



СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПЛОЩИННИХ ВІДБИВАЧІВ, ОРІЄНТОВАНИХ В НАПРЯМІ, БЛИЗЬКОМУ ДО НАПРЯМУ ПОШИРЕННЯ ПОЗДОВЖНІХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

1. Експериментальне вивчення можливості виявлення площинних дефектів з орієнтацією, близькою до орієнтації акустичної осі перетворювача

І. Б. КОЛБІН, Ю. О. ВОЛКОВ

Виявлення площинних дефектів, орієнтованих у напрямі нормалі до поверхні вводу поздовжніх ультразвукових хвиль, було досить складною задачею, рішення якої до останнього часу не вдавалося знайти у багатьох випадках, наприклад, при контролі зварних з'єднань багатошарових посудин. Результати проведених експериментів дозволяють стверджувати, що дана проблема вирішується, якщо при умові наявності на контрольованій ділянці площинного відбивача використовувати ефект появи серії періодичних сигналів, час поширення яких перевищує час поширення донного сигналу.

Detection of plane defects oriented in the direction of the normal to the surface of application of longitudinal ultrasonic waves was a rather complicated problem. Until recently, it was not possible to solve it in many cases, for instance in monitoring welded joints in multilayered vessels. Results of the conducted experiments allow stating that this problem is solved, if under the conditions of the presence of a plane reflector in the monitored region, the effect of appearance of a series of periodical signals with the propagation time not greater than the propagation time of back-wall reflection signal is used.

В різних галузях промисловості застосовують посудини для зберігання рідких та газоподібних середовищ. Серед них найбільше поширені такі, що мають монолітні обичайки. У випадках, коли умови експлуатації екстремальні (наявність високих значень тиску та температури, високої циклічності навантажень) застосовують посудини з багатошаровими обичайками, які забезпечують більшу надійність і збільшують термін експлуатації.

Незважаючи на високу надійність і у багатошарових обичайках посудин можуть утворюватися деякі специфічні і в той же час небезпечні дефекти. Так, на етапі виготовлення їх зварних з'єднань (ЗЗ) — попереднього наплавлення кромки обичайок — існує вірогідність виникнення площинних дефектів — несплавлень. В технічній документації на виготовлення та контроль цих посудин [1], [2] встановлено максимально допустиму площу таких несплавлень — не більше 3 мм². На певному етапі експлуатації з невиданих після контролю несплавлень еквівалентною площею меншою 3 мм² під впливом циклічних навантажень можуть утворитися тріщини.

Подальше зростання тріщини (під впливом тих же навантажень) приводить до утворення зони відриву шару обичайки (рис. 1). Завдяки конструктивним особливостям швів такого типу (кут нахилу кромки ЗЗ становить 6°), орієнтація площини вірогідної тріщини та напрям нормалі до поверхні обичайки майже співпадають. Зростання утворених площинних дефектів у напрямі вертикалі обмежене зазорами між сусідніми шарами обичайки,

в горизонтальному напрямі можливості для збільшення їх розмірів нічим не обмежені.

До останнього часу існували проблеми, пов'язані з достовірною оцінкою технічного стану багатошарових посудин і в першу чергу зі знаходженням оптимального способу для виявлення вірогідних площинних дефектів у їх ЗЗ. Застосувати для цього радіаційний метод неможливо через високу трудомісткість та низьку достовірність при виявленні вірогідних площинних дефектів. Застосовуючи відомі способи ультразвукового (УЗ) контролю поперечними хвилями, наприклад, описані в [3], неможливо отримати інформацію стосовно зони ЗЗ, до якої примикають внутрішні шари обичайки.

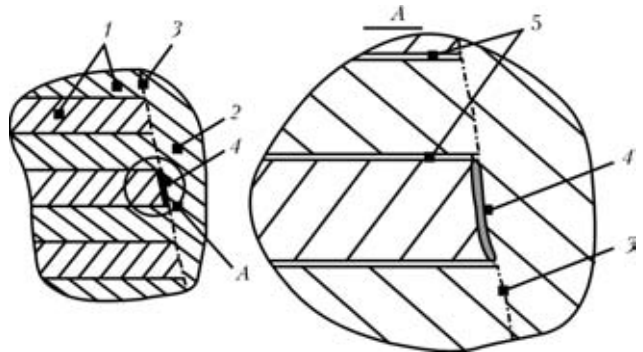


Рис. 1. Зона відриву шару рулонної обичайки, утворена у зварному з'єднанні багатошарової посудини: 1 — шари рулонної обичайки; 2 — зона наплавленого металу; 3 — межа сплавлення основного і наплавленого металу; 4 — площинний дефект (зона відриву рулонної обичайки); 5 — зазори між шарами рулонної обичайки



