

применение ультразвука в промышленности

применение
ультразвука
в промышленности



применение
**УЛЬТРА-
ЗВУКА**
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

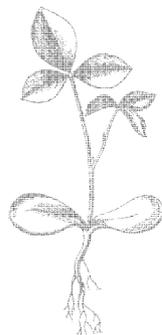
Под редакцией
д-ра техн. наук
проф. А.И. МАРКОВА



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1975



София
«ТЕХНИКА»



6114.4
П76
УДК 621.03:534—8

Авторы: Г. С. АНГЕЛОВ, И. Н. ЕРМОЛОВ, А. И. МАРКОВ, А. М. МИЩКЕ-
ВИЧ, Ю. Ф. ПИСКУНОВ, В. П. СЕВЕРДЕНКО, А. В. СТЕПАНЕНКО

Рецензент д-р техн. наук проф. В. С. ЯМЩИКОВ

П76 **Применение** ультразвука в промышленности. (Болгаро-
советское издание). Под ред. д-ра техн. наук проф.
А.И. Маркова. М., «Машиностроение», 1975.

240 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: Г. С. Ангелов, И. Н. Ермолов, А. И. Мар-
ков и др.

В книге изложены особенности применения ультразвука в металлургических процессах, при литье, термической обработке деталей машин, пластическом деформировании, сварке и пайке металлов и пластмасс, механической обработке, очистке прецизионных деталей, в дефектоскопии и контроле.

Книга предназначена для инженеров-технологов машиностроительных заводов, проектно-конструкторских и технологических организаций.

П $\frac{31104-121}{038(01)-75}$ 121-75

6П4.4

ВВЕДЕНИЕ

Применение ультразвуковых колебаний является одним из важных направлений технического прогресса в различных отраслях промышленности. Современный этап развития ультразвуковой техники характеризуется как совершенствованием ранее разработанных способов, так и расширением числа новых областей применения ультразвука.

К наиболее перспективным областям относятся повышение эффективности технологических процессов, создание новых материалов, методы и средства производственного контроля и прогнозирования прочности конструкционных материалов. Промышленное использование ультразвука развивается в двух направлениях:

применение волн малой интенсивности (низкоэнергетические колебания) для дефектоскопии, измерений, сигнализации, автоматизации производства и др.;

применение высокоэнергетических колебаний — волн высокой интенсивности для активного воздействия на вещества и различные технологические процессы, такие как очистка и обезжиривание деталей, сварка металлов и пластмасс, механическая обработка и др.

Ультразвук низкой интенсивности и высокой частоты широко используют в технике уже более 40 лет.

Ультразвуковые колебания высокой интенсивности (более нескольких Вт/см²) и частотой 18—44 кГц применяют для активного воздействия на вещества и различные технологические процессы около 20 лет.

В настоящей книге кратко освещено современное состояние теории и практики промышленного применения ультразвука. Она написана большим коллективом авторов, что позволило осветить новейшие данные в различных областях ультразвуковой техники и технологии. Книга послужит дальнейшему развитию работ в области промышленного применения ультразвука.

Замечания и пожелания по содержанию книги просьба направлять по адресу: Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., д. 3, издательство «Машиностроение».

Редактор

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- α — коэффициент поглощения;
 β, β_c — коэффициент затухания; адиабатический коэффициент сжимаемости;
 γ — отношение удельных теплоемкостей ($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$);
 δ, δ_k — толщина изделия (пластины); декремент (затухание) колебаний;
 $\Delta, \Delta f$ — приращение какой-либо величины; расстройка частоты;
 ϵ, ϵ_d — коэффициент потерь; степень деформации;
 ρ — плотность;
 η, η_k — к. п. д.; износостойкость; η_d — динамическая вязкость;
 $\theta^\circ; \theta$ — температура; логарифмический декремент;
 λ — длина волны;
 μ — коэффициент Пуассона;
 ν — кинематическая вязкость;
 ξ, ξ_m, ξ_0 — текущее, максимальное и начальное значение амплитуды колебаний;
 τ — касательное напряжение;
 φ — сдвиг фазы;
 ω — круговая (угловая) частота;
 ψ — коэффициент сухого трения;
 $\sigma_n; \sigma_T; \sigma_{-1}$ — нормальное напряжение; временное сопротивление; предел текучести; предел выносливости;
 a — радиус преобразователя; параметр кристаллической решетки;
 b — ширина магнитострикционного пакета;
 c, c_p, c_v — скорость распространения звуковых волн; теплоемкости при постоянных давлении и объеме;
 D, d, d_a — диаметр стержня, отверстия; средний размер абразивных зерен;
 E — модуль Юнга;
 F — сила трения;
 f, f_0 — текущая и резонансная частоты колебаний;
 G — модуль сдвига;
 g — ускорение силы тяжести;
 H, H_0, \bar{H}, HV, HB — напряженность поля и напряженность подмагничивания; среднеарифметическая величина микротвердости; твердость по Виккерсу, твердость по Бринеллю;
 h — высота, глубина обработки;

- I — интенсивность (сила) звука;
 i — число проходов;
 k, k_y — порядок гармоники; коэффициент усиления концентратора;
 l — длина тела, стержня;
 L — скрытая теплота плавления;
 M, m — молекулярный вес, масса;
 N — нормальная сила; число Авогадро;
 n — число полуволн, частота вращения;
 P — статическая сила;
 p_0, p — статическое и звуковое давления;
 Q — механическая добротность;
 q, q_0 — удельная производительность; удельный износ инструмента;
 $R, R_0, R_{кр}, R_z$ — текущий, начальный и критический радиусы кавитационного пузырька; высота микронеровностей;
 r — расстояние до дефекта;
 S — площадь;
 s, s_m — подача на оборот; подача минутная;
 T — период колебаний;
 T_s — температура плавления;
 t — время;
 V — объем, объемная производительность;
 v, v_0 — колебательная скорость; окружная скорость;
 W, W_n, W_k — мощность; потенциальная и кинетическая энергия;
 w — волновое сопротивление;
 Z — механическое сопротивление;
 x, y, z — оси декартовой системы координат;
 \mathcal{E} — энергоемкость процесса.

Глава **1**

**Физические
основы
ультразвуковой
техники
и технологии**

•

А.И. МАРКОВ

Ультразвуковые колебания представляют собой упругие волны, распространяющиеся с определенной скоростью в какой-либо материальной среде — газах, жидкостях, твердых телах. Колеблющийся источник звука периодически сближает примыкающие к нему частицы, которые передают это сжатие среды следующему прилегающему слою; и волны сжатия, чередуясь с волнами разрежения, проходят все пространство, занимаемое данной средой. Скорость и направление распространения звуковых волн зависят от плотности и упругости среды, а также ее размеров. Особенностями высокоэнергетических ультразвуковых колебаний является возможность фокусирования энергии на сравнительно небольшую площадь рабочей зоны. Ультразвуковые колебания малой интенсивности, используемые для дефектоскопии и исследования вещества, подчиняются законам линейной акустики.

Распространение высокоэнергетических колебаний в жидких и твердых средах сопровождается рядом новых эффектов, часто приводящих к необратимым явлениям. Эти эффекты, такие как радиационное давление, акустическая кавитация и звуковые потоки, изучаются в нелинейной акустике.

Вопросы механических колебаний и акустики ультразвуковых преобразований изложены в многочисленных работах [8, 11, 41, 42, 45, 46], физика и техника мощного ультразвука рассмотрены в трудах [15, 28, 47, 48].

В настоящей главе содержатся краткие сведения об ультразвуке, гармонических колебаниях и основных явлениях, возникающих при распространении ультразвука.

§ 1. СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Простейшей механической колебательной системой с одной степенью свободы является горизонтально расположенный упруго закрепленный шарик массой m (рис. 1). Если сдвинуть шарик, растянув или сжав пружину, то он начнет совершать свободные гармонические колебания относительно положения равновесия. Предполагая в системе отсутствие потерь (консервативная — изолированная система), получим *незатухающие колебания*.

Дифференциальное уравнение таких колебаний легко получить, рассмотрев равновесие действующих в системе сил: силы инерции $F_{и}$ и силы упругости F_{y} :

$$F_{и} + F_{y} = 0. \quad (1)$$

По второму закону Ньютона

$$F_{и} = m \frac{d^2\xi}{dt^2},$$

где ξ — смещение шарика ($\xi \leq \xi_m$).

Сила упругости по закону Гука

$$F_{y} = \chi\xi,$$

где χ — коэффициент упругости

На основании формулы (1) дифференциальное уравнение движения примет вид

$$m \frac{d^2\xi}{dt^2} + \chi\xi = 0. \quad (2)$$

Разделив уравнение (2) на m , приведем его к каноническому виду

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + \omega_0^2 = 0, \quad (3)$$

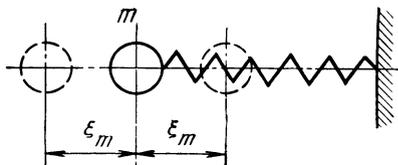


Рис. 1. Схема колебательной системы с одной степенью свободы

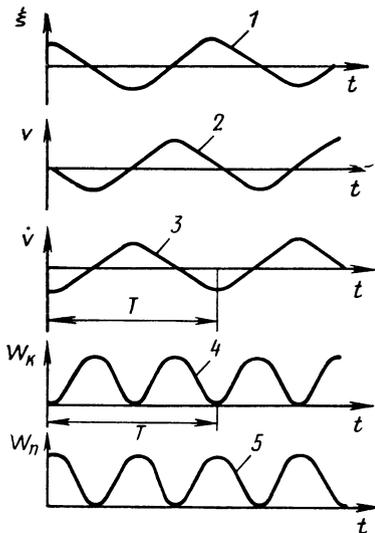


Рис. 2. Изменение по времени t смещения ξ (1), колебательной скорости v (2), ускорения \dot{v} (3), кинетической W_k (4) и потенциальной W_p (5) энергии

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{\chi}{m}}$ — собственная круговая частота;

$$\omega = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

(f_0 — частота колебаний, Гц; T — период колебаний, с).

При начальных условиях $t=0$, $\xi = \xi_m$ решение уравнения (3) имеет вид

$$\xi = \xi_m \cos \omega_0 t. \quad (5)$$

Скорость и ускорение колеблющейся массы получаем дифференцированием уравнения (5) по времени t :

$$v = \frac{d\xi}{dt} = -\xi_m \omega_0 \sin \omega_0 t = -v_m \sin \omega_0 t, \quad (6)$$

$$\dot{v} = -\xi_m \omega_0^2 \cos \omega_0 t = -\dot{v}_m \cos \omega_0 t, \quad (7)$$

где v_m и \dot{v}_m — амплитуды колебательной скорости и ускорения.

Значения ξ , v и \dot{v} при гармонических колебаниях периодически изменяются по времени с одинаковой частотой, но смещены по фазе (рис. 2).

Потенциальная W_p и кинетическая W_k энергии системы $W_p = \frac{1}{2} \chi \xi^2$ и $W_k = \frac{1}{2} m v^2$ изменяются во времени (рис. 2). В консервативной идеальной системе полная энергия W не изменяется: $W = W_p + W_k = \text{const}$.

Реальная (неконсервативная) система всегда имеет потери энергии, вызванные трением об окружающую среду, внутренним трением, нагрузкой системы. Колебания реальной системы являются затухающими, а уравнение движения содержит силу сопротивления F_r . Последняя обычно пропорциональна колебательной скорости: $F_r = r \frac{d\xi}{dt}$.

Для затухающих колебаний с учетом формулы (2) уравнение движения примет вид

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + r \frac{d\xi}{dt} + \chi \xi = 0. \quad (8)$$

После приведения уравнения (8) к каноническому виду получим

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + 2\delta_k \frac{d\xi}{dt} + \omega_0^2 \xi = 0, \quad (9)$$

где

$$2\delta_k = \frac{r}{m}. \quad (10)$$

Решение уравнения (9) при тех же начальных условиях:

$$\xi = \xi_m e^{-\delta t} \cos \sqrt{\omega_p^2 - \delta_k^2} t. \quad (11)$$

Потери вызывают снижение амплитуды и частоты колебаний.

Декремент колебаний (затухание) δ_k определяет крутизну снижения огибающей (рис. 3), показывая, во сколько раз уменьшается амплитуда колебаний через каждую секунду.

Для того чтобы колебательная система совершала незатухающие колебания, необходимо к ней приложить внешнюю периодическую силу

$$F = F_m \cos \omega_b t. \quad (12)$$

Такие колебания называют *вынужденными*. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний согласно формулам (9) и (12) имеет вид

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + 2\delta_k \frac{d\xi}{dt} + \omega_0^2 \xi = \frac{F_m}{m} \cos \omega_b t. \quad (13)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\xi = \xi_b \cos (\omega_b t + \varphi). \quad (14)$$

В системе устанавливаются незатухающие колебания с частотой внешней силы, сдвинутые по фазе на угол φ . Амплитуда вынужденных колебаний

$$\xi_b = \frac{F_m}{4\pi^2 m \sqrt{(f_0^2 - f_b^2) + \left(f_b \frac{\delta}{\pi}\right)^2}}. \quad (15)$$

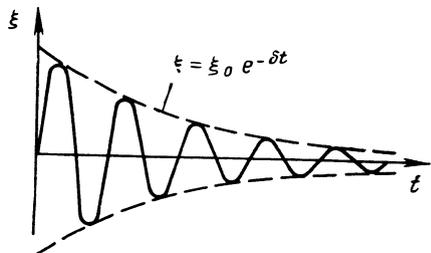


Рис. 3. График затухающих гармонических колебаний

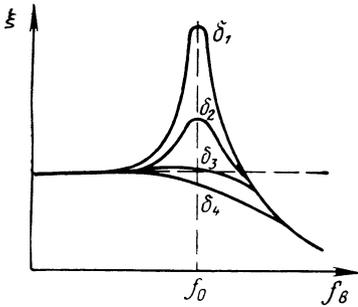


Рис. 4. Резонансные кривые амплитуды смещения

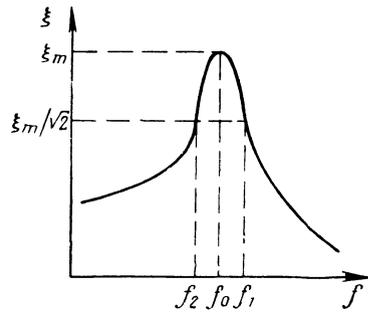


Рис. 5. К определению добротности системы по резонансной кривой

На рис. 4 показана зависимость ξ_B от частоты f_B и декремента δ_K . При малых частотах ($f_B \ll f_0$) ξ_B незначительно зависит от частоты f_B . При механическом резонансе ($f_B = f_0$) амплитуда колебаний максимальна:

$$\xi_{B\max} = \frac{F_m}{4\pi m f_0 \delta_K} = \frac{F_m}{\omega_0 r}.$$

В идеальной системе без потерь ($r=0$) амплитуда колебаний ξ_B возрастает безгранично — система запасает бесконечно большую энергию. В реальных системах накопление энергии ограничено затратами на преодоление потерь и полезную работу. Отношение полного запаса энергии, накапливающейся в колебательной системе за какой-либо промежуток времени, к энергии, отдаваемой на полезную работу и преодоление потерь, называют *механической добротностью* Q , которая связана с δ_K зависимостью

$$Q = \frac{\omega_0}{2\delta_K}.$$

Величина, обратная добротности, — коэффициент потерь $\epsilon = \frac{1}{Q}$. Кроме того, потери оценивают логарифмическим декрементом θ : $\theta = \pi\epsilon = \pi/Q$. Добротность системы можно определить по ее резонансной кривой (рис. 5):

$$Q = \frac{f_0}{f_1 - f_2},$$

где f_1 и f_2 — частоты, соответствующие значению амплитуды $\xi_B = \xi_{B\max}/\sqrt{2}$.

Из выражений (6), (10) и (15) амплитуда колебательной скорости

$$v_m = \frac{F_m}{\sqrt{\left(\omega_B m - \frac{\chi}{\omega_B}\right)^2 + r^2}}. \quad (16)$$

Величину, указанную в знаменателе, называют *механическим сопротивлением* или *механическим импедансом*:

$$Z = \frac{F_m}{v_m}. \quad (17)$$

Импеданс показывает, какую амплитуду колебательной скорости получает система под действием приложенной силы. В «жестких» системах импеданс велик, а скорости малы, в «мягких» системах при малом импедансе скорости велики. В момент резонанса ($f=f_0$) импеданс минимален и равен сопротивлению потерь r ($Z=r$).

§ 2. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ГАЗАХ, ЖИДКОСТЯХ И ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Колебания, возбужденные в какой-либо среде, распространяются в ней в виде упругих волн. Скорость распространения звуковых волн c связана с длиной волны λ и частотой f , а также периодом колебаний T :

$$c = \lambda f = \frac{\lambda}{T}. \quad (18)$$

Тип волны зависит от упругих свойств среды. Различают плоские, цилиндрические и сферические волны. В плоской бегущей волне амплитуды и фазы колебаний одинаковы во всех точках фронта волны, а в сферических и цилиндрических амплитуды колебаний изменяются с расстоянием.

В идеальном случае сферические волны формирует излучатель, выполненный в виде точечного источника. Однако практически считают волну сферической, когда радиус излучателя мал по сравнению с длиной волны λ : $a \ll \lambda$.

Жидкости и газы, обладающие сдвиговой вязкостью, не способны выдерживать и передавать какие-либо касательные напряжения. Поэтому в жидкостях и газах распространяются лишь *продольные волны* — волны, в которых направление колебательного движения частиц совпадает с направлением распространения волны.

1. Значения плотности ρ , скорости звука c и ρc при 20° С

Среда	ρ , г/см ³	c , см/с	ρc , г/см ² ·с
Воздух	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$0,343 \cdot 10^5$	44,2
Азот	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$0,351 \cdot 10^5$	41,0
Вода	0,997	$1,497 \cdot 10^5$	$1,49 \cdot 10^5$
Глицерин	1,261	$1,923 \cdot 10^5$	$2,42 \cdot 10^5$
Трансформаторное масло при 32,5° С .	0,895	$1,425 \cdot 10^5$	$1,28 \cdot 10^5$
Бензин	0,879	$1,32 \cdot 10^5$	$1,16 \cdot 10^5$
Ртуть	13,596	$1,451 \cdot 10^5$	$1,972 \cdot 10^5$

Скорость c распространения звуковых волн в газах и жидкостях (табл. 1) зависит от плотности ρ и адиабатического коэффициента сжимаемости β_c (для воды $\beta_c = 4,47 \cdot 10^{-11}$ см²/дин):

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta_c}}. \quad (19)$$

Уравнение плоской бегущей волны:

$$\xi = \xi_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right),$$

где t — продолжительность процесса; x — расстояние от колеблющейся точки до излучателя.

Давление в плоской звуковой волне, распространяющейся без поглощения в неограниченной среде,

$$p = p_0 + \omega \xi_0 \rho c \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (20)$$

где p_0 — давление в невозмущенной среде; $\omega \xi_0 \rho c$ — амплитуда звукового давления.

Механическое сопротивление Z жидкой или газообразной среды в линейном приближении не зависит от интенсивности звука: $Z = S \rho c$, где S — площадь волнового фронта. Произведение ρc — удельное механическое сопротивление — называют волновым сопротивлением среды. Мощность волнового фронта

$$W = \frac{S v_m^2 \rho c}{2}.$$

При распространении продольной волны в среде последовательно возникают области сжатия и разрежения. В *стоячей волне* в точках с максимальной амплитудой колебаний — в пучностях наблюдается область сжатия, а в узлах — область разрежения. Для *бегущей волны* пучности и узлы в любой точке пространства чередуются.

В твердых телах, обладающих упругостью формы, наряду с нормальными напряжениями возникают и касательные напря-

жения сдвига. Последние являются причиной возникновения *поперечных волн*; движения частиц твердого тела происходят перпендикулярно к направлению распространения волны. Кроме того, в твердых телах могут распространяться *поверхностные волны* (волны Рэлея), а в пластинах *нормальные волны* (волны Лэмба).

Колебательные свойства твердого тела зависят от плотности ρ , модулей Юнга E и сдвига G , коэффициента Пуассона μ , удельного волнового сопротивления ρc и коэффициента затухания β . В табл. 2 приведены зависимости для определения скорости распространения волн различных типов в изотропных твердых телах.

2. Скорость распространения звуковых волн в твердых телах

Волны	Размеры тела	
	неограниченные ($\lambda \ll$ размеров тела)	ограниченные ($\lambda \gg$ размеров тела)
Продольные	$c_{\infty} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$	Для стержней $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
Поперечные (волны сдвига)	$c_{\tau} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	—
Волны изгиба	—	Для стержня радиусом R $c_{и} = \sqrt{\pi R f} \cdot \sqrt[4]{\frac{E}{\rho}}$ Для пластины толщиной d $c_{и} = \sqrt{\pi d f} \cdot \sqrt[4]{\frac{E}{3\rho(1-\mu)^2}}$
Крутильные	—	Для тонких стержней $c_r = \sqrt{\frac{G}{\rho}}; G = \frac{E}{2(1+\mu)}$
Поверхностные (волны Рэлея)	Для полубесконечной среды $c_{п} = \frac{0,87+1,12\mu}{1+\mu} \sqrt{\frac{G}{\mu}}$	—

3. Скорости распространения ультразвука и упругие константы твердых материалов

Материал	ρ , г/см ³	$E \cdot 10^{-4}$	$G \cdot 10^{-4}$	μ	$c \cdot 10^{-5}$	$c_{\infty} \cdot 10^{-5}$	$c_T \cdot 10^{-5}$	$\rho c \times 10^{-5}$, г/см ² · с
		кгс/мм ²						
Алюминий	2,7	0,71	0,26	0,34	5,08	6,26	3,08	13,7
Железо	7,8	2,1	0,82	0,28	5,17	5,85	3,28	40,4
Никель	8,8	2,05	0,785	0,31	4,78	5,63	2,96	41,5
Сталь	7,8	2,04	0,855	0,28	5,05	6,1	3,3	39,4
Свинец	11,4	0,16	0,0580	0,44	1,18	2,16	0,7	13,4
Вольфрам	19,1	3,62	1,34	0,35	4,31	5,46	2,62	82,1
Медь	8,9	1,25	0,464	0,35	3,71	4,7	2,26	33
Органическое стекло	1,18	0,0535	0,0151	0,35	2,14	2,67	1,12	2,52
Стекло	3,2	0,57	0,238	0,23	4,88	5,34	3,12	11,7

Значения скоростей звука c , c_{∞} , c_T и упругих констант некоторых твердых тел при температуре 20°С даны в табл. 3.

Среднее за период значение плотности потока энергии, называемое *интенсивностью* или силой звука I , в плоской бегущей волне пропорционально квадратам частоты ω и амплитуды колебаний ξ_m :

$$I = \frac{1}{2} \omega^2 \xi_m^2 \rho c. \quad (21)$$

При распространении звуковых волн в твердых телах, как и в жидкостях, происходит перенос энергии. Распространение звуковых волн в твердых телах сопровождается потерями энергии на внутреннее трение, теплопроводность и упругий гистерезис. В плоской бегущей волне амплитуда колебаний изменяется по экспоненциальному закону

$$\xi_x = \xi_0 e^{-\alpha x}. \quad (22)$$

Потери энергии зависят от физико-механических свойств и структуры материала, амплитуды и частоты колебаний.

Потери ультразвуковой энергии связаны с движением дислокаций: в металле под действием приложенного напряжения дислокации, закрепленные атомами примеси и узлами дислокационной сетки, совершают колебания подобно натянутой струне.

Существует пороговая амплитуда колебательной скорости, т. е. в зависимости от величины знакопеременных напряжений движение дислокаций может носить как обратимый характер (колебания их около точек закрепления), так и необратимый — отрыв от точек закрепления и перемещение по кристаллу и размножение (за счет работы источников Франка—Рида). Взаимодействие движущихся дислокаций приводит к образованию точечных дефектов. Активация дислокаций под действием

ультразвука происходит главным образом в результате поглощения акустической энергии в местах дефектов решетки и других структурных несовершенств. При этом за очень малое время происходит локальный нагрев, снятие напряжений, разблокировка дислокаций, увеличение их подвижности.

Ультразвуковые колебания, таким образом, могут значительно снижать сопротивление металлов пластическому деформированию. Более подробно этот вопрос изложен в гл. 6.

Для однородных сред поглощение ультразвука в основном определяется коэффициентами вязкости и теплопроводности. В поликристаллических телах при высоких частотах f , когда длина волны λ мала по сравнению с размерами зерен l ($\lambda \ll l$), α пропорционален квадрату частоты. Особенно велико поглощение в телах, средний размер зерен которых имеет порядок длины волны ($\lambda \approx l$). Для большинства твердых тел затухание продольных и сдвиговых волн определяется формулой

$$\alpha = Af + Bf^4. \quad (23)$$

Составляющая, пропорциональная f , обуславливается наличием упругого гистерезиса, а член, пропорциональный f^4 , определяет релеевское (диффузионное) рассеяние энергии.

При небольших амплитудах колебаний α не зависит от амплитуды, а при больших ξ ($\xi \geq 10$ мкм) процесс усложняется: появляется нелинейное поглощение; при увеличении ξ коэффициент поглощения сначала медленно, а затем резко возрастает [40]. При частотах 2—100 кГц α прямо пропорционален f . Из сталей наименьшие потери у сталей 45 и 30ХГСА в закаленном состоянии. Хорошие акустические свойства имеют титан и его сплавы.

§ 3. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ, КОНЦЕНТРАТОРЫ И ВОЛНОВОДЫ

В ультразвуковой технике и технологии источником звуковых колебаний в жидких и твердых средах являются магнитострикционные, пьезоэлектрические и ферритовые преобразователи, возбуждаемые ламповыми или полупроводниковыми генераторами. Магнитострикционные преобразователи обычно используют для возбуждения высокоэнергетических колебаний и работы в нижнем диапазоне ультразвуковых частот ($f \leq 44$ кГц), а пьезокерамические — на более высоких частотах (от 100 кГц до 20 мГц) и для создания колебаний меньшей интенсивности.

Магнитострикционный и пьезоэлектрический эффекты обратимы: те же преобразователи могут служить не только излучателями, но и приемниками ультразвука.

