свій напрямок в коловому напрямку θ . Спіральні тріщини можуть бути присутніми в трубах, які містять спіральні зварні шви. Такі труби відомі як спіральні зварені труби або гвинтоподібно зварені труби.

Розглянемо Фіг. 3A і 3B, які стосуються виявлення та класифікації тріщин у трубопроводі 308.

Перший випромінюючий ЕМАТ (не показаний), такий як ЕМАТ 101, як описано із посиланням на Фіг. 1, розташований всередині трубопроводу 308 таким чином, що генерується перша зсувна хвиля 304, поляризована в площині 301, паралельній площині, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. Тобто зсувна хвиля 304 поляризована в напрямку 304В. Зсувна хвиля 304 поширюється в напрямку 304А до площини, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. У даному випадку область 303А інспекції містить тріщину 303, яка орієнтована паралельно вказаній площині, що представляє інтерес. Завдяки цій орієнтації зсувна хвиля 304 не буде або мінімальною мірою взаємодіяти з тріщиною 303. Зсувна хвиля поширюється далі і приймається першим приймаючим ЕМАТ, таким як ЕМАТ 101, як показано на Фіг. 1. Перший приймаючий ЕМАТ розташований у площині 302. Відповідно, буде виміряна зсувна хвиля, що істотно не затухла. Площини 301 і 302 можуть бути віддалені на відстань d_1 , яка може бути в діапазоні близько 2 см – 250 см, більш переважно близько 5 см - 50 см.

Як буде більш докладно пояснено далі, шляхом дослідження анізотропії прийнятих хвиль тріщину 303 можна виявити та класифікувати. Таким чином, можна визначити наявність тріщини, а також отримати інформацію про розмір і орієнтацію тріщини (і, отже, тип тріщини, наприклад, осьова тріщина, поздовжня тріщина або спіральна тріщина).

Другий випромінюючий ЕМАТ (не показаний), такий як ЕМАТ 101, як описано із посиланням на Фіг. 1, розташований всередині трубопроводу 308 таким чином, що генерується друга зсувна хвиля 307, поляризована в площині 305, паралельній площині, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. Тобто зсувна хвиля 307 поляризована в напрямку 307В. Зсувна хвиля 307 поширюється в напрямку 307А до площини, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. Завдяки орієнтації тріщини 303 зсувна хвиля 307 буде взаємодіяти з тріщиною 303, наприклад, шляхом (часткового) перетворення на інші типи хвиль. Затухаюча зсувна хвиля поширюється далі і приймається другим приймаючим ЕМАТ, таким як ЕМАТ 101, як показано на Фіг. 1. Другий приймаючий ЕМАТ розташований у площині 306. Відповідно, буде виміряна зсувна хвиля, що істотно затухла. Площини 305 і 306 можуть бути віддалені на відстань d_2 , яка може бути в діапазоні близько 2 см - 250 см, більш переважно близько 5 см - 50 см.

У цьому прикладі тріщина 303 є коловою тріщиною, і площини 301 і 302 віддалені в осьовому напрямку одна відносно одної, тоді як площини 305 і 306 віддалені в коловому напрямку одна відносно одної.

Крім того, перша зсувна хвиля 304 може бути згенерована першою, після чого генерується друга зсувна хвиля 307. Однак перша і друга зсувні хвилі також можуть генеруватися по суті одночасно, якщо можна уникнути перешкод.

Нарешті зазначається, що протокол вимірювань відповідно до прикладу варіанту здійснення цього винаходу згідно з Фіг. 3A-3B дуже чутливий до виявлення та класифікації лише тріщин (всіх видів, наприклад, колових, осьових, спіральних), але не є чутливим до інших дефектів трубопроводу, таких як розшарування.

Розглянемо Фіг. 4A і 4B, які також стосуються виявлення та класифікації тріщин у трубопроводі 308.

Відповідно, перший випромінюючий ЕМАТ, такий як ЕМАТ 101, проілюстрований на Фіг. 1, розташований всередині трубопроводу 308 таким чином, що генерується перша зсувна хвиля 403, поляризована в площині 401, паралельній площині, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. Тобто зсувна хвиля 403 поляризована в напрямку 403В. Зсувна хвиля 403 поширюється в напрямку 403А до площини, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. У даному випадку область 303А інспекції містить тріщину 303, яка орієнтована паралельно вказаній площині, що представляє інтерес. Завдяки цій орієнтації зсувна хвиля 403 не буде або мінімальною мірою взаємодіяти з тріщиною 303. Зсувна хвиля поширюється далі, відбивається на зовнішній стінці 404 трубопроводу 308 і приймається як луна-сигнал першим приймаючим ЕМАТ (не показаний), таким як ЕМАТ 101, як описано із посиланням на Фіг. 1. Перший приймаючий ЕМАТ також розташований у площині 401. Відповідно, буде виміряна зсувна хвиля, що істотно не затухла. В альтернативному варіанті здійснення луна-сигнал може бути прийнятий першим випромінюючим ЕМАТ.