Серед способів УЗ прямим перетворювачем, призначених для виявлення у ЗЗ та інших деталях тих площинних дефектів, що мають орієнтацію, близьку до напрямку акустичної осі перетворювача, на час проведення досліджень не було відомо жодного, який би дозволяв виявляти такі дефекти у багатошарових ЗЗ посудин. Наприклад, для цього не можна застосувати спосіб виявлення вертикально орієнтованих площинних дефектів, оснований на зменшенні амплітуди донного сигналу прямого перетворювача, розміщеного над дефектом ([3], с. 50). Зважаючи на конструктивні особливості ЗЗ багатошарових посудин — довільну конфігурацію поверхонь швів на різних ділянках, технічно досить важко забезпечити однаковий стан (конфігурацію і шорсткість) в межах зовнішньої та протилежної їй внутрішньої поверхні контрольованого ЗЗ. А наявність суттєвих варіацій параметрів стану цих поверхонь приводять до неможливості відстеження закономірності зміни амплітуди донного сигналу на ділянці з вірогідним площинним дефектом.

Незважаючи на недоліки відомих способів УЗ контролю, було вирішено вести пошук рішення проблеми, базуючись на можливостях та ефектах, які можна отримати при введенні поздовжніх ультразвукових хвиль у напрямі нормалі до поверхні ЗЗ. Після проведення експериментальних досліджень було знайдено специфічний ефект, який виникає при локації площинних відбивачів поздовжніми хвилями.

Експерименти проводили на спеціальному еталоні (його конструкція та зображення наведені в роботі [4]). Відбивачі еталона — плоскодонні от-

вори з овальною формою дна, виготовлено відповідно до найбільш вірогідного варіанту виникнення у вище згаданих ЗЗ площинних дефектів (їх площини мали нахил 6° відносно нормалі до поверхні вводу). На нашу думку, такі відбивачі найбільш достовірно імітують зони відриву рулонних обичайок. Їх розміри становили: в напрямі горизонтальної осі 20; в напрямі нормалі до поверхні вводу 5 мм. Крім того, в деяких випадках дослідження проводили, роблячи поверхню вводу бокову поверхню еталона (при цьому розміри площини відбивача становили: 5 мм — в горизонтальному напрямі та 20 мм — в напрямі нормалі до поверхні вводу).

Використовуючи зазначений еталон та дефектоскоп УД 2-70 з комплектом прямих перетворювачів провели експериментальне вивчення тих ефектів, які виникають при поширенні поздовжніх хвиль в зоні площинних відбивачів, коли площини останніх орієнтовані в напрямі, близькому до напрямку акустичної осі (рис. 2).

В першу чергу визначили вплив орієнтації площини дефекту на величину прийнятих корисних сигналів. Конструкція еталона та чергове використання у якості поверхні вводу двох його взаємно протилежних поверхонь дозволили створити наступні кути між площинами відбивачів та акустичною віссю перетворювача: 6° проти годинникової стрілки (рис. 2, а) та 6° за годинниковою стрілкою (рис. 2, б). З рисунка видно, що коли використовувати геометро-оптичне уявлення щодо поширення ультразвукових хвиль в твердих матеріалах, то для отримання максимального луна-сигналу найбільш сприятливою орієнтацією площини

