



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 90117

(13) C2

(51) МПК (2009)

G01N 29/24

G01N 27/90

B06B 1/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) ПРИСТРІЙ І СПОСІБ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛУ І/АБО ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ВИПРОБУВАНОГО ОБ'ЄКТА, ЯКИЙ МІСТИТЬ ЩОНАЙМЕНШЕ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІ І ФЕРОМАГНІТНІ КОМПОНЕНТИ

1

(21) a200706192
(22) 03.11.2005
(24) 12.04.2010
(86) РСТ/ЕР2005/011782, 03.11.2005
(31) 10 2004 053 584.1
(32) 05.11.2004
(33) DE
(46) 12.04.2010, Бюл.№ 7, 2010 р.
(72) КРЕНІНГ МІХЕЛЬ, DE, НІКІФОРЕНКО ЖОРЖ, DE, БУЛАВІНОВ АНДРЕЙ, DE
(73) ФРАУНХОФЕР-ГЕЗЕЛЛЬШАФТ ЦУР ФЕРДЕРУНГ ДЕР АНГЕВАНДТЕН ФОРШУНГ Е.Ф., DE
(56) US 4312231, 26.01.1982
US 6176132 B1, 23.01.2001
US 4450725, 29.05.1984
DE 3904440 A1, 23.08.1990
DE 3511076 A1, 09.10.1986
JP 5087780 A, 06.04.1993
US 3697867, 10.10.1972
SU 1702295 A1, 30.12.1991
SU 353614, 25.06.1976
(57) 1. Пристрій для контролю матеріалу випробуваного об'єкта (4), що містить щонайменше електропровідні і феромагнітні компоненти і має щонайменше одну технічну поверхню (5), який містить щонайменше один ультразвуковий перетворювач (EMUS), з постійним магнітом або електромагнітом (1), щонайменше з двома магнітними полюсами (N, S) різної магнітної полярності, повернутими у бік технічної поверхні (5), і з щонайменше однією котушкою (2) вихрових струмів, встановленою в проекції на технічну поверхню (5) між обома магнітними полюсами (N, S) в непрямому або безпосередньому зв'язку з технічною поверхнею, який **відрізняється** тим, що постійний магніт або електромагніт (1) має U-подібне тіло магніту, магнітні полюси (N, S) якого своїми площинами прилягають до технічної поверхні (5) і який подібно мосту охоплює зону технічної поверхні (5), призначену для розміщення на повернутому до тіла магніту або протилежному відносно тіла магніту боці випробуваного об'єкта щонайменше однієї котушки (2) вихрових струмів, при цьому постійний магніт або електромагніт (1) щонайменше локально

2

створює у випробуваному об'єкті (4) тангенціальне магнітне поле, спрямоване паралельно технічній поверхні (5), причому щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів має таку геометрію, завдяки якій створюється просторово обмежена зона, в якій всередині випробуваного об'єкта (4) виникає результуюче поле вихрових струмів з підвищеною в порівнянні з іншими оточуючими просторовими зонами густиною вихрових струмів, а також з однаковим напрямком цих струмів, при цьому напрямок вихрових струмів в полі, наведеному у випробуваному об'єкті (4), в області підвищеної густини вихрових струмів спрямований перпендикулярно напрямку магнітних силових ліній тангенціального магнітного поля, при цьому котушка (2) вихрових струмів виконана у вигляді тривимірного каркаса з реальним або віртуальним осердям, на реальну або віртуальну поверхню якого намотаний електричний провід (7) з однаковим напрямком намотування, при цьому осердя тривимірного каркаса (11) має ділянку поверхні, прилеглу до технічної поверхні (5), на якій провід (7) має множину паралельних між собою секцій проводів.

2. Пристрій за п. 1, який **відрізняється** тим, що щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів передбачає конфігурацію електричних проводів, які постачаються змінним струмом, яка щонайменше місцями або посекційно має щонайменше два, переважно множину, в основному паралельних між собою електричних проводів (7), які обтікаються в одному напрямку змінним струмом.

3. Пристрій за п. 2, який **відрізняється** тим, що постійний магніт або електромагніт (1) між магнітними полюсами (N, S) всередині випробуваного об'єкта (4) створює тангенціальне магнітне поле (B_t), орієнтоване в основному паралельно технічній поверхні (5), при цьому, в основному, паралельні між собою проводи (7) розташовані перпендикулярно тангенціальному магнітному полю (B_t) і при проходженні по них змінного струму формують всередині випробуваного об'єкта (4) змінне магнітне поле (B_{ws}); так що всередині випробуваного об'єкта (4) результуюче магнітне поле B має вигляд: $B=B_t \pm B_{ws}$.

(13) C2

(11) 90117

(19) UA

4. Пристрій за п. 2 або 3, який **відрізняється** тим, що постійний магніт або електромагніт (1) між магнітними полюсами (N, S) створює всередині випробуваного об'єкта (4) тангенціальне магнітне поле (B_t), орієнтоване в основному паралельно технічній поверхні (5), при цьому, в основному, паралельні між собою проводи (7) розташовані перпендикулярно тангенціальному магнітному полю (B_t) і при проходженні по них змінного струму формують всередині випробуваного об'єкта (4) вихрові струми, під дією яких у випробуваному об'єкті (4) в зоні вихрових струмів генеруються сили Лоренца (F_L), спрямовані перпендикулярно технічній поверхні (5), внаслідок чого виникають подовжні ультразвукові хвилі з характеристикою випромінювання, спрямованою перпендикулярно технічній поверхні (5).

5. Пристрій за п. 1, який **відрізняється** тим, що щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів знаходиться в ефективному механічному зв'язку з постійним магнітом або електромагнітом (1), при цьому котушка (2) вихрових струмів розташована над технічною поверхнею (5) без контакту з нею або встановлена на цій технічній поверхні (5) по суті без зусилля.

6. Пристрій за п. 1, який **відрізняється** тим, що щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів по відношенню до технічної поверхні (5) переважно встановлена як блок з ручним керуванням, незалежно від постійного магніту або електромагніту (1).

7. Пристрій для контролю матеріалу випробуваного об'єкта (4), що містить щонайменше електропровідні і феромагнітні компоненти і має щонайменше одну технічну поверхню (5), який містить щонайменше один ультразвуковий перетворювач (EMUS), з постійним магнітом або електромагнітом (1), щонайменше з двома магнітними полюсами (N, S) різної магнітної полярності, повернутими у бік технічної поверхні (5), і з щонайменше однією котушкою (2) вихрових струмів, встановленою в проекції на технічну поверхню (5) між обома магнітними полюсами (N, S) в непрямому або безпосередньому зв'язку з технічною поверхнею, який **відрізняється** тим, що щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів виконана і встановлена таким чином, що внаслідок подачі в згадану котушку (2) змінного струму виникають ультразвукові хвилі, які поширюються всередині випробуваного об'єкта (4), в основному перпендикулярно технічній поверхні (5), при цьому постійний магніт або електромагніт (1) включає в себе два кільцеподібних тіла магніту з кільцевою поверхнею, встановлених вздовж осі (A) з інтервалом, кільцева поверхня яких перетинає вісь (A) в перпендикулярному напрямі, а краї окружності відповідають магнітним полюсам різної магнітної полярності, причому між обома тілами магніту передбачена щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів, при цьому згадані тіла магніту по осі (A) з'єднані між собою як єдине ціле, при цьому котушка (2) вихрових струмів виконана у вигляді тривимірного каркаса з реальним або віртуальним осердям, на реальну або віртуальну поверхню якого намотаний електричний провід (7) з однаковим напрямом намотуван-

ня, при цьому осердя тривимірного каркаса (11) має ділянку поверхні, прилеглу до технічної поверхні (5), на якій провід (7) має множину паралельних між собою секцій дротів.