Другий випромінюючий ЕМАТ, такий як ЕМАТ 101, проілюстрований на Фіг. 1, розташований всередині трубопроводу 308 таким чином, що генерується друга зсувна хвиля 403', поляризована в

площині 401, паралельній площині, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. Тобто зсувна хвиля 403' поляризована в напрямку 403В'. Зсувна хвиля 403' поширюється в напрямку 403А' до площини, що представляє інтерес, яка містить область 303А інспекції. У даному випадку область 304А інспекції містить тріщину 303, яка орієнтована паралельно вказаній площині, що представляє інтерес. Завдяки цій орієнтації зсувна хвиля 403' буде взаємодіяти з тріщиною 303, наприклад, шляхом (часткового) перетворення на інші типи хвиль. Затухаюча зсувна хвиля поширюється далі, відбивається на зовнішній стінці 404 трубопроводу 308, додатково затухає внаслідок подальшої взаємодії з тріщиною 303 і, нарешті, приймається як луна-сигнал першим приймаючим ЕМАТ (не показаний), таким як ЕМАТ 101, як описано з посиланням на Фіг. 1. Перший приймаючий ЕМАТ також розташований у площині 401. Відповідно, буде виміряна зсувна хвиля, що істотно затухла. В альтернативному варіанті здійснення луна-сигнал може бути прийнятий першим випромінюючим ЕМАТ.

У цьому прикладі тріщина 303 є коловою тріщиною, а площини 401 і 402 віддалені в коловому напрямку одна відносно одної. Таким чином, зсувні хвилі 403 і 403' поширюються в напрямку, перпендикулярному до стінки 404 трубопроводу.

Крім того, перша зсувна хвиля 403 може бути згенерована першою, після чого генерується друга зсувна хвиля 403'. Однак перша і друга зсувні хвилі також можуть генеруватися по суті одночасно.

Крім того, зазначається, що протокол вимірювань згідно з цим прикладом варіанту здійснення цього винаходу також може використовувати лише один ЕМАТ як для генерування, так і для прийому першої зсувної хвилі 403 і другої зсувної хвилі 403'. У цьому випадку ЕМАТ змінює свою просторову орієнтацію після того, як було згенеровано першу зсувну хвилю 403. Наприклад, ЕМАТ повертається переважно на кут близько 90° (ортогонально). Можуть також використовуватися менші або більші кути, як буде описано далі з посиланням на Фіг. 4С і 4D цього винаходу.

Дві прийняті зсувні хвилі, отримані засобами відповідно до прикладів варіантів здійснення цього винаходу на Фіг. 3А-3В або на Фіг. 4А-4В, можуть бути проаналізовані, щоб визначити, чи містить область 303А, що представляє інтерес, тріщини. Крім того, якщо тріщини дійсно є, можна також визначити їх тип.

Відповідно, порівнюючи прийняті зсувні хвилі, можна визначити наявність тріщин. Точніше, якщо виявлено тріщини, їх можна класифікувати за розміром та орієнтацією. Аналіз можна виконувати шляхом обчислення коефіцієнта анізотропії затухання хвилі (WAAF). Такий аналіз можна, наприклад, провести, розглядаючи різницю виміряних амплітуд прийнятих хвиль. В альтернативному варіанті здійснення WAAF можна обчислити шляхом ділення амплітуди першої прийнятої хвилі на амплітуду другої прийнятої хвилі. Крім того, фахівцю в цій галузі техніки буде зрозуміло, що загалом будь-яка інша властивість хвилі (наприклад, частота, довжина хвилі, фаза) може використовуватися для обчислення WAAF.

Далі обговорюється приклад обчислення WAAF, причому WAAF обчислюється як відношення виміряних амплітуд першої та другої прийнятих зсувних хвиль. Наприклад, у випадку, проілюстрованому на Фіг. 3А-3В, перша зсувна хвиля 304 поляризована в напрямку 304В, паралельному орієнтації тріщини 303. Тут тріщина 303 є коловою тріщиною. Як обговорювалося раніше, перша хвиля 304 не затухає через такий дефект або затухає мінімальною мірою. Затухання А вказаної першої хвилі 304, яке виявляється за допомогою ЕМАТ в площині 302, є невеликим. Навпаки, друга зсувна хвиля 307 поляризується в напрямку, перпендикулярному вказаній орієнтації тріщини, і, як обговорювалося вище, взаємодіє з тріщиною 303. Отже затухання В вказаної другої хвилі 307, яке виявляється за допомогою ЕМАТ в площині 306, є великим. Співвідношення АШВШ, оскільки WAAF може бути відносно малим, наприклад, набагато менше за 1. Якщо в області інспекції 303А немає тріщини, WAAF дорівнюватиме або буде близьким до 1. Крім того, фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що, якщо тріщина 303 насправді є осьовою тріщиною, затухання хвилі А буде відносно великим порівняно із затуханням хвилі В, і буде отримано WAAF, набагато більший за 1. Причому, чим більше абсолютне значення WAAF, тим більший розмір тріщини. Таким чином, протокол вимірювань, показаний у прикладі варіанту здійснення на Фіг. 3А-3В, одночасно є чутливим до всіх видів тріщин.