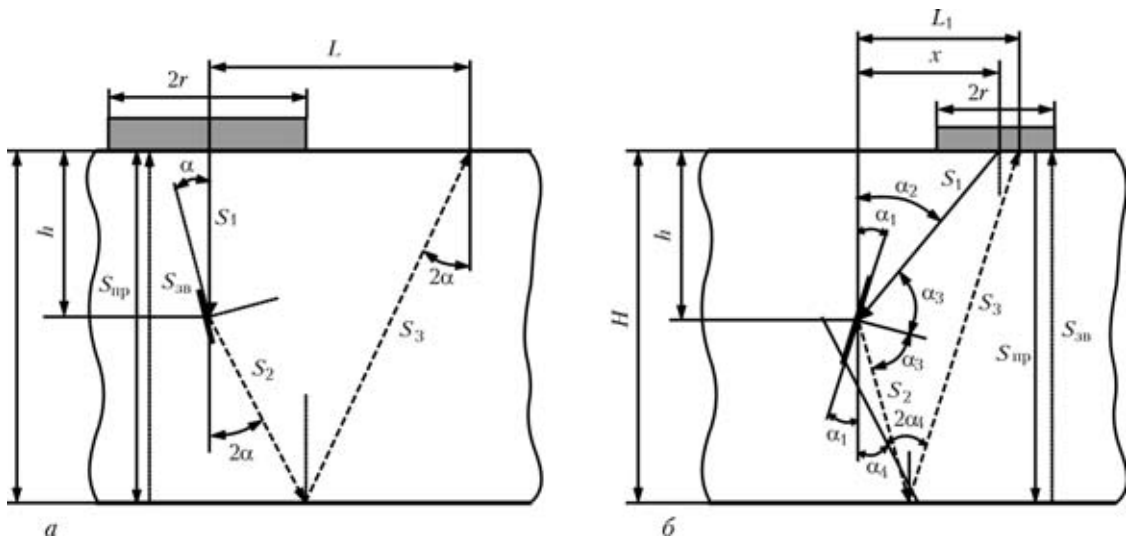


Рис. 2. Схеми поширення поздовжніх хвиль в робочому еталоні у випадку їх падіння на площину відбивача, яка відхилена проти (а) та за годинниковою стрілкою відносно акустичної осі (б): h — глибина залягання відбивача; H — товщина еталона; r — радіус перетворювача; x — відстань від центру перетворювача до проекції центру відбивача на робочу поверхню; L, L_1 — відстані від центру відбивача до точки падіння на поверхню вводу променя, відбитого від площини відбивача та донної поверхні; $S_1 \dots S_3$ — відрізки шляху, пройденого УЗ сигналами вздовж променів, відбитих від поверхні відбивача та донної поверхні; $S_{пр}, S_{зв}$ — відрізки шляху, вздовж якого поширюється донний сигнал; α, α_1 — кути нахилу площини відбивача відносно нормалі до робочої поверхні; α_2 — кут між променем та нормаллю до поверхні вводу; α_3 — кут падіння променя на площину відбивача; α_4 — кут падіння променя на донну поверхню