Теория и расчет преобразователей изложены в работе [46], а также в трудах советских авторов [11, 17, 48, 50]. Различные

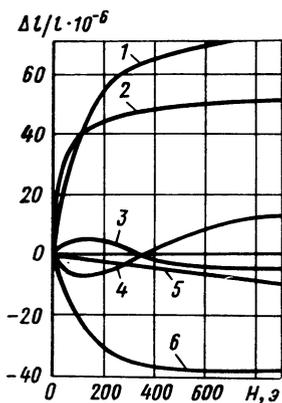


Рис. 6. Кривые магнитоэстроиционной деформации ферромагнитных материалов:

1 — сплав платины с железом (54% Pt+46% Fe); 2 — пермендиор (49% Co+49% Fe+2% V); 3 — железо; 4 — литой кобальт; 5 — отожженный кобальт; 6 — никель

вопросы проектирования концентраторов и волноводов рассмотрены в работах [2, 17, 22, 24, 40, 45—50], а ультразвуковых преобразователей для целей дефектоскопии и измерений — в работах [8, 10, 30].

Эффект магнитоэстроиции (эффект Джоуля) заключается в способности ферромагнитных материалов изменять свои геометрические размеры под действием магнитного поля. Наибольшей магнитоэстроиционной деформацией $\Delta l/l$ (рис. 6) обладают никель, сплавы алюминия с железом (альфер), железокобальтовые сплавы К49Ф2 и К65 (табл. 4) и сплав платины с железом (54% Pt+46% Fe). Последний не применяют

4. Физико-механические свойства магнитоэстроиционных материалов

Материал	Химический состав	ρ , г/см ³	σ_B , кгс/мм ²	σ_M , м/с	$E \cdot 10^{-4}$, кгс/мм ²	Удельное электросопротивление $\rho_{эл} \cdot 10^{-8}$, Ом·м	Коэрцитивная сила H_c , А/м	Индукция насыщения B_s , Гс	Магнитоэстроиция насыщения $(\Delta l/l)_s \cdot 10^{-6}$
Никель	100% Ni	8,8	47	4850	2,1	7	56	6,4	-35
Пермендиор К49Ф2	49% Co; 1,5—1,8% V; остальное Fe	8,08	45	5200	2,18	26	180	2,4	70
Сплав К65	65% Co; остальное Fe	8,25	67	5200	2,24	8	300	2,2	90
Альфер Ю14	13,8% Al; остальное Fe	6,65	79	5160	1,77	90	56	13,4	40

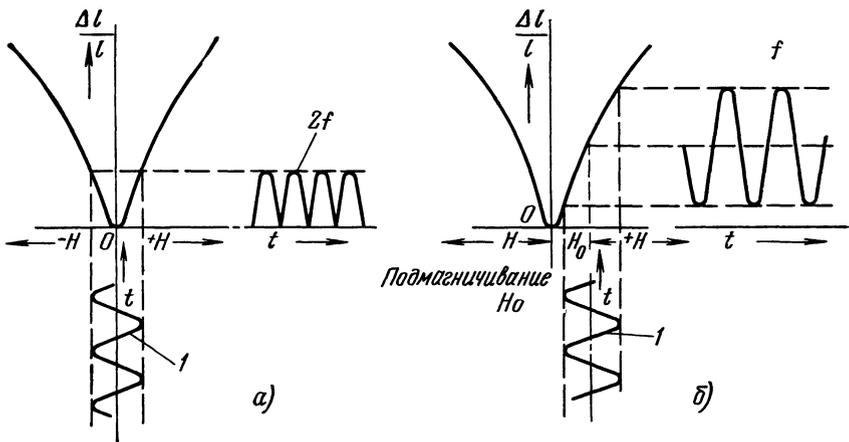


Рис. 7. Магнитострикционная деформация при возбуждении переменным магнитным полем:
 а — без подмагничивания; б — с подмагничиванием; 1 — возбуждающее поле частоты f

из-за высокой стоимости. Эти кривые получены при воздействии постоянного магнитного поля.

Стержень из ферромагнитного материала, помещенный в переменное магнитное поле, периодически изменяет свою длину (рис. 7, а) с удвоенной частотой (по сравнению с частотой возбуждающего поля), и магнитострикционная деформация $\Delta l/l$ небольшая.

Другая картина наблюдается для поляризованного преобразователя (рис. 7, б). Подмагничивание вибратора полем напряженностью H_0 необходимо для линеаризации магнитострикционного эффекта, а также для получения наибольшей величины $\Delta l/l$.

Амплитуда колебаний поляризованного преобразователя ξ_m максимальна на резонансном режиме — при совпадении частоты колебаний электромагнитного поля с собственной частотой его механических колебаний. Величина ξ_m ограничивается механической прочностью и маг-

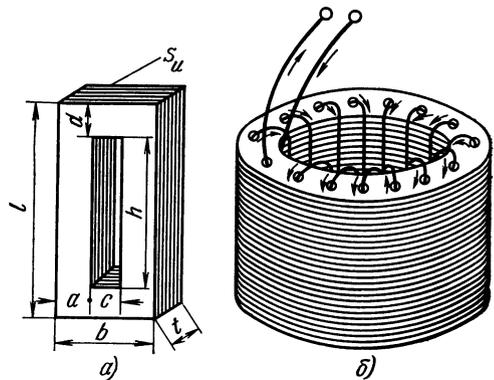


Рис. 8. Сердечники магнито-стрикционных преобразователей

нитным насыщением материала преобразователя (при $f = 18 \div \div 22$ кГц $\xi_m \leq 10$ мкм). Основная собственная частота f_0 продольных колебаний (Гц) в стержнях и трубках постоянного поперечного сечения:

$$f_0 = \frac{c_m}{2l},$$

где c_m — скорость распространения звука в магнитострикционном стержне, см/с; l — длина стержня, см ($l = \lambda/2$).

В ультразвуковой технологической аппаратуре наибольшее применение получили две разновидности магнитострикционных преобразователей: продольно-колеблющийся двухстержневой (рис. 8, а) и радиально-колеблющийся кольцевой (рис. 8, б).

Собственная частота двухстержневого преобразователя определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha\pi}{2} \operatorname{tg} \frac{\beta\pi}{2} = \frac{S_c}{S_n}, \quad (24)$$

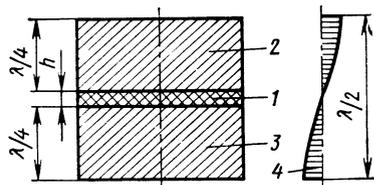
где $\alpha = \frac{4d}{\lambda} = \frac{4df_0}{c_m}$; $\beta = \frac{2h}{\lambda} = \frac{2hf_0}{c_m}$; $\frac{S_c}{S_n}$ — отношение площади поперечного сечения стержней к излучающей поверхности ($\frac{S_c}{S_n} = \frac{2a}{2a+c}$). Резонансная частота радиально колеблющегося преобразователя

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_c} \sqrt{\frac{E}{\rho} [1 + (1-k)^2]} = \frac{c_m}{2\pi R_c} \sqrt{1 + (1-k)^2}, \quad (25)$$

где R_c — средний радиус пластин преобразователя; k — номер гармоники собственных колебаний ($k = 1; 2; 3$).

Пьезоэлектрические преобразователи изготавливают из кристаллов кварца, сегнетовой соли, турмалина, керамики титаната бария (BaTiO_3), а также цирконата-титаната свинца ЦТС [$\text{Pb}(\text{ZnTi})\text{O}_3$] и его производных. Прямой пьезоэффект заключается в появлении электрических зарядов под действием механических деформаций. Обратный пьезоэлектрический эффект — способность названных материалов изменять свои геометрические размеры под действием электрического напряжения. Оба эффекта обратимы. В ультразвуковых установках небольшой мощности применяют излучатели типа Ланжевена. Преобразователь состоит из двух металлических накладок-пластин 2 и 3, между которыми зажата кварцевая или пьезокерамическая пластинка 1 (рис. 9). Возбуждение осуществляется таким образом, чтобы вся система работала как полуволновой излучатель 4. Металлические пластины действуют как массы, значительно понижающие частоту излучателя. Благодаря этому устраняется необходимость применения толстых пьезоэлементов и улуч-

Рис. 9. Излучатель Ланжевена



шается их охлаждение. Важно обеспечить прочное соединение поверхностей пластин и пьезоэлементов. Эти поверхности необходимо тщательно притирать, для этого применяют склейку, наиболее прочное соединение достигается стягиванием пластин и пьезоэлементов при помощи шпильки (см. рис. 7, гл. 8).

Толщину каждой накладки принимают равной $\lambda/4$: $l_H = \lambda/4 = = c/4f$. Для эффективной работы излучателя Ланжевена подбирают материал накладок с малым коэффициентом поглощения, особенно для излучающей (активной) накладки.

Большинство магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей работает в режиме одностороннего излучения, когда излучающей является лишь одна его сторона. Максимальная амплитуда колебаний преобразователя ξ_m даже на резонансном режиме небольшая — не более 5—10 мкм. Для увеличения амплитуды колебаний инструмента и согласования преобразователя с нагрузкой применяют ультразвуковые концентраторы (трансформаторы скорости). Стержни или трубки постоянного сечения, соединяющие преобразователь или концентратор с нагрузкой, называют ультразвуковыми волноводами. В зависимости от типа колебаний различают волноводы продольных, изгибных, радиальных и поперечных колебаний.

Для обеспечения неискаженной передачи продольных колебаний и исключения появления колебаний других типов необходимо выдержать условия: $0,05 < \frac{d_{\max}}{\lambda} < 0,5$.

Резонансная частота однородного волновода (E , ρ и S постоянны) со свободным концом (рис. 10, а)

$$f_0 = \frac{c}{2l} k,$$

где l — длина волновода; $k=1, 2, 3$ — порядок гармоники.

Для однородного волновода с зажатым концом резонансная длина

$$l = \frac{c}{4f_0} k,$$

где $k=1, 3, 5$, а первая узловая плоскость совпадает с зажатым концом.

В неоднородных волноводах распределение колебательных величин отличается от распределения их в однородных. Для волновода с сосредоточенной присоединенной массой (неодно-

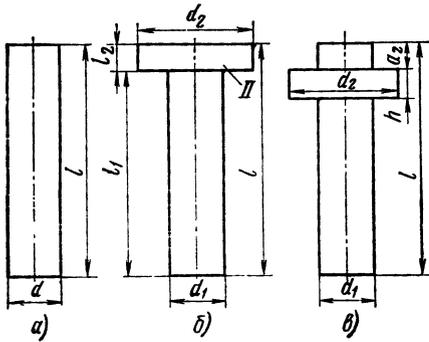


Рис. 10. Типы волноводов продольных колебаний

родный волновод) при $\frac{d_2}{d_1} \leq 2$ и $l_2 \leq 0,1\lambda$ (рис. 10, б).

$$l_1 = \frac{\pi\varphi}{\omega} c, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{d_2^2}{d_1^2} \operatorname{tg} k l_2.$$

Резонансная частота волновода с массой в каком-либо месте волновода (рис. 10, в)

$$f_n \approx \frac{c}{l} \left[1 - \frac{(d_2^2 - d_1^2)^2}{d_1^2 d_2^2} \cdot \frac{h}{l} + \frac{d_2^4 - d_1^4}{2d_1^2 d_2^2} \cdot \frac{h}{l} \cos k(l + 2a_2) \right]. \quad (26)$$

Формула (26) справедлива при $\frac{d_2^2}{d_1^2} \leq \frac{1}{kh} + 1$ и $\frac{f_0 - f_n}{f_0} \ll 1$,

где f_0 — резонансная частота однородного волновода. Расчет волноводов с переменной инерционной нагрузкой приведен в работе [15].

Ультразвуковые концентраторы (трансформаторы скорости) применяются для увеличения амплитуды колебаний инструмента и согласования преобразователя с нагрузкой. Коэффициент усиления концентратора K_y равен отношению на его концах амплитуд, колебательных скоростей и напряжений:

$$K_y = \frac{\xi_l}{\xi_0} = \frac{v_l}{v_0} = \frac{\sigma_l}{\sigma_0}.$$

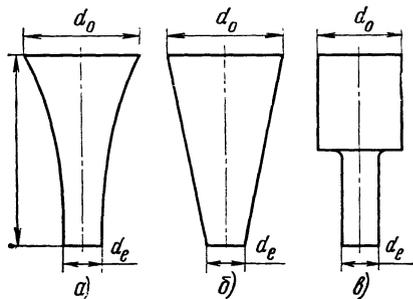
Концентратор трансформирует нагрузку, приложенную к выходному концу $Z_{\text{ВЫХ}}$ ($Z_{\text{ВЫХ}} = \omega_0 S_l$), от некоторого значения на входе $Z_{\text{ВХ}}$: $Z_{\text{ВХ}} = \omega_0 S_0$, где ω — волновое сопротивление материала концентратора, S_0 и S_l — площади входного и выходного торцов.

Коэффициент трансформации

$$K_T = \frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_{\text{ВЫХ}}} = \frac{S_0}{S_l}.$$

Подбором величины K_T можно добиться оптимального согласования нагрузки с преобразователем. Коэффициент усиления зависит от отношения площадей входных и выходных торцов концентратора, формы его образующей и акустических свойств его материала. Наибольшее распространение получили полу-волновые концентраторы трех типов: экспоненциальные (рис. 11, а), конические (рис. 11, б) и ступенчатые (рис. 11, в). Методика их расчета изложена в [2, 17, 24, 25, 28, 37, 45, 46].

Рис. 11. Полуволновые концентраторы продольных колебаний

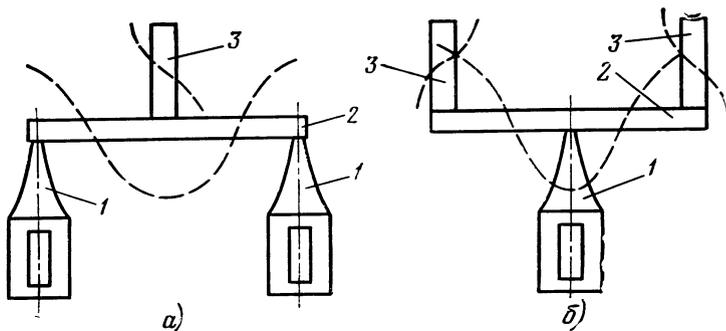


Различают два режима работы волноводов и концентраторов: 1) колебательный режим в ненагруженном состоянии (режим стоячей волны); 2) режим бегущей волны — при нагрузке на абсолютно поглощающую активную среду. Режим колебаний определяется коэффициентом бегущей волны $K_6 = \xi_{m \min} / \xi_{m \max}$, где $\xi_{m \min}$ — амплитуда смещения в узле, а $\xi_{m \max}$ — в пучности колебаний. Сравнение экспоненциального и ступенчатого концентраторов показывает, что последний имеет больший K_6 . Однако при увеличении нагрузки K_6 ступенчатого концентратора резко уменьшается, приближаясь в режиме бегущей волны к K_6 экспоненциального концентратора. Кроме того, требуется тщательная настройка ступенчатого концентратора, он чувствителен к влиянию нагрузки на колебательный режим. В узловой плоскости ступенчатого концентратора возникает большая концентрация напряжений, могущая его разрушить (при $\frac{d_0}{d_1} > 4 - 4,5$), поэтому его применяют в устройствах небольшой мощности (< 1 кВт).

Волноводные системы продольных колебаний не всегда удовлетворяют практическим требованиям, и тогда используют системы со звеньями изгибных и крутильных колебаний. Например, сочетание звеньев изгибных колебаний с продольными

Рис. 12. Сложные волноводы-излучающие системы:

1 — концентратор; 2 — волновод изгибных колебаний; 3 — волновод продольных колебаний



(рис. 12, а, б) позволяет передавать колебания в нужном направлении, а также складывать или распределять мощности нескольких преобразователей.

§ 4. АКУСТИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИЯ И АКУСТИЧЕСКИЕ ПОТОКИ

При возбуждении в жидкости интенсивных ультразвуковых колебаний возникает сложное физическое явление — акустическая кавитация. Интенсивными считают такие колебания, которые создают звуковые поля с амплитудами давления, превышающими прочность жидкости на разрыв (более 1 Вт/см^2). Кавитация в жидкости вызывает такие эффекты, как ускорение химических реакций, эрозия, звуколюминесценция и излучение звука.

Изучению акустической кавитации посвящено большое количество работ [1, 7, 23, 28, 48, 63]. Однако многие стороны кавитационного процесса, особенно для кавитационной области, все еще недостаточно изучены.

Кавитация заключается в образовании ряда мелких разрывов или полостей в жидкости под действием растягивающих усилий, создаваемых звуковой волной в фазе разрежения с последующим их захлопыванием в фазе сжатия. Скорость сжатия, вызываемого силами поверхностного натяжения и звуковым давлением, может достигать больших величин, вызывая гидравлическую ударную волну. Мгновенные значения давления в ударной волне доходят до нескольких сотен атмосфер. Таким образом, при расширении и сжатии кавитационной полости происходит своеобразная трансформация мощности, чем и объясняется кавитационное разрушение твердых тел в звуковом поле высокой интенсивности.

Разрывы в жидкости появляются в наиболее слабых ее местах, обычно это мельчайшие воздушные пузырьки, остающиеся на поверхности твердого тела из-за неполного смачивания. Кавитационные пузырьки под действием сил поверхностного натяжения получают шарообразную форму. Если после образования пузырька продолжается фаза растяжения, то пузырек увеличивается в своих размерах и может достигнуть диаметра, в несколько раз превышающего первоначальную величину.

Дальнейшее движение образовавшегося кавитационного пузырька может быть различным [48]: он может пульсировать линейно относительно своего равновесного радиуса; колебаться нелинейно (стабильная полость); может, увеличившись до некоторого максимального радиуса, очень быстро сжаться до захлопывания (неустойчивая полость).

Радиус пузырьков R изменяется от минимального $R_{кр}$ до максимального — резонансного R_p . Наименьшее критическое значение $R_{кр}$ определяется уравнением [28]

$$R_{кр}^3 + \frac{2\sigma_1}{P_{ст}} R_{кр}^2 - \frac{32\sigma_1^3}{27P_{ст}(P_{ст} - P_0)^2} = 0, \quad (27)$$

где σ_1 — поверхностное натяжение; P_0 — амплитуда звукового давления; $P_{ст}$ — статическое давление в объеме жидкости.

Пузырьки размером $R < R_{кр}$ из-за большой величины поверхностного натяжения в кавитации не участвуют. Для $P_{ст} = 1$ кгс/см² (10^5 Н/м²), $P_0 = 9 \cdot 10^5$ Н/м² и $\sigma_1 = 8 \cdot 10^{-2}$ Н/м значение $R_{кр} = 0,1$ мкм.

Пузырьки размером $R > R_p$ всплывают на поверхность жидкости и выделяются в воздушную среду (дегазация).

Значение R_p определяют из формулы для его резонансной частоты f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left(P_{ст} + \frac{2\sigma_1}{R_p} \right)}, \quad (28)$$

где $\gamma = c_p/c_v$ — отношение удельных теплоемкостей газа в пузырьке; ρ — плотность жидкости.

При $\omega = 9 \cdot 10^4$ с⁻¹, $P_{ст} = 1$ кгс/см² и $P_0 = 4$ кгс/см² радиусы кавитирующих пузырьков изменяются от десятых долей микрометра до десятых долей миллиметра.

При математическом описании акустической кавитации применяют модель изолированной сферической полости, размеры которой $2R \ll \lambda$. Наиболее известно уравнение Нолтинга-Непай-раса, полученное в предположении, что пузырек пульсирует в идеальной несжимаемой жидкости, а содержание газа в нем постоянно [49]:

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[P_{ст} - P_{п} - P_0 \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_{ст} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\beta} \right] = 0, \quad (29)$$

где $P_{п}$ — давление пара, которое считается постоянной величиной, определяемой температурой жидкости; R_0 — начальный радиус пузырька.

Уравнение пульсаций кавитационного пузырька с учетом сжимаемости и вязкости жидкости получено Херрингом и Флинном [47]. При уменьшении величины начального радиуса R_0 максимальное давление захлопнувшейся кавитационной полости существенно возрастает. Например, при $f = 500$ кГц и $P_0 = 20$ кгс/см² уменьшение R_0 с 10^{-3} до 10^{-4} см приводит к росту P_{max} от $7,4 \cdot 10^4$ до $2,8 \cdot 10^8$ кгс/см². Амплитуда ударных волн велика вблизи кавитирующей полости, и различные эф-

фекты, сопутствующие кавитации, наиболее интенсивно проявляются у захлопывающихся кавитационных полостей.

На эрозионную активность звукового поля в жидкости влияют параметры, наиболее существенно изменяющие величину сил, противодействующих захлопыванию пузырька за счет снижения коэффициента паросодержания и уменьшения присоединенной массы жидкости.

Для оценки влияния кавитирующей жидкости на излучаемую мощность Л. Д. Розенберг [28] ввел среднее эффективное сопротивление излучения $\bar{R} = 2 W_a / v_m^2$, где W_a — фактическая мощность, излучаемая в среду; v_m — колебательная скорость излучателя. При появлении кавитации \bar{R} резко понижается (до 30%), а давление в жидкости у излучающей поверхности падает до минимума и возрастает до прежнего значения лишь при увеличении v_m в 2 раза и более.

Критериями выбора жидкости, обеспечивающей максимальную кавитационную активность, являются малая вязкость, высокое поверхностное натяжение, низкое давление пара и большая скорость звука.

В СССР [1, 48] разработан метод повышения интенсивности кавитационной эрозии, который заключается в том, что наряду со знакопеременным звуковым давлением $P_{зв}$ на жидкость действует повышенное статическое давление $P_{ст}$ ($P_{ст}/P_{зв} \approx 0,4$). При этом стадия сжатия кавитационных пузырьков сдвигается по времени и захлопывание происходит в положительном полупериоде звуковой волны. Поэтому значительно возрастает давление в ударной волне и ликвидируются крупные пульсирующие пузырьки, экранирующие ультразвуковые колебания.

Радиационное давление и акустические потоки в жидкости. При интенсивном ультразвуке форма волны искажается — она принимает пилообразную форму с крутым подъемом переднего фронта. Это приводит к появлению радиационного давления и акустических потоков. Последние носят вихревой характер и возникают в свободном неоднородном поле и вблизи препятствий, находящихся в звуковом поле. Причина их возникновения — потери энергии звуковой волны. Различают потоки трех типов [28]: а) потоки, возникающие в вязком пограничном слое вблизи препятствий, и микропотоки около колеблющихся пузырьков (шлихтинговское течение); б) потоки вне пограничного слоя (релевское течение); в) макропотоки в свободном неоднородном звуковом поле, в котором масштаб неоднородности значительно больше длины волны (экартовское течение).

Потоки, возникающие в пограничном слое, уменьшают его толщину, оказывая существенное влияние на процессы массо- и теплопереноса. Они ускоряют процессы теплопередачи от нагретых тел, перемешивания сред, очистки загрязненных поверхностей, распыления жидких капель горючего в режиме вибрационного горения, дегазации жидкостей и др.

Глава **2**

**Применение
ультразвука
при производстве
металлов
и сплавов**

•

Г.С. АНГЕЛОВ

§ 1. МЕТОДЫ ВВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В РАСПЛАВЛЕННЫЙ МЕТАЛЛ

Эффективность обработки ультразвуком зависит от метода введения его в обрабатываемую среду. Трудности введения ультразвука в металлические расплавы обусловлены их более специфическими свойствами по сравнению с другими жидкостями: высокой температурой, быстрым растворением, расплавлением или разрушением волновода, изменением акустических свойств и связи с волноводом при кристаллизации и т. п.

При выборе метода введения ультразвука следует учитывать, что ультразвук необходимо подавать непосредственно в расплав, чтобы форма или кристаллизатор, в котором получается слиток или отливка, не входили в колебательную систему (за исключением специальных случаев, когда обрабатываются очень малые объемы расплава).

Такой метод наиболее выгоден в энергетическом отношении, а также наиболее эффективен и технологичен (за исключением специальных случаев, когда обрабатываются очень малые объемы расплава).

Непосредственное введение ультразвука в расплав может осуществляться сверху, снизу или в промежуточный объем. При введении ультразвука сверху (рис. 1) необходимо обеспечить медленное охлаждение верхней части формы, чтобы расплав в этой части сохранился до полного отверждения слитка или отливки. Преждевременная кристаллизация верхней части отливки может нарушить акустический контакт с излучателем. Медленное охлаждение в зоне

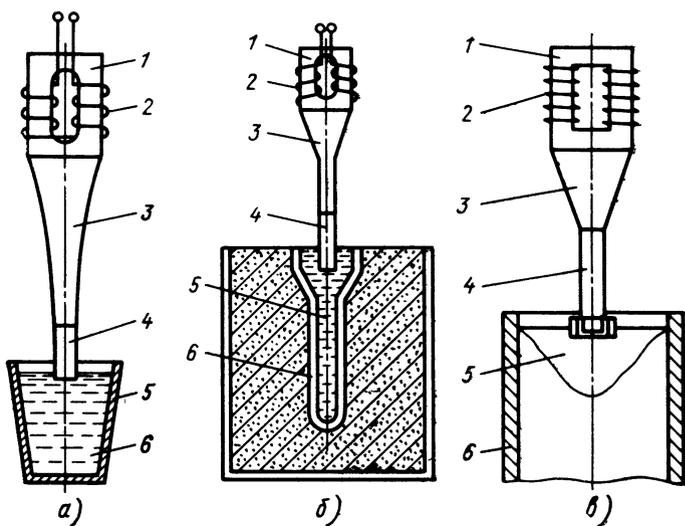


Рис. 1. Схемы введения ультразвука в металлический расплав сверху:

а — в кокиль; *б* — в керамическую укрепленную форму; *в* — при непрерывном или полунепрерывном литье; 1 — магнитострикционный преобразователь, 2 — обмотка; 3 — концентратор; 4 — излучатель; 5 — расплав; 6 — металлическая (*а*), керамическая (*б*) форма или кристаллизатор (*в*)

введения ультразвука необходимо и для того, чтобы можно было извлечь излучатель до отверждения металла около него.

Для метода введения ультразвука сверху характерны следующие недостатки:

1. Воздействие на расплав начинается тогда, когда уровень металла достиг излучателя. До этого нижняя часть отливки может кристаллизоваться без воздействия ультразвука. Позднее, когда кристаллизуется слиток и объем жидкого металла в верхней части уменьшается, обработка происходит с большей интенсивностью. Вследствие этого размеры зерна по высоте слитка или отливки могут быть различными.

2. Чтобы замедлить охлаждение и предотвратить образование усадочной раковины под излучателем, верхнюю часть слитка делают большего объема, чем нижнюю, учитывая при этом и теплоотвод от излучателя.

3. Продолжительное нахождение излучателя в жидкой фазе приводит к его разрушению или растворению.