Ті ж принципи застосовні і для протоколу вимірювань на Фіг. 4А-4В. Тут перша зсувна хвиля 403 поляризована в напрямку 403В, який є паралельним орієнтації тріщини 303 (колова тріщина). Як обговорювалося раніше, хвиля не затухає через такий дефект або затухає мінімальною мірою. Затухання А' вказаної першої хвилі 403, яке виявляється за допомогою ЕМАТ в площині 401, є невеликим. Навпаки, друга зсувна хвиля 403' поляризується в напрямку, перпендикулярному вказаній орієнтації тріщини, і, як обговорювалося вище, взаємодіє з тріщиною 303. Отже затухання В' вказаної другої хвилі 403', яке виявляється за допомогою ЕМАТ в площині 306, є великим. Співвідношення А'ШВ'Ш, оскільки WAAF може бути набагато меншим за 1. Якщо в області інспекції 303А немає тріщини, WAAF дорівнюватиме або буде близьким до 1. Крім того, фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що, якщо тріщина 303 насправді є осьовою тріщиною, затухання хвилі А' буде відносно великим порівняно із затуханням хвилі В', і буде отримано WAAF, набагато більший за 1. Причому, чим більше абсолютне значення WAAF, тим більший розмір тріщини. Таким чином, протокол

вимірювань, описаний згідно з прикладом варіанту здійснення на Фіг. 4А-4В, є одночасно чутливим до всіх видів тріщин.

Таким чином, вищезазначене ілюструє, що значення WAAF надає користувачеві достовірну інформацію про виявлення та класифікацію тріщин.

Крім того, зазначається, що ці самі принципи винаходу також передбачають виявлення спіральних тріщин, навіть якщо ці тріщини близькі до близько 45° . У цьому випадку відношення амплітуд хвиль як WAAF може дорівнювати або бути близьким до 1, але згасання хвиль А і В або А' і В' не є малими. В альтернативному варіанті здійснення якщо EMAT орієнтовані один відносно одного під кутом (таким чином, не вирівняні по колу чи по осі, а орієнтовані в діапазоні від близько 20° до 70° , більш переважно від близько 30° до 60°), WAAF, обчислений у спосіб, подібний до описаного вище, є відносно малим, якщо перша випромінювана зсувна хвиля поляризована по суті паралельно спіральній тріщині, тоді як друга випромінювана зсувна хвиля поляризована по суті перпендикулярно спіральній тріщині.

Далі зазначається, що у наведених вище прикладах терміни "малий" та "великий" вживаються стосовно згасання хвиль. Однак фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що такі терміни стосуються початкової амплітуди випромінюваних зсувних хвиль або ситуації, коли хвиля зазнає мінімального згасання через відсутність дефектів.

Крім того, автори цього винаходу виявили, що обчислений WAAF на основі вимірювань зсувних хвиль згідно з прикладами на Фіг. 3А-В або 4А-4В є дуже чутливою мірою для виявлення тріщин, але не є чутливим до інших дефектів у трубопроводі, таких як розшарування всередині трубопроводу або від'єднання покриття від стінки трубопроводу. Отже, WAAF відповідає достовірній інформації про наявність і тип тріщин у трубопроводах.

Як обговорювалося вище, WAAF є чутливим засобом для одночасного виявлення різних видів тріщин, таких як осьові тріщини, колові тріщини та спіральні тріщини. Наприклад, якщо область інспекції 303А містила б осьову тріщину, WAAF був би набагато більшим за 1. Як уже вказано вище, інакше орієнтовані тріщини також можуть бути виявлені за допомогою подібного підходу. Тобто використовується перша зсувна хвиля, яка по суті паралельна орієнтації тріщини, що представляє інтерес, а друга зсувна хвиля складає кут із вказаною орієнтацією тріщини, що представляє інтерес, переважно близько 90° (ортогонально). Далі зазначається, що трубопроводи часто мають осьові тріщини, тоді як зварні з'єднання всередині трубопроводу можуть мати колові тріщини. Тому ці типи тріщин вважаються найбільш релевантними типами тріщин.

Крім того, описані вище приклади передбачали першу і другу випромінювані хвилі, які орієнтовані по суті ортогонально одна до одної. Однак фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що перша і друга випромінювані хвилі можуть бути поляризовані одна відносно одної під кутом, відмінним від близько 90° . Це показано на Фіг. 4С і 4D. Відповідно, показано дві зсувні хвилі, що випромінюються в напрямку 408, причому перша зсувна хвиля має поляризацію в напрямку 407А, а друга зсувна хвиля має поляризацію в напрямку 407В. Тут перша зсувна хвиля поляризована в площині 405, яка паралельна площині 406 (наприклад, площина, що містить тріщину, орієнтована паралельно вказаній площині 406). У цьому прикладі площини 405 і 406 паралельні площинам ху. Друга зсувна хвиля поляризується в площині 409, ортогональній площині 405, і далі становить кут α із вказаною площиною 405, як показано на Фіг. 4С. Для наочності на Фіг. 4В показано зсувні хвилі в площині ху. Кут α зазвичай становитиме принаймні близько 10° . Бажано, щоб кут α був більшим ніж близько 30° . Більш переважно кут α більший ніж близько 45° . Але найбільш переважно кут α становить близько 90° . Крім того, слід розуміти, що можуть використовуватися додаткові випромінювані хвилі, такі як третя і четверта випромінювані хвилі. Усі хвилі можуть бути поляризовані в різній орієнтації. Наприклад, у випадку 3 випромінюваних хвиль перша і друга хвилі можуть бути поляризовані, як показано на Фіг. 4С і 4D. Третя хвиля може бути поляризована в тій самій площині, що й перша та друга випромінювані хвилі, але під кутом, відмінним від α , наприклад 2α . В іншому переважному варіанті використовуються три хвилі під кутом близько 60° . Таким чином, всі тріщини можна проаналізувати за допомогою WAAF. Однак можна зрозуміти, що використання 2 випромінюваних хвиль, які є по суті ортогональними одна відносно одної, є найбільш переважним.