8. Пристрій за п. 7, який **відрізняється** тим, що щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів передбачає конфігурацію електричних проводів, які постачаються змінним струмом, яка щонайменше місцями або посекційно має щонайменше два, переважно множину, в основному паралельних між собою електричних проводів (7), які обтікаються в одному напрямку змінним струмом.

9. Пристрій за п. 8, який **відрізняється** тим, що постійний магніт або електромагніт (1) між магнітними полюсами (N, S) всередині випробуваного об'єкта (4) створює тангенціальне магнітне поле (B_t), орієнтоване в основному паралельно технічній поверхні (5), при цьому в основному паралельні між собою проводи (7) розташовані перпендикулярно тангенціальному магнітному полю (B_t) і при проходженні по них змінного струму формують всередині випробуваного об'єкта (4) змінне магнітне поле (B_{ws}), так що всередині випробуваного об'єкта (4) результируюче магнітне поле B має вигляд: $B = B_t \pm B_{ws}$.

10. Пристрій за п. 8 або 9, який **відрізняється** тим, що постійний магніт або електромагніт (1) між магнітними полюсами (N, S) створює всередині випробуваного об'єкта (4) тангенціальне магнітне поле (B_t), орієнтоване в основному паралельно технічній поверхні (5), при цьому в основному паралельні між собою проводи (7) розташовані перпендикулярно тангенціальному магнітному полю (B_t) і при проходженні по них змінного струму формують всередині випробуваного об'єкта (4) вихрові струми, під дією яких у випробуваному об'єкті (4) в зоні вихрових струмів генеруються сили Лоренца (F_L), спрямовані перпендикулярно технічній поверхні (5), внаслідок чого виникають подовжні ультразвукові хвилі з характеристикою випромінювання, спрямованою перпендикулярно технічній поверхні (5).

11. Пристрій за п. 7, який **відрізняється** тим, що щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів знаходиться в ефективному механічному зв'язку з постійним магнітом або електромагнітом (1), при цьому котушка (2) вихрових струмів розташована над технічною поверхнею (5) без контакту з нею або встановлена на цій технічній поверхні (5) по суті без зусилля.

12. Пристрій за п. 7, який **відрізняється** тим, що щонайменше одна котушка (2) вихрових струмів по відношенню до технічної поверхні (5) переважно встановлена як блок з ручним керуванням, незалежно від постійного магніту або електромагніту (1).

13. Пристрій за п. 7, який **відрізняється** тим, що множина котушок (2) вихрових струмів передбачена по краю окружності кільцевої або дискової конфігурації (14), який віддалений від осі (A) на рівній або меншій відстані, ніж край окружності кільцевих тіл магнітів.

14. Спосіб контролю матеріалу випробуваного об'єкта (4), що містить щонайменше електропровідні і феромагнітні компоненти, за допомогою гене-

рування електромагнітних ультразвукових хвиль всередині випробуваного об'єкта (4), що має технічну поверхню (5), в якому для контролю матеріалу випробуваного об'єкта використовують пристрій за будь-яким з пп. 1-13, при цьому здійснюють наступні етапи:

- створення магнітного поля B_t всередині випробуваного об'єкта (4), при цьому магнітні силові лінії щонайменше частково спрямовані паралельно технічній поверхні (5), і формування тангенціального магнітного поля B_t ,
- постачання котушки (2) вихрових струмів змінним струмом для наведення змінного магнітного поля (B_{ws}) у випробуваному об'єкті (4), яке вступає у взаємодію з тангенціальним магнітним полем B_t , внаслідок чого результуюче поле описується як:

$$B = B_t + B_{ws},$$

- формування в результаті магнітострикції і/або дії виникаючих всередині випробуваного об'єкта (4) сил Лоренца вільних ультразвукових хвиль (6), що поширюються у випробуваному об'єкті (4) перпендикулярно технічній поверхні (5),
- облік часу проходження ультразвукових хвиль, що вільно поширюються всередині випробуваного об'єкта (4), які відбиваються всередині нього і повертаються до місця свого виникнення, а також
- аналіз врахованого часу проходження для контролю матеріалів.

15. Спосіб за п. 14, який **відрізняється** тим, що силові лінії змінного магнітного поля (B_{ws}) спрямо-

вані по відношенню до тангенціального магнітного поля (B_t) в одну або в протилежні сторони.

16. Спосіб за п. 14 або 15, який **відрізняється** тим, що щонайменше одну котушку (2) вихрових струмів, що забезпечується змінним струмом, встановлюють відносно технічної поверхні (5) для збудження у випробуваному об'єкті (4) вихрових струмів таким чином, щоб збуджені вихрові струми у взаємодії з тангенціальним магнітним полем (B_t) генерували всередині випробуваного об'єкта (4) сили Лоренца (F_L), які збуджують у випробуваному об'єкті (4) вільні подовжні ультразвукові хвилі (6) з характеристикою поширення, спрямованою перпендикулярно технічній поверхні (5) випробуваного об'єкта (4).

17. Спосіб за п. 14, який **відрізняється** тим, що вимірюють товщину випробуваного об'єкта.

18. Спосіб за п. 17, який **відрізняється** тим, що вимірювання товщини здійснюють вимірюванням прямого та відбитого сигналів, коли ультразвукові хвилі генеруються у вигляді імпульсу у випробуваному об'єкті (4) перпендикулярно технічній поверхні (5) і відбиваються від протилежної поверхні, причому проводять вимірювання часу проходження, при якому враховують моменти генерації і прийому ультразвукових хвиль.

19. Спосіб за п. 14, який **відрізняється** тим, що здійснюють контроль матеріалів і/або вимірювання товщини у магістральних трубопроводах або у залізничних колесах.

Галузь техніки

Винахід належить до пристрою, а також до способу контролю матеріалу випробуваного об'єкта, який містить щонайменше електропровідні і феромагнітні компоненти і має щонайменше одну технічну поверхню, за допомогою щонайменше одного ультразвукового перетворювача (EMUS), що містить постійний магніт або електромагніт щонайменше з двома магнітними полюсами різної магнітної полярності, повернутими у бік технічної поверхні, і при наявності щонайменше однієї котушки вихрових струмів, встановленої в проекції на технічну поверхню між обома магнітними полюсами в непрямому або безпосередньому зв'язку з технічною поверхнею.