Подача ультразвука сверху особенно эффективна при непрерывном и полунепрерывном литье (рис. 1, *в*), когда объем жидкого металла невелик и постоянен в течение всего периода работы.

Определенные преимущества и недостатки имеет и второй метод введения ультразвука в металлический расплав — введе-

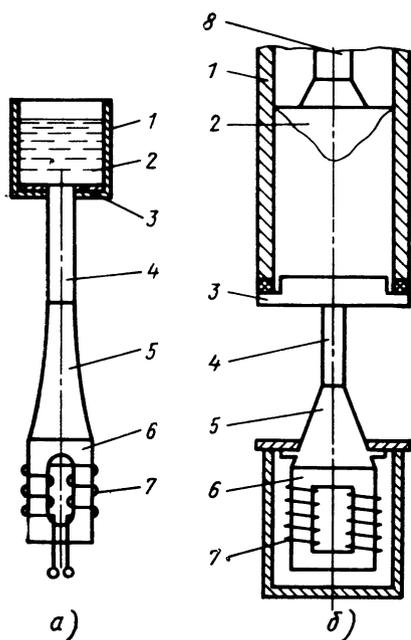


Рис. 2. Схемы введения ультразвука в металлический расплав снизу: *a* — в кокиль; *б* — при электродуговой или электрошлаковой переплавке; 1 — кокиль (кристаллизатор); 2 — расплав; 3 — защитное кольцо (прокладка); 4 — волновод; 5 — концентратор; 6 — магнитострикционный преобразователь; 7 — обмотка; 8 — электрод

ние снизу (рис. 2). В таком случае обработка ультразвуком начинается еще в начале заливки сплава и происходит непрерывное интенсивное перемещение расплава. Это ускоряет теплообмен и создает условия для объемной кристаллизации. Когда на излучателе застывает слой металла, создается хороший акустический контакт, что повышает эффективность ультразвуковой обработки. При более продолжительном нахожде-

нии металла в жидком состоянии над излучателем эффективность обработки ультразвуком также повышается. Особенно неблагоприятно, когда у излучателя образуется отвердевший слой, отделенный от него воздушным слоем.

Для метода введения ультразвука снизу характерны следующие недостатки:

- 1) слабая эффективность обработки верхней части слитка;
- 2) уменьшение общей эффективности обработки в случае приварки слитка к излучателю;
- 3) необходимость большой интенсивности ультразвуковой обработки всего слитка, при которой после кристаллизации определенных объемов металла энергия колебаний в них эффективно не используется.

При электродуговом и электрошлаковом переплаве объем жидкого металла невелик и постоянен, что создает возможности эффективной ультразвуковой обработки. Наряду с этим непрерывное нарастание слитка изменяет резонансную частоту системы излучатель—слиток и нарушает нормальную работу преобразователя и эффективность обработки.

Ультразвуковая обработка в промежуточном объеме, т. е. в каком-либо объеме между формой и литейным ковшом (рис. 3), малоэффективна. Обработка расплава происходит непрерывно во время его заливки при малой интенсивности ультразвука, так как обрабатываемый промежуточный объем тоже мал.

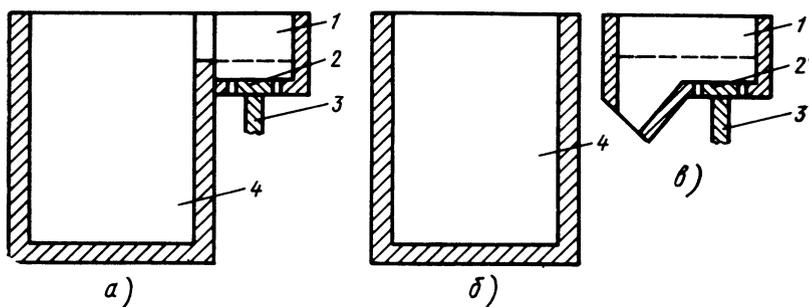


Рис. 3. Схемы введения ультразвука в металлический расплав через промежуточный объем:

a, в — связанная с формой; *б* — отдельно от формы; 1 — промежуточный объем; 2 — излучатель; 3 — волновод; 4 — кокиль (форма)

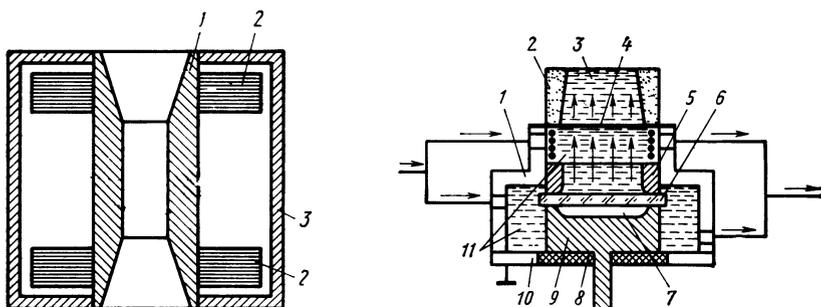


Рис. 4. Ультразвуковая воронка:

1 — чаша; 2 — кольцевой магнитострикционный преобразователь; 3 — водяная рубашка

Рис. 5. Пьезокварцевый преобразователь для ввода ультразвука в расплав алюминиевого сплава:

1 — корпус; 2 — форма; 3 — расплав; 4 — мембрана; 5 — верхний контакт; 6 — пьезопластина; 7 — воздушная подушка; 8 — изоляция; 9 — нижний контакт; 10 — клапан; 11 — масло

Обработка требует строгого соблюдения температурного режима и скорости литья, так как твердая корка на промежуточном сосуде (лотке, воронке и т. д.), образующаяся под действием ультразвука, непрерывно разрушается, и расплав уносит зародыши кристаллизации. Однако эти зародыши могут расплавляться в форме, и обработка ультразвуком станет малоэффективной.

Непрерывное образование корки отвердевшего металла и разрушение ее под действием ультразвука может быть обеспечено охлаждением промежуточного объема. Вокруг этого объема (рис. 4) закрепляют кольцеобразный магнитострикционный преобразователь и весь узел встраивают в корпус, в котором протекает вода.

При использовании пьезокварцевых преобразователей введение упругих колебаний (рис. 5) в расплавленный металл произ-

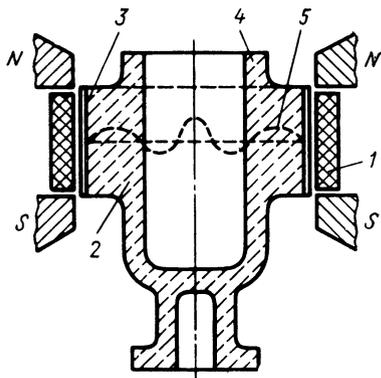
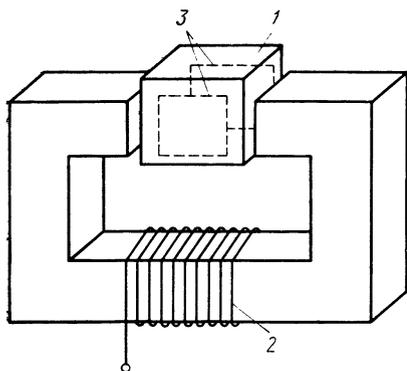


Рис. 6. Схема бесконтактного возбуждения ультразвука в металлическом расплаве:

1 — ванна с маслом; 2 — электромагнит с обмоткой для высокочастотного тока; 3 — электроды для тока подмагничивания

Рис. 7. Схема возбуждения ультразвука в металлическом расплаве, залитом в кокиль:

1 — обмотка; 2 — резонансная стенка; 3 — металлическое покрытие; 4 — керамический тигель; 5 — график распределения акустического давления в радиальном направлении

ходит через промежуточную среду — трансформаторное масло и тонкую (0,1 мм) мембрану из стали 12Х18Н9Т. Однако сложность и малая надежность такой схемы не позволяют широко использовать пьезокварцевые преобразователи.

В последнее время ведутся работы по бесконтактному возбуждению ультразвуковых колебаний в расплаве: без непосредственного акустического контакта с излучателем ультразвука. Это достигается (рис. 6) использованием электродинамических сил, возникающих при взаимодействии высокочастотного поля с постоянным магнитным полем [40]. В расплаве, находящемся в металлической форме, можно возбуждать ультразвуковые колебания по схеме, показанной на рис. 7 [40].

§ 2. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Ряд эффектов, возникающих при обработке металлических расплавов ультразвуком, объясняется тем, что под действием ультразвука изменяются основные физико-химические свойства расплавов: вязкость, поверхностное натяжение на границе раздела «расплав—форма» или «расплав—твердая фаза» и температура. Эти изменения определяют предкристаллизационное состояние расплава и условия дегазации, рафинирования и образования структуры во время кристаллизации.

В настоящее время еще недостаточно исследовано изменение вязкости металлических расплавов под действием ультра-

звука. Торсионным вискозиметром (рис. 8) измеряли коэффициент динамической вязкости η алюминиевого сплава Ал9. Расплав находился в тигле 5, помещенном в печь 8. Через дно тигля проходит излучатель 7 магнитострикционного преобразователя 9. Термопарой 4 и терморегулятором поддерживается необходимая температура исследуемого сплава. В расплав погружен стальной цилиндр 6 с прутком, подвешенным к гибкой упругой нити 1. К нити прикреплена стрелка 2. При вращении цилиндра относительно его оси в расплаве образуется трение, обусловленное смачиванием его поверхности. Под действием внутреннего трения расплава колебательное движение нити затухает. Отклонение стрелки при затухании отсчитывают по круговой шкале 3. Устройство тарируют на жидкости, вязкость которой известна, и строят кривую коэффициент динамической вязкости η — логарифмический декремент колебаний δ . При определении вязкости металлического расплава закручивают нить на 90° и отпускают ее. Угловые отклонения отсчитывают за 10—15 колебаний стрелки и вычисляют логарифмический декремент по формуле

$$\delta = \frac{\ln 90 - \ln \alpha_n}{n}, \quad (1)$$

где α_n — угловое отклонение n -ного колебания стрелки, градусы; n — число колебаний.

По этому декременту и тарировочной кривой определяют коэффициент динамической вязкости. На рис. 9. показано изменение динамической вязкости силумина Ал9 в интервале от 720 до 800°C . Во всех случаях после ультразвуковой обработки расплава вязкость уменьшается на 10—50%. Характер изменения вязкости при повышении температуры (большее уменьшение η при более высоких темпе-

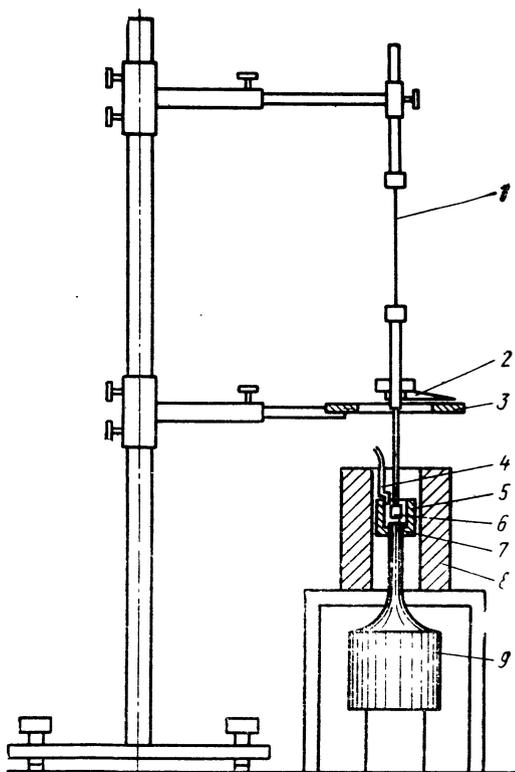


Рис. 8. Схема вискозиметра [3]

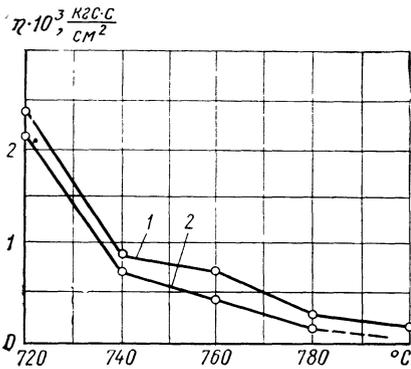


Рис. 9. Зависимость коэффициента динамической вязкости силумина Ал9 от температуры:

1 — без ультразвука; 2 — с ультразвуком (27,5 кГц, амплитуда 0,0086 мм)

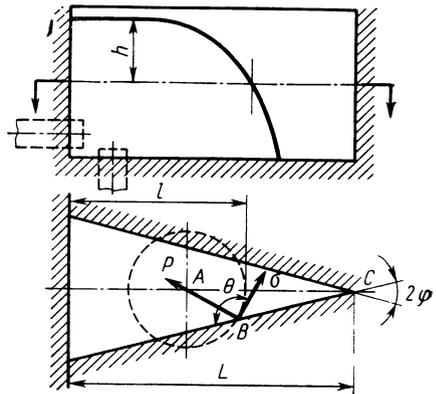


Рис. 10. Клиновидная форма для отливки образцов при определении влияния ультразвука на поверхностное натяжение и смачивание

ратурах) не позволяет считать, что уменьшение вязкости при ультразвуковой обработке вызывается только его тепловым воздействием. Вероятно, наряду с тепловым действием ультразвука существуют и другие эффекты, механизм которых недостаточно изучен.

Влияние ультразвука на металлические расплавы, содержащие твердые нерастворимые примеси или кристаллы, значительно сложнее из-за трения при их относительном движении. Косвенным подтверждением наличия трения между расплавом и твердыми частицами служит выделение тепла в затвердевающем расплаве и уменьшение скорости охлаждения расплава при подаче ультразвука. В таком расплаве еще труднее определить влияние ультразвука на вязкость.

В результате вязкого трения между частицами может измениться состояние пограничного слоя, что может привести к изменению других свойств, например поверхностного натяжения между обеими фазами, или к отколу элементов от частиц твердой фазы. В последнем случае это вызовет еще и увеличение числа частиц твердой фазы и изменение вязкости.

В расплаве металлов и сплавов всегда содержатся различные твердые частицы — примеси. При ультразвуковой обработке такого расплава возникает трение между этими частицами, изменяется поверхностное натяжение и смачивание на границах раздела фаз, а также изменение относительной доли принудительной кристаллизации. Изменения поверхностного натяжения и смачиваемости под действием ультразвука в литейных формах можно измерить [3]. В металлическую форму (рис. 10)

с клиновидным поперечным сечением ($2\varphi=15^\circ$) и длиной $L=115$ мм наливают расплав силумина Ал9. В результате сопротивления, обусловленного поверхностным натяжением σ , форма заполняется на определенную глубину l клина. При подаче ультразвука снизу или сбоку в расплав заполнение клина увеличивается по сравнению с его заполнением без обработки ультразвуком. Разрезав образец на определенном расстоянии h от верхней поверхности, с помощью проектора снимают поперечное сечение в вершине (рис. 11). Если провести касательную к свободной поверхности образца, то можно получить угол смачивания θ . Поверхностное натяжение σ вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{1}{2} (l - L) \frac{rh}{\frac{\cos \theta}{\sin \varphi} + 1}. \quad (2)$$

Под влиянием ультразвука (частота 27,5 кГц и амплитуда 0,0086 мм) поверхностное натяжение силумина уменьшается с 899,0 до 742,9 дин/см при подаче ультразвука через дно формы и до 708,4 дин/см при горизонтальной подаче ультразвука. Угол смачивания θ тоже уменьшается и изменяется соответственно с $167^\circ 50'$ до $166^\circ 5'$ и $160^\circ 13'$. В результате уменьшения поверхностного натяжения и угла смачивания металл проникает на большую глубину в клин.

Роль стенки литейной формы может играть и поверхность твердых нерастворимых примесей в расплаве. Увеличение их смачиваемости и уменьшение поверхностного натяжения на границах раздела приводит к активации в процессе кристаллизации. Это подтверждает активацию примесей под действием ультразвука, если уменьшается поверхностное натяжение и увеличивается смачивание примесей. Этой активацией объясняют ряд эффектов, возникающих при кристаллизации под действием ультразвука. Предполагают [2], что действие ультразвука связано с образованием контактного адсорбционного мономолекулярного слоя металла на неметаллических твердых частицах, что превращает их в активные зародыши кристаллизации. При перегреве этот слой разрушается, и примеси теряют свою активность. Косвенным подтверждением активации

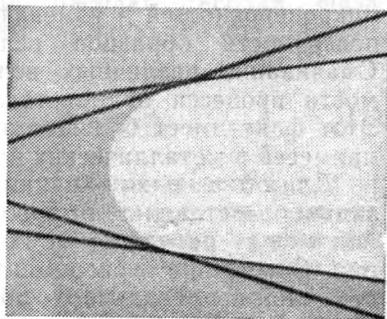


Рис. 11. Поперечный разрез клиновидного образца

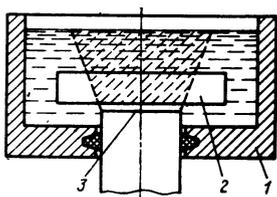


Рис. 12. Схема установки для изучения воздействия ультразвука на смачивание

примесей под действием ультразвука является положительное влияние ультразвука при модифицировании металлов и сплавов. При обработке ультразвуком было обнаружено смачивание диспергированных частиц металлом и образование дополнительных центров кристаллизации и измельчение структуры сплава Ал4, чистого алюминия АВ000, олова, висмута, цинка и алюминия [2]. Опыты показывают, что при наличии примесей эффект измельчения возрастает благодаря силам трения между твердой и жидкой фазами и удельной поверхностной энергии на границе «расплав—примесь». Сильное измельчение структуры, происходящее в результате активирования ультразвуком неактивных примесей вольфрама и бора, было отмечено и при обработке олова и алюминия [2]. Металлизацию примесей производили пластинками площадью 0,5 см² из Al₂O₃, SiO₂ и вольфрама, погруженными в расплав олова. При ультразвуковой обработке в течение 3 мин при 240°С на пластинках наблюдалось появление олова. В других исследованиях смачивание нерастворимых систем под действием ультразвука объясняется несколько иначе. В ванне 1 (рис. 12), помещенной в трубчатой нагревательной печи, расплавляли олово или сплав Вуда. Против излучателя 3 (на определенном расстоянии) устанавливали образец 2 из стали, керамический корундовый сплав или стекло и обрабатывали расплав ультразвуком. При увеличении интенсивности ультразвука и времени нахождения образца в ванне в зоне действия ультразвука увеличивается зона смачивания образца расплавом, тогда как без обработки ультразвуком смачивание отсутствует. Смачивание зависит также от чистоты поверхности. Хорошо очищенные от окалины поверхности лучше смачиваются. Смачивание объясняют образованием микронеровностей и изменением кристаллической структуры на поверхности образцов вследствие интенсивной кавитации. Смачивание различных веществ свидетельствует о независимости процесса от кристаллической структуры твердой фазы. Этот факт имеет большое значение для активации неактивных примесей в металлических расплавах.

Для объяснения влияния ультразвука на процесс кристаллизации представляет интерес изменение поверхностного натяжения между расплавом и кристаллами при двухфазном состоянии. Отсутствие экспериментальных данных долгое время было причиной неправильного объяснения ряда связанных с этим явлений. Например, установлено, что под действием

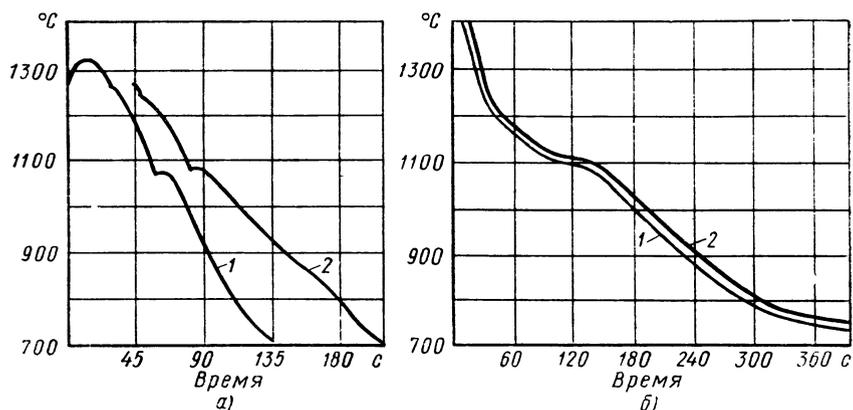


Рис. 13. Уменьшение переохлаждения чугуна при обработке расплава ультразвуком (по Ангелову Г. С.):

а — белого чугуна; б — магниевое чугуна; 1 — без ультразвука; 2 — с ультразвуком.

ультразвука уменьшается переохлаждение расплавов и увеличивается количество кристаллизационных зародышей, а структура сплава, кристаллизующегося при меньшем переохлаждении, получается более мелкозернистой. Это явление объясняют [4] уменьшением поверхностного натяжения σ на границе расплав—кристаллы, что стабилизирует кристаллизационные зародыши меньше критического размера $r_{кр}$:

$$r_{кр} = \frac{2\sigma M T_s}{\rho L \Delta T} , \quad (3)$$

где M — молекулярный вес; T_s — температура плавления; ρ — плотность; L — скрытая теплота плавления; ΔT — переохлаждение кристаллизующегося расплава.

Если считать, что ультразвук уменьшает переохлаждение расплава, то теоретически можно доказать также и уменьшение поверхностной энергии на границе расплав—твёрдая фаза [4—5]. В этом случае рассматривают скрытую теплоту плавления L' , приходящуюся на 1 атом:

$$L' = L \frac{M}{N} , \quad (4)$$

где L — скрытая теплота плавления единицы массы металла; M — атомный вес; N — число Авогадро. Предполагают, что на поверхности растущего кристалла атомы связаны такими же силами, как и силы связи между ними и внутри кристалла. На поверхности отсутствует определенное количество связей, и атомы энергетически неуравновешены, т. е. они обладают

большей энергией, чем атомы внутри кристалла. Эта разность энергии пропорциональна количеству отсутствующих связей, и для одного атома она составляет

$$\Delta L' = \frac{k-m}{k} L' = \frac{k-m}{k} L \frac{M}{N}, \quad (5)$$

где k — координационное число; m — количество ближайших соседних атомов до некоторого атома на поверхности; $k-m$ — количество отсутствующих связей.

Если допустить, что каждый атом поверхности имеет одинаковое количество ближайших соседних атомов, т. е. что $k-m = \text{const}$ и N — количество атомов на единицу площади, то для удельной поверхностной энергии на границе расплав—кристаллы можно записать

$$\sigma = n \Delta L' = n \frac{k-m}{k} L \frac{M}{N}. \quad (6)$$

Так как m и n зависят от кристаллографических плоскостей, то и σ тоже зависит от них. При $n = \frac{c}{a^2}$ это выражение можно переписать в виде

$$\sigma = \frac{c}{a^2} \cdot \frac{k-m}{k} L \frac{M}{N}, \quad (7)$$

а для гранецентрированной кубической решетки получим следующие уравнения для отдельных кристаллографических плоскостей:

$$\sigma_{(110)} = \frac{0,587}{a^2} L \frac{M}{N}; \quad (8)$$

$$\sigma_{(100)} = \frac{0,667}{a^2} L \frac{M}{N}; \quad (9)$$

$$\sigma_{(111)} = \frac{0,565}{a^2} L \frac{M}{N}. \quad (10)$$

Вычисленные для $\sigma_{(111)}$ значения поверхностной энергии удовлетворительно согласуются с экспериментальными и теоретическими данными для ряда металлов (табл. 1).

Ультразвуковая энергия при обработке металлов и сплавов, находящихся в двухфазном состоянии, изменяет их энергетическое состояние. При этом поверхностная энергия на границе кристаллы—расплав принимает вид

$$\sigma' = \frac{c'}{a^2} \cdot \frac{k-m}{k} \left(L \frac{M}{N} - \frac{M}{N} \cdot \frac{2\pi^2}{g} f^2 \xi^2 \right) = \frac{c'}{a^2} \cdot \frac{k-m}{k} \cdot \frac{k-m}{k} \times \\ \times \frac{M}{N} \cdot \left(L - \frac{J}{\rho c} \right), \quad (11)$$

1. Поверхностная энергия [дин/см] для металлов

Металл	Значение энергии		
	расчетное	экспериментальное	теоретическое
Zn	558	—	570
K	69	—	40
Fe	1167	2040	460
Pb	209	330	120
Al	611	930	250

где f — частота; ξ — амплитуда; I — интенсивность ультразвука; c — скорость ультразвука; ρ — плотность среды. Уменьшение удельной поверхностной энергии определяется выражением

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma' = \frac{2\pi^2}{g} \cdot \frac{c'}{a^2} \cdot \frac{k-m}{\kappa} \cdot \frac{M}{N} f^2 \xi^2. \quad (12)$$

При заданных частоте и амплитуде колебаний удельная поверхностная энергия возрастает у металлов с ростом координационного числа $\frac{k-m}{k}$ решетки, атомного веса M и уменьшением параметра решетки a .

Ультразвук уменьшает поверхностную энергию σ на межфазной границе кристаллы—расплав, что экспериментально доказано автором по скорости образования кристаллизационных зародышей I при спонтанной кристаллизации. Согласно теории флуктуации, эта скорость определяется формулой

$$I = K e^{-\frac{B\sigma^3}{T\Delta T^2}}, \quad (13)$$

где K — кинетическая постоянная кристаллизации; B — постоянная $\left(B = \frac{32T_s^2 M^2}{KL^2\rho} \right)$; T_s — температура плавления; k — постоянная Больцмана; M — молекулярный вес; ρ — плотность; ΔT — переохлаждение сплава и T — температура, при которой протекает кристаллизация. При логарифмировании уравнения (13)

$$\ln I = \ln K - \frac{B\sigma^3}{T} \cdot \frac{1}{\Delta T^2} \quad (14)$$

видно, что между $\ln I$ и $\frac{1}{\Delta T^2}$ существует линейная зависимость.

При малом переохлаждении температуру кристаллизации T можно принять равной температуре плавления T_s .