Розглянемо Фіг. 5, на якій схематично проілюстровано приклад приладу 601 для інспекції трубопроводів в трубопроводі 602 з діаметром D, товщиною стінки t і внутрішньою стінкою 602А. Трубопровід 602 може бути трубопроводом діаметром від близько 5 сантиметрів до близько 5 метрів, більш переважно від близько 8 сантиметрів до близько 1,5 метра і товщиною t від близько 1 мм до близько 100 мм, більш переважно від близько 2 мм до близько 60 мм, ще більш переважно від близько 5 мм до близько 30 мм. Однак фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що діаметр D і товщина стінки t можуть бути меншими або більшими. Крім того, трубопровід може мати малу довжину (трубопроводи довжиною в пару 100 метрів, наприклад, навантажувальні або стоякові труби, наприклад, якщо вони використовуються в морі) або трубопроводи великої довжини (кілометрові трубопроводи).

Прилад 601 містить блок 603 датчиків, що містить кілька ЕМАТ, таких як ЕМАТ 102, як описано з посиланням на Фіг. 1. Кожен ЕМАТ виконаний із можливістю генерації ультразвукових хвиль в трубопроводі 602 відповідно до будь-якого з рішень, що описувалися вище. Переважно блок 603 датчиків містить достатню кількість ЕМАТ, так що у трубопроводі 602 можна виконати вимірювання достатньою мірою. В альтернативному варіанті здійснення блок 603 датчиків містить принаймні один ЕМАТ, який сканує трубопровід по колу. Однак при такій конфігурації сканування отримання даних відбувається набагато повільніше. Тому така конфігурація сканування може застосовуватися для інспекції трубопроводів невеликої довжини.

Блок 603 датчиків дозволяє проводити вимірювання стінок з покриттям принаймні близько 45 % за один прохід, більш переважно близько 80 % або більше, ще більш переважно близько 90 % або більше, ще більш переважно близько 95 % або більше і найбільш переважно близько 100 %. Прилад 601 містить направляючі засоби 605, такі як диски, колеса, щітки або електромагнітні направляючі засоби, так що прилад 601 може сканувати трубопровід на наявність тріщин під час руху в напрямку 609 (осьовий напрям, тут: позитивний напрям z).

Крім того, прилад 601 містить один або більше процесорних блоків 606 для обробки даних із блока 603 датчиків і сховище даних 606' принаймні для зберігання оброблених даних, хоча необроблені дані також можуть зберігатися. Прилад 601 може додатково містити засіб 607 охолодження для запобігання перегріву одного або більше процесорних блоків 606.

Один або більше процесорних блоків 606 сконфігуровані для здійснення вивчення анізотропії вимірюваних сигналів шляхом виконання алгоритму обчислення WAAF. Процесорні блоки 606 також можуть виконувати алгоритми зменшення шуму. Крім того, слід розуміти, що один або більше процесорних блоків 606 і сховищ даних 606' можуть бути не інтегровані в прилад 601, а бути зовнішніми елементами. Тобто прилад 601 може бути з'єднаний з зовнішнім процесором і сховищем даних, наприклад, за допомогою відповідного кабелю даних. Зокрема, такий варіант може застосовуватися для інспекції трубопроводів малої довжини.

Прилад 601 може забезпечуватися одним або кількома блоками 608 живлення, такими як батареї, таким чином, що, наприклад, блок 603 датчиків отримує достатньо живлення під час роботи.

Під час роботи прилад 601 рухається вздовж внутрішніх стінок трубопроводу 602 у напрямку 609 з відносно високою постійною швидкістю, переважно від близько 0,1 метра до близько 4 метрів на секунду. Проте, фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що прилад 601 також може рухатися з більшою швидкістю (переважно від близько 5 метрів на секунду до близько 20 метрів на секунду) або з меншою швидкістю (переважно від близько 0,01 метра на секунду до близько 0,09 метра на секунду). Швидкість приладу 601 може залежати від типу застосування. Тобто швидкість приладу 601 може становити близько 100 метрів за 10 годин для трубопроводів малої довжини. Швидкість приладу 601 у випадку трубопроводів великої довжини може бути набагато більшою, переважно від близько 0,1 метра на секунду до близько 10 метрів на секунду. Швидкість приладу 601 можна регулювати за допомогою блока 610 регулювання швидкості. Крім того, відстань, пройдену приладом 601, можна виміряти за допомогою одометра 611.