Рівень техніки

Електромагнітні ультразвукові перетворювачі використовуються відомим способом з метою неруйнуючого контролю матеріалів і для обміру випробуваних об'єктів, які складаються з електропровідних матеріалів і в доповнення до цього переважно мають феромагнітні властивості.

Взагалі розрізняють два типи електромагнітних ультразвукових перетворювачів, з одного боку, це ті перетворювачі, за допомогою яких можливе формування, так званих, горизонтально поляризованих хвиль зсуву, здатних поширюватися у випробуваному зразку переважно паралельно поверхні введення, а, з іншого боку, це ультразвукові перетворювачі для формування, так званих, ультразвукових хвиль, що вільно поширюються в дослідному зразку, які поширюються в зразку перева-

жно перпендикулярно поверхні введення. У обох випадках збудження ультразвукових хвиль всередині випробуваного зразка зводиться до явища магнітострикції, а також сил Лоренца всередині матеріалу випробуваного зразка, які виникають внаслідок наявності в значній мірі постійного у часі магнітного поля, на яке накладається змінне електромагнітне поле, що створюється змінним електричним струмом.

Типова установка для збудження ультразвукових хвиль за, так званим, принципом електромагнітного ультразвукового перетворювача (EMUS) представлена на Фіг.5а, б. Звичайні перетворювачі 3 мають постійний магніт 1, а також котушку 2 вихрових струмів, які для спільного використання виконані у вигляді єдиного блока. Типовим є виконання котушки 2 вихрових струмів у вигляді прямокутної або спіральної плоскої котушки, що встановлюється з одного боку магнітного полюса постійного магніту 1, так що через котушку 2 проходить поле постійного магніту 1 в перпендикулярному напрямі. При установленні вищезазначеного електромагнітного ультразвукового перетворювача 3 на електропровідний феромагнітний випробуваний об'єкт 4 на поле постійного магніту всередині випробуваного зразка 4 накладається поле вихрових струмів, що створюється котушкою 2 вихрових струмів, в результаті чого, з одного боку, через накладення магнітних складових поля вихрових струмів і поля постійного магніту, яке пронизує поверхню випробуваного об'єкта 4 в перпендикулярному напрямі, виникають магні-

тострикційні ефекти, а, з іншого, за допомогою вихрових струмів, що наводяться у випробуваному об'єкті 4, формуються сили Лоренца, завдяки чому, ударні хвилі, направлені нормально поверхні випробуваного об'єкта 4, формуються так само, як і радіально поляризовані хвилі зсуву, які здатні поширюватися всередині випробуваного об'єкта 4 у вигляді ультразвукових хвиль. Обидва види хвиль, тобто, ультразвукові хвилі, що поширюються нормально поверхні випробуваного об'єкта, а також ультразвукові хвилі, що поширюються радіально поляризованими хвилями зсуву вздовж поверхні випробуваного об'єкта, відповідно до рівня техніки придатні як для виявлення дефектів, як наприклад, тріщин всередині випробуваного об'єкта 4, так і для вимірювання товщини його стінок.

Оскільки використовувані котушки вихрових струмів дуже чутливі до зовнішніх механічних впливів, вони повинні бути захищені від механічного зносу. Це передусім ускладнюється тим, що у феромагнітних випробуваних об'єктів котушка вихрових струмів, що знаходиться між постійним магнітом і випробуваним об'єктом, під впливом тяжіння з боку магнітних сил щільно притискається до поверхні випробуваного об'єкта і тому піддається зносу внаслідок стирання.

У зв'язку з цим з документа DE 35 11 076 A1 відома вставка для електромагнітних випробувань стінок сталених трубопроводів, за допомогою якої, наприклад, в рамках випробувань без руйнування зразка можуть бути обстежені і виявлені пошкодження стінок трубопроводів внаслідок корозії. Вставка, детально розкрита в патентному описі, обладнана електромагнітами, рівномірно розподіленими по її окружності, кожний з яких має по дві вимірювальні головки, розташовані на одній осі, ядро, що з'єднує вимірювальні головки, і намагнічувальну котушку на цих вимірювальних головках. При цьому поле кожного електромагніту наводиться паралельно осі труби. Для ультразвукового вимірювання щонайменше на одному з полюсів або на одній з магнітних головок встановлюється котушка вихрових струмів, на яку подаються потужні імпульси з крутими фронтами. В трубопроводах, виконаних у вигляді магістральних трубопроводів, на місці швів двох сусідніх ланок трубопроводу передбачені кільцеві шви, які при переході через них вищезазначеної вставки в ході постійного контролю піддають електромагнітний перетворювач ударному навантаженню, яке до того ж помітно зростає за рахунок, магнітних сил, діючих між електромагнітом і стінкою трубопроводу. Як вищеописаний знос внаслідок стирання, так і додаткове ударне навантаження на електромагнітний ультразвуковий перетворювач, зокрема на котушку вихрових струмів, скорочують термін служби електромагнітного ультразвукового перетворювача.

Правда, існує можливість зменшити знос внаслідок стирання за рахунок зменшення магнітних сил тяжіння, діючих між електромагнітним ультразвуковим перетворювачем і обстежуваним випробуваним об'єктом, наприклад, шляхом зменшення магнітної індукції, однак ця міра одночасно привела б і до помітного падіння ефективності роботи

електромагнітного ультразвукового перетворювача, тобто густина силових ліній, що індукуються для формування ультразвуку, зменшується в такій же пропорції, в результаті чого чутливість індикації при прийомі розсіяних або відображених ультразвукових хвиль також слабшає.

З документа EP 0 781 994 A2 відомий електромагнітний ультразвуковий перетворювач, в якому для генерації і прийому хвиль всередині електропровідного, феромагнітного випробуваного зразка або ж для їх передачі за межі останнього передбачені дві окремі котушки вихрових струмів, які разом переважно захищені за допомогою ізолювального шару. З прикладу виконання винаходу згідно з Фіг.17 у вказаному документі відомий електромагнітний ультразвуковий перетворювач, в якому для створення поля постійного магніту використовується U-подібний постійний магніт, в якому обидва магнітних полюси кінцями повернуті у бік випробуваного зразка. На ділянці поверхні випробуваного об'єкта, поміщеній між стержнями постійного магніту, виконаного у вигляді U-подібного магніту, передбачені відповідні котушки вихрових струмів, виконані у вигляді меандрових котушок, що служать як для формування ультразвуку, так і для його прийому. Внаслідок меандрової конфігурації проводів, напрямки струмів в двох безпосередньо прилеглих одна до одної секціях проводів протилежні. Це веде до створення всередині випробуваного зразка областей вихрових струмів, безпосередньо прилеглих одна до одної, які при накладанні на них створеного поблизу поверхні поля постійного магніту, направленного паралельно випробуваному об'єкту, формують сили Лоренца з діаметрально протилежними напрямками силових ліній, які, знову ж, генерують ударні хвилі з утворенням горизонтально поляризованих хвиль зсуву, які поширюються вздовж поверхні випробуваного зразка у вигляді ультразвукових хвиль. Такі ультразвукові хвилі, що поширюються паралельно поверхні випробуваного зразка, цілком придатні для контролю матеріалу поблизу поверхні, однак вони не придатні для вимірювання товщини випробуваних зразків.