Скорость образования кристаллизационных зародышей I определяется выражением

$$I = \frac{1}{\tau V} \frac{1}{c \cdot \text{см}^3}, \quad (15)$$

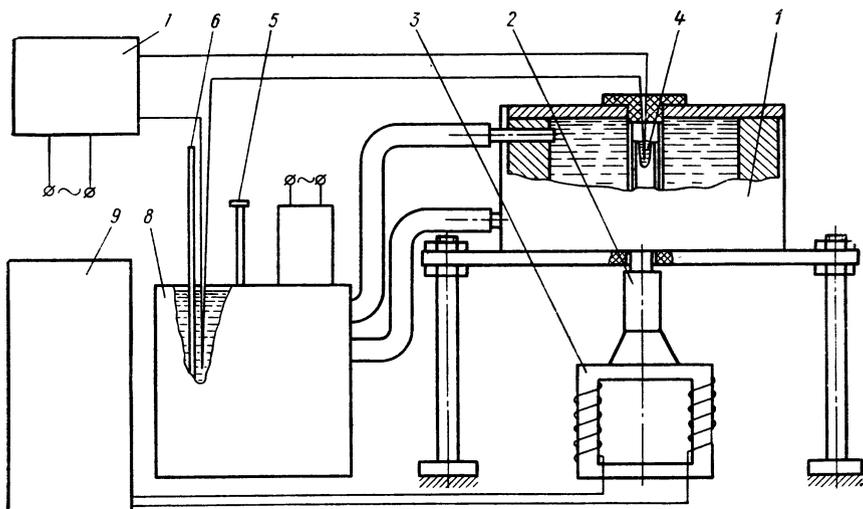


Рис. 14. Схема установки для записи кривых «время — температура»:

1 — термостатическая камера; 2 — ультразвуковой излучатель; 3 — магнитостриктор; 4 — термопара; 5 — контактный термометр; 6 — термометр; 7 — электронный потенциометр ЭПП-09; 8 — термостат; 9 — ультразвуковой генератор ГУ1,6

где τ — интервал метастабильности; V — объем исследуемого металла. Переохлаждение ΔT задается термостатом, включенным в схему экспериментального устройства для записи кривой «время — температура» (рис. 14). Металл, полученный путем вакуумной перегонки, олово в количестве 2—3 г, предварительно нагревают до температуры, превышающей на 3—4°С температуру плавления. Кристаллизация металла происходит в термостатической камере 1. При подключении магнитострикционного преобразователя 3 к генератору 9 кристаллизация олова протекает под воздействием ультразвука частотой 20,5 кГц и амплитудой 7,5 мкм. Электронным потенциометром 7 и термопарой 4 записывают кривую «время — температура», которая показывает разность между температурой металла и термостата 8.

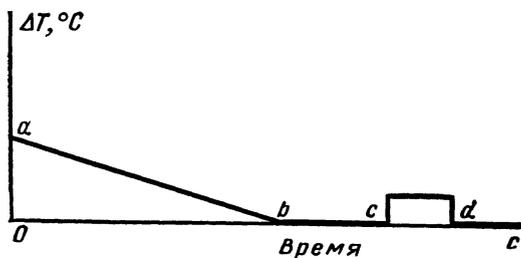


Рис. 15. Общий вид кривой «время — температура»

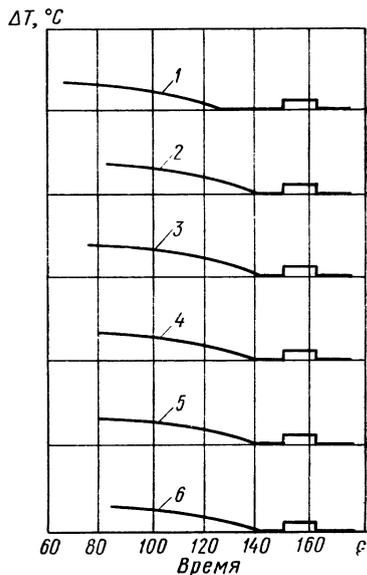
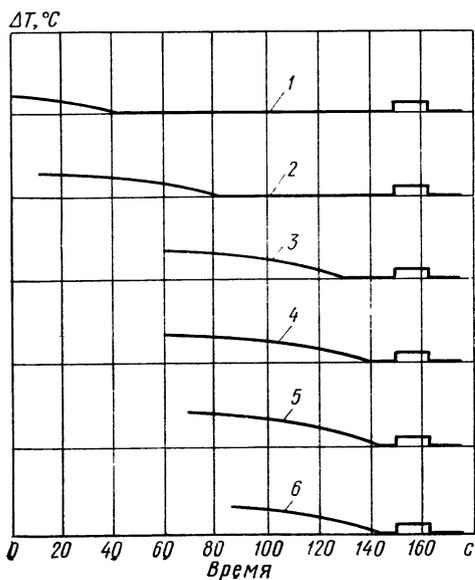


Рис. 16. Кривые «время — температура» при различных переохлаждениях без ультразвука:

1 — $\Delta T = 1,1^\circ \text{C}$; $V = 0,077 \text{ см}^3$; 2 — $\Delta T = 1,2^\circ \text{C}$; $V = 0,058 \text{ см}^3$; 3 — $\Delta T = 1,3^\circ \text{C}$; $V = 0,071 \text{ см}^3$;
4 — $\Delta T = 1,4^\circ \text{C}$; $V = 0,058 \text{ см}^3$; 5 — $\Delta T = 1,5^\circ \text{C}$; $V = 0,050 \text{ см}^3$; 6 — $\Delta T = 1,6^\circ \text{C}$; $V = 0,050 \text{ см}^3$

Рис. 17. Кривые «время — температура» при различном переохлаждении и воздействии ультразвука; обозначения см. на рис. 16

Переохлаждение задают с точностью $\pm 0,02^\circ \text{C}$ с помощью контактного термометра 5 термостата, температуру которого измеряют термометром 6, проградуированным через $0,1^\circ \text{C}$.

Общий вид кривой «время—температура» показан на рис. 15. За промежуток времени a до b происходит выравнивание температуры металла с температурой термостата при предварительно заданном переохлаждении. В интервале от b до c металл переохлажден до температуры термостата и находится в жидком состоянии, т. е. это интервал метастабильности $\tau(c)$, служащий для определения величины I . В точке c начинается кристаллизация, которая продолжается до точки d , и затем температуры металла и термостата снова выравниваются. На рис. 16 показаны зависимости «время—температура», полученные экспериментально при различных значениях ΔT и объема V металла. При увеличении переохлаждения уменьшается интервал метастабильности. При ультразвуковой обработке металла (рис. 17) этот интервал уменьшается более значительно.

По заданным значениям ΔT и после учета τ и вычисления I уравнения прямых линий (рис. 18), построенных по методу средних отклонений, принимают вид:

$$\text{без ультразвука } \ln I = 6,94 - 11,80 \frac{1}{\Delta T^2}; \quad (16)$$

$$\text{с ультразвуком } \ln I = 7,23 - 8,77 \frac{1}{\Delta T^2}. \quad (17)$$

Из этих уравнений получаем $\sigma = 0,61 \text{ Н/м}$ (без ультразвука) и $\sigma' = 0,55 \text{ Н/м}^2$ (с ультразвуком), а для кинетических констант кристаллизации — соответственно $K = 1,03 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{с} \cdot \text{см}^3}$ и $K' = 1,39 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{с} \cdot \text{см}^3}$. Таким образом, ультразвук уменьшает удельную поверхностную энергию на линии раздела фаз «кристаллы—расплавы» и увеличивает кинетическую постоянную кристаллизации.

Изменение удельной поверхностной энергии σ и кинетической постоянной кристаллизации под действием ультразвука доказано Ангеловым Г. С. и Длэгниковым И. Н. путем статистической обработки данных экспериментов, причем использована и линейная зависимость между скоростью образования кристаллизационных зародышей I и переохлаждением расплава $\frac{1}{\Delta T^2}$. Принимая во внимание, что из каждого зародыша вырастает только одно зерно и что кристаллизационные зародыши образуются в течение всего интервала кристаллизации τ , можно получить количество зародышей, образованных за единицу времени в единице объема в следующем виде:

$$I = \frac{I'}{\tau}, \quad (18)$$

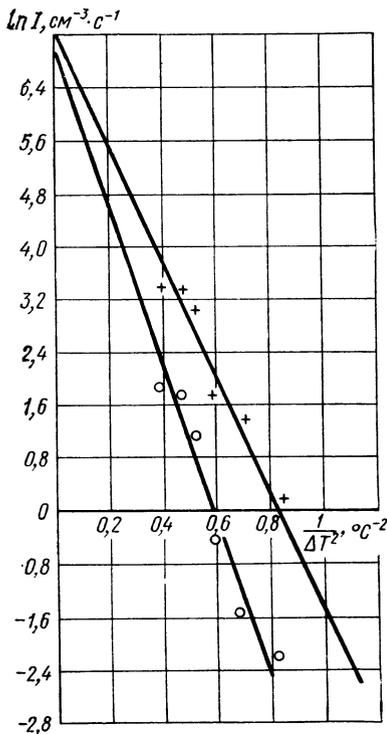


Рис. 18. Зависимость между $\ln I$ и $1/\Delta T^2$

○ — без ультразвука; + — с ультразвуком

Рис. 19. Схема кривых «время — температура охлаждения» для определенных параметров процесса кристаллизации

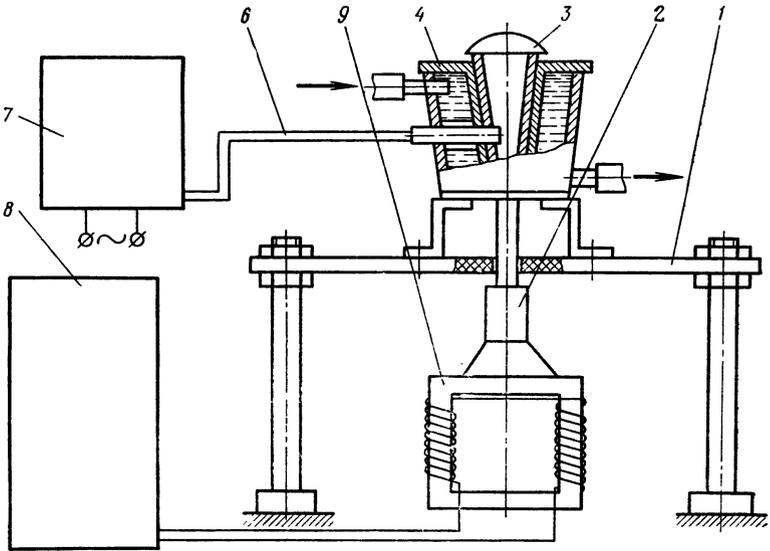
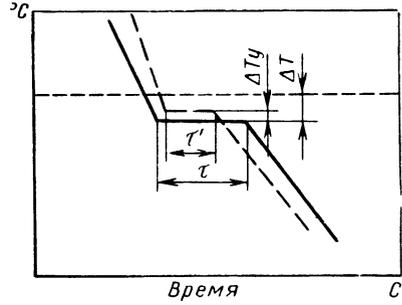


Рис. 20. Схема установки для определения параметров кристаллизации

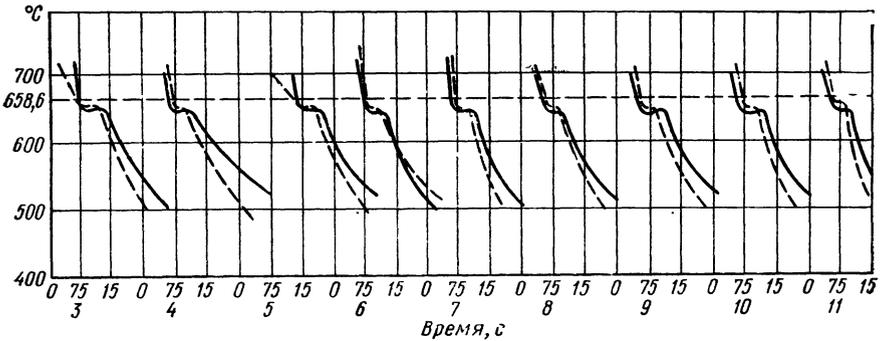


Рис. 21. Кривые «время — температура охлаждения» чистого алюминия А7: — — — без ультразвука; — — — с ультразвуком

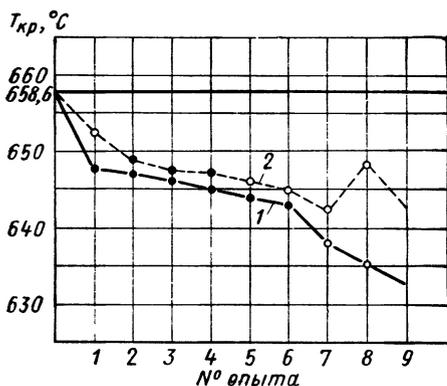


Рис. 22. Изменение переохлаждения $T_{кр}$ расплава:
1 — без ультразвука; 2 — с ультразвуком

где I' — среднее количество зерен в единице объема. Параметры процесса кристаллизации τ и ΔT определяются по кривым «время—температура» (рис. 19), а I' — металлографическим анализом по методу случайных хорд. При экспериментах использован алюминий А7 состава 99,7% Al, <0,16% He, <0,16% Si, <0,01% Cu, <0,05% Zn и <0,02% Ti. Предварительно расплавленный алюминий заливают в тигель 3 (рис. 20) охлаждающей камеры 4. Под стойкой 1 помещен магнитострикционный преобразователь 5 с излучателем 2, проходящим через дно тигля (частота 20,5 кГц, амплитуда 7,5 мкм). Преобразователь питается от генератора 8. Скорость охлаждения изменяют регулированием количества охлаждающей воды, с помощью терморпары 6 (хромельалюмель) и электронного потенциометра 7 (ЭПП-09) записывают кривые «время—температура» (рис. 21). Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Во всех случаях ультразвуковая обработка расплава во время кристаллизации приводит к уменьшению переохлаждения ΔT расплава и сокращению времени кристаллизации τ по сравнению с образцами, не обработанными ультразвуком (рис. 22). Среднее переохлаждение образцов без ультразвука равно 16,2%, а образцов, обработанных ультразвуком, — 11,8%, т. е. переохлаждение под действием ультразвука примерно

2. Значения постоянных кристаллизации

№ опытов	$\Delta T, ^\circ C$		τ, c	
	без ультразвука	с ультразвуком	без ультразвука	с ультразвуком
1	9,8	6,1	7,2	4,1
2	11,0	9,7	6,7	3,7
3	12,2	10,9	5,2	3,4
4	13,4	11,0	4,9	4,1
5	14,6	12,1	5,0	3,0
6	15,9	13,4	3,7	2,6
7	20,7	15,9	4,9	2,2
8	23,1	11,2	6,7	3,7
9	25,6	15,9	5,3	3,8

3. Влияние ультразвука на переохлаждение, количество зерен и скорость кристаллизации

№ опыта	Переохлаждение		Количество зерен		Скорость кристаллизации	
	без ультразвука	с ультразвуком	без ультразвука	с ультразвуком	без ультразвука	с ультразвуком
1	9,8	6,1	21,6	37,1	3,0	9,1
2	11,0	9,7	26,4	65,9	3,9	17,8
3	12,2	10,9	49,3	110,1	9,5	32,4
4	13,4	11,0	71,5	133,9	14,6	32,6
5	14,6	12,1	90,1	257,6	18,0	85,8
6	15,9	13,4	211,6	782,5	57,0	301,0
7	20,7	15,9	588,1	1024,7	120,0	456,0
8	23,1	11,2	861,0	1132,5	128,0	306,0
9	25,6	15,8	1333,4	1510,2	250,0	371,0

на 38% меньше переохлаждения без ультразвукового воздействия. Средняя продолжительность кристаллизации без ультразвука равна 5,5 с, а с ультразвуком — 3,4 с.

Металлографический анализ по методу случайных хорд выполнен для двух шлифов по трем снимкам, снятым в различных местах (по шесть хорд на каждом снимке). Результаты приведены в табл. 3.

По полученным экспериментальным данным вычисляют величины $\frac{1}{\Delta T^2}$ и $\ln I$, а по методу наименьших квадратов строят прямые линии (рис. 23). Параметры прямых линий: $a=28,5$; $b=3,46 \cdot 10^3$ (без ультразвука) и $a'=51,2$; $b'=2,15 \cdot 10^3$ (с ультразвуком). Принимая во внимание, что для чистого алюминия $T_s=658,6^\circ\text{C}$, $M=26,97$ г/моль, $K=1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/°С ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/°С), $L=2542$ эрг/моль ($2389 \cdot 10^{-8}$ эрг/моль ($397 \cdot 10^3$ Дж/кг)), $\rho=2,7$ г/см³ ($2,7 \cdot 10^3$ кг/м³), для удельной поверхностной энергии σ и постоянной кристаллизации получается соответственно $\sigma=29,6 \cdot 10^2$ Дж/м²; $K=11,5 \cdot 10^{18}$ см³·с (без ультра-

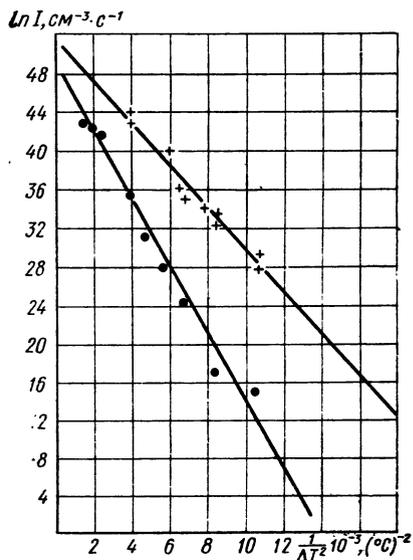


Рис. 23. Зависимость между $\ln I$ и $1/\Delta T^2$ (по Ангелову Г. С. и Дльгникову И. Н):

● — без ультразвука; + — с ультразвуком

звука) и $\sigma' = 20,0 \cdot 10^2$ Дж/м² и $K' = 17,0 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$ (при обработке с ультразвуком). Эти результаты также подтверждают, что ультразвук уменьшает поверхностную энергию межфазной границы «кристаллы—расплав» и увеличивает кинетическую константу кристаллизации.

Ультразвуковая обработка металлов в жидком состоянии и во время кристаллизации приводит и к изменению характера температурного поля. Возникновение акустических потоков в расплаве под действием ультразвука связано с потерей энергии в расплаве. Эти потери зависят от интенсивности ультразвука и акустических свойств среды. Акустические потоки вызывают интенсивное перемешивание расплава, выравнивание температуры и интенсификацию конвективной диффузии. При выравнивании температуры расплава увеличивается теплообмен со стенками сосуда и окружающей средой, в результате чего увеличивается скорость охлаждения. Установлено, например, что под действием ультразвука скорость охлаждения расплава от температуры перегрева до температуры кристаллизации в центральной зоне слитка увеличивается примерно в 6 раз, а в зонах у стенок кокиля — лишь в 2 раза. Это ускорение охлаждения объясняется непрерывным выравниванием температуры отдельных зон.

Физическая сущность влияния ультразвука на теплообмен при естественной или вынужденной конвекции заключается в проникновении акустических потоков в пограничный слой и ламинарный подслой, что приводит к деформации этих слоев, их турбулизации и перемешиванию. В результате этого в несколько раз (примерно в 4 раза) увеличивается коэффициент теплоотдачи α и скорость теплообмена.

Для большинства процессов в металлургии особо большое значение имеет диффузия. Имеется много экспериментальных данных, показывающих, что ультразвук ускоряет диффузионные процессы в металлических расплавах и на границе с твердой фазой. Однако это явление еще теоретически не объяснено. Приемлемым можно считать объяснение, согласно которому ускорение диффузии под действием ультразвука вызывается возможностью легкого перемещения атомов из одного устойчивого состояния в другое благодаря образованию кавитационных пузырьков. При этом учитывают также влияние вторичных эффектов — акустических потоков — и повышение температуры [2, 49] или акустическое давление, вызывающее турбулентное перемещение и разрушение пограничного слоя между жидкой и твердой фазами при ускорении диффузии на границе жидкость—твердое тело. Существует мнение [49], что ультразвук уменьшает энергию активации при диффузии, чем объясняется ускоренное разрушение титанового излучателя в расплавленном алюминии.

§ 3. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА РАСТВОРИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУЧЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ СПЛАВОВ

Ультразвуковая энергия, введенная в расплав несмешивающихся металлов, может изменить динамическое равновесие и привести к расширению границ растворимости или даже создать условия для растворения нерастворяющихся металлов. Хотя это явление еще не объяснено теоретически, практически оно подтверждено рядом экспериментов при производстве сплавов из нерастворимых и ограниченно растворимых в жидком состоянии металлов, например Al—Cd, Al—Pb, Fe—Pb, Zn—Pb, Fe—W, W—Ni и др. Кроме того, наряду с увеличением растворимости ультразвук интенсифицирует процесс растворения вследствие ускорения процессов диффузии.

Шмидт и Рол показали, что скорость растворения железа в цинке значительно возрастает при действии колебаний частотой 9 кГц.

Значительный эффект достигнут и при растворении вольфрама в стали, чугуна и никеле. При достаточной интенсивности ультразвука скорость растворения увеличивается более чем в 4 раза. Подобные результаты получены для сплавов Cu—Sb, Al—Pb и для дисперсных сплавов алюминия и двуокиси алюминия.

Увеличение растворимости приводит к качественным изменениям в сплавах, позволяя получать новые, неизвестные ранее сплавы из элементов, которые в обычных условиях не могут растворяться. Ультразвук обычно диспергирует частицы обоих сплавов, и после отвердевания компоненты бывают распределены равномерно. Такие сплавы известны под названием дисперсных и получены из алюминия и свинца, алюминия и двуокиси кремния, дюралюминия и стали. Ультразвук способствует также диспергированию неметаллических частиц в металлических расплавах. Так, путем диспергирования графита получена самосмазывающаяся антифрикционная бронза.

Ультразвук используют и для микролегирования металлов и сплавов. При диспергировании излучателя ультразвука, изготовленного из специально подобранного металла, и осуществляется микролегирование.

§ 4. МОДИФИЦИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Диспергирование твердых частиц и активация примесей (металлических и неметаллических) в расплаве под действием ультразвука нашли практическое применение при модифицировании металлов и сплавов. Эксперименты показывают, что эффект введения модификатора в расплав значительно увеличивает

ется, если модифицирование сопровождается ультразвуковой обработкой расплава.

Модифицирующий эффект ультразвука хорошо изучен для алюминия и его сплавов. Установлено [2, 49], что когда сплав алюминия с 20% кремния модифицируют солями натрия при обработке ультразвуком, получается более равномерное распространение модифицирующего эффекта по всему металлу и более мелкозернистая структура. При модифицировании алюминия цирконием применение ультразвука позволяет примерно в 10 раз увеличить модифицирующий эффект. Вместо добавки 0,8% циркония можно осуществлять модифицирование в ультразвуковом поле с добавкой только 0,08—0,15% циркония. При модифицировании алюминия мелкозернистым порошком CaCO_3 и Al_2O_3 [2] установлено, что для обеспечения модифицирующего действия необходимо применять ультразвуковые колебания, превышающие определенный порог интенсивности. Этот порог уменьшается при увеличении количества примесей. Аналогичное уменьшение пороговой мощности и получение более мелкозернистой структуры достигается при модифицировании алюминия вольфрамом. Эффективное модифицирование сплава из алюминия и меди и чистого алюминия АВ000 в ультразвуковом поле достигнуто с применением титана в качестве модификатора, а модифицирование силумина — с применением натрия. Модифицирующее действие натрия и ультразвука объясняется уменьшением поверхностного натяжения на границе «расплав — кристаллы».

Однако имеются и противоположные данные. При обработке ультразвуком силумина, модифицированного натрием (12—16% Si), установлено, что модифицирующий эффект уменьшается и структура эвтектики укрупняется, а первоначально выделенные игольчатые кристаллы кремния уменьшаются под действием ультразвука. Эти результаты нуждаются в более глубоком анализе и не могут служить отрицанием модифицирующего действия ультразвука.

Ультразвук используют для усиления действия модификаторов, уменьшения их количества и ускорения процесса модифицирования. Положительные результаты получены при обработке ультразвуком расплавов магния и магниевых сплавов, модифицированных молибденом, стали Х27 с модификатором 0,05% магния и стали 40 с модификатором 0,1 титана, чугуна, висмута и цинка, модифицированных натрием и магнием, олова и цинка с двуокисью кремния, висмута с Al_2O_3 [2, 49] и др.

Указанные выше явления при модифицировании металлов и сплавов можно объяснить следующим образом. Когда модификатор образует активные зародыши в расплаве, ультразвук может способствовать их диспергированию и увеличению количества, а также ускорять образование зародышей из-за уменьшения поверхностного натяжения на границе их раздела с рас-

плавом. При модификаторах из неизоморфных веществ, т. е. неактивных примесей, ультразвук способствует их активации и путем уменьшения поверхностного натяжения на границе раздела с расплавом.

§ 5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕГАЗАЦИЯ И РАФИНИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Для дегазации металлических расплавов используют химические методы, вакуумирование, центрифугирование и др. Наряду с этим применение находится дегазация с помощью ультразвука. В результате экспериментов установлено, что ультразвуковая обработка приводит к сильной дегазации жидкостей и металлических расплавов, особенно цветных металлов и сплавов. Обнаружено, что под действием ультразвука растворенный газ сначала выделяется в виде пузырьков в зонах разрежения ультразвуковых волн, после этого пузырьки соединяются и при достижении достаточно большого размера всплывают на поверхность. Для полной дегазации металла обработка ультразвуком должна начинаться при температуре, немного (примерно до 50° С) превышающей температуру плавления, и должна продолжаться до полной кристаллизации металла. Доказано также, что дегазация слитков алюминия и магниево-алюминиевых сплавов эффективна только при поддержании постоянной температуры расплава в течение всего времени обработки ультразвуком. Установлены и условия для дегазации — определенная мощность ультразвука и продолжительность обработки. Дегазацию можно осуществлять за значительно более короткое время и при меньшей мощности ультразвука. Подобные различия в условиях дегазации были отмечены многократно. В ряде случаев рассматривали действие ультразвука на дегазацию в зависимости от режима обработки, материала излучателя, совместного действия вакуума и ультразвука, вида сплавов, температуры и других параметров, от которых зависит эффект дегазации. Для сравнения во многих случаях использовали дегазацию другими методами — продувание хлором, обработку флюсами и дегазаторами, вакуумирование и др. В некоторых случаях в качестве критерия дегазации сплавов принимают повышенную плотность структуры, получаемую после обработки расплава ультразвуком, отсутствие газовых раковин в отливках. Эти критерии применяют главным образом в отношении металлов и сплавов, в которых очень трудно определить количественное содержание газов, например, в чугунах, сталях, медных сплавах.

Установлено, что после обработки ультразвуком расплавов из серого чугуна, белого чугуна [5] и чугуна с шаровидным графитом отливки имеют сосредоточенные усадочные раковины и повышенную плотность, а газовых раковин у них нет.