РЧ-сигнал, який передається через електричні котушки, переважно знаходиться в діапазоні від близько 0,5 МГц до близько 5 МГц. РЧ-сигнали можуть застосовуватися протягом періоду від близько 100 не до близько 300 не, хоча також можливі коротші (наприклад, близько 50 нс) або більш тривалі періоди, але не довші, ніж близько 1 мкс. Крім того, повторення РЧ-імпульсів забезпечується переважно на частоті від близько 100 Гц до близько 2 кГц. Проте, фахівцю у цій галузі техніки буде зрозуміло, що такі параметри блока 603 датчиків можуть бути адаптовані до швидкості сканування приладу 601, так що весь трубопровід 602 може бути перевірений на наявність тріщин.

Після описання прикладів варіанти здійснення цього винаходу слід розуміти, що наведені вище конкретні варіанти здійснення є ілюстративними, і у ці варіанти здійснення можуть бути внесені варіації, не відходячи від суті винаходу або від обсягу формули винаходу, що додається.

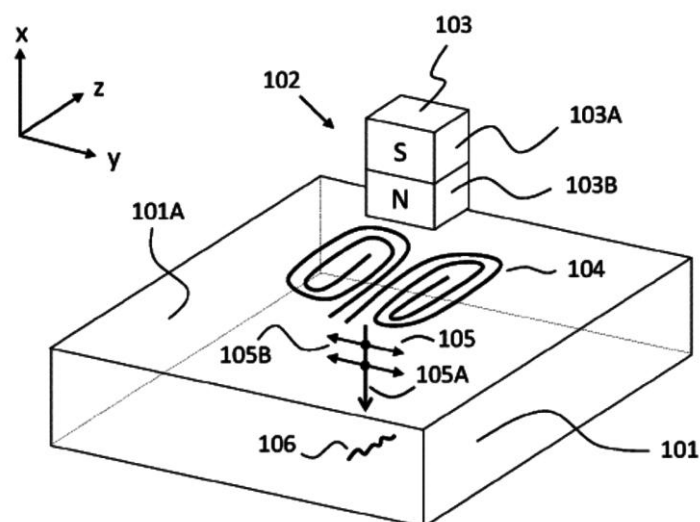


Fig. 1

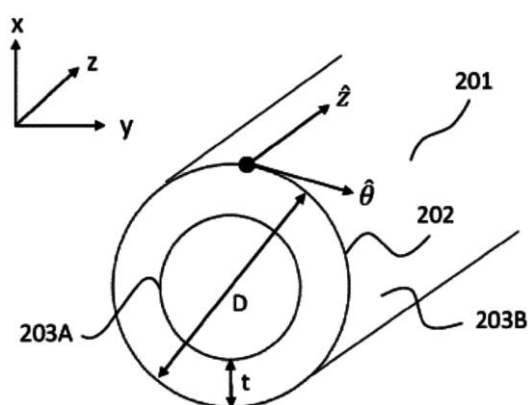


Fig. 2A

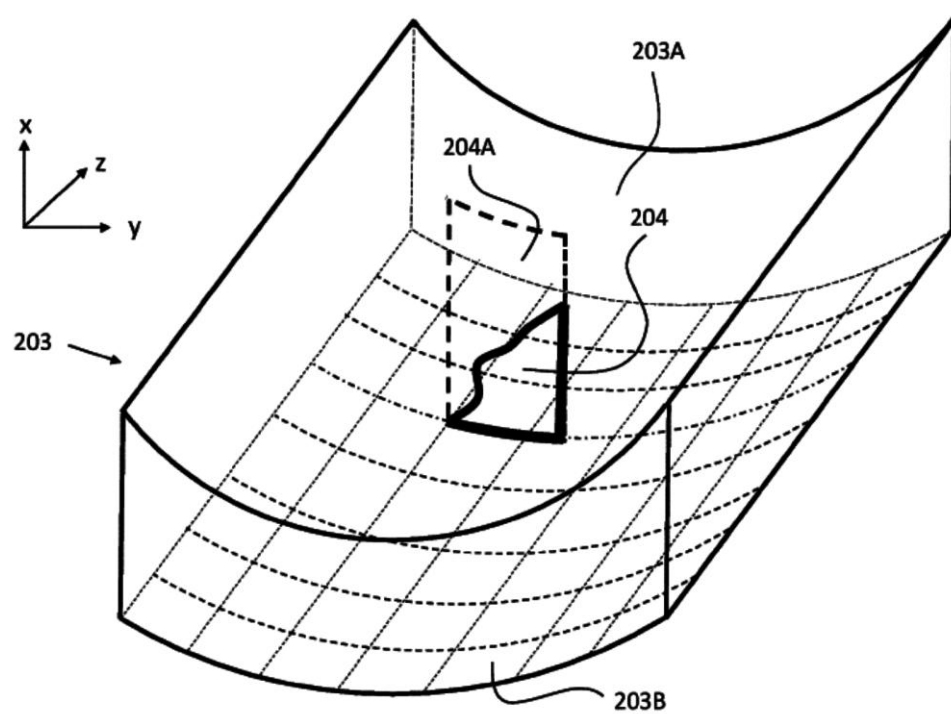


Fig. 2B

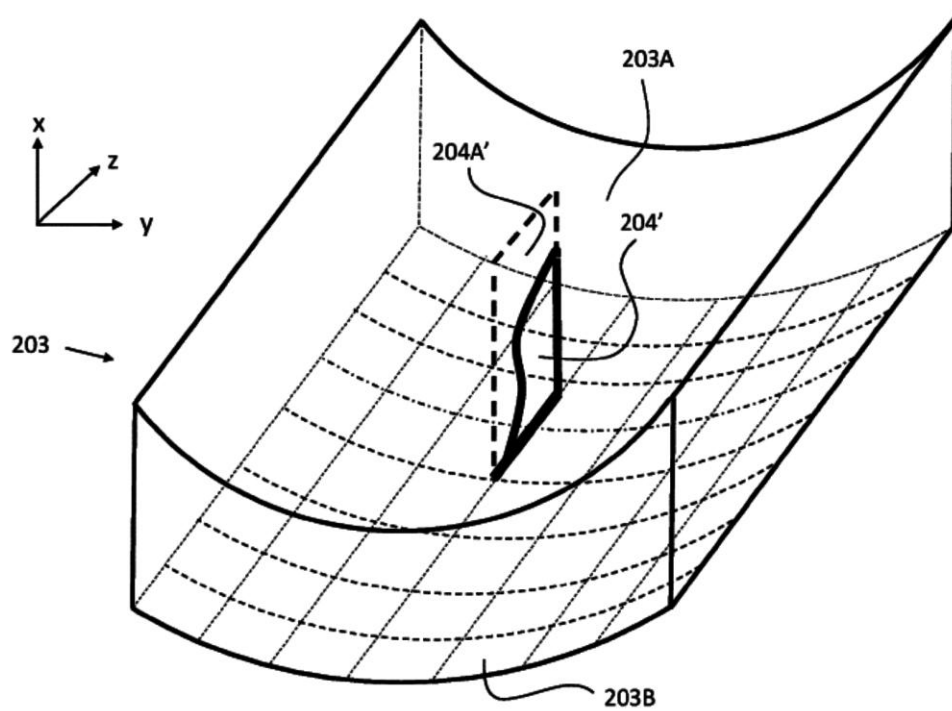


Fig. 2C

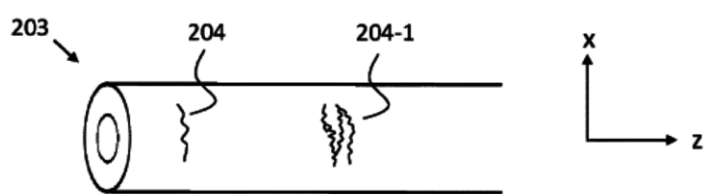


Fig. 2D

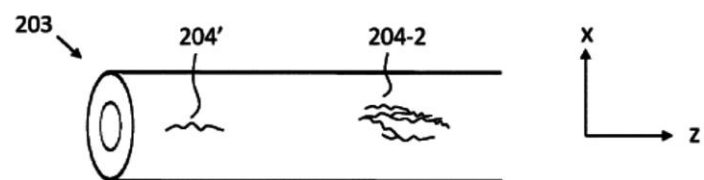


Fig. 2E