В основу винаходу поставлена задача удосконалити пристрій, а також спосіб контролю матеріалу випробуваного об'єкта, що містить щонайменше електропровідні і феромагнітні компоненти, шляхом електромагнітного збудження ультразвуку з використанням електромагнітного ультразвукового перетворювача з тим, щоб, з одного боку, забезпечувалося таке положення, щоб котушка вихрових струмів, необхідна для наведення вихрових струмів, не піддавалася ніякому зносу внаслідок стирання, а, якби і піддавалася, то лише в незначній мірі, але, з іншого боку, щоб існувала можливість проведення обстеження випробуваного зразка по всій його товщині, а також вимірювання товщини його стінок. Зокрема, застосовувані заходи повинні забезпечити обстеження, а також вимірювання геометрії трубчастих, а також дискових випробуваних об'єктів.

Задача, поставлена в основу винаходу, вирішується відповідно до пункту 1 формули винаходу. Спосіб згідно з винаходом для контролю мате-

ріалу є предметом пункту 16 формули винаходу. Ознаки, які доцільно розвивають ідею винаходу, розкриті в залежних пунктах, а також в описі, зокрема, з посиланням на приклади здійснення винаходу.

Пристрій, згідно з винаходом, для контролю матеріалу випробуваного об'єкта, який містить щонайменше електропровідні і ферромагнітні компоненти і має щонайменше одну технічну поверхню, щонайменше з одним ультразвуковим перетворювачем (EMUS), який включає постійний магніт або електромагніт щонайменше з двома магнітними полюсами різної магнітної полярності, повернутими у бік технічної поверхні, і передбачає наявність щонайменше однієї котушки вихрових струмів, встановленої в проекції на технічну поверхню між обома магнітними полюсами в непрямому або безпосередньому зв'язку з технічною поверхню, згідно з винаходом виконаний таким чином, що щонайменше одна котушка вихрових струмів виконана і встановлена так, щоб при подачі на котушку вихрових струмів змінного струму всередині випробуваного об'єкта виникали вільні ультразвукові хвилі, які, в основному, поширюються перпендикулярно технічній поверхні останнього.

Запропонований пристрій забезпечує установлення щонайменше однієї котушки вихрових струмів відносно технічної поверхні випробуваного об'єкта, незалежно від сил тяжіння, діючих між постійним магнітом або електромагнітом і випробуваним об'єктом, так щоб вона не піддавалася ніякому зносу внаслідок стирання, яке відбувалося б внаслідок притискання котушки вихрових струмів, зумовленого впливом магнітних сил, до технічної поверхні обстежуваного випробуваного об'єкта. Більше того, котушка вихрових струмів відносно технічної поверхні випробуваного об'єкта встановлена в такому місці, через яке проходить тангенціальне магнітне поле, що створюється магнітними полюсами, розташованими вздовж технічної поверхні випробуваного об'єкта з визначеними інтервалами, тобто, магнітні силові лінії, які наводяться постійним магнітом або електромагнітом всередині випробуваного об'єкта, розташовуються значною мірою паралельно технічній поверхні, на якій або відносно якої встановлена котушка вихрових струмів. На відміну від відомих на сьогоднішній день електромагнітних ультразвукових перетворювачів, в яких котушка вихрових струмів, повернута у бік випробуваного об'єкта, встановлена безпосередньо на поверхні магнітного полюса, в пристрої відповідно до винаходу між котушкою вихрових струмів і обстежуванним випробуваним об'єктом не діє ніяких сил тяжіння, наведених зовнішніми магнітними полями. У залежності від варіанта здійснення винаходу щонайменше одну котушку вихрових струмів можна жорстко з'єднати з постійним магнітом або електромагнітом за допомогою відповідного тримача. Такого роду жорсткий просторовий зв'язок між постійним магнітом або електромагнітом і щонайменше однією котушкою вихрових струмів забезпечує одноманітне і просте використання електромагнітного ультразвукового перетворювача, виконаного відповідно до винаходу. Аналогічним чином незалежне використання

постійного магніту або електромагніту і щонайменше однієї котушки вихрових струмів може відкрити переважні можливості застосування, наприклад, в тих випадках, коли постійний магніт або електромагніт розташовується з одного боку від обстежуваного випробуваного об'єкта, а щонайменше одна котушка вихрових струмів встановлюється на протилежному по відношенню до постійного магніту або електромагніту боці випробуваного об'єкта таким чином, щоб щонайменше одна котушка вихрових струмів в проекції на технічну поверхню останнього постійно знаходилася між обома магнітними полюсами постійного магніту або електромагніту. У всіх можливих варіантах здійснення винаходу необхідно стежити за тим, щоб тангенціальне магнітне поле, що створюється постійним магнітом або електромагнітом всередині випробуваного об'єкта в напрямі вздовж його технічної поверхні, складалося або взаємодіяло з полем вихрових струмів, що наводяться всередині випробуваного об'єкта котушкою вихрових струмів, на яку подається змінний струм. Зокрема, у випадку вищенаведеного установлення постійного магніту або електромагніту, а також щонайменше однієї котушки вихрових струмів на відповідних протилежних по відношенню до випробуваного об'єкта поверхнях потрібно домагатися того, щоб тангенціальне магнітне поле, наведене у випробуваному об'єкті, проникало досить глибоко, тобто, діяло б і на тій ділянці випробуваного об'єкта, де діє поле вихрових струмів, наведене котушкою вихрових струмів.

У переважному варіанті щонайменше одна котушка вихрових струмів по відношенню до технічної поверхні переважно встановлена як блок з ручним керуванням, незалежно від постійного магніту або електромагніту.

Для формування вільних ультразвукових хвиль, які поширюються всередині випробуваного об'єкта, в основному, перпендикулярно його технічній поверхні, передбачені спеціальні котушки вихрових струмів, які повинні бути відповідним чином орієнтовані відносно тангенціального магнітного поля. Так наприклад, за допомогою щонайменше однієї котушки вихрових струмів всередині випробуваного об'єкта локально на ділянці тангенціального магнітного поля необхідно створити просторову область, в якій вихровий струм наводиться з підвищеною густиною, а також в однаковому напрямі. Інакше кажучи, щонайменше одну котушку вихрових струмів потрібно виконати і встановити по відношенню до випробуваного об'єкта, через який проходить тангенціальне магнітне поле, таким чином, щоб всередині випробуваного об'єкта утворювалася просторова обмежена область, в якій створювалося б результуюче поле вихрових струмів з підвищеною відносно навколишніх просторових областей густиною вихрових струмів, а також з однаковим напрямом цих струмів. Одночасно напрям вихрових струмів, встановлений у випробуваному об'єкті, в області підвищеної густини вихрових струмів необхідно орієнтувати перпендикулярно напрямку магнітних силових ліній тангенціального магнітного поля.