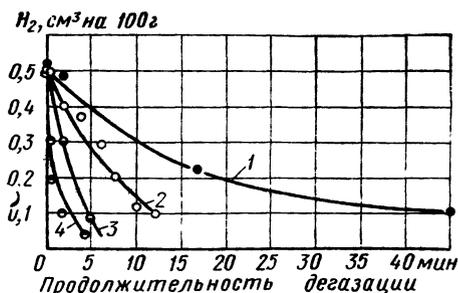
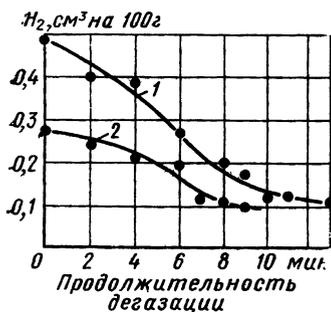


Рис. 24. Зависимость содержания водорода в сплаве Ал9 от продолжительности воздействия ультразвука:

1 — без ультразвука; 2 — с ультразвуком

Рис. 25. Кинетика дегазации сплава Ал9 в зависимости от материала излучателя:

1, 2, 3 — соответственно расплавленный кварц, ниобий и титан (давление $1 \cdot 10^{-1}$ Мн/м²); 4 — титан (давление 1 кПа)

Наиболее глубокие и систематические исследования по дегазации металлов выполнены для алюминиевых сплавов [2, 49]. Установлено [2, 49], что интенсивность ультразвука в 7—8 Вт/см² в состоянии за очень короткое время вызвать дегазацию сплавов Ал40 и Ал9 и уменьшить содержание газов на несколько единиц. При этом, как это видно из рис. 24 [2, 49], различная степень газонасыщенности не изменяет общего характера кривых выделения газов при обработке ультразвуком (частота 20 кГц при 720—730° С, излучатель из ниобиевого сплава ВН1). Максимальная скорость выделения газов наблюдается через некоторое время после начала процесса. Этот факт послужил основой для построения гипотезы кинетики процесса выделения водорода. Вначале ультразвук действует на пузырьки нерастворенного водорода, которые коагулируют и всплывают на поверхность металла. После этого происходит выделение основной части водорода, находящегося в растворенном состоянии. Из этого водорода образуются маленькие пузырьки, которые постепенно увеличиваются и всплывают. Скорость дегазации снова уменьшается к концу процесса, когда количество оставшегося растворенного водорода уже мало.

Процесс дегазации зависит также от материала излучателя (рис. 25), интенсивности ультразвука и скорости диспергирования, при которой получают интерметаллические соединения. Последние играют роль зародышей кавитации, которая возникает тем легче, чем больше зародышей имеется в расплаве.

Возможно также, что дегазация алюминия и его сплавов вызывается и связыванием растворенного водорода с титаном или ниобием, которые склонны поглощать большие количества

водорода. Однако, как показывают расчеты [2], дегазация в этом случае будет незначительной.

Большой интерес для практики представляют результаты исследований влияния температуры расплава при ультразвуковой обработке на выделение газов. Обычно растворимость газов увеличивается с повышением температуры, особенно алюминия и его сплавов. Поэтому при ультразвуковой дегазации надо обеспечивать создание таких условий, при которых выделение газов будет больше их поглощения. Если расплав сильно перегрет, то скорость поглощения резко возрастает и дегазация не возникает. Очень низкие температуры затрудняют дегазацию вследствие увеличения вязкости расплава. Поэтому для каждого металла или сплава существует определенный температурный интервал, при котором дегазация ультразвуком протекает наиболее эффективно.

Для оценки степени дегазации ультразвуком алюминиевого сплава АЛ9 был сопоставлен этот метод дегазации с рафинированием хлористым цинком и вакуумированием [2]. Кинетические кривые (рис. 26) показывают, что дегазация ультразвуком более эффективна, чем рафинирование хлористым цинком и вакуумирование, а при сочетании ультразвука и вакуума получается наибольший эффект дегазации.

В литературе имеются и противоположные данные о дегазирующем действии ультразвука. Так, например, при вакуумной электродуговой переплавке с отработанными электродами [2] жаростойких сплавов на никелевой основе ЭИ437БУ, ХН56ВМКЮ, ЭП220 методом химического анализа измеряли содержание газов в электродах и в полученных слитках. Ультразвуковая обработка не оказала заметного влияния на общую газонасыщенность исследованных сплавов. Обработка ультразвуком коррозионностойкого сплава на никелевой основе Н85СДЗЛ вызывает образование газовых пузырей. При уменьшении скорости переплава количество и размеры пузырей увеличиваются. Это происходило, вероятно, вследствие образования твердой корки на поверхности стального слитка и последующей дегазации внутренней

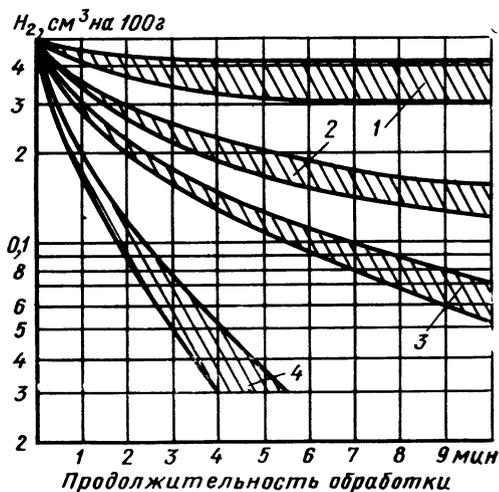


Рис. 26. Кинетика дегазации сплава АЛ9:

1 — хлористым цинком; 2 — вакуумированием; 3 — при воздействии ультразвука; 4 — при воздействии ультразвука в вакууме

части при обработке ультразвуком. Во время кристаллизации наблюдалась более высокая газовая пористость, чем в слитках, кристаллизовавшихся без обработки ультразвуком.

Однако процесс дегазации металлических расплавов ультразвуком еще недостаточно изучен. Наиболее достоверной считают следующую гипотезу: под влиянием ультразвука возникает в расплаве кавитация. В образованные кавитационные пустоты проникает растворенный газ. При замыкании кавитационных пузырей этот газ не успевает снова раствориться в металле и образует газовые пузырьки. У алюминия водородные атомы в этих пузырьках соединяются в молекулы. Зародыши газовых пузырьков образуются и в полупериоде разрежения при распространении упругих ультразвуковых колебаний в расплаве, так как при уменьшении давления уменьшается растворимость газов. После этого газовые пузырьки под влиянием колебательных движений коагулируют и когда достигают определенных размеров, всплывают. Ускорение диффузии под действием ультразвука тоже может стимулировать нарастание газовых пузырьков. Однако в этих условиях дегазирующее влияние ультразвука можно ожидать только тогда, когда пузырьки могут всплывать на поверхность, т. е. когда вязкость металла мала. Такие условия создаются только в металлах с постоянной вязкостью т. е. при постоянной температуре. При медленном отвердевании и малом содержании газов возможна дегазация ультразвуком. Однако обычно ультразвуковая обработка при отвердевании приводит к появлению дополнительной пористости, так как образовавшиеся пузырьки не могут выделяться из сплава [2].

Возможность стимулирования дегазации ультразвуком путем уменьшения вязкости расплава предполагалась уже давно, но практически доказана значительно позднее [3].

Уменьшение поверхностной энергии на границе расплав — газ отражается на скорости образования газовых пузырьков. Согласно Френкелю, интенсивность зарождения флуктуации новой (газовой) фазы путем преодоления сил противодействия между частицами жидкости определяется выражением

$$I = Ae^{-\frac{4}{3}\pi r^3\sigma} / kT, \quad (19)$$

где A — постоянная величина; k — постоянная Больцмана; T — температура и σ — поверхностная энергия. При уменьшении σ должна увеличиться интенсивность возникновения пузырьков. Давление p в газовых пузырьках, необходимое для их устойчивого существования, определяется формулой

$$p = p_{ат} + \gamma H + \frac{2\sigma}{r}. \quad (20)$$

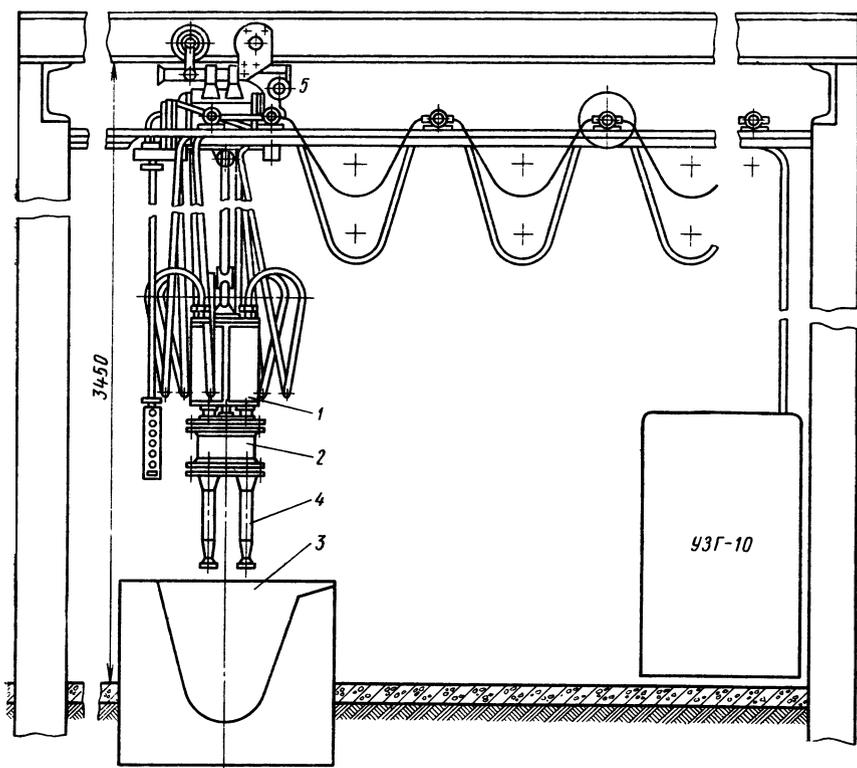


Рис. 27. Схема установки ультразвукового дегазатора УЗД-200М [52]

Из формулы следует, что применение ультразвука способствует их стабилизации и всплыванию. Поэтому при построении механизма ультразвуковой дегазации надо учитывать и изменения физических свойств расплава.

Ультразвуковая дегазация металлов уже давно вышла из сферы лабораторных и промышленных испытаний. Существуют промышленные установки для дегазации ультразвуком. В СССР разработана серия дегазаторов УЗД-100, УЗД-200М и УЗД-300 [49], питаемых ультразвуковыми генераторами УЗГ-10А. Первые два дегазатора имеют по четыре параллельно соединенных магнитострикционных преобразователя типа ПМС-7А с обратной акустической связью, а третий имеет восемь преобразователей типа ПМС-15А. Излучатели изготовлены из титана. Дегазатор УЗД-100 выполнен в двух вариантах — на тележке и подвесной, он может обслуживать печи, расположенные в радиусе 10—15 м от генератора. Второй дегазатор УЗД-200М подвешивают к мостовому крану или тельферу, а третий — переносного типа, устанавливаемый при работе на кожухе печи.

Магнитострикционные преобразователи 1 (рис. 27) помещены в охлаждаемом сосуде 2 и передают титановыми излучателями 4 ультразвуковые колебания металлу 3 в печи. Тельфер 5, несущий преобразователи, может перемещаться вдоль несущей балки. Связь магнитостриктора с ультразвуковым генератором осуществляется с помощью гибких кабелей и шлангов.

Ультразвук способствует также выделению газов, связанных в нерастворимых твердых химических соединениях — окислах и нитридах, а также других твердых неметаллических включений, например, сульфидов, т. е. рафинированию металлов. Это подтверждается многочисленными опытами, при которых полунные слитки после ультразвуковой обработки расплава имели значительно меньше неметаллических включений, чем слитки, кристаллизовавшиеся без ультразвука. При кристаллизации некоторых металлов и сплавов с примесями под действием ультразвука обнаружено вытеснение примесей. Это дало повод предполагать, что ультразвук можно использовать для рафинирования металлов и сплавов от неметаллических включений. Механизм очистки алюминиевых сплавов представляется следующим образом. Ионы растворенного водорода соединяются в комплексы с окислами алюминия, адсорбируются на поверхности газовых пузырей и всплывают вместе с ними. Таким образом, процесс выделения газов протекает одновременно с очисткой от неметаллических примесей.

Уменьшение вязкости расплава под действием ультразвука приводит и к уменьшению скорости всплывания твердых примесей согласно формуле Стокса

$$v = \frac{2}{9} g \frac{1}{\eta} r^2 (\rho_m - \rho_{пр}). \quad (21)$$

где вязкость расплава входит в знаменатель. При прочих равных условиях (размер частиц r и разность плотностей металла и примесей $\rho_m - \rho_{пр}$) меньшая скорость v при обработке ультразвуком обеспечивает лучшее рафинирование, а также очистку от примесей значительно меньших размеров. Этому способствуют также акустические потоки и радиационное давление.

Ультразвуковое рафинирование металлов и сплавов находит практическое применение при зонной плавке, при которой получают особо чистые вещества.

Интересные результаты получены при выделении серы из чугуна при обработке расплава ультразвуком. Чугун (560—660 г) составом 4,0% С, 0,6% Si, 0,2% Mn и 0,22% S расплавляется в графито-шамотном тигле в печи с силиковыми нагревательными элементами. В качестве десульфатора используют 2%-ный порошок технически чистого марганца (99% Mn), который перед опытом кладут на дно тигля под чугунной чушкой. Ультразвук (частота 22,1 кГц) вводят в металл при температурах 1200 и 1350°С сверху через свободную поверхность.

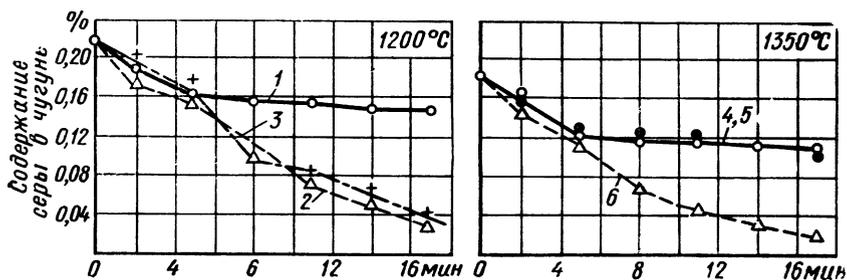


Рис. 28. Изменение содержания серы в чугунае

спустя 5 мин после расплавления, и через 3 мин отбирают образец засасыванием в кварцевую трубочку диаметром 3 мм. Результаты анализа (рис. 28) показывают, что при ультразвуковой обработке (кривые 2, 3 и 6) процесс выделения серы резко интенсифицируется (за 12 мин содержание серы понижается с 0,22 до 0,028—0,06%) по сравнению с рафинированием без ультразвука (кривые 1, 4 и 5 показывают понижение содержания серы за 12 мин с 0,22 до 0,142%).

Для объяснения процесса десульфизации чугуна рассматривают действие различных сил на твердые частицы (MnS) в поле упругих колебаний среды. Вычисляют размер r частиц, приводимых силой трения в колебательное движение, по формуле

$$r = \sqrt{\eta \frac{k}{\rho f}}, \quad (22)$$

где η — вязкость чугуна; ρ — плотность частиц; f — частота (22 кГц) и k — постоянная величина ($k=3,5$).

Частицы размером больше 1 мкм практически не участвуют в колебательном движении, а частицы размером меньше 0,5 мкм увеличиваются в расплаве и колеблются вместе с ним. Амплитуда колебаний частиц различных размеров различна. При столкновении частицы коагулируют, их размеры увеличиваются, что облегчает их всплывание на поверхность расплава. Этому всплыванию способствуют еще радиационное давление и силы Бьеркнеса.

Коагулирование частиц, не участвующих в колебательном движении, происходит под действием гидродинамических сил притяжения.

Наряду с указанными способами рафинирования авторы рассматривают и действие кавитации. Твердые частицы MnS , на которых образуются газовые пузыри, представляют собой готовые зародыши кавитации. Выделение этих пузырей способствует флотации сульфидных включений. Таким образом протекает значительная часть процесса десульфирования.

§ 6. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Большое разнообразие металлов и сплавов и различная эффективность применения ультразвука при их кристаллизации обуславливают необходимость рассмотрения основных результатов воздействия на отдельные металлы и сплавы.

Первые опыты по исследованию влияния ультразвука на кристаллизацию выполнены с различными цветными металлами и техническими сплавами и с кристаллическими солями. Обработка ультразвуком оказалась особенно эффективной для уменьшения размера зерна металлов, сплавов и солей. При малой мощности и несовершенстве способа ввода ультразвука при обработке чистых металлов олова, цинка, алюминия, висмута и кадмия дендритное строение кристаллов увеличивалось или же почти не изменялось и увеличивалось переохлаждение расплава. Позднее при исследовании легкоплавких сплавов висмута, олова и других элементов, которые в обычных условиях образуют дендритную структуру, установлено, что уменьшается длина дендритных игл или при достаточной интенсивности ультразвука дендритная структура полностью устраняется, увеличивается растворимость железа в цинке, структура сурьмы и кадмия измельчается. При этом хрупкость сурьмы уменьшается, а ее твердость увеличивается. Измельчение структуры объясняют разрушением кристаллов в момент их образования и увеличением числа кристаллизационных зародышей за счет обломков кристаллов. При ультразвуковой обработке силумина разрушались иглы кремния, но твердость практически не изменялась, а при обработке дюралюминия исчезала сетчатая структура вторичных примесей и нарастала твердость. Установлено, что эффективность обработки ультразвуком зависит как от его интенсивности, так и от частоты, но последняя играет подчиненную роль и влияет только на те кристаллы, которые достигли определенного размера. Это приводит к выводу, что измельчение кристаллов обусловлено силами трения между ними и расплавом. Расчеты показывают, что эти силы имеют величину порядка прочности кристаллов. Противоположные результаты получены при обработке цинка ультразвуком, которая приводит к сильному измельчению его.

В экспериментах также получено измельчение структуры цветных металлов, бинарных магниеводюралюминиевых сплавов с содержанием алюминия от 4 до 12% и при непрерывном литье слитков дюралюминия диаметром 290 мм. Более мелкая структура, полученная в последнем случае, приводит к увеличению прочности на сжатие примерно на 3 кгс/см² по сравнению со сплавами, не обработанными ультразвуком. Положительные результаты (измельчение структуры и уменьшение средней продолжительности кристаллизации) получены при других экспе-

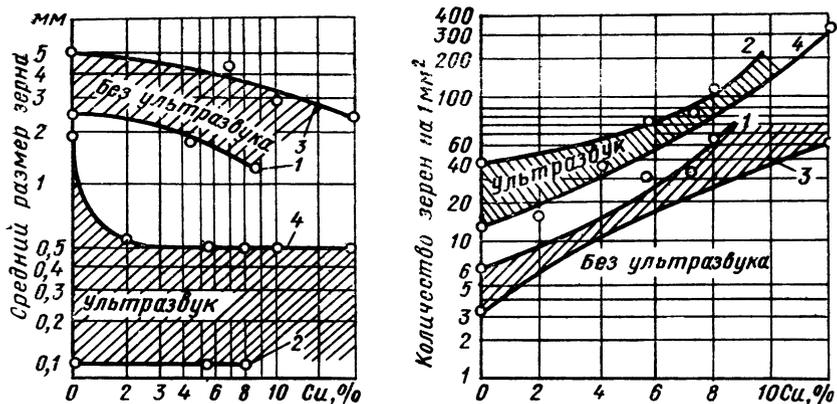


Рис. 29. Зависимость среднего размера и количества зерен на 1 мм² в алюминий-медном сплаве от содержания меди и способа обработки расплава:

1 — контрольная проба; 2 — с ультразвуком и модификатором; 3 — с модификатором; 4 — с ультразвуком

риментах с цинком, свинцом, дюралюминием, сплавом Вуда, органическими веществами и монокристаллами, на основе чего действие ультразвука объясняют диспергированием твердой фазы во время кристаллизации.

Первые эксперименты промышленного применения проводились при полунепрерывном литье алюминия. Большой вклад в изучение кристаллизации под действием ультразвука внесли советские авторы своими исследованиями легкоплавких металлов и сплавов — алюминия и его сплавов, магниевых и медных сплавов и тугоплавких металлов [2, 49]. Наряду с этим во многих странах проведены исследования, результаты которых также способствовали развитию теории и практики ультразвуковой обработки при кристаллизации цветных металлов и сплавов [3—5].

Обычно в микроструктуре металлов и сплавов, кристаллизовавшихся под действием ультразвука, наблюдается многократное измельчение, особенно при сочетании этого воздействия с модифицированием (рис. 29). Однако иногда ультразвук действует избирательно. Так, в некоторых сплавах с эвтектикой обработка ультразвуком оказывает сильное влияние только на первично выделенную фазу, а эвтектика укрупняется или на нее ультразвуковая обработка влияет очень слабо [49]. При других эвтектических сплавах получается измельчение и эвтектики [2]. Это свидетельствует о сложном механизме действия ультразвука в некоторых случаях, для которых трудно подобрать оптимальный режим обработки. Обычно существенное изменение структуры металла наступает при каком-то критическом значении интенсивности ультразвука, различном для различных ме-

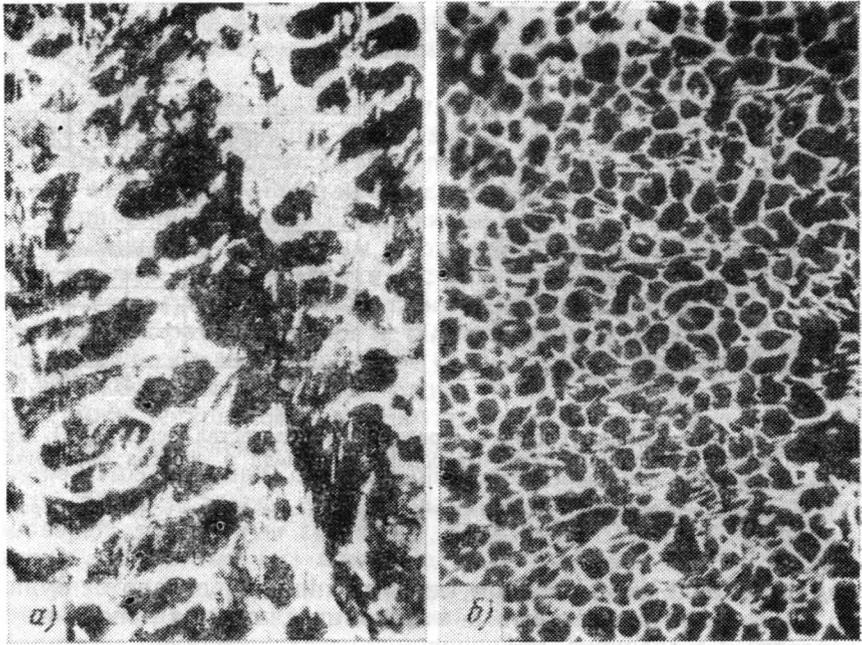


Рис. 30. Влияние ультразвука на структуру белого чугуна:

a — контрольная проба; *б* — проба, обработанная ультразвуком во время кристаллизации

таллов и сплавов. При уменьшении интенсивности ослабляется влияние ультразвука, уменьшается объем, в котором проявляется его влияние, размер зерна постепенно увеличивается, и после этого структура становится игольчатой или дендритной. С другой стороны, превышение критического значения интенсивности только стабилизирует эффект улучшения структуры, но она уже больше существенно не изменяется.

Изменение структуры металлов под действием ультразвука приводит и к изменению их механических свойств. Так, например, при этом значительно умень-

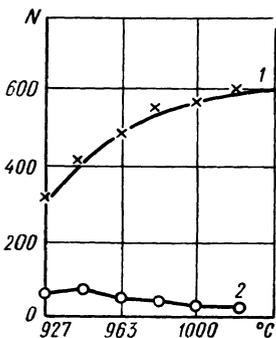


Рис. 31. Влияние ультразвука на количество графитовых включений N на 1 мм от поверхности шлифа в зависимости от температуры отжига:

1 — после обработки расплава ультразвуком; *2* — контрольная проба

шается хрупкость сурьмы, а твердость, ее увеличивается с *HB34* до *HB52*. Твердость дюралюминия при этом возрастает с *HB78* до *HB96* и предел текучести на 3 кгс/мм². Механические свойства различных промышленных сплавов изменяются в довольно широких пределах.

Трудности при введении ультразвука в расплавы тугоплавких металлов и сплавов, и особенно сталей, явились причиной того, что исследования влияния ультразвука на характер кристаллизации и механические свойства этих металлов начали проводить значительно позднее. Ряд исследований посвящен влиянию ультразвука на кристаллизацию белого, серого чугуна и чугуна с шаровидным графитом [5, 49].

При обработке ультразвуком во время кристаллизации расплава белого чугуна получили мелкозернистую структуру перлита и сильно развитую решетку цементита (рис. 30). Хотя трудно точно оценить степень измельчения структуры, можно все же утверждать, что средний размер перлитных зерен в чугуне, обработанном ультразвуком, значительно меньше размеров зерен в чугуне, не подвергавшемся такой обработке. Поверхность раздела двух структурных компонентов цементит — перлит значительно увеличивается. Такой чугун, подвергнутый отжигу, графитизируется за значительно более короткое время (продолжительность первой стадии уменьшается на 35—40%, а второй — на 30—40%), имеет более однородную металлическую массу и значительно большее количество графитовых включений (рис. 31). При одинаковой степени графитизации (табл. 4) контрольных отливок и отливок, обработанных ультразвуком ($C=2,98\%$; $Si=0,81\%$; $Mn=0,40\%$; $P=0,09\%$ и $S=0,11\%$), отжигавшихся во время первой стадии в соляной ванне (1050°С), а во время второй стадии — в камерной электрической печи, механические свойства образцов чугуна, обработанного ультразвуком, оказались лучше.