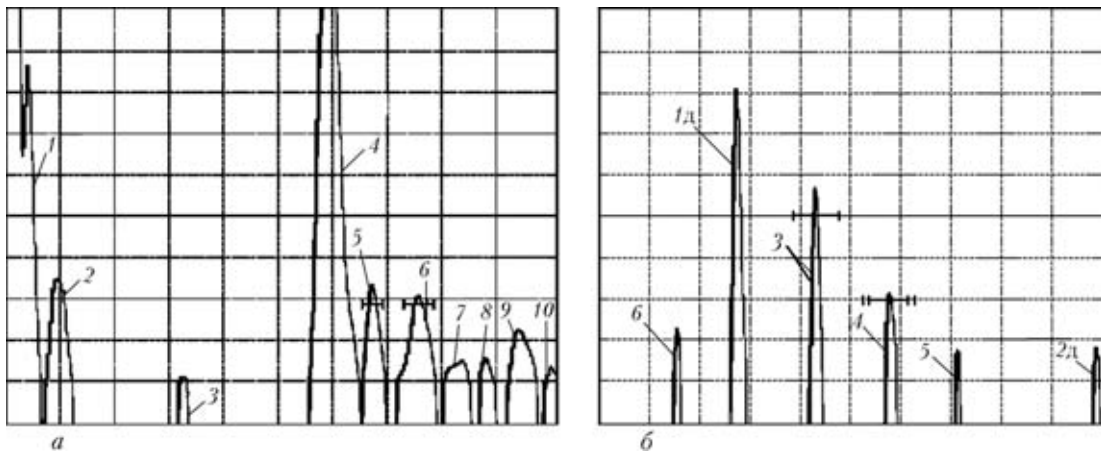


Рис. 3. Послідовність індикацій на екрані дефектоскопа УД2-70 при локації перетворювачем П111-5-К6: *а* — площинного відбивача висотою 5 мм, розміщеного на глибині 43 мм (параметри апаратури: затримка 1 мм; діапазон 78 мм; режим вимірювання товщини 1-2; $H = 6,0$ мм; 1 — індикація зондуючого сигналу; 2, 3 — індикація, що належить шуму; 4 — індикація сигналу, відбитого від бокової поверхні плоскодонного відбивача; 5–10 — індикації, що належать послідовності періодичних сигналів); *б* — площинного відбивача висотою 20 мм, розміщеного на глибині 35 мм (параметри апаратури: затримка 60 мм; діапазон 130 мм; режим вимірювання товщини 1-2; $H = 19,4$ мм; 1д, 2д — індикації першого та другого донного сигналів; 3–5 — індикації, що належать послідовності періодичних сигналів; 6 — індикація сигналу, двічі відбитого від бокової поверхні відбивача)

відбивача є поворот відносно акустичної осі на невеликий кут в напрямі за годинниковою стрілкою.

Але отримані експериментальні дані не підтвердили припущення щодо можливості реєстрації сигналу, який виникає в результаті дії геометрооптичного закону послідовного відбивання хвиль від відбивача та донної поверхні. У всіх можливих випадках орієнтації відбивача (як зображених на рис. 2, так і у випадку паралельної орієнтації площини дефекту відносно акустичної осі) реєстрували періодичну послідовність індикацій сигналів, амплітуда яких монотонно зменшувалася по мірі віддалення від початку розгортки (рис. 3). Сигнали реєструвалися незалежно від того, на якій глибині від поверхні вводу знаходився відбивач. і в будь-якому випадку індикації цих сигналів були розміщені на розгортці правіше індикації, що належала донному сигналу (або сигналу, відбитому від бокової поверхні плоскодонного відбивача). Як правило, в кожному з зазначених вище випадків можна було розрізнити три або більше сигналів (в деяких випадках до шести) — залежно від наявності шумів та їх амплітуди.

Визначення часу поширення кожного з сигналів дало змогу стверджувати, що вони не пов'язані з відбиттям від бокової поверхні відбивачів еталону (рис. 3, *а*).

Для всіх наведених вище випадків характерним було те, що величина затримки між будь-якими двома сусідніми періодичними сигналами мала однакове фіксоване значення, що свідчить про наявність певного періодичного механізму утворення таких сигналів. Результати експериментів, показані на рис. 3 дозволяють стверджувати, що часовий інтервал між періодичними сигналами

змінюється в залежності від параметрів відбивачів, використовуваних у даному випадку.

Аналіз отриманих даних проводили з використанням табличного відображення результатів. Нижче наведено таблицю з параметрами тих періодичних сигналів, які отримані з допомогою трьох різних перетворювачів з застосуванням відбивачів висотою 5 мм, нахилених під кутом 6° за годинниковою стрілкою відносно акустичної осі. Подібні до зображених в цій таблиці результатів (з невеликими відмінностями, про які буде сказано нижче) отримано і при застосуванні відбивачів висотою 20 мм, площини яких були паралельними до акустичної осі перетворювача. В таблиці наведено отримані значення амплітуд сигналів (у від'ємних децибелах) A , та значення відстані H (в міліметрах), яка відповідає часовому інтервалу поширення цього сигналу відносно зондуючого.

Зважаючи на те, що в зоні поширення ультразвукових хвиль знаходились лише три типа відбивачів: дно плоскодонного отвору, його бокова поверхня та донна поверхня еталона, можна стверджувати, що отримані сигнали можуть бути лише результатом тих процесів, які пов'язані з однією з відбиваючих поверхонь або їх сукупністю. Встановлено, що при розміщенні перетворювача в зоні з плоскодонним відбивачем висотою 5 мм (його ширина становила 20 мм), енергетичні характеристики донного сигналу змінювалися, але на порівняно незначну величину: амплітуда, що відповідає положенню перетворювача над відбивачем та амплітуда при зміщенні перетворювача в бік від першого положення, відрізнялися між собою так, що перша була менша за останню на величину від 1 до 3 дБ. І навпаки, при розміщенні перетворювача в зоні з відбивачем висотою 20 мм (його