У переважній котушці вихрових струмів, яка відповідає вищенаведеним вимогам, передбачається таке розміщення електричних проводів, по яких проходить змінний струм, при якому щонайменше в кожній області або на кожній ділянці було б мінімум по два, переважно множина, в основному, паралельних один одному електричних проводів, по яких змінний струм проходив би в однаковому напрямі. З метою запобігання тому, щоб, як у випадку прямокутної котушки, в якій струм на розташованих одна на протилежній стороні котушки проходить в протилежних напрямках і в якій вони завдяки звичайно компактному намотуванню просторово щільно прилягають одна до одної, в той час як ультразвукові хвилі, виникаючи в результаті магнітострикції під протилежними сторонами котушки, через їх зміщення по фазі на 180° накладаються одна на одну руйнівним чином, для пристрою згідно з винаходом необхідно свідомо уникати вибору таких конфігурацій котушок вихрових струмів, при яких всередині випробуваного об'єкта мають місце явища взаємної компенсації ударних хвиль.

У подальших прикладах виконання винаходу описуються два переважних варіанти його здійснення для такого роду конфігурації котушок вихрових струмів, з яких один передбачає тривимірну котушку вихрових струмів, а інший передбачає двовимірну конфігурацію проводів, яка має щонайменше дві секції проводів, виконані на зразок відповідної прямокутної котушки, причому секції проводів розташовуються поруч одна з одною таким чином, щоб обидві прямокутні котушки були розташовані поруч з відповідною ділянкою прямокутних котушок, через яку проходить змінний струм того ж напрямку.

Пристрій відповідно до винаходу здатний генерувати вільні ультразвукові хвилі, які, в основному, поширюються перпендикулярно технічній поверхні, розташованій навпроти електромагнітного ультразвукового перетворювача. Ультразвуковий зв'язок в залежності від виду випробуваного об'єкта і його магнітного насичення засновується на магнітострикційному ефекті або на силах Лоренца. Обидва механізми ультразвукового зв'язку будуть детально описані нижче з посиланням на креслення.

В основу пристрою відповідно до винаходу покладений спосіб контролю матеріалу випробуваного об'єкта, який містить щонайменше електропровідні і феромагнітні компоненти, шляхом формування електромагнітних ультразвукових хвиль всередині випробуваного об'єкта, що має технічну поверхню, при якому, зокрема, передбачені наступні етапи. Спочатку всередині випробуваного об'єкта необхідно створити магнітне поле, в якому лінії магнітного поля щонайменше частково розташовуються паралельно його технічній поверхні і формують, так зване, тангенціальне магнітне поле. Крім того, з метою наведення змінного магнітного поля у випробуваному об'єкті відносно його технічної поверхні передбачається котушка вихрових струмів, яка забезпечується змінним струмом, причому на змінне поле, наведене котушкою вихрових струмів, накладається тангенціальне магні-

тне поле. При цьому необхідно зорієнтувати обидва магнітні поля таким чином, щоб їх магнітні силові лінії розташовувалися паралельно одна одній, але необов'язково були направлені в одну сторону. Це приводить до того, що в залежності від орієнтації напрямку магнітних силових ліній змінного поля, що періодично змінюється всередині області, в якій обидва магнітні поля накладаються одне на одне, виникає результуюче магнітне поле, що утворюється як результат складання або віднімання обох напруженостей магнітних полів. Внаслідок магнітострикційного ефекту результуючого магнітного поля, що періодично змінюється, всередині випробуваного об'єкта наводяться ударні хвилі, які генерують вільні ультразвукові хвилі, що поширюються всередині випробуваного об'єкта перпендикулярно його технічній поверхні. Наведені у випробуваному об'єкті вихрові струми, діючи на ділянки тангенціального магнітного поля, викликають сили Лоренца, які також генерують ударні хвилі для утворення вільних ультразвукових хвиль, напрям поширення яких зорієнтований перпендикулярно технічній поверхні випробуваного об'єкта. Обидва ефекти у вищеприписаній ситуації з тангенціальним магнітним полем, наведеним постійним магнітом або електромагнітом, і з вихровими струмами, наведеними за допомогою котушки вихрових струмів, сприяють формуванню ультразвукових хвиль, завдяки яким випробуваний об'єкт може бути обстежений і проконтрольований по всій його товщині.

Оскільки збудження змінного струму в котушці вихрових струмів переважно носить імпульсний характер, в рамках вимірювання часу поширення нарівні з випробуванням матеріалу можна виміряти також товщину стінок випробуваного об'єкта. Для цього підраховується час проходження ультразвукових хвиль з моменту їх формування до моменту їх прийому, причому сформовані ультразвукові хвилі відбиваються граничною поверхнею або поверхнею випробуваного об'єкта.

Таким чином, пристрій відповідно до винаходу переважно придатний для вимірювання товщини трубчастих випробуваних об'єктів, як наприклад, магістральних трубопроводів, а також дискових випробуваних об'єктів, як наприклад, залізничних коліс.

У одному переважному прикладі виконання винаходу пристрій відповідно до винаходу є невід'ємною складовою частиною вставки, яка за допомогою відповідного приводу просувається вздовж трубопроводу, причому трубопровід перевіряється на наявність дефектів матеріалу, зокрема, вимірюється товщина його стінок. Подальші подробиці містяться в описі з посиланням на інші приклади здійснення винаходу.

Короткий опис винаходу

Винахід детально описується нижче без обмеження загальної ідеї винаходу на основі прикладів виконання з посиланням на креслення, на яких показано:

Фіг.1a-f - різні конфігурації електромагнітного ультразвукового перетворювача, виконаного відповідно до винаходу, з випробуваним об'єктом;

Фіг.2a, b - принцип збудження ультразвуку за допомогою магнітострикційного ефекту, а також сил Лоренца;

Фіг.3 - схематично вигляд зверху котушки з вихровими струмами згідно з винаходом;

Фіг.4a, b - схеми альтернативно виконаної котушки вихрових струмів;

Фіг.5a, b - електромагнітний ультразвуковий перетворювач відповідно до рівня техніки;

Фіг.6a-c - принципові схеми керування множиною котушок вихрових струмів за принципом «плоского масиву» "Faced-Array";

Фіг.7 і 8 - альтернативні приклади здійснення винаходу при використанні електромагнітного ультразвукового перетворювача для контролю трубопроводу.

На Фіг.1a-f представлені різні можливості компонування і виконання пристрою згідно з винаходом. Однак для обстеження матеріалу, зокрема для вимірювання товщини випробуваного об'єкта 4, що складається з електропровідного і феромагнітного матеріалів, передбачений U-подібний постійний магніт 1, який охоплює випробуваний об'єкт 4 на зразок ярма і який з торцевої сторони своїми магнітними полюсами N, S встановлюється безпосередньо на технічній поверхні 5 випробуваного об'єкта 4. Як це, зокрема, видно з подальшого опису з посиланням на Фіг.2, постійний магніт на ділянці між магнітними полюсами N, S створює всередині випробуваного об'єкта 4 тангенціальне магнітне поле, яке у випадку постійного магніту 1 є постійним у часі. Можна також використовувати замість постійного магніту 1, зображеного на Фіг.1, електромагніт тієї ж або аналогічної конфігурації, який здатний підтримувати у випробуваному об'єкті 4 тангенціальне магнітне поле, що змінюється у часі. У цьому випадку необхідно стежити за тим, щоб частота змінного струму, необхідна для формування тангенціального магнітного поля, була набагато нижчою за частоту змінного струму, яким заживлюється щонайменше одна котушка 2 вихрових струмів, встановлена на технічній поверхні 5 випробуваного об'єкта 4 в зоні дії тангенціального магнітного поля. Надалі для простоти передбачається, що магніт 1, як указано вище, виконаний як постійний магніт.