4. Продолжительность отжига и механические свойства ковкого чугуна после обработки расплава ультразвуком

Условия кристаллизации	Продолжительность отжига, мин		Механические свойства		
	I стадия	II стадия	$\sigma_{B'}$, кгс/мм ²	δ , %	<i>HB</i>
Контрольный образец, не обработанный ультразвуком	70	10	40,9	2,9	203
При обработке расплава ультразвуком	35—40	6	45,4	4,8	177

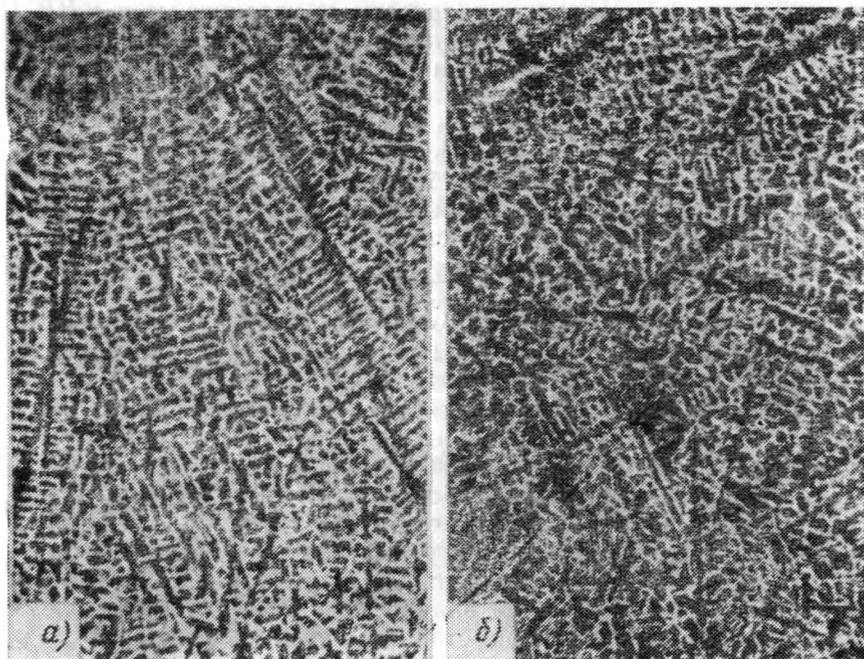


Рис. 32. Дендритная структура белого чугуна ($\times 70$):
а — на поверхности отливки; б — в центре отливки

Лучшие механические свойства чугуна получаются и при одинаковой продолжительности отжига контрольных отливок и отливок, обработанных ультразвуком во время второй стадии. Степень графитизации чугуна, обработанного ультразвуком, больше. Эти результаты показывают, что при ультразвуковой обработке исходного белого чугуна можно сократить продолжительность отжига и улучшить механические свойства ковкого чугуна благодаря созданию более благоприятной исходной структуры [5].

Белый чугун склонен к дендритной кристаллизации (рис. 32). Поэтому на нем очень хорошо проявляется влияние ультразвуковой обработки металлического расплава. При осуществлении оптимального режима полностью устраняется дендритная структура и происходит объемная кристаллизация. Подвод ультразвука в расплав надо начинать еще до начала процесса кристаллизации, причем тем раньше, чем больше скорость охлаждения. Если обработку ультразвуком задержать, то в середине отливки образуется поверхностная твердая дендритная зона и зернистая структура (рис. 33). Эта зона не может быть разрушена ультразвуком. При большой толщине граница между этой зо-

ной и зернистой структурой резко очерчена и гладкая. Когда образовавшаяся корка тонка, то ее можно разрушить ультразвуком полностью или же могут сохраниться отдельные небольшие участки ее с плавным переходом от дендритной к зернистой структуре (рис. 34). Обломки дендритов уносятся акустическими потоками в расплав и служат в качестве кристаллизационных зародышей. Если их размеры очень велики, то они могут остаться внутри отливки и сохранить свою дендритную структуру (рис. 35).

Ультразвук значительно влияет на структуру и свойства серого чугуна. Установлено, что при кристаллизации серого чугуна состава 3,0—3,4% Si и 1,5—2,2% Mn под действием ультразвука получается однородная структура, равномерная твердость по сечению, повышенная плотность и отсутствие газовых раковин. Механические свойства и пластичность повышаются в полтора — два раза.

Изменения в структуре и свойствах серого чугуна свидетельствуют о том, что ультразвук способствует кристаллизации более стабильной системы железо — углерод, увеличивая степень графитизации. Это объясняется повышенной скоростью образования графитовых зародышей и диспергированием графитовых включений, а их более равномерное расположение в металлической матрице повышает механические свойства.

Графитизирующее действие ультразвука еще более четко проявилось при исследовании чугуна с шаровидным графитом. Ультразвук способствует кристаллизации более стабильной системы, увеличивает количество графитовых включений и уменьшает их размер, а металлическая основа становится ферритной. Наибольший эффект действия ультразвука достигается при ультразвуковой обработке с начала выделения первичных кристаллов и до образования некоторого количества эвтектики или до полного затвердевания. При этом эвтектическая кристаллизация протекает с уменьшенным переохлаждением. Если интенсивность ультразвука при такой обработке недостаточна, то в отливке получают зоны с различной структурой — ферритной у излучателя, ферритно-перлитной и перлитно-цементитной — и постепенно увеличиваются размеры графитовых включений. Рост интенсивности ультразвука увеличивает зону его эффективного воздействия. Возможности получения чугуна с шаровидным графитом с ферритной или с ферритно-перлитной металлической основой путем ультразвуковой обработки и без термической обработки отливок представляют определенный интерес для практики, хотя пока этот метод еще не внедрен в промышленность.

Большие исследования выполнены и по кристаллизации стали под действием ультразвука (2, 49). Ввиду практической необходимости в улучшении механических и технологических свойств для экспериментов использовали стали ферритного,

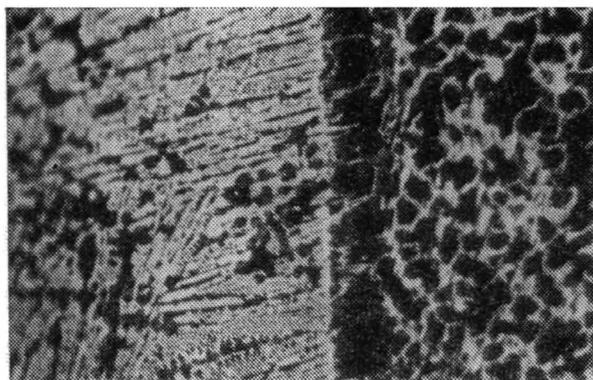


Рис. 33. Структура белого чугуна, обработанная ультразвуком после начала кристаллизации ($\times 135$) [5]

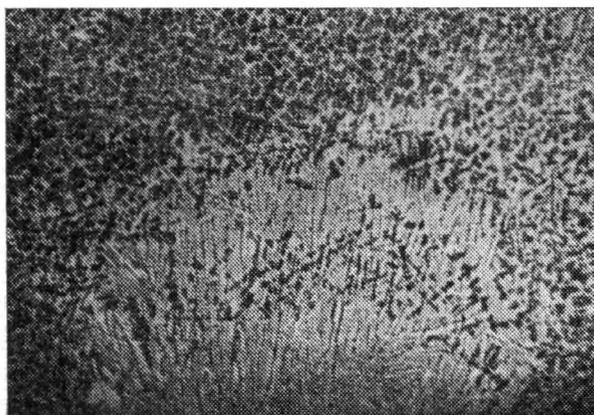


Рис. 34. Участок с дендритной структурой поверхности отливки, не разрушенной ультразвуком [5]

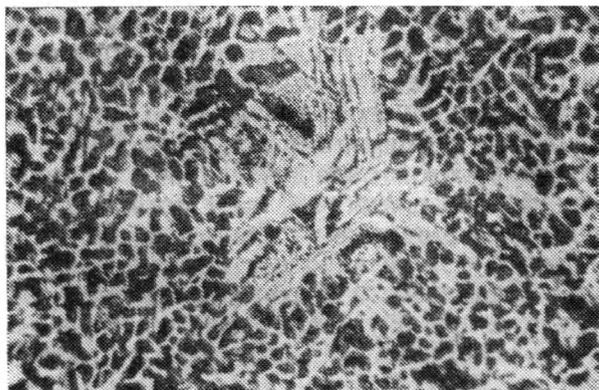


Рис. 35. Неразрушенные дендриты в центре отливки [5]

аустенитного и карбидного класса, углеродистые, низколегированные, жаропрочные, коррозионностойкие и другие стали.

Углеродистые стали (20, 30, 40) и низколегированные (30ХГС, 35ХМ, 40ХМ, 45Г2, 55С2, 40ХН56, СХНМ) стали склонны к образованию крупнокристаллической структуры. Стали с содержанием углерода 0,4% плохо обрабатываются ультразвуком и при этом не изменяют свою структуру [2, 49]. При обработке стали 40 ультразвуком повышенной мощности получается измельчение зерна и разрыв ферритной решетки. Существенные изменения в структуре под действием ультразвука, выражающиеся в многократном уменьшении размера зерен, наблюдаются у сталей У8 и У10, а также стали 40 в комбинации с модифицированием 0,08—0,1% титана. Изменения в структуре приводят к увеличению прочности на растяжение, предела текучести и твердости на 15—50% и уменьшению пластических свойств сталей. При этом разница в свойствах сталей частично сохраняется и после термической обработки.

Низколегированные стали тоже по-разному обрабатываются ультразвуком. Влияние последнего растет с увеличением содержания углерода в стали. При ультразвуковой обработке этих сталей повышается их пластичность на 30—40% и прочность примерно на 10%.

Ферритные стали типа Х13, Х18, Х18Т, Х27, С3, С6 обрабатываются ультразвуком сравнительно хорошо, улучшаются их механические свойства. Обработка кремнистых сталей ультразвуком увеличивает их пластичность, а при обработке хромовых сталей наблюдается сильное измельчение структуры, устранение игольчатых кристаллов и повышение их однородности. При ультразвуковой обработке стали Х18 наблюдается изменение фазового состава. В отличие от ферритных сталей эффективная обработка ультразвуком аустенитных сталей типа 12Х18Н9, Х25Н20, Г12 достигается при более высокой интенсивности ультразвука: ликвидация дендритной структуры, измельчение структуры, увеличение прочности и пластичности, устранение анизотропии и ликвации и т. д. Подобные изменения наступают и в карбидных сталях (Р18).

Стали, содержащие бор (Х18Н15Р2, Х18Н10Р2, Х18Н6Г9Р2 и др.), плохо обрабатываются ультразвуком.

По-разному ультразвук влияет и на структуру и свойства жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов [2]. В определенных условиях обработка этих сталей и сплавов ультразвуком даже оказывает отрицательное влияние.

Рассмотренные примеры показывают, что в большинстве случаев ультразвуковая обработка расплавов до кристаллизации и во время кристаллизации является эффективным способом улучшения их структуры и механических свойств. Однако эффективность и экономичность этой обработки зависят от ряда фак-

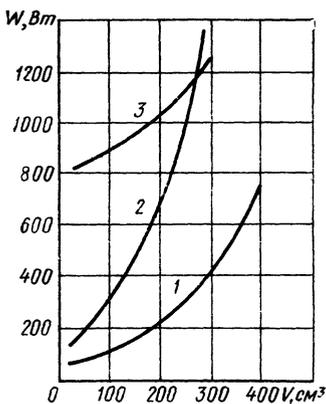


Рис. 36. Зависимость пороговой мощности ультразвука от объема обрабатываемого расплава:

1 — для висмута; 2 — для алюминия; 3 — для стали X27

торов — обрабатываемости расплава ультразвуком, условий кристаллизации, наличия примесей и др.

Под обрабатываемостью ультразвуком понимают совокупность всех изменений в металле, наступающих под действием ультразвука. Степень этих изменений, выраженную какими-то условными показателями, можно назвать «степенью ультразвуковой обрабатываемости», например, изменение среднего размера зерна данной фазы, изменение относительного содержания этой фазы и др. Обрабатываемость зависит от глубины распространения ультразвука и от физических свойств расплава.

Распространение ультразвука в расплаве зависит от его плотности, вязкости, волнового сопротивления и поверхностного натяжения на границе между излучателем и расплавом. Эти свойства расплава обуславливают мощность, обеспечивающую эффективность и экономичность ультразвуковой обработки. Велико влияние объема кристаллизующегося расплава на минимальную (пороговую) мощность P ультразвука для эффективной обработки. При увеличении объема расплава пороговая мощность для различных металлов и сплавов вследствие неравномерного распределения поля упругих колебаний возрастает нелинейно (рис. 36). Кроме того, пороговая мощность при одинаковом объеме расплава зависит от свойств металла или сплава. Так, например, чтобы значительно изменить структуру 100 г металла, обработанного ультразвуком в продолжение 1 мин, для висмута необходима мощность 30 Вт, а для цинка — 150 Вт.

Для различных сталей необходимая электрическая мощность ультразвука, подаваемая на магнитострикционный преобразователь, колеблется в пределах от нескольких сотен Вт до 2 кВт на 1 кг расплава. Кроме того, эта мощность зависит от способов подачи ультразвука в расплав — снизу, сверху, в зону плавления, в металлическую ванну при полунепрерывном литье и т. д.

В настоящее время ультразвуковая обработка при кристаллизации металлов выходит за рамки лабораторных исследований. Создан ряд полупромышленных установок, на которых проводят эксперименты по промышленному применению ультразвука.

Обработка слитков наибольшей массы (до 1500 кг) достигнута американской фирмой «Вестингауз Электрик Корпорейшен», но вследствие того, что там использовали ультразвуковой генератор недостаточной мощности (25 кВт), измельчение структуры получено лишь на глубину 400—450 мм. Хотя степень измельчения оказалась незначительной, игольчатая структура устранена и увеличена пластичность ряда хромоникелевых (17% Cr, 12% Ni, 2,5% Mo) и хромомарганцевых (0,5% C, 18% Mn, 5% Cr) сталей, железо-кобальтовых сталей и никель-алюминиевых сплавов.

Впервые ультразвук применен при полунепрерывном литье (рис. 37) дюралюминиевых отливок диаметром 290 мм. Мощный (20—25 кВт) ультразвуковой генератор создавал упругие колебания в расплаве посредством четырех магнитострикционных преобразователей с волноводами из кермета. Полученные слитки с более равномерной, тонкой и плотной структурой имели предел прочности на сжатие примерно на 3 кгс/мм² больший, чем такие же слитки, не обработанные ультразвуком.

Наибольшие успехи в практическом применении ультразвука достигнуты Центральным научно-исследовательским институтом черной металлургии (СССР) [2, 48]. При помощи ультразвукового генератора мощностью 150 кВт и частотой от $8 \cdot 10^3$ до $30 \cdot 10^3$ Гц достигнута эффективная обработка слитков различных металлов и сплавов. При обработке расплава

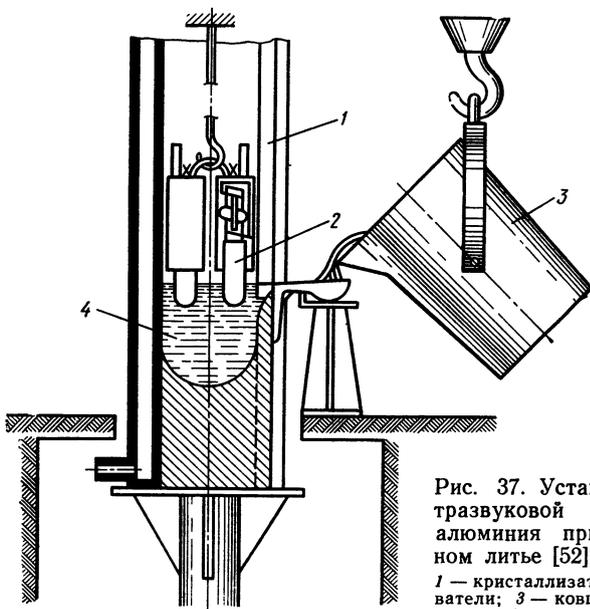


Рис. 37. Установка для ультразвуковой обработки дюралюминия при полунепрерывном литье [52]:

1 — кристаллизатор; 2 — преобразователи; 3 — ковш для заливки металла; 4 — жидкий металл

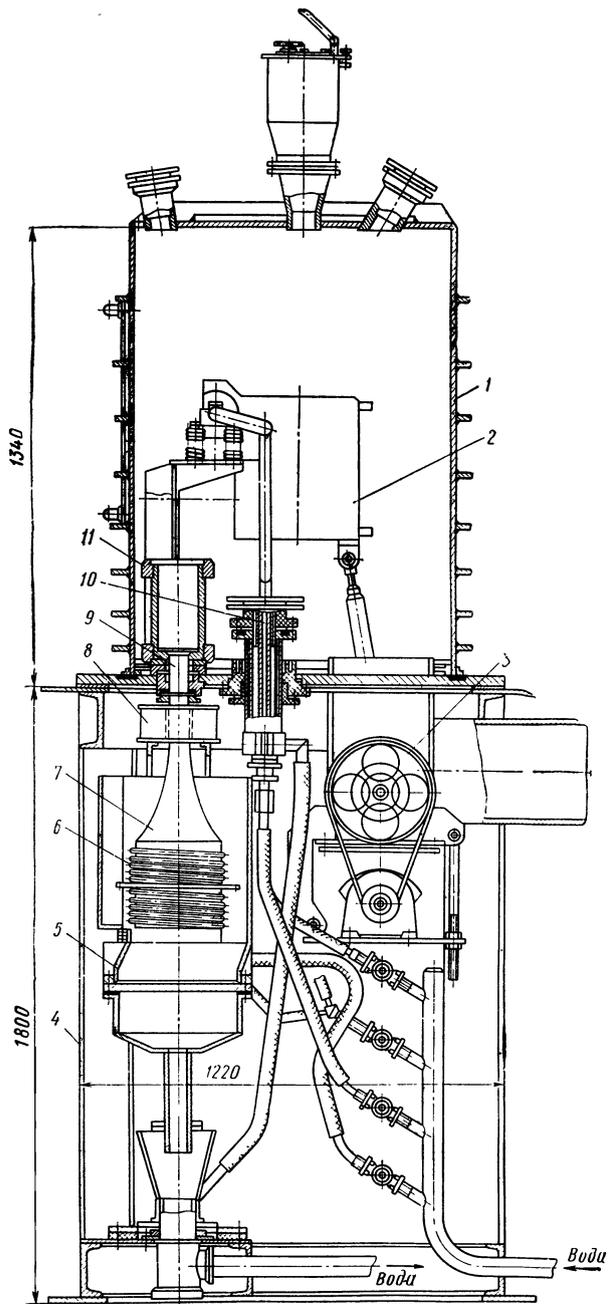


Рис. 38. Рабочий узел ультразвуковой установки [48]

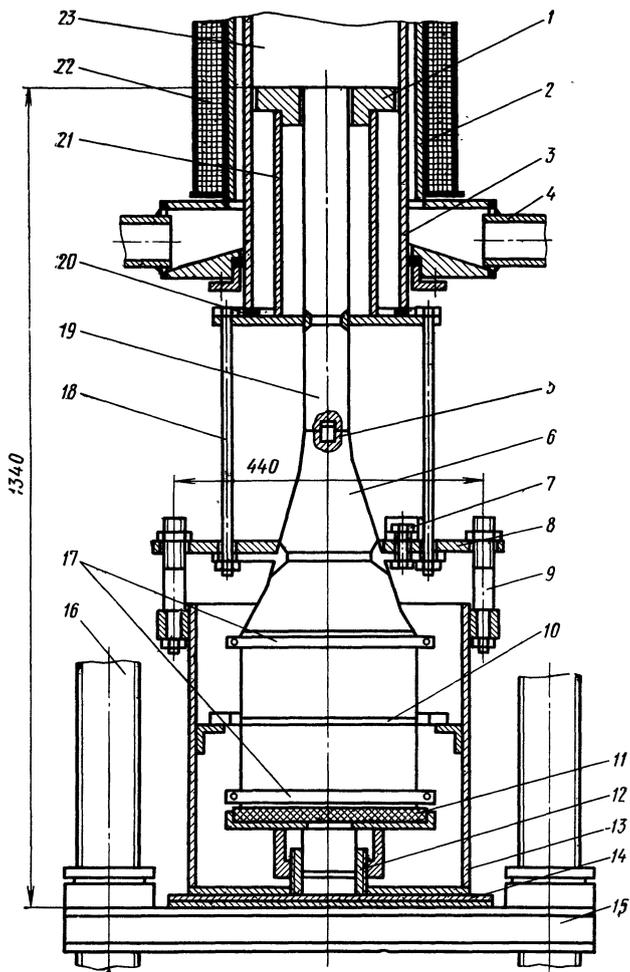


Рис. 39. Ультразвуковая установка для обработки металлического расплава [48]

ультразвуком во время охлаждения используется установка, показанная на рис. 38. Магнитоstrictionный преобразователь 6, помещенный в охлаждающую ванну 5, и концентратор 7 соединены с волноводом 9 посредством электромагнитного соединителя 8. Наконечник волновода проходит через дно кокиля 11, помещенного в вакуумную камеру 1, установленную на металлической конструкции 4. В камере находится индукционная печь 2, в которой расплавляется металл массой до 25 кг. Печь питается от машинного генератора. Вода для охлаждения подается через коаксиальное соединение 10. Подъем печи для раз-

ливки металла осуществляется механизмом 3. Эта установка позволяет производить плавление, разливку и обработку ультразвуком при атмосферном давлении и вакууме (1,33 Па). Генератор используют также и с вакуумнодуговой печью для получения слитков диаметром 110—270 мм, высотой до 1000 мм и массой до 250 кг. Обработка металла ультразвуком производится на установке, показанной на рис. 39. Магнитострикционный преобразователь 10, установленный в зажимах 17, помещен в кожух 13 с охлаждающей водой и передает ультразвуковые колебания через концентратор 6 и волновод 19 на слиток 23. Концентратор прижимается к волноводу зажимами 18 и центрируется штифтом 5. Магнитострикционный преобразователь крепится к кожуху 13 прижимной плитой 8 и винтами 9. Чтобы уменьшить потери энергии нерабочим торцом преобразователя, под него поставлена прокладка из вакуумной резины 11. Подъем и опускание преобразователя осуществляется механизмом 12, опирающимся на подкладки 14, расположенные на траверсе 15 для подъема и перемещения печи винтами 16. Для предотвращения протекания металла в зазор между волноводом 19 и кристаллизатором 3 на разделительной чаше 21 установлена прокладочная шайба 1. Охлаждение кристаллизатора осуществляется водой, подаваемой по трубопроводу 4 в водяную рубашку 2. Около кристаллизатора расположен соленоид 22, а в его нижней части — вакуумное уплотнение 20. Подвод электроэнергии к печи осуществляется шиной 7.

Глава **3**

**Применение
ультразвука
в литейном
производстве**

•

Г.С. АНГЕЛОВ

§ 1. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специфический характер воздействия ультразвука на различные материалы раскрывает возможность его применения при предварительной подготовке компонентов формовочных смесей — глины, вяжущих веществ и добавок. Одним из перспективных направлений применения ультразвука является его диспергирующее действие на глинистые материалы — каолинит и монтмориллонит. Дисперсность этих минералов обуславливает их связующую способность в смеси. Чем более тонко они диспергированы, тем больше прочность смеси.

Установлено, что через определенное время диспергирования каолинита и монтмориллонита в воде наступает насыщение, и диспергирование прекращается. Оптимальная частота ультразвука при размере частиц 100 мкм не превышает 1000 кГц.

Например, для получения максимальной дисперсности монтмориллонита необходима частота 320 кГц, а для каолинита — 960 кГц, т. е. существует зависимость между дисперсностью системы и кристаллической структурой диспергируемого вещества.

В полупромышленных масштабах глуховецкий каолин диспергирован в институте «Уралмеханобр» с помощью специальной установки непрерывного действия, схематически представленной на рис. 1. Суспензию каолина и воды в соотношении 1 : 6 погружают в приемный сосуд 1 с мешалкой для предотвращения осаждения. Оттуда суспензия подается в камеру 3, верхним торцом которой является магнитоотрицательный

Рис. 1. Схема установки для непрерывной обработки каолина ультразвуком

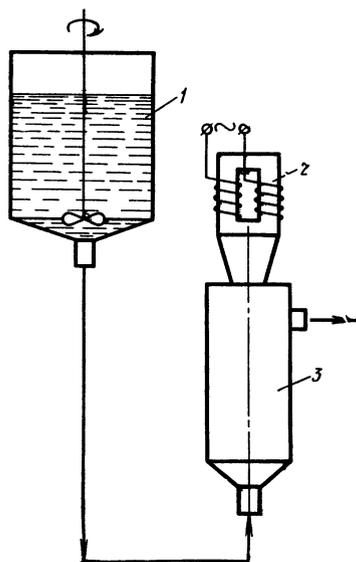
преобразователь 2 типа ПМС-6, питаемый от ультразвукового генератора УЗГ-10У. При одновременном использовании четырех преобразователей ПМС-6 производительность установки 600 $\text{дм}^3/\text{ч}$. Ультразвуковая обработка каолиновой суспензии позволяет получить продукт с высокой степенью дисперсности: содержание частиц размером 2 $\mu\text{м}$ увеличивается в среднем на 20% и достигает 82% при 61,5%-ном содержании в исходном состоянии. Существенной особенностью суспензий, полученных путем ультразвукового диспергирования, является их большая устойчивость и стабильность.

Режим ультразвукового диспергирования глины требуется строго соблюдать, так как в отличие от многих других процессов в данном случае несоблюдение режима может привести к обратным результатам — коагулированию частиц.

Установлено, что ультразвуковая обработка монтмориллонита в течение 3—8 мин увеличивает дисперсность, а при увеличении продолжительности обработки этой же суспензии до 11 мин наступает агрегатирование. Наиболее эффективное диспергирующее воздействие ультразвука наблюдается при низких частотах — 18—24 кГц, так как при этом кавитация возникает при значительно меньшей интенсивности.

Перспективным методом является диспергирование при повышенном статическом давлении. По сравнению с диспергированием при нормальном давлении обработка при повышенном давлении увеличивает скорость диспергирования в десятки и сотни раз.

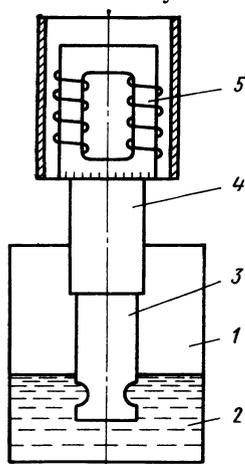
Механизм действия ультразвука при диспергировании твердых тел в жидкости еще не объяснен. Предполагают, что ультразвук возбуждает в них силы стремящиеся оторвать эти частицы одну от другой при их колебательном движении или что диспергирование наступает вследствие трения частиц друг о друга и возникновения кавитации. Экспериментально доказано, что главное значение для диспергирования имеет кавитация. Ее возникновение облегчается наличием границы раздела между твердыми частицами и жидкостью.