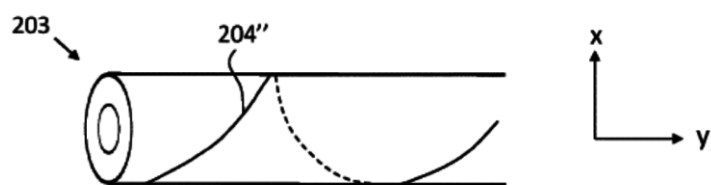


Fig. 2F

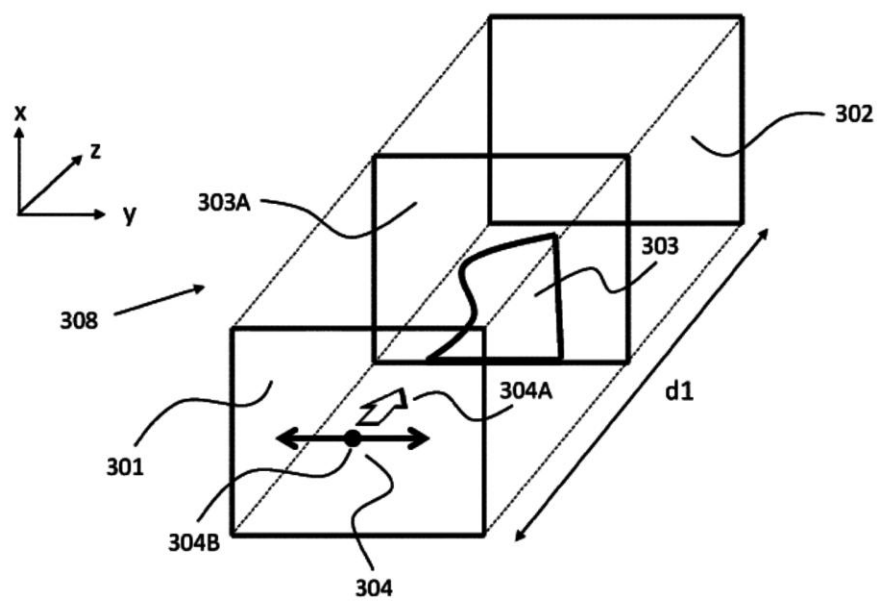


Fig. 3A

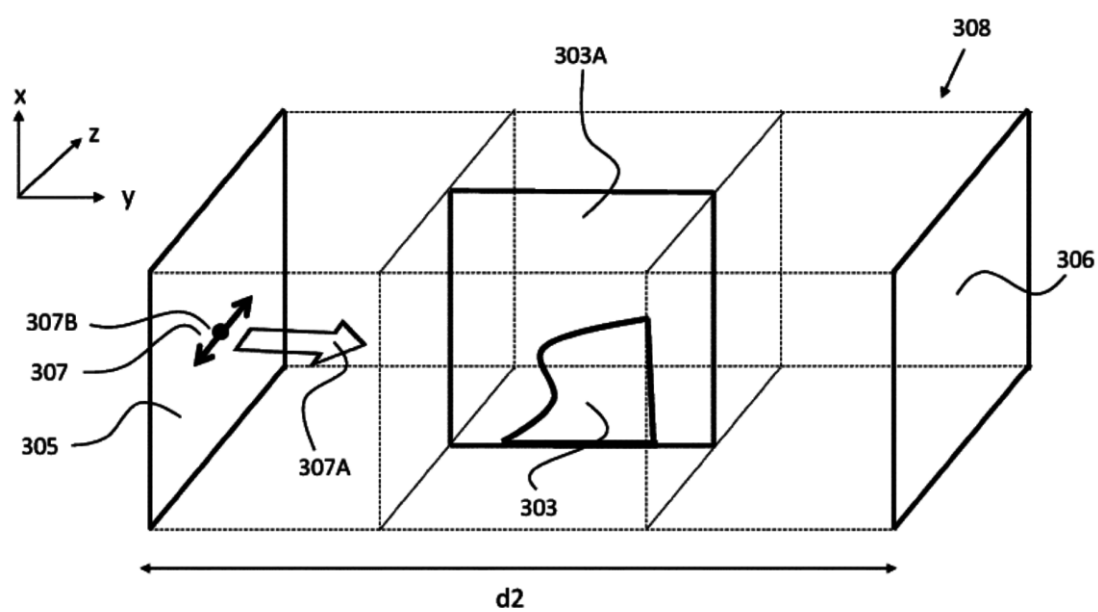


Fig. 3B

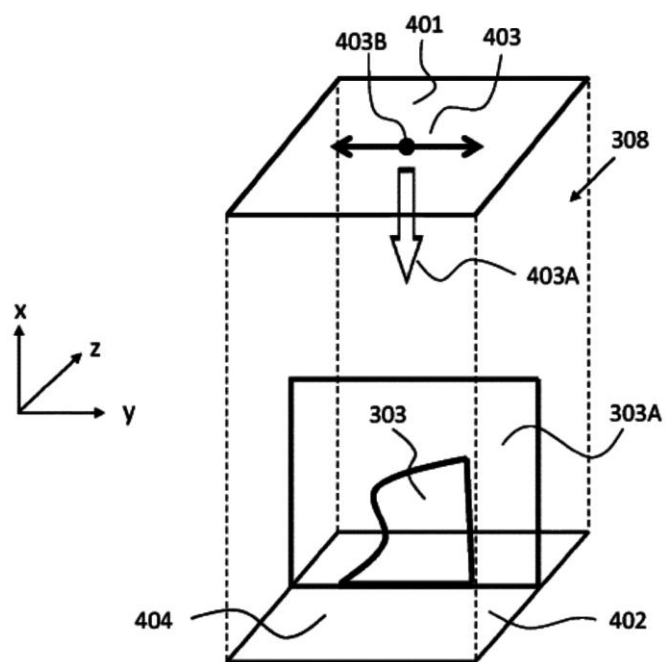


Fig. 4A

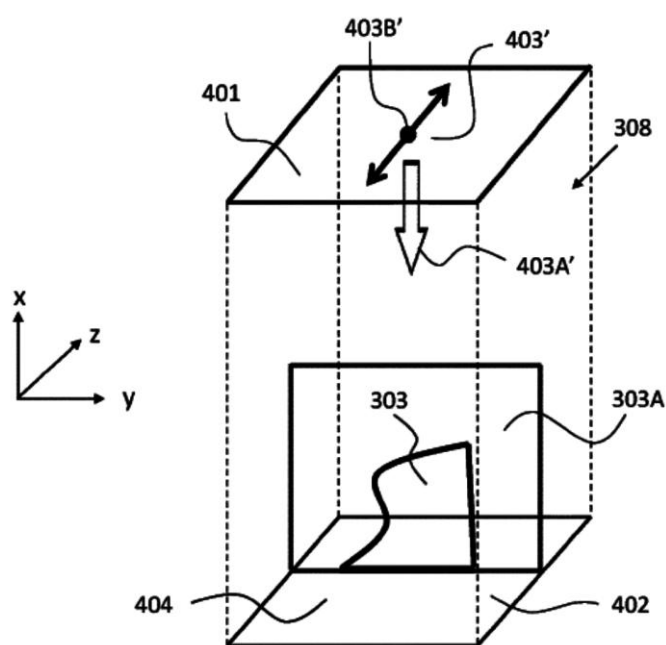


Fig. 4B

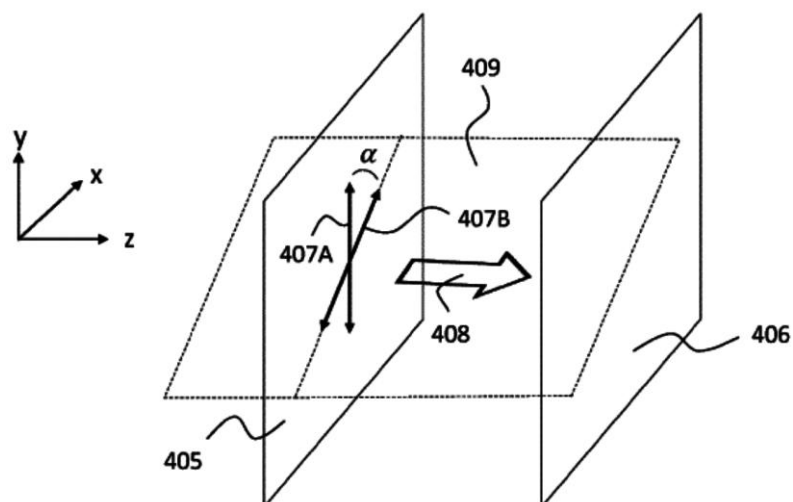


Fig. 4C

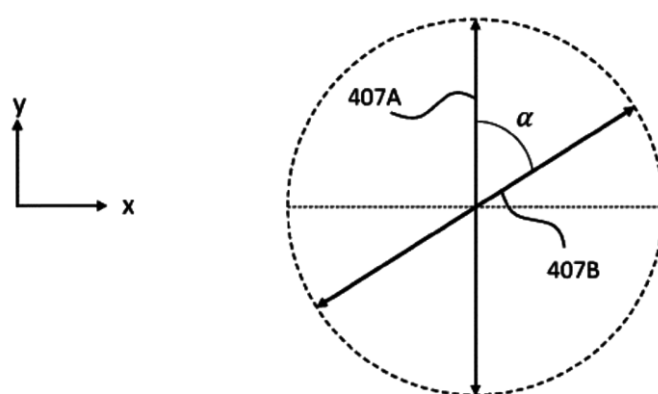


Fig. 4D

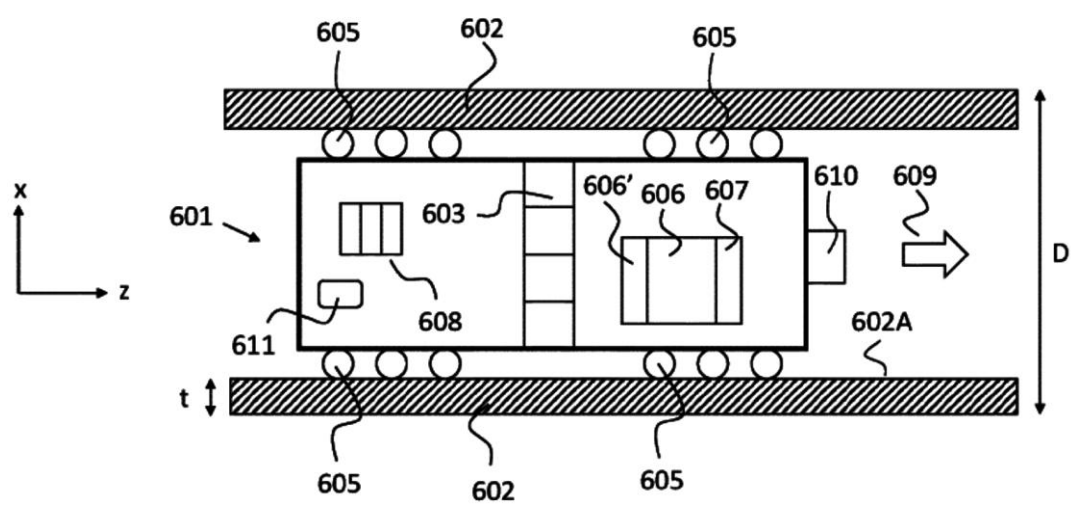


Fig. 5