При подачі змінного струму в котушку 2 на ділянці випробуваного об'єкта 4 наводиться поле вихрових струмів, в якому діє тангенціальне магнітне поле, що створюється постійним магнітом 1. В результаті накладання обох полів на основі магнітострикційних ефектів, а також внаслідок виникнення сил Лоренца, як це, зокрема, ще буде детально показано; на Фіг.2, формуються вільні ультразвукові хвилі 6, проникаючі всередину випробуваного об'єкта 4 перпендикулярно технічній поверхні 5. Шляхом самого по собі відомого вимірювання часу проходження прямих і відображених ультразвукових хвиль, що поступають на технічну поверхню 5 відповідно до принципу дії ультразвукового перетворювача, крім всього іншого, може бути визначена товщина стінки випробуваного об'єкта 4.

Альтернативні приклади здійснення винаходу відповідно до Фіг.1a-c демонструють варіабель-

ність, з якою щонайменше одна котушка 2 вихрових струмів може бути встановлена на випробуваному об'єкті 4 відносно постійного магніту 1. У випадку установки відповідно до Фіг.1b котушка 2 вихрових струмів розташовується на поверхні випробуваного об'єкта 4, протилежній постійному магніту 1. В цьому випадку необхідно домагатися того, щоб тангенціальне магнітне поле, наведене постійним магнітом 1 у випробуваному об'єкті 4, діяло по всій його товщині. У прикладі виконання винаходу відповідно до Фіг.1 випробуваний об'єкт 4 розташовується між обома магнітними полюсами N, S, так що тангенціальне магнітне поле створюється по всій довжині випробуваного об'єкта 4.

Щоб обстежити або виміряти випробувані об'єкти 4 великої площі, відповідно до прикладів виконання винаходу на Фіг.1d-e потрібно відповідним чином використовувати декілька котушок 2 вихрових струмів.

На Фіг.1f схематично зображений вигляд зверху електромагнітного ультразвукового перетворювача, наприклад, відповідно до Фіг.1a, і показано, що котушка 2 вихрових струмів, незалежно від розташування магніту, переміщається вздовж або уперек силових ліній тангенціального магнітного поля, що простягається від північного до південного полюса. При необхідності, якщо мають місце викривлення поверхні або нерівності, зумовлені, наприклад, посиленням зварного шва, виступним перекошуванням, корозією, забрудненнями або іншими нерівностями, між котушкою 2 вихрових струмів і випробуваним об'єктом 4 може бути відповідним чином встановлений або варіюватися повітряний зазор.

Для генерації вільних ультразвукових хвиль всередині випробуваного об'єкта 4, напрям поширення яких, в основному, зорієнтований перпендикулярно технічній поверхні, необхідні певні заходи, описані з посиланням на Фіг.2. У прикладах здійснення винаходу згідно з Фіг.2a і b відповідно передбачений U-подібний постійний магніт для створення постійного у часі тангенціального магнітного поля B_t всередині випробуваного об'єкта 4. Далі передбачається, що котушка 2 вихрових струмів складається з множини паралельних електричних проводів, по яких проходить змінний струм, кожного разу в одному напрямі.

У варіанті за Фіг.2a, передбачається, що через електричні проводи 7 котушки 2 вихрових струмів проходить електричний струм, який виходить з площини креслення, в одному напрямі. При проходженні струму наводиться змінне магнітне поле B_{ws} , яке в області випробуваного об'єкта 4 накладається на тангенціальне магнітне поле B_t . У цьому випадку щонайменше в області змінного магнітного поля B_{ws} наведеного котушкою 2 вихрових струмів всередині випробуваного об'єкта 4, діє результуюче магнітне поле B , для якого $B = B_t + B_{ws}$.

У ситуації, зображеній на Фіг.2a внизу, через електричні проводи 7 котушки 2 вихрових струмів проходить струм, направлений в площину креслення, в одному напрямі. У результаті з урахуванням вищенаведених міркувань відбувається віднімання змінного магнітного поля B_{ws} з постійного у часі тангенціального магнітного поля B_t . Результа-

юче магнітне поле в області змінного магнітного поля B_{ws} , наведеного котушкою 2 вихрових струмів, приймає таким чином наступний вигляд: $B = B_L - B_{ws}$.

Під дією результуючого магнітного поля B , що змінюється у часі, внаслідок магнітострикційного ефекту виникають ультразвукові хвилі, що направляються у випробуваний об'єкт 4 у вигляді поперечних хвиль, перпендикулярних технічній поверхні 5 останнього.

Додатково до цього або як альтернатива формуванню ультразвукових хвиль на основі магнітострикційного ефекту ультразвукові хвилі генеруються також силами Лоренца, діючими всередині випробуваного об'єкта 4, хоч цей ефект у феромагнітних матеріалах виражений значно слабше, в порівнянні з магнітострикцією. Зокрема, генерування ультразвукових хвиль у вигляді подовжніх хвиль, що засновується на силах Лоренца, додатне для неферомагнітних матеріалів. Відповідний механізм збудження представлений на Фіг.2b. На Фіг.2b вгорі показано, що через електричні проводи 7 котушки 2 вихрових струмів проходить односпрямований струм, що входить в площину креслення. Внаслідок проходження цього струму всередині випробуваного об'єкта 4 наводяться вихрові струми, які з утворенням сил Лоренца F_L взаємодіють з тангенціальним магнітним полем B_L і в конкретному описуваному прикладі направлені у випробуваний об'єкт 4. Якщо напрям проходження струму по електричних проводах 7 зорієнтований в протилежну сторону, як це показано в конкретному прикладі на Фіг.2b внизу, то сили Лоренца F_L виникають в напрямі, перпендикулярному технічній поверхні 5. Очевидно, що знакозмінні сили Лоренца F_L , які кожного разу змінюють напрям своєї дії на протилежний в залежності від напрямку змінного струму, здатні формувати подовжні ультразвукові хвилі в напрямі поширення, перпендикулярному технічній поверхні.

Вищенаведені механізми збудження вільних ультразвукових хвиль всередині випробуваного об'єкта 4 показують, що необхідно використовувати спеціальні конфігурації вихрових котушок, які в обмеженому просторі всередині випробуваного об'єкта 4 повинні створювати велику густину струму переважного напрямку, зорієнтованого, в основному, перпендикулярно тангенціальному магнітному полю. На Фіг.3 і 4 зображені альтернативні форми виконання таких котушок вихрових струмів.