Влияние ультразвука на механические свойства глинистых формовочных смесей изучено при обработке водно-глинистых суспензий при соотношении вода : глина = 1 : 1. Ультразвук частотой 22,5 кГц и амплитудой 20 и 40 мкм подается в суспензию 2 (рис. 2), налитую в чашу 1, посредством концентратора 3 и волновода 4 от магнитострикционного преобразователя 5, питаемого от ультразвукового генератора УЗГ 5-1,6. Обработанную суспензию подают в формовочную смесь состава 90% люберецкого песка, 10% глины. Влажность смеси, 3, 4, 5 и 6%. Установлено значительное повышение прочности смесей при увеличении влаги свыше 3% и обработке суспензии ультразвуком (табл. 1).

При седиментическом анализе выявлены значительное увеличение дисперсности глины, обработанной ультразвуком, и повышенная стабильность суспензии.

Материалы с повышенной гидратационной активностью могут диспергироваться в «кипящем» слое, который при определенной частоте ультразвука можно поддерживать продолжительное время в стабильном состоянии. Этим методом осуществили диспергирование феррохромового шлака, который после этого использован в качестве отвердителя формовочной смеси с жидким стеклом. Увеличение дисперсности шлака приводит к его взаимодействию с жидким стеклом, т. е. к его активированию. Обработка осуществлена с помощью преобразователя с излучающей поверхностью 5,15 см², частотой 15—30 кГц, интенсивностью 1,7 Вт/см², на поверхности закреплена неподвижная плексигласовая ювета со слоем пылевидного шлака толщиной от 1,5 до 7,5 мм. При подводе ультразвука возникает «кипение» слоя. При увеличении толщины слоя «кипение» уменьшается. Время, необходимое для обработки ультразвуком, определяют опытным путем. При данной продолжительности обработки от-

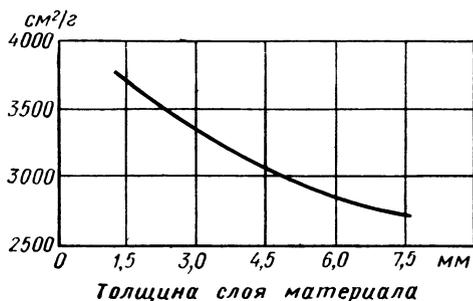


1. Прочность песчано-глинистых формовочных смесей после ультразвуковой обработки суспензии

Время работы смеси	Прочность смеси $\sigma \cdot 10^{-2}$ кгс/см ² , при влажности формовочной смеси, %			
	3	4	5	6
20 мин (без ультразвука) . .	0,16	0,20	0,13	0,14
20 мин (с ультразвуком) . .	0,15	0,19	0,14	0,16
2 ч (без ультразвука)	0,93	1,03	0,48	0,25
2 ч (с ультразвуком)	0,64	1,43	0,94	0,50

Рис. 2. Схема установки для ультразвуковой обработки водно-глиняных суспензий

Рис. 3. Зависимость относительной поверхности диспергированного феррохромового шлака от толщины слоя, обработанного ультразвуком



носительная поверхность диспергируемого шлака $S_{отн}$ (рис. 3) зависит от толщины слоя, обрабатываемого ультразвуком. При исходной относительной поверхности $2059 \text{ см}^2/\text{г}$ и режиме обработки с частотой 18 кГц , интенсивностью $1,7 \text{ Вт}/\text{см}^2$ и продолжительностью 5 мин относительная поверхность увеличивается до $3660, 3385, 3060, 2921$ и $2656 \text{ см}^2/\text{г}$ при толщине обрабатываемого слоя соответственно $1,5; 3,0; 4,5; 6,0$ и $7,5 \text{ мм}$, или в 2 раза при слое толщиной $1,5 \text{ мм}$ и на 20% при слое толщиной $7,5 \text{ мм}$.

Опыты по диспергированию шлака с применением более высоких частот ультразвука (20 и 22 кГц) и интенсивности $1,9 \text{ Вт}/\text{см}^2$ не дали положительных результатов. Вместо диспергирования получалось коагулирование, и относительная поверхность уменьшалась до $1300\text{—}1400 \text{ см}^2/\text{г}$ (исходная поверхность шлака $1900\text{—}2000 \text{ см}^2/\text{г}$). Неудовлетворительные результаты получены и при увеличении времени обработки ультразвуком с 5 до $20, 30$ и 40 мин при частоте ультразвука 18 кГц и интенсивности $1,7 \text{ Вт}/\text{см}^2$.

При обработке ультразвуком водных суспензий из этих минералов интенсифицируется ионообмен и улучшается их связующая способность. 50% -ная водная суспензия каолинита, обработанная ультразвуком в течение $1; 3; 7; 5$ и 15 мин , показала увеличение своей ионообменной способности с $1,94$ соответственно до $3,24; 3,24; 4,30$ и $3,24 \text{ мг экв}/100 \text{ г}$. Особенно эффективной оказалась обработка ультразвуком сульфитного щелока и крепителя УСК-1, используемых в формовочных смесях в качестве связующих веществ для изготовления литейных стержней. На лабораторной установке с генератором УЗГ-2-10 эти крепители обрабатывали ультразвуком в цилиндрической ванне, дном которой служил магнитострикционный преобразователь ПМС-6. Во время обработки температура сульфитного щелока повышается (рис. 4), а плотность уменьшается. Прочность на растяжение σ_b стандартных проб, высушенных в течение 60 мин при $160\text{—}180^\circ \text{С}$ (рис. 4), возрастает на $28\text{—}30\%$ с увеличением продолжительности обработки сульфитного щелока ультразвуком до $5\text{—}7 \text{ мин}$. Затем прочность начинает снижаться и при

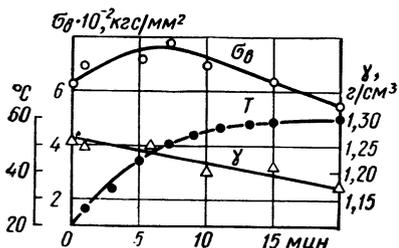


Рис. 4. Изменение температуры T , плотности сульфитного щелока γ и прочности смесей σ_b при воздействии ультразвука

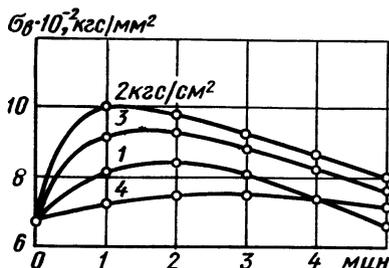


Рис. 5. Влияние давления на эффективность обработки ультразвуком сульфитного щелока

продолжительности обработки 20 мин становится даже ниже исходной. При повышении давления в ванне эффективность ультразвуковой обработки повышается. Максимальная прочность проб достигается при давлении 2 кгс/см², после чего она уменьшается (рис. 5). Увеличение давления приводит и к уменьшению продолжительности обработки. Аналогичные результаты получены и при ультразвуковой обработке крепителя УСК-1. Большое значение для эффективности ультразвуковой обработки имеет температура. Наибольшая прочность получается при температуре 40—50° С (рис. 6). Выше этого температурного интервала наступает коагулирование крепителя, и прочность уменьшается.

Положительные результаты лабораторных исследований позволили перейти к промышленному применению этого метода. Опытная промышленная установка представляет собой вертикальную камеру размером 600×300 мм (рис. 7), в боковых стенках которой расположены магнестрикционные преобразователи на расстоянии 10 мм. Крепитель подается насосом со скоростью 40 дм³/мин, давление в камере достигает 1,5—20 кгс/см². Рекомендуется последовательное соединение двух таких колонн, чтобы обеспечить необходимую продолжительность обработки ультразвуком.

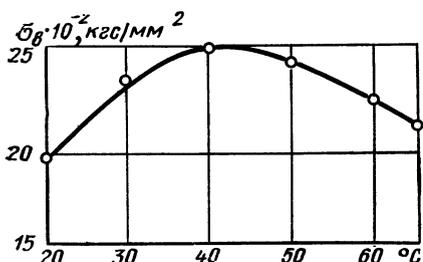
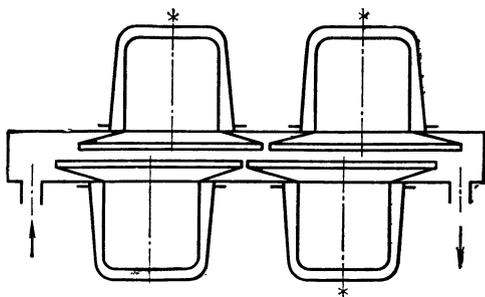


Рис. 6. Влияние температуры на эффективность ультразвуковой обработки

Рис. 7. Схема промышленной установки для ультразвуковой обработки сульфитного щелока



Увеличение связующей способности позволяет уменьшить количество сульфитного щелока на 20—30% и крепителя УСК-1 на 15—18% в формовочных смесях без уменьшения прочности стержня. Кроме того, можно уменьшить продолжительность сушки стержня.

Необходимо отметить также, что благодаря необратимости процессов, происходящих в крепителях под влиянием ультразвука, и продолжительному сохранению ими новых свойств, приобретенных в результате ультразвуковой обработки, целесообразно эту обработку производить на химических предприятиях, производящих крепители.

Диспергирующее действие ультразвука может найти применение и при обработке других литейных материалов, при приготовлении обмазки и т. п.

Наконец, следует упомянуть еще об одной возможности применения ультразвука при приготовлении формовочных материалов — о так называемой акустической сушке. Хотя еще нет данных о применении этого метода в литейном производстве, интенсификация процесса сушки в ультразвуковом поле может быть использована для некоторых формовочных материалов.

§ 2. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Качество отливок зависит от механических свойств металла. Однако наряду с этим большое значение для получения плотных и бездефектных отливок имеют литейные свойства металлов и сплавов — жидкотекучесть, усадка, склонность к образованию ликвации и поглощению газов. Поэтому применение ультразвука для изменения литейных свойств металлов и сплавов имеет для практики такое же большое значение, как и использование ультразвука для улучшения структуры и механических свойств металлов и сплавов.

В гл. II на примере силумина [6] показано, что ультразвуковая обработка металлических расплавов вызывает уменьшение вязкости и поверхностного натяжения и увеличение угла смачивания. Этот факт послужил основанием для исследования влияния ультразвука на жидкотекучесть силумина Ал9 [6].

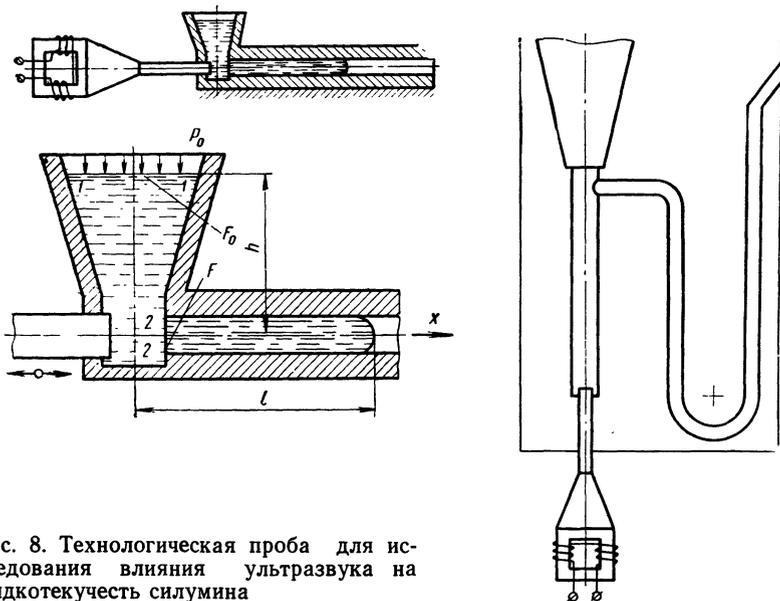


Рис. 8. Технологическая проба для исследования влияния ультразвука на жидкотекучесть силумина

Рис. 9. Видоизмененная комплексная проба для исследования влияния ультразвука на жидкотекучесть силумина

Рассмотрены условия заполнения металлом канала прямой технологической пробы при одновременном применении ультразвука (частота 27,6 кГц, амплитуда 8,6 мкм) по схеме рис. 8. При поддержании постоянного уровня металла 1—1 его количество, прошедшее через входное сечение 2—2 горизонтального канала без воздействия ультразвука, меньше, чем при воздействии ультразвука. Увеличение количества прошедшего металла вызывается как изменением его физико-химических свойств, так и «насосным» действием ультразвука и градиентом давления по длине канала, вызываемым непрерывной транспортировкой металла по оси x . Длина заполненной части канала увеличивается с 56 до 83,5 мм, т. е. на 45%. Для устранения прямого «насосного» действия ультразвука на жидкотекучесть выполнены измерения с видоизмененным U-образным сложным трубопроводом, показанным на рис. 9. Влияние ультразвука в этом случае сводится только к изменению свойств металла. При температуре заливки 720°С обычная проба заполняется на длине 288 мм, а при применении ультразвука — на длине 325 м. У всех U-образных проб увеличение жидкотекучести под влиянием ультразвука больше при низких температурах заливки, когда обычно жидкотекучесть мала. Благодаря этому можно получить лучшее заполнение литейной формы без перегрева металла.

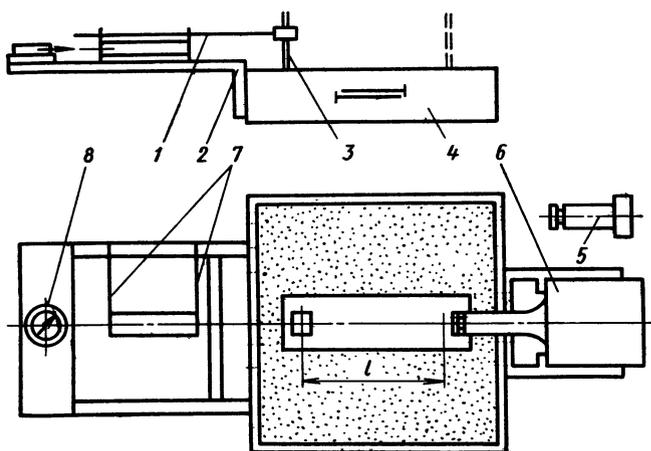


Рис. 10. Схема установки для исследования влияния ультразвука на усадку силумина

Значительная часть дефектов в отливках вызывается усадкой металлов и сплавов во время охлаждения температуры заливки до постоянной температуры. Так как ультразвук вызывает дегазацию металлических расплавов и изменяет характер кристаллизации, следовало ожидать и изменения усадки под его влиянием. Исследования усадки силумина Al_9 [7] подтвердили это предположение. Пробы для испытания усадки изготовлены в песчаной форме 4 (рис. 10), они имеют поперечное сечение 30×80 мм и измеряемые длины $l = 250$ и 265 мм. В рамке формы справа закреплена консоль с магнитострикционным преобразователем 6 (частота 27,5 кГц и амплитуда 8,6 мкм), а слева — консоль 2 с плоскими пружинами 7, несущими стержень 1 с графитовыми прутками 3, погруженными в металл. Усадку измеряют с помощью индикатора 8. Вместо магнитострикционного преобразователя 6 можно установить наконечник 5 для одностороннего измерения усадки без воздействия ультразвука или же еще одну измерительную систему с пружинами, рычагом, графитовым прутком и индикатором для двустороннего измерения усадки. В последнем случае металл обрабатывают ультразвуком в плавильном тигле в течение 60 и 150 с и заливают его в форму. Результаты опыта приведены в табл. 2 и рис. 11—13. Позиции на рисунках соответствуют номерам пробы в табл. 2.

Ультразвуковая обработка до или во время охлаждения отливки вызывает устранение предварительного расширения и увеличение усадки. Это объясняется дегазацией металла, при которой устраняется причина этого расширения. При вводе ультразвука во время усадки происходит помимо дегазации еще и

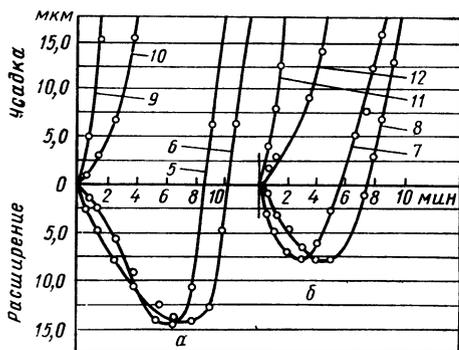


Рис. 11. Влияние ультразвука на предварительное расширение силумина Ал9

разрушение кристаллического каркаса и устранение закрытых объемов, в которых могли бы заключаться остальные растворенные газы. В этом случае время дегазации сравнительно мало и измельчение кристаллов

играет сравнительно большую роль в устранении предварительного расширения. Поэтому действие обработки ультразвуком на усадку во время охлаждения более эффективно, чем предварительная обработка расплава. Устранение начального расширения и дегазация металла под действием ультразвука приводят к увеличению действительной усадки и возможности образования «горячих» трещин.

Уменьшение начального расширения чистого алюминия и алюминиево-кремниевых сплавов под действием ультразвука наблюдалось и при других исследованиях [49], когда газ легко выделялся и всплывал на поверхность отливки. При обработке ультразвуком сплавов алюминия, кремния и меди, подвергнутых дегазации во время кристаллизации, наблюдалось увеличение начального расширения по сравнению с отливками, не обра-

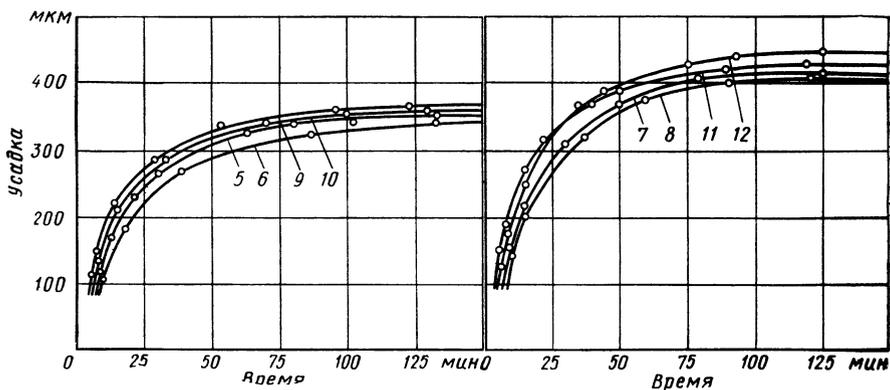


Рис. 12. Влияние предварительной ультразвуковой обработки металла на усадку силумина Ал9

Рис. 13. Влияние ультразвука на усадку силумина Ал9, обработанного во время охлаждения

2. Результаты ультразвуковой обработки слитков силумина

№ пробы	Длина <i>l</i> , мм	Температура заливки, °С	Способ измерения усадки	Предварительное расширение, мкм	Действительная усадка, мкм	Полная усадка, мкм
5	250	720	А	14,0	351,0	365,0
6	250	750	А	13,5	346,0	395,0
7	265	720	Б	8,0	410,0	418,0
8	265	750	Б	8,5	402,0	410,5
9	250	720	А	0,0	366,0	366,0
10	250	750	А	0,0	372,0	372,0
11	265	720	А	0,0	420,0	420,0
12	265	750	Б	0,0	440,0	440,0

А—двусторонний, Б—односторонний.

ботанными ультразвуком. Это объясняется неполным выделением газов до последней стадии кристаллизации.

Кристаллизация отливок и слитков различных сплавов часто сопровождается ликвацией в поперечном сечении или же по высоте, но интенсивное перемешивание расплава под действием ультразвука создает условия для уменьшения или устранения ликвации. Это считают одним из важнейших результатов воздействия ультразвука на изменения структуры [49]. Образование мелкозернистой равноосной структуры способствует повышению однородности слитков и препятствует зональной и дендритной ликвации.

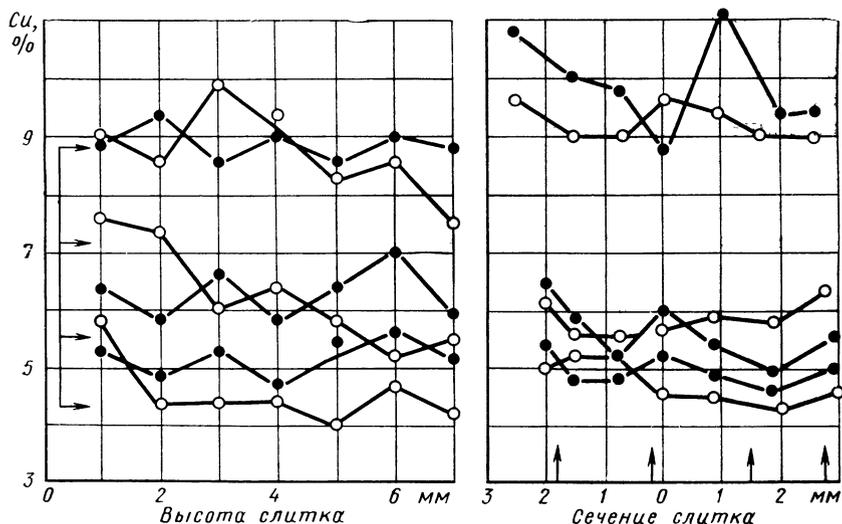


Рис. 14. Распределение меди вдоль и поперек слитка

—○—○— с ультразвуком; —●—●— без ультразвука; → направление ультразвукового облучения

Наряду с интенсивным перемешиванием расплава изменение характера температурного поля и интенсификация конвективной диффузии способствуют уменьшению зон с термическим и концентрационным переохлаждением в них и предотвращают появление дендритной ликвации. Экспериментальное уменьшение дендритной ликвации под действием ультразвука доказано путем измерения микротвердости α -твердого раствора сплава алюминия с медью [2, 49].

Ликвация по поперечному сечению и высоте слитков из сплавов с различным содержанием алюминия и меди зависит от содержания меди (рис. 14). При концентрации меди, соответствующей равновесному содержанию в твердом растворе, ультразвук почти не влияет на ликвацию. Выше этой концентрации, когда химические соединения меди с алюминием могут кристаллизоваться как самостоятельные фазы, ультразвук ослабляет ликвацию или полностью ее устраняет.

Ультразвук способствует уменьшению и весовой ликвации, например, свинца и таких модифицирующих прибавок, как цирконий, титан, хром и марганец, которые сильно отличаются по плотности от алюминия.

§ 3. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОТЛИВОК

Основной трудностью ультразвуковой обработки отливок является введение колебаний в металл во время кристаллизации, что объясняется сложностью форм отливок и большим разнообразием их размеров, способов изготовления, используемых материалов и т. д.

Наиболее легко применим ультразвук в литейном деле при обработке расплава в лотке или в воронке, расположенных между литейным ковшом и формой. Несмотря на это, он еще не нашел широкого практического применения. Обычно этот метод применяют для создания колебаний в металлическом расплаве, т. е. при низкой частоте упругих колебаний.

Методы введения ультразвука сверху или снизу находят применение при производстве отливок в металлических формах, а введение сверху применяется только при изготовлении отли-

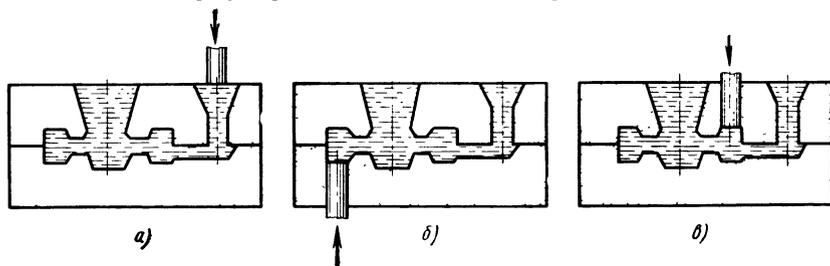


Рис. 15. Методы введения ультразвука в отливки:
а — в литейник; *б* — в отливку снизу; *в* — в отливку сверху

вок в обычных однократных, оболочковых и прецизионных формах. В определенных условиях можно вводить ультразвук в обычные литейные формы и снизу (рис. 15). Несмотря на сложную конфигурацию отливок, можно получить мелкозернистую структуру по всему объему отливки. Это свидетельствует о том, что диффузионное поле ультразвуковых колебаний распределяется равномерно по объему расплава.

Основной проблемой, которая возникает при обработке ультразвуком, является создание упругих колебаний во всех частях отливок и ликвидация экранированных участков. В большинстве случаев конфигурация отливок очень сложна и ультразвуковое поле не распространяется по всему их объему. Таким

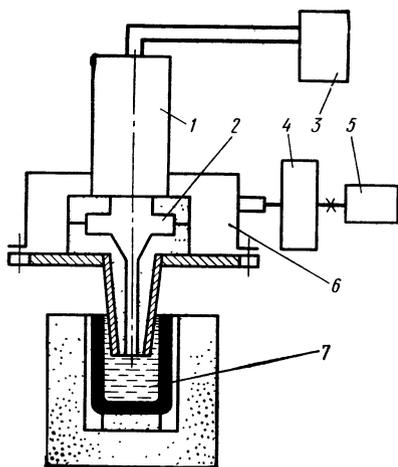


Рис. 16. Принципиальная схема литья способом вакуумного всасывания и ультразвуковой обработки

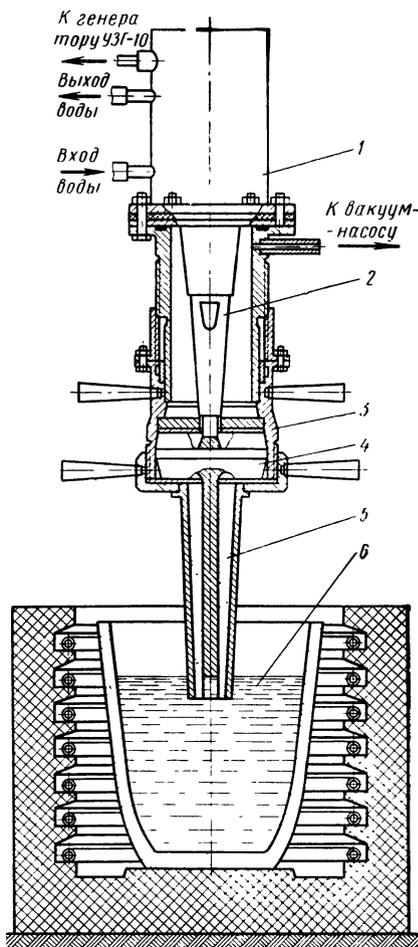


Рис. 17. Агрегат УМВО для отливки турбинных колес из алюминиевого сплава путем вакуумного всасывания и ультразвуковой обработки:

1 — магнитоистриктор; 2 — излучатель; 3 — корпус камеры; 4 — гипсовая форма; 5 — литник; 6 — металлический расплав

образом, наряду с методом введения ультразвука это еще одна трудно преодолимая на практике задача. Поэтому ультразвук чаще находит применение при производстве специальных отливок, для которых экономически и технически оправдано применение дополнительных мероприятий, связанных с введением ультразвука в отливку и с созданием специальных форм. Типичный пример этого — вакуумное всасывание тонкостенных роторных дисков для турбомашин по схеме, показанной на рис. 16. Металл 7 поступает в полость 2 гипсовой формы в результате засасывания вследствие различия в давлении над ним и в форме, встроенной в корпус 6. Вакуум создают с помощью вакуум-насоса 5 и промежуточного резервуара 4. При вакуумировании внутри камеры создается разрежение через поры формы и в ее полости. С верхней стороны формы расположен магнитострикционный преобразователь 1, питаемый от ультразвукового генератора 3. При вакууме от 0,207 кгс/см² (200 мм рт. ст.) до 0,335 кгс/см² (250 мм рт. ст.) и ультразвуковой обработке расплава в продолжение от 30 до 60 с достигается измельчение структуры и увеличение прочности сплавов Ал9, Ал19 и Ал40 примерно на 10—15%. Конструкция агрегата УМВО (ультразвуковой магнитострикционной вакуумной камеры) для отливки роторных дисков этим методом показана на рис. 17. После включения ультразвукового генератора агрегат с формой поднимается над печью, а после того как воронка 5, войдет в металл, опускается, и тогда краном включают вакуумирование и заливку формы. Через некоторое время после обработки ультразвуком (30—60 с) излучатель извлекают из формы, агрегат поднимают и извлекают из печи, а готовую отливку вынимают из формы.