Значення параметрів сигналів, отриманих в результаті локації площинних відбивачів висотою 5 мм поздовжніми хвилями

Тип перетворювача, частота $f_{\text{пр}}$, МГц, амплітуда донного сигналу A_d , дБ	Порядковий номер сигналу	Амплітуда A , уявна глибина H	Значення параметрів сигналів A та H для розміщених на різній глибині відбивачів:			Донний сигнал (в положенні перетворювача над дальнім відбивачем), дБ
			Ближній відбивач ($h_6 = 20$ мм)	Середній відбивач ($h_c = 43$ мм)	Дальній відбивач ($h_d = 80$ мм)	
П111-1,25-К20, $f_{\text{пр}} = 1,25$ МГц, $A_d = 67$ дБ	1	A	88,0	93	88	70
		H	124,5	126,5	122	
	2	A	91,0	88,5	90	
		H	153	144	144,5	
	3	A	86	80	Даних немає	
		H	183	153	—"	
П111-2,5-Кн, $f_{\text{пр}} = 2,5$ МГц, $A_d = 12$ дБ	1	A	39	46	33	13,5
		H	124	122,5	122,5	
	2	A	49,5	26	39	
		H	142	152,5	144,5	
	3	A	33	44	48	
		H	182,5	183	172,5	
П111-5-К20, $f_{\text{пр}} = 5$ МГц, $A_d = 38$ дБ	1	A	74	63,5	76	40
		H	112	110	109	
	2	A	63	63	50	
		H	124	123	123	
	3	A	62,5	47	67	
		H	155	153	154	

Примітки. 1. Пояснення відсутності даних щодо сигналу №3 наводяться в тексті. 2. Донний сигнал в положенні перетворювача над дальнім відбивачем

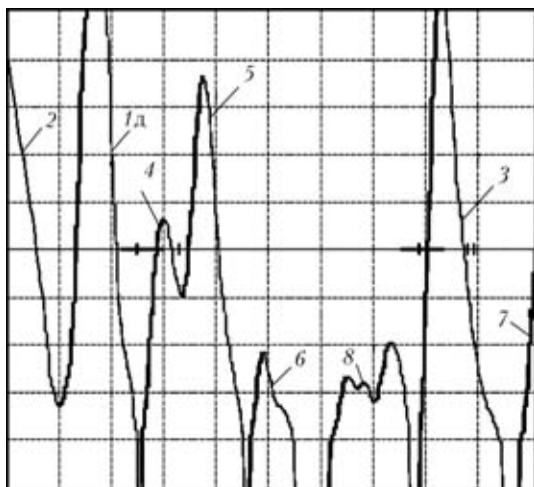


Рис. 4. Картина на екрані дефектоскопа УД 2-70, що ілюструє злиття та екранування сигналів різних типів (параметри апаратури: діапазон 51 мм; режим вимірювання товщини 0-1; $H = 106$ мм; затримка 94 мм); 1д — індикація першого донного сигналу; 2 — індикація сигналу, двократно відбитого від бокової поверхні відбивача; 3 — індикація сигналу, трикратно відбитого від бокової поверхні відбивача; 4-7 — індикації, що належать послідовності періодичних сигналів; 8 — індикація комплексного сигналу, що складається з послідовності періодичних сигналів та шумів

ширина 5 мм) зафіксовано більш суттєву різницю цих двох сигналів — від 4 до 9 дБ.

До таблиці були занесені тільки ті дані, що стосуються корисних періодичних сигналів, які

надходили з уявної глибини, більшої за відстань до донної поверхні, та мали амплітуду, що дозволяла проводити їх розрізнення на фоні шуму та інших заважаючих сигналів. Саме тому в окремих випадках внесені до таблиці дані щодо відстані до відбивача (уявної глибини його залягання) не мають очікуваної періодичності, тобто часовий інтервал між будь-якими двома сусідніми сигналами не завжди становить однакове постійне (в межах похибки вимірювань) значення. Це можна спостерігати на рис. 4: амплітуда деяких корисних сигналів майже не відрізняється від амплітуди розміщених поруч сигналів шуму, що не дозволяє проводити їх розрізнення (наприклад, індикація 8 має комплексну природу, оскільки відображає не тільки корисний сигнал, але і сигнали-шуми, і вони не розрізняються між собою). Крім того, деякі корисні сигнали можуть екрануватися іншими сигналами, наприклад, тими, що виникають завдяки багаторазовому відбиванню пучка променів від бокової поверхні площинного відбивача в еталоні (індикація 3 відображає тричі відбитий від бокової поверхні відбивача сигнал, який внаслідок збігу часових параметрів з корисним сигналом поглинає останній). Крім того, індикації деяких сусідніх сигналів (наприклад, 4 та 5), не підпадають під загально застосований кри-



терій їх розрізнення і, як наслідок, фіксуються як один сигнал.

Щоб усвідомлено застосовувати ефект виникнення серії періодичних сигналів при проходженні поздовжніх хвиль в зоні площинного відбивача, необхідно дати теоретичне пояснення отриманим результатам. Це дозволить проводити з його допомогою контроль різних об'єктів (і в тому числі таких складних, як 33 багатошарових обичайок посудин).

До настоящего времени обнаружение и идентификация плоскостных дефектов, ориентация которых совпадает или почти совпадает с направлением нормали к контролируемой поверхности, было достаточно сложной задачей. А в случае контроля сварных соединений многослойных толстостенных изделий, например, таких, как швы рулонных обечаек сосудов высокого давления, применяемых в нефтегазовой и химической отраслях промышленности, эта задача не имела технологичных и экономически оправданных решений.

Цель данной работы — нахождение достаточно простого и экономичного способа обнаружения и идентификации плоскостных дефектов, имеющих вертикальную или близкую к ней ориентацию (относительно доступной для контроля поверхности изделия). В первую очередь внимание было сконцентрировано на моделях плоскостных дефектов, которые могут появиться в швах рулонных обечаек толстостенных сосудов. Исследования проводили с использованием продольных акустических колебаний, излучаемых прямыми преобразователями. В случае нахождения преобразователя в зоне над моделью плоскостного дефекта был зафиксирован эффект появления серии периодических сигналов с временными параметрами, превышающими значение аналогичных параметров всегда сопутствующих им донного сигнала или сигнала от боковой поверхности модели дефекта.

Изучена закономерность появления таких периодических сигналов (для этого изменяли значение ориентации плоскостных отражателей: -6 , 0 и $+6^\circ$ и их размеры в направлении распространения продольных волн: 5 и 20 мм). Эксперименты

показали: сигналы появляются в любом случае, независимо от угла наклона плоскостей отражателей, но их периодичность следования и относительная величина зависят от размера плоскости в направлении распространения объемных продольных волн.

В результате теоретического рассмотрения особенностей зафиксированных периодических сигналов было установлено, что причиной их возникновения являются дифракционные явления, в результате которых вдоль плоскости отражателя распространяются поверхностно-продольные волны, обладающие свойством повторно трансформироваться в продольные объемные волны на его краях. Сравнительно высокий (т. е. достаточный для фиксации без применения специальных технологий) уровень дифракционных сигналов можно объяснить тем, что в зоне, непосредственно прилегающей к поверхности отражателя, возникает эффект их усиления за счет интерференции поверхностно-продольных волн с объемными продольными.

Описанные выше особенности сигналов, возникающих при прохождении продольных волн в направлении, близком к направлению плоскости отражателей, могут служить для практического обнаружения и приблизительной оценки размеров плоскостных дефектов, что особенно актуально в случае неблагоприятной конфигурации элементов контролируемых изделий (например, в швах многослойных обечаек сосудов).

1. ОСТ 26-01-221-86. Сосуды и аппараты многослойные рулонированные стальные высокого давления. — Общие технические условия.
2. ОСТ 26-01-163-84. Сосуды многослойные рулонированные стальные высокого давления. Методика ультразвукового контроля сварных соединений.
3. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый, А. Х. Вовилкин и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
4. Пат. України № 78345, МПК (2006) G01N 29/14. Спосіб комплексного діагностування зварних з'єднань посудин та еталон-імітатор зон відриву рулонних обичайок для реалізації цього способу. — 15.03.2007. Бюл. № 3, 2007 р.
5. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справ. — М.: Машиностроение, 1991. — 750 с.

УНДІгаз,
Харків

Надійшла до редакції
23.01.2010