На Фіг.3 зображена двовимірною котушка вихрових струмів, яка передбачає конфігурацію проводів на зразок крил метелика. Вона складається з двох однакових секцій проводів 8, 9, які розташовані поруч таким чином, що одна з прямокутних ділянок кожної з обох секцій проводів, виконаних у вигляді прямокутних котушок, розташовується в безпосередній близькості від такої ж ділянки іншої секції, які, відповідно, обтікають односпрямовані змінні струми (див. область, обмежену пунктирною лінією, а також напрямом стрілок, вказуючих відповідні напрями струмів). Область 10, обмежена пунктиром, є, так званою, робочою зоною, в якій електричні струми ділянок проводів, по яких вони проходять, постійно зорієнтовані в одному напрямі.

Тим самим густина вихрових струмів у випробуваному об'єкті 4 під робочою зоною 10 виявляється значно вищою, ніж в інших областях, так що внаслідок цього перепаду ультразвукові хвилі в цьому місці, тобто, в цій області, генеруються найкращим чином.

На Фіг.4a і b зображена наступна альтернативна тривимірною котушка 2 вихрових струмів для збудження вільних ультразвукових хвиль. На Фіг.4a показано, що електричний провід, який утворює котушку 2 вихрових струмів, намотаний на кубічний каркас 11 котушки. На Фіг.4b зображений в поперечному розрізі виконаний відповідним чином електромагнітний ультразвуковий перетворювач, в якому кубічно намотана котушка 2 вихрових струмів оточена U-подібним постійним магнітом 1. Передбачається, що через електричні проводи 7 котушки 2 вихрових струмів, безпосередньо прилеглі до технічної поверхні 5 випробуваного об'єкта 4, проходить струм одного напрямку, який у випадку, зображеному на Фіг.4b, виходить з площини креслення. Ясно, що така геометрія котушки тільки з однією стороною звичайно тривимірної котушки вихрових струмів збуджує у випробуваному об'єкті 4 вихрові струми. У наведеному прикладі здійснення винаходу протилежно спрямованих вихрових струмів, які могли б взаємно знищуватися, всередині випробуваного об'єкта 4 виникнути не може, як наприклад, у випадку самої по собі відомої геометрії прямокутних котушок.

Що стосується зображення на Фіг.5, що являє собою сам по собі відомий електромагнітний ультразвуковий перетворювач, то тут потрібно звернутися до представленої вище частини опису.

Щодо зображень на Фіг.6a, b і c необхідно указати на можливість установа котушок 2 вихрових струмів відносно технічної поверхні 5 випробуваного об'єкта 4 і на можливість їх збудження з регульованою фазою за, так званним, принципом керування «фазового масиву».

Зображення згаданого спочатку магнітного пристрою 1 не показане внаслідок його тривіальності. Принцип «фазового масиву» засновується на збудженні ультразвукового перетворювача, що складається з декількох елементів, з регульованою фазою. Так наприклад, керуючи звуковим полем, можна коливати або фокусувати звуковий пучок, що випромінюється сукупністю котушок 2 вихрових струмів. У випадку «коливального» відключення поля ультрамагнітних хвиль відповідно до Фіг.6a окремі котушки 2 вихрових струмів повинні керуватися з лінійною затримкою за часом. У випадку фокусування відповідно до зображення на Фіг.6b окремі котушки вихрових струмів потрібно збуджувати згідно з параболічним законом затримки. Обидва вищезазначених принципи збудження згідно із зображенням на Фіг.6c відповідають звуковому полю за принципом Гюйгенса.

На Фіг.7 і 8 показані випадки практичного застосування пристрою для контролю матеріалів згідно з винаходом, зокрема для вимірювання товщини стінок матеріалу. У обох випадках мова йде про обстеження труб, наприклад, магістральних трубопроводів. Для цього контрольні пристрої відповідно до Фіг.7 і 8 потрібно комбінувати з відпові-

дною рушійною кінематикою, наприклад, з, так званою, вставкою, з тим, щоб забезпечити просування вздовж труби.

У прикладі здійснення винаходу згідно з Фіг.7 в цілях можливо більш повного охоплення великої площі стінки труби між двома магнітними полюсами N, S встановлюється множина окремих котушок 2 вихрових струмів, переважно в шаховому порядку. Магнітні полюси N, S можуть встановлюватися поруч в напрямі осі труби 12 або по окружності навколо осі труби (див. зображення на Фіг.7 в поперечному розрізі).

На Фіг.8 магнітні полюси N, S виконані у вигляді кілець, сполучених між собою загальною віссю A. Виконання магнітних полюсів N, S в формі кілець або дисків відповідним чином підганяється під внутрішню геометрію обстежуваної труби 12. Для уникнення, з одного боку, заклинення між магнітним пристроєм і внутрішньою стінкою труби, а, з іншого, з метою очищення по краях окружності магнітних полюсів N, S переважно встановлюються щітки. Між обома кільцеподібно встановленими магнітними полюсами N, S передбачається множина котушок 2 вихрових струмів, розташованих по краю окружності дискового пристрою 14. Дисковий пристрій 14 жорстко сполучений із загальною віссю A магнітів, яка з'єднує обидва магнітних полюси N, S, при цьому край окружності дискової конфігурації (14) віддалений від осі (A) на рівну або меншу відстань, ніж край окружності тіл магнітів. Перетворювальний пристрій, зображений на Фіг.8, здатний повністю охопити ділянку труби по її внутрішній окружності в осьовому напрямі.

Таким чином, вищеописаний електромагнітний перетворювач згідно з винаходом поєднує в собі наступні переваги:

- Звичайна конструкція електромагнітного ультразвукового перетворювача з підмагнічуванням безпосередньо в області котушок вихрових струмів відповідно до винаходу замінюється установкою, в якій за допомогою тангенціального магнітного поля намагнічується значно більша ділянка випробуваного об'єкта. Відстань між магнітними полюсами значно перевищує розміри котушок вихрових струмів.

- У випадку такого роду намагнічування при переміщенні магнітної системи по випробуваному об'єкту перемагнічуються тільки ті ділянки випробуваного об'єкта, які розташовані безпосередньо під полюсами. Ділянки, розташовані між полюсами, намагнічуються майже однаково або однорідно шляхом створення тангенціального магнітного поля.

- Використані можуть бути одна або декілька котушок вихрових струмів. Котушки вихрових струмів можуть бути встановлені в будь-яких місцях намагнічуваної ділянки випробуваного об'єкта і в будь-якій конфігурації. Використання декількох котушок вихрових струмів, так званих, «масивів котушок», є переважним при контролі великих об'єктів. Таким чином може бути досягнута висока швидкість контролю без великих витрат часу на сканування випробуваного об'єкта.

- В результаті використання намагнічувальної установки для декількох котушок вихрових струмів досягаються суттєва економія постійних магнітів, а також спрощення конструкції датчика електромагнітного ультразвукового перетворювача.

- В результаті збудження декількох котушок вихрових струмів з регульованою фазою ультразвукові хвилі можуть поширюватися під вибраними кутами, завдяки чому за допомогою відповідних регулюючих механізмів стає можливим виявлення дефектів у вигляді тріщин.

- Навантаження на котушку вихрових струмів за рахунок магнітних сил тяжіння, що викликаються взаємодією сил між магнітом і випробуваним об'єктом, відпадає повністю. Завдяки цьому знос щупа зменшується, а термін служби електромагнітного ультразвукового перетворювача збільшується.

Жорсткий механічний зв'язок магніту з котушкою вихрових струмів може стати зайвим. Котушка вихрових струмів може довільно переміщатися над поверхнею випробуваного об'єкта в межах намагнічуваної ділянки. Зокрема, котушку вихрових струмів можна переміщувати незалежно від профілю поверхні випробуваного об'єкта і пристосовувати її до нерівностей, як-то: закруглення, зварні шви і подібне.

Перелік посилальних позицій

1. Магніт
2. Котушка вихрових струмів
3. Електромагнітний ультразвуковий перетворювач (EMUS)
4. Випробуваний об'єкт
5. Технічна поверхня
6. Вільні ультразвукові хвилі
7. Електричний провід
- 8, 9. Секція проводів
10. Робоча зона
11. Кубічна геометрія
12. Труба
13. Щітки
14. Дисковий пристрій.

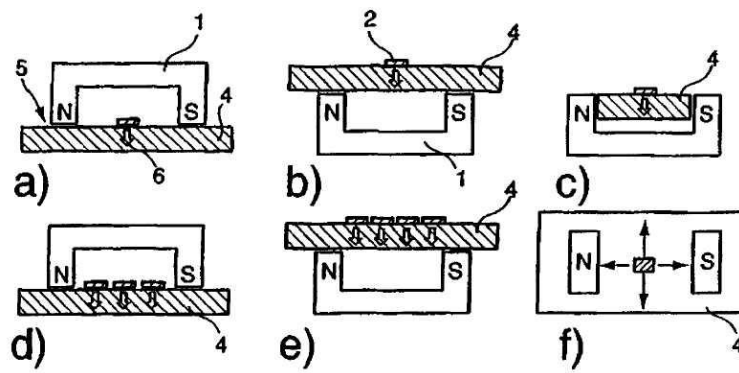


Fig. 1

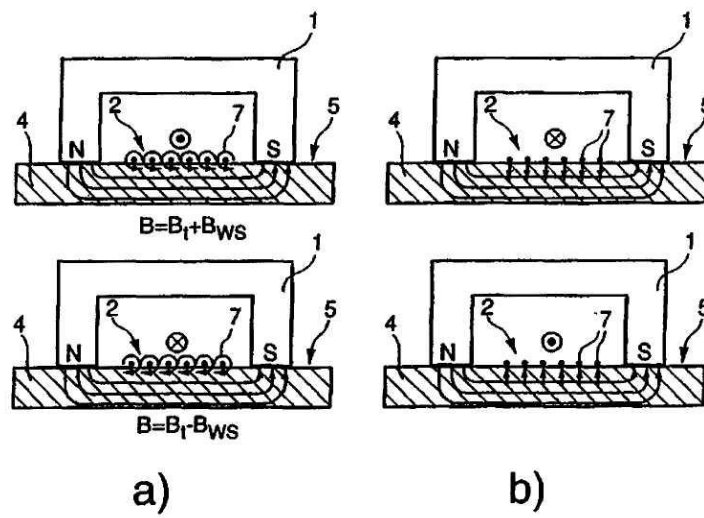


Fig. 2

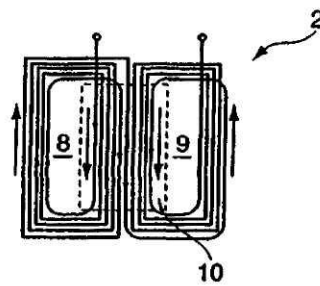


Fig. 3

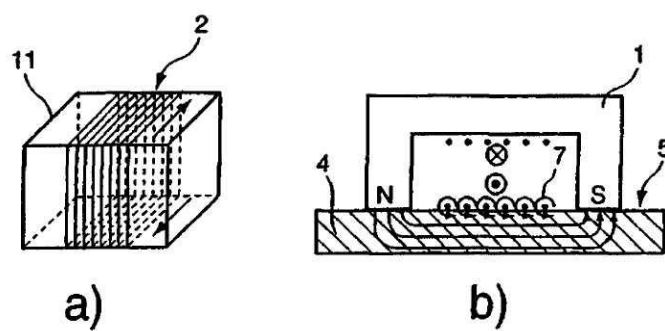


Fig. 4

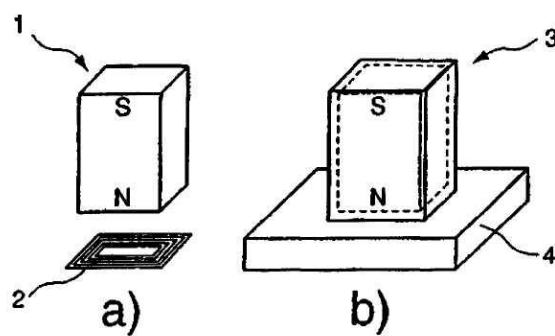


Fig. 5

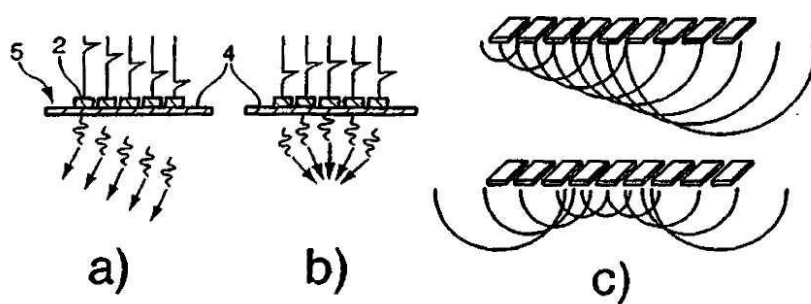


Fig. 6

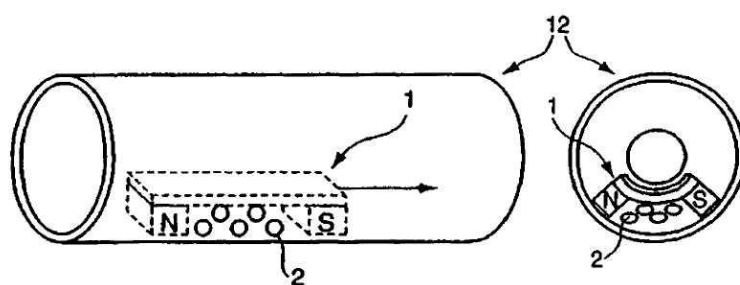
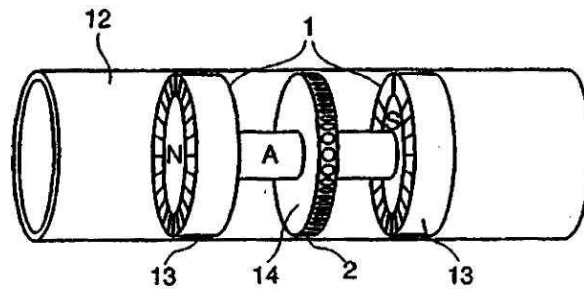


Fig. 7



Фиг. 8