Глава **4**

**Влияние ультразвука
на фазовые
и структурные
изменения и свойства
металлов и сплавов,
находящихся
в твердом состоянии**

•

Г.С. АНГЕЛОВ

§ 1. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ДИФФУЗИЮ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Влияние ультразвука на свойства металлов и сплавов, находящихся в твердом состоянии, сводится главным образом к следующим двум эффектам: 1) тепловому воздействию в результате поглощения ультразвуковой энергии и 2) ускорению процессов диффузии.

При некоторых процессах, происходящих в металлах, находящихся в твердом состоянии, большое значение имеет тепловое воздействие ультразвука. Повышение температуры при этом невелико, однако фазовые превращения чувствительны и к малым изменениям температуры. Поэтому тепловое воздействие ультразвука является основным фактором ускорения превращений. Наряду с этим фазовое превращение как диффузионный процесс влияет на скорость диффузии.

Трудно выделить непосредственное влияние ультразвука на процессы, происходящие в металлах, находящихся в твердом состоянии, и его косвенное влияние—нагревание. Обычно поглощение энергии происходит на границах зерен, включениях и дефектах кристаллической решетки. В макроскопическом масштабе повышение температуры металлов вследствие поглощения ультразвуковой энергии невелико, но оно локально и может значительно влиять на протекание процесса. Тепловое действие ультразвука, т. е. повышение температуры, можно вычислить, но более точно его определяют экспериментально. Во многих исследованиях отмечено повышение температуры в обрабатываемых образцах. Так, например, у полуволновых образцов

меди и бронзы Бр. 44 температура в зоне с максимальной амплитудой 15 мкм повысилась до 90° С. При амплитуде 24 мкм температура бронзы при ультразвуковой обработке повышается до 130° С.

Однако в большинстве случаев наибольшее значение имеет ускорение диффузии. Благодаря этому облегчается и ускоряется образование зародышей новых твердых фаз и ускоряется их рост. Таким образом, изменяются условия для протекания различных процессов, в результате которых изменяются структура и свойства металлов и сплавов.

Исследования влияния ультразвука на скорость диффузии в металлах дают противоречивые результаты. В твердых металлах и сплавах не возникает кавитация при обработке ультразвуком, являющаяся важным фактором для ускорения диффузии в жидком и полужидком состоянии металлов. По этой причине некоторые авторы считают, что диффузия не ускоряется. При исследовании самодиффузии в кадмии высокой чистоты (99,99%) по методу тонких слоев с помощью изотопа Cd^{115} под действием ультразвука не отмечено изменения коэффициента диффузии. Однако эти результаты не могут служить основанием для отрицания благоприятного влияния ультразвука на скорость диффузии. Более многочисленны примеры положительного влияния ультразвука на процессы, протекающие при твердом состоянии металлов, и ускорение диффузии. Подтверждением этого является факт создания многих лабораторных и полупромышленных установок, использующих ультразвук в этих целях. Характер воздействия ультразвука и причины ускорения диффузии под его влиянием теоретически еще не объяснены. Предполагают [2], что под влиянием упругих колебаний атомы диффундирующего вещества могут входить в резонансные колебания и при многократных повторениях деформаций растяжения — сжатия могут выделяться из кристаллической решетки перенасыщенного твердого раствора в виде дисперсных групп.

§ 2. МЕТОДЫ ВВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Методы введения ультразвука в твердые тела можно разделить на две группы: 1) через промежуточный жидкий слой, расположенный между источником или излучателем ультразвука и обрабатываемыми деталью или образцом, и 2) непосредственно в саму деталь или образец.

В свою очередь, методы первой группы можно подразделить на две подгруппы [49]: а) сообщение ультразвука через толстый промежуточный слой и б) сообщение ультразвука через тонкий промежуточный слой. При сообщении через толстый промежуточный слой расстояние между источником ультразвука и обрабатываемым предметом велико. Ультразвуковые коле-

бания проходят через слой жидкости и достигают обрабатываемого предмета, где они передаются твердому металлу. Источником ультразвука может быть пьезоэлектрический или магнитострикционный преобразователь.

При сообщении ультразвука через тонкий слой обрабатываемый образец прижимают к источнику ультразвука — концентратору с волноводом и магнитострикционным преобразователем. В этом случае прижатие образца к концентратору осуществляют грузом, пружинами или шайбой. К недостаткам ультразвуковой обработки через промежуточную жидкую среду следует отнести трудности измерения параметров ультразвуковых колебаний и большие потери энергии в жидкости.

При втором методе введения ультразвука обрабатываемые образцы прикрепляют к концентратору. При обеспечении хорошего акустического контакта такой метод обладает рядом преимуществ по сравнению с введением ультразвука через жидкую среду. Здесь достигается полная передача ультразвуковой энергии обрабатываемому образцу, легко измерить параметры колебательного движения.

Обрабатываемые образцы прикрепляют к концентратору пайкой, сваркой или с помощью резьбовых соединений.

Обычно длину образца, обрабатываемого ультразвуком, подбирают так, чтобы она не была кратна полуволновой длине. В таких случаях могут в образцах образоваться бегущие волны. В большинстве случаев этот способ более удобен для исследований, а при промышленном его применении он обеспечивает однородность структуры обработанных деталей.

§ 3. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПОЛИМОРФНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Ультразвуковая обработка ускоряет превращение белого олова в серое и наоборот. Ускоряется также превращение некоторых солей из более неустойчивых в более устойчивые модификации, а также достигается приближение к равновесному состоянию сплава. Объяснения механизма действия ультразвука еще не существует. Авторы, исследовавшие полиморфное превращение γ —Со в ϵ —Со, считают, что ультразвук оказывает на процесс только тепловое воздействие.

Исследовалось влияние ультразвука интенсивностью от 1,1 до 1,7 Вт/см² и частотой 400 и 1000 кГц на полиморфные превращения в стали, содержащей 0,07 и 1,05% С. Образцы 2 (рис. 1) диаметром 12,7 мм и длиной 200 мм сначала отжигали при 980°С с последующим охлаждением в течение 2 ч для снятия остаточных напряжений и для обеспечения одинаковых условий эксперимента. После этого образцы нагревают повторно при 960°С в печи 6 со скоростью 64°С/мин, выдерживают при этой температуре 5 мин и начинают охлаждение в ванне 3

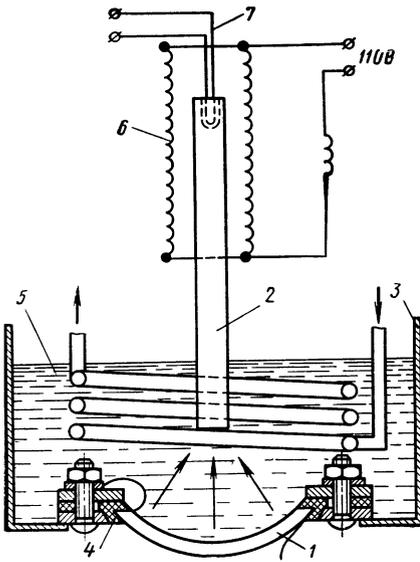


Рис. 1. Схема установки для исследования влияния ультразвука на полиморфные превращения в стали

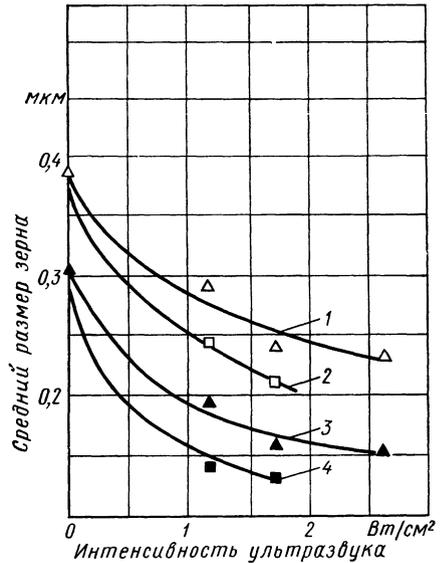


Рис. 2. Средний размер зерен стали в зависимости от частоты и интенсивности ультразвука:

1 — феррит при частоте 400 кГц; 2 — феррит при частоте 1000 кГц; 3 — перлит при частоте 400 кГц; 4 — перлит при частоте 1000 кГц

с водой 5. Скорость охлаждения $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ контролируют термопарой 7, встроенной в образец в интервале от 960 до $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $39\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ при последующем охлаждении до комнатной температуры. Ультразвуковую обработку осуществляют с помощью сферической пластинки 1, изготовленной из титаната бария и прикрепляемой к захвату в опоре 4 так, что колебания фокусируются в образце через воду. В этих же условиях проводят охлаждение и эталонных образцов, не обработанных ультразвуком.

Результаты исследования доэвтектоидной стали сводятся к измельчению зерна феррита и перлита (рис. 2) при увеличении частоты и интенсивности ультразвука. На твердость преимущественно влияет интенсивность, повышая ее, а влияние частоты ультразвука незначительно. Из одного кристалла аустенита образуется несколько кристаллов феррита, и их рост тормозится, а при доэвтектоидном распаде перлитные пластинки феррита и цементита становятся более тонкими. При доэвтектоидной стали получаются противоположные результаты из-за увеличения скорости диффузии, приводящей к росту пластинок перлита.

Установлено, что при нагревании доэвтектоидной стали (сталь 45) и обработке ультразвуком частотой 21 кГц получается укрупнение зерен аустенита. Причиной этого является интенсификация диффузии и гомогенизация аустенита.

Ультразвуковые колебания способствуют также уменьшению температурного гистерезиса при полиморфных превращениях в стали во время нагревания и охлаждения, ускорению диффузионных превращений и усилению процесса обезуглероживания и окисления.

§ 4. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Ультразвуковая обработка твердых металлов и сплавов вызывает два явления: акустическое разупрочнение и акустическое упрочнение. Первое наступает во время ультразвуковой обработки металлов и сплавов большой интенсивности, а второе наступает после обработки ультразвуком малой интенсивности.

Акустическое разупрочнение металлов выражается в уменьшении статического напряжения или усилия, необходимого для осуществления определенной деформации. Во многих исследованиях выявлено при этом уменьшение напряжений, а после окончания ультразвуковой обработки металл упрочнялся. Это понижение статического напряжения, называемое ультразвуково-

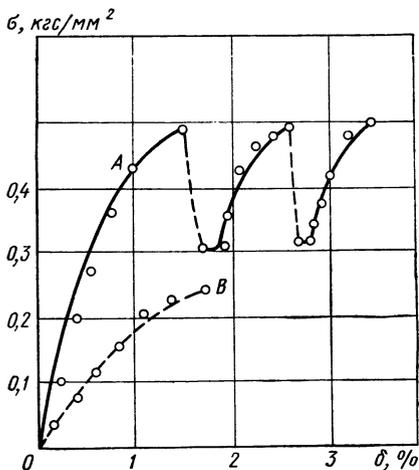


Рис. 3. Влияние ультразвука на статические напряжения растяжения в монокристалле цинка:

A — без ультразвука; B — с ультразвуком

1 — образец; 2 — концентратор; 3 — цапга; 4 — динамометр; 5 — микрометрический винт

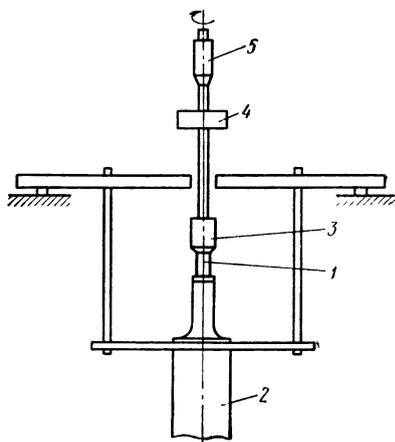


Рис. 4. Схема испытаний на растяжение с воздействием ультразвука:

вым разупрочнением, установлено для моно- и поликристаллов различных металлов и сплавов — цинка, алюминия, латуни, стали и др. На рис. 3 показано изменение статического напряжения растяжения при деформации монокристаллов цинка. При статическом нагружении образца напряжение растет с увеличением деформации по кривой *A*. В определенный момент в образце возбуждается ультразвук с частотой 800 кГц (излучаемый пьезокварцевым излучателем), что приводит к резкому падению напряжения (примерно на 40%). После выключения ультразвука напряжение быстро достигает первоначального значения. Эффект может повторяться. Если ультразвук вводится с самого начала, то кривая *B* напряжения становится более пологой, т. е. снижается напряжение для соответствующей деформации. Подобные результаты получены с монокристаллами кадмия и цинка в широком диапазоне частоты — от 15 кГц до 1,5 МГц. Установлено, что эффект зависит не от частоты, а от интенсивности ультразвука.

Еще больший эффект ультразвука получен на алюминиевых монокристаллах при нагружении по схеме, показанной на рис. 4. Эффект проверяли на образцах длиной меньше $\lambda/2$ при обработке ультразвуком частотой 20 кГц. Путем постоянного увеличения интенсивности ультразвука избегают увеличения статического напряжения из-за упрочнения. Кривые «напряжение — деформация» имеют вид, показанный на рис. 5. Кроме того, было доказано, что после предварительной деформации с применением ультразвука получается большее упрочнение, чем после такой же степени деформации без применения ультразвука. Если кристаллы подвергают более продолжительной ультразвуковой обработке, то упрочнение несколько понижается. Мягкие кристаллы упрочняют до определенного насыщения, после которого ультразвук вызывает разупрочнение.

Упрочнение наступает также после обработки ультразвуком без создания в образцах напряжения. Для этого необходима определенная мощность и определенная продолжительность обработки. При довольно продолжительной обработке наступает насыщение.

Ультразвук и нагрев влияют аналогично на разупрочнение металлов при статическом нагружении. Однако для достижения одного и того же эффекта с применением ультразвука требуется значительно меньше энергии, чем при нагревании.

Растяжение монокристалла цинка (рис. 6) с периодической подачей ультразвука может служить иллюстрацией акустического разупрочнения и упрочнения. При постоянной скорости растяжения и частоте 8 кГц в моменты *a*, *e* и *i* подается ультразвук с интенсивностью соответственно 5; 15 и 25 Вт/см². Каждый раз статическое напряжение падает соответственно до точек *b*, *f* и *n*, а после обработки (горизонтальные участки кривых за этими точками), т. е. после выключения ультразвука, напряже-

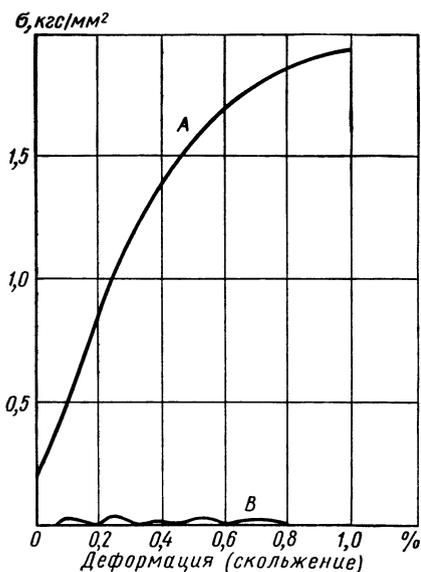


Рис. 5. Зависимость между тангенциальным напряжением и деформацией алюминиевого монокристалла:

A — без ультразвука; B — с ультразвуком

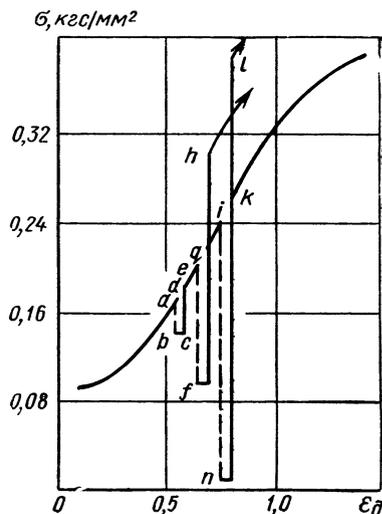


Рис. 6. Изменение статических напряжений на растяжение цинкового монокристалла при периодическом воздействии ультразвука

ние снова возрастает в первом случае до уровня соответствующей деформации в обычных условиях (точка *d*), а затем возрастает еще больше и достигает уже точек *h* и *l*.

При исследованиях на низкоуглеродистой и коррозионно-стойкой сталях, бериллии, вольфраме и других поликристаллических металлах и сплавах установлены такие же зависимости, как и в случае монокристаллов.

Результаты этих исследований можно объяснить следующим образом. Под влиянием ультразвука в материале возникают переменные напряжения, которые суммируются со статическими. В полупериод, когда сумма напряжений максимальна, достигается минимальное напряжение, необходимое для протекания пластической деформации. Кроме того, напряжения могут интенсифицировать зарождение дислокаций и их перемещение. В последнем случае дополнительная энергия, сообщенная ультразвуком металлу, способствует преодолению потенциальных барьеров для дислокаций, не обладающих достаточной энергией для перемещения. Так вызывается дополнительная пластическая деформация, вследствие которой уменьшается статическое напряжение.

При недостаточной интенсивности ультразвука дислокации только увеличивают свою амплитуду — происходят колебания вокруг равновесного положения, и диаграмма «напряжение — деформация» не отличается от диаграммы, полученной в обычных условиях. Аналогичные результаты получаются и при обработке ультразвуком малой интенсивности ненагруженных кристаллов. Когда интенсивность ультразвука увеличивается и достигает определенного значения, активирование заблокированных дислокаций и зарождение новых вызывает элементарные пластические деформации. Вследствие этого увеличивается плотность дислокаций, образуется больше препятствий от перекрещения движущихся и неподвижных дислокаций и блокируются вакансии. После прекращения действия ультразвука эта дислокационная структура фиксируется и металл оказывается упрочненным.

Для деформирования такого металла в обычных условиях необходимо значительно большее усилие, чем для деформирования этого же металла с исходным структурным состоянием, т. е. до обработки его ультразвуком.

Уменьшение статического напряжения объясняют и как результат непрерывного преодоления упрочнения за счет энергии ультразвука. Последняя не только преодолевает вызванное ею упрочнение, но и создает дополнительное разупрочнение, которое проявляется в виде уменьшения усилий деформации. Таким образом, при растяжении с одновременным действием ультразвука на образец, предварительно упрочненный ультразвуком такой же мощности, снижается усилие, как и без предварительного упрочнения.

В ряде других случаев исследовали влияние ультразвука на свойства различных металлов и сплавов. Установлено [18], что микротвердость алюминия увеличивается на 150—200% в зависимости от продолжительности действия ультразвука частотой 21,5 кГц.

При ультразвуковой обработке (частота 19,5 кГц) медной нити при температуре от 20 до 700°С от 1 до 20 мин отмечено резкое понижение прочности и снижение удлинения при температуре свыше 400°С или при увеличении продолжительности обработки при одной и той же температуре. Кроме того, при ультразвуковой обработке при температуре 600—700°С в течение 15—20 мин медь переходит из пластического в хрупкое состояние, на границах зерен появляются микротрещины, а ее микротвердость уменьшается. Это приводит к хрупкому разрушению при постоянной температуре.

Медь и медные сплавы были объектом многих исследований [18]. Под влиянием ультразвука предел текучести латуни уменьшается на 50%, предел прочности на 40% и удлинение на 50%. Подобные изменения происходят с железом (табл. 1) и с медью.

1. Механические характеристики железа при растяжении в ультразвуковом поле

Наименование характеристики	Амплитуда ξ , мм			
	0	0,008	0,012	0,014
Предел текучести σ_T , кгс/мм ²	26,5	23,7	21,9	20,0
Предел прочности при растяжении σ_B , кгс/мм ² . .	36,3	32,3	29,6	27,6
Относительное удлинение δ , %	41,3	33,3	28,0	27,5
Относительное сужение ψ , %	82,2	81,5	81,0	80,4

При ультразвуковой обработке меди микротвердость сначала увеличивается (примерно до 32%), затем немного понижается и сохраняется постоянной в течение времени до полного разрушения образца. При испытании на кручение и воздействии ультразвука уменьшаются прочность и пластичность меди и прочность сплава Д16Т в температурном интервале от 0 до 300°С. Исследования образцов, отожженных в вакууме при температуре 680°С (для меди) и 400°С (для алюминия), показали, что их статическая нагрузка и удлинение [18] тоже уменьшаются в зависимости от энергии ультразвука. Кроме того, при воздействии ультразвука отличается характер процесса разрушения алюминиевых образцов. Вместо образования шейки и последующего разрыва образцы, обработанные ультразвуком, разрываются в начальный момент образования шейки. Большие исследования проведены и по влиянию ультразвука на латунь ЛС 59 [38, 39]. Испытывали образцы холоднотянутой наклепанной латуни с зернистой структурой, отожженной при 600°С (в вакууме). При частоте 34 кГц, интенсивности ультра-

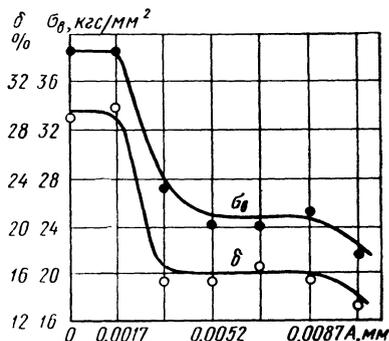
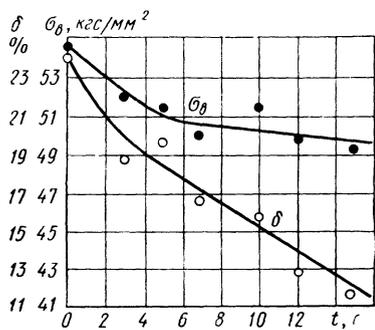


Рис. 7. Зависимости прочности на растяжение и относительного удлинения холоднотянутой латуни ЛС59 от продолжительности ультразвуковой обработки

Рис. 8. Влияние амплитуды ультразвуковых колебаний на прочность при растяжении и относительное удлинение латуни

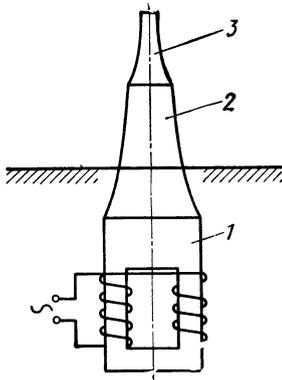


Рис. 9. Схема испытаний на усталость

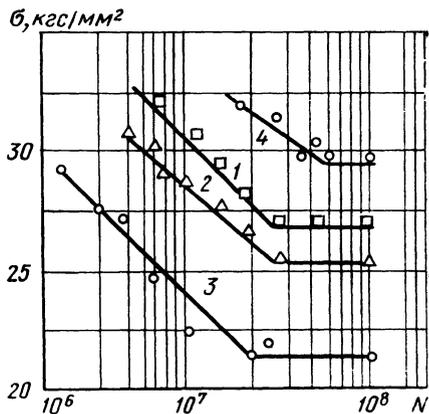


Рис. 10. Кривые усталости сталей 20 и 45 при ультразвуковой обработке: сталь 20 — кривые 1, 2, 3 для образцов диаметром 3, 4 и 5 мм; сталь 45 — кривая 4 для образцов диаметром 7,5 мм

звуча около 25 Вт/см², амплитуде 0,0125 мм и скорости деформации 25—95 мм/мин наблюдается значительное понижение прочности и относительного удлинения холоднотянутой латуни (рис. 7). При ультразвуковой обработке более 15 с образцы разрушаются. Уменьшение прочности и относительного удлинения наблюдалось и на образцах отожженной латуни. Микроструктурные исследования показывают значительное изменение структуры холоднотянутой латуни в месте разрушения. Под влиянием ультразвука устраняется наклеп, образуются равноосные зерна α -фазы и по их границам отделяется β' -фаза, которая тверда и хрупка. По этой причине β' -фаза придает латуни хрупкость при ее испытании на растяжение.

При испытании образцов латуни на растяжение с одновременным воздействием ультразвука нагрузка уменьшается, а предел текучести снижается с 35 до 15 кгс/мм². Предел прочности на растяжение тоже значительно уменьшается. Наибольшее влияние на уменьшение предела прочности на растяжение и относительного удлинения оказывает амплитуда (рис. 8). В исследованиях наблюдалось также и тепловое влияние ультразвука: на изменение предела текучести влияет повышение температуры вследствие поглощения ультразвуковой энергии.

Ультразвуковые колебания вызывают циклическое знакопеременное нагружение в твердых металлах, вследствие чего их можно применять для испытания на усталость. Большая частота изменения напряжений приводит к сокращению продолжительности испытаний на усталость в сотни и тысячи раз по

сравнению с обычными методами испытаний. Кроме того, испытание с применением ультразвука осуществляется просто и легко.

При ультразвуковом испытании на усталость образец 3 (рис. 9) крепят неