АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVI 1970 Вып. 2

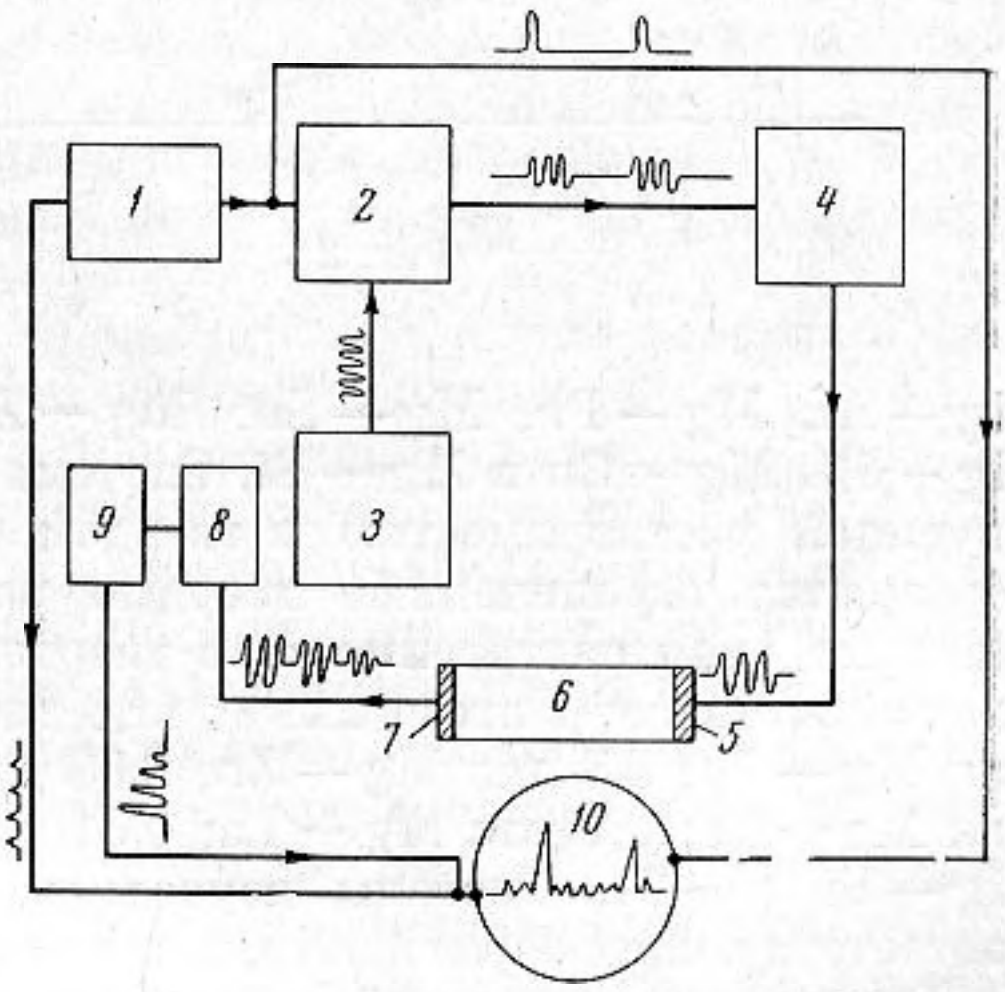
УДК 534.222.1—8

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СКОРОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА В МАГНИИ

М. Е. Дриц, Л. Л. Зусман, Л. Л. Рохлин

Установлено, как изменяется скорость ультразвука в магнии при его легировании. Доказано, что добавки кремния и алюминия в двухфазной области увеличивают скорость ультразвука в магнии. В остальных системах происходит снижение скорости ультразвука с увеличением содержания легирующего элемента и в области твердого раствора и в двухфазной области. Полученные экспериментальные зависимости для двухфазных сплавов качественно согласуются со значениями скорости ультразвука для отдельных фаз, вычисленными по модулю нормальной упругости и плотности.

Скорость ультразвука является одной из важнейших характеристик материала. Она принимается во внимание фактически во всех случаях применения ультразвука в промышленности и в научных целях [1, 2]. Тем не менее, для ряда веществ сведения о скорости ультразвука крайне ограничены. Так, в случае металлических материалов имеются лишь сведения о скорости ультразвука для чистых металлов или сплавов какого-либо определенного состава [2, 3]. Какие-либо сведения о систематических исследованиях скорости ультразвука в металлических сплавах в литературе отсутствуют. Нами проведены исследования, позволяющие судить о том, как изменяется скорость ультразвука в металле при легировании его различными элементами. При экспериментах использовались сплавы на магниевой основе, которые представляют интерес как материал для звукопроводов ультразвуковых линий задержки [4].

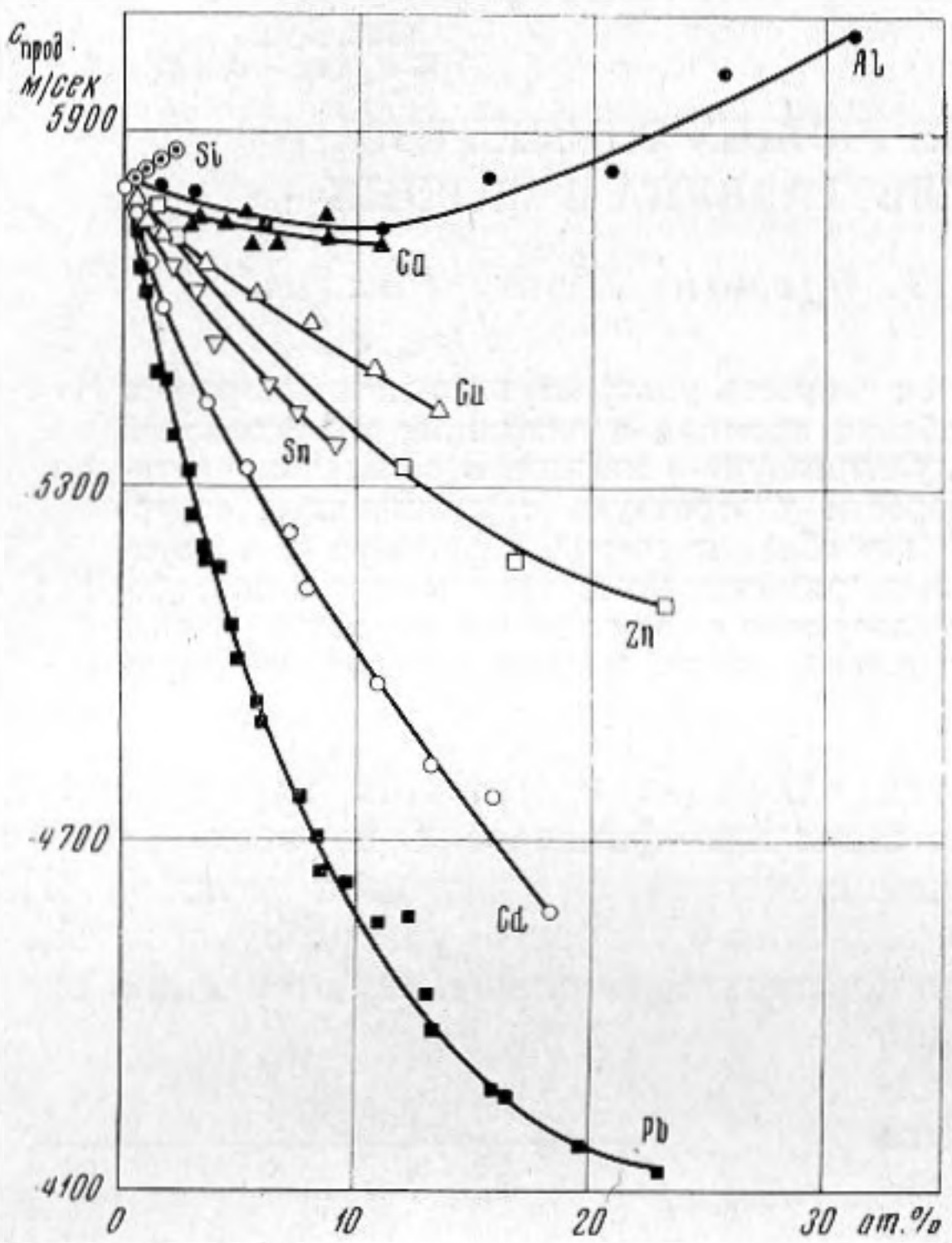


Фиг. 1

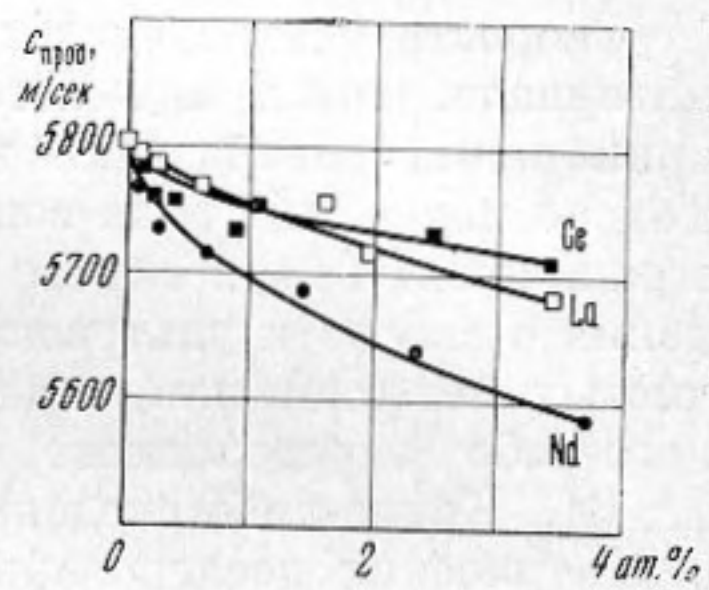
Сплавы выплавлялись в электрической печи сопротивления в железных тиглях под флюсом ВИ-2. Чистота исходного магния составляла 99,9%, чистота легирующих элементов была не ниже 99,4% (за исключением неодима, который содержал 6% празеодима). Слитки сплавов подвергались горячему прессованию в прутки, диаметром 18 *мм* со степенью обжатия 87%. Из прутков готовились образцы для измерения скорости ультразвука, диаметром 16 и длиной 80 *мм*. Измерения проводились импульсным методом на продольных волнах при частоте 10 *Мгц*. Блок-схема установки представлена на фиг. 1. В калибраторе дистанций

27ИМ (*1*) формируются электрические импульсы, которые в модуляторе *2* преобразуются в импульсы высокой частоты с частотой заполнения, определяемой генератором *3*. Импульсы высокой частоты после усилителя *4* подаются на пьезокварц *5*, прикрепленный к торцу образца *6*. С приемного пьезокристалла *7* электрические импульсы высокой частоты поступают на усилитель *8*, детектор *9* и, наконец, на осциллоскоп *10* со ждущей разверткой. Расстояние между двумя последовательными импульсами на экране осциллоскопа соответствует времени прохождения импульсом ультразвука двойной длины образца. Время между двумя последовательными импульсами и длина образца позволяют определить скорость распространения ультразвука в исследуемом сплаве. Время прохождения определяется с помощью калибрационных импульсов, создаваемых прибором 27ИМ, и меток времени осциллоскопа с точностью $\pm 0{,}05$ *мксек*.

В ходе работы были изучены системы Mg — Cd,



Фиг. 2



Фиг. 3

Mg — Al, Mg — Pb, Mg — Sn, Mg — Zn, Mg — Ca, Mg — Nd, Mg — Ce, Mg — La, Mg — Cu и Mg — Si. Система Mg — Cd характеризуется неограниченной растворимостью в твердом состоянии; в остальных системах образуются ограниченные твердые растворы различной концентрации. Максимальная растворимость в твердом магнии (при температуре эвтектики) составляет в атомных %: 11,6 для Mg — Al; 7,75 для Mg — Pb; 3,45 для Mg — Sn; 3,3 для Mg — Zn; 0,63 для Mg — Nd; 0,6 для Mg — Ca; 0,13 для Mg — Ce; 0,1 для Mg — La; 0,01 для Mg — Cu и порядка 0,005 для Mg — Si [5—7]. Системы изучались до концентраций, приблизительно соответствующих образованию эвтектик.

Результаты измерений представлены на фиг. 2 и 3. Можно видеть, что в системе Mg — Si добавки легирующего элемента приводят к повышению скорости ультразвука. В системе Mg — Al в области концентраций, соответствующей приблизительно растворимости в твердом состоянии скорость ультразвука по мере увеличения содержания легирующего элемента несколько снижается, а затем в двухфазной области увеличивается. В остальных системах происходит снижение скорости ультразвука с увеличением содержания легирующего элемента и в области твердого раствора и в двухфазной области. Наиболее резкое снижение скорости ультразвука с увеличением содержания легирующего элемента имеет место в системе Mg — Pb,

Фаза	E, *кг/мм²*	ρ, *г/см³*	$c_{прод}$, *м/сек*	Фаза	E, *кг/мм²*	ρ, *г/см³*	$c_{прод}$, *м/сек*
Mg	4430	1,74	5800	Mg_2Cu	6250	3,41	4920
Mg_2Si	8525	1,98	7540	MgZn	5840	4,15	4300
$Mg_{17}Al_{12}$	5760	2,057	6070	Mg_2Sn	6920	3,66	4980
Mg_2Ca	4655	1,74	5950	Mg_2Pb	6250	5,49	3880

затем, в порядке уменьшения снижения скорости ультразвука, приходящегося на 1 *ат*% легирующей добавки, следуют системы Mg — Cd, Mg — Sn, Mg — Zn, Mg — Cu, Mg — Nd, Mg — La, Mg — Ce и Mg — Ca.

Скорость ультразвука $c_{прод}$ для продольных волн связана с плотностью ρ, модулем нормальной упругости E и коэффициентом Пуассона σ соотношением [8]

$$c_{прод} = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}. \qquad (1)$$

Руководствуясь этим соотношением, можно высказать некоторые предположения о причине наблюдающегося изменения скорости ультразвука в различных системах. Снижению скорости ультразвука по мере легирования в области твердых растворов, очевидно, способствует увеличение плотности, которое следует ожидать при замене в кристаллической решетке атомов магния более тяжелыми атомами алюминия, свинца, олова, кадмия и цинка. В двухфазной области, очевидно, решающую роль играют модули упругости и плотность вторых фаз. При этом следует ожидать, что изменение скорости ультразвука будет происходить в направлении, соответствующем скорости ультразвука во второй фазе.

В таблице приведены данные по модулю нормальной упругости и плотности некоторых из фаз, которые встречаются в исследованных нами сплавах [6, 9—11]. За исключением магния, в литературе отсутствуют сведения о значениях коэффициента Пуассона. Отсутствуют также данные о модулях сдвига или модулях всестороннего сжатия, которые бы позволили вычислить σ. Однако можно приближенно вычислить $c_{прод}$ по формуле (1), принимая $\sigma = 0{,}3$. Вычисленные значения также приведены в таблице.

Можно видеть, что рассчитанные значения скорости ультразвука в фазах согласуются с экспериментальными зависимостями ее от состава. Так, фазы Mg_2Si и $Mg_{17}Al_{12}$ имеют более высокие значения скорости ультразвука, чем магний, и увеличение количества кристаллов этих фаз в структуре сплавов приводит к повышению $c_{прод}$. В сплавах Mg — Cu, Mg — Zn, Mg — Pb и Mg — Sn имеет место снижение скорости ультразвука по мере увеличения в структуре количества кристаллов вторых фаз, и соответственные фазы имеют меньшую скорость ультразвука, чем магний. При этом наиболее резкое снижение скорости ультразвука наблюдается в системе Mg — Pb, в которой вторая фаза Mg_2Pb имеет наименьшее значение $c_{прод}$. В случае сплавов Mg — Ca вторая фаза Mg_2Ca имеет скорость ультразвука, близкую к скорости ультразвука магния, и изменение скорости ультразвука по мере увеличения количества кристаллов второй фазы в этой системе незначительно. Правда, скорость ультразвука для Mg_2Ca несколько больше, чем для магния, а по мере легирования в сплавах Mg — Ca наблюдается некоторое снижение $c_{прод}$. Некоторое несоответствие имеется также между вычисленными значениями $c_{прод}$ фаз Mg_2Cu, MgZn, Mg_2Sn и степенью снижения скорости ультразвука в сплавах соответственных систем. Из трех указанных фаз наименьшую скорость ультразвука имеет MgZn, а наибольшую — Mg_2Sn. Однако наиболее резкое снижение $c_{прод}$ по мере легирования имеет место в системе Mg — Sn, а наименее резкое — в системе Mg —

Cu. Отмеченные несоответствия касаются случаев, когда скорости ультразвука для рассматриваемых фаз близки между собой и их можно объяснить некоторыми погрешностями в определении модуля нормальной упругости фаз, незнанием истинного значения коэффициента Пуассона и неучетом объемного содержания фаз в сплавах.

В общем можно считать, что вычисленные по модулю нормальной упругости и плотности значения скорости ультразвука фаз позволяют судить, во всяком случае качественно, о характере изменения скорости ультразвука в сплавах в двухфазной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. С. Шрайбер. Ультразвуковая дефектоскопия. М., Металлургия, 1965.
2. О. И. Бабиков. Ультразвук и его применение в промышленности. М., Физматгиз, 1958.
3. K. H. Schramm. Zeitschrift fur Metallkunde. Daten Zur Schallgeschwindigkeit in reinen Metallen, 1962, **53**, H 11, 729.
4. А. Г. Соколинский, Ю. М. Сухаревский. Магниевые ультразвуковые линии задержки. М., «Сов. радио», 1966.
5. М. Хансен, К. Андерко. Структуры двойных сплавов. М., Металлургиздат, 1962.
6. Г. В. Рейнор. Металловедение магния и его сплавов. М., «Металлургия», 1964.
7. М. Е. Дриц, З. А. Свидерская, Л. Л. Рохлин. Диаграммы состояния систем «магний — неодим» и «магний — церий». Тр. Ин-та металлургии им. А. А Байкова АН СССР, **12**, 1963, 193.
8. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория упругости, М., «Наука», 1965.
9. W. Köster, W. Rauscher. Beziehungen zwischen der Elastizitätsmodul von Zweistofflegirungen und ihrem Aufbau. Z. f. Metallkunde. 1948, **39**, 4, 111.
10. Е. С. Макаров. Кристаллическое строение γ-фазы системы Al — Mg и γ-фазы системы Tl — Bi. Докл. АН СССР, 1950, **74**, 935.
11. W. B. Pearson. A Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys. Pergamon Press. 1958.

Институт металлургии
им. А. А. Байкова АН СССР

Поступила в редакцию
3 февраля 1969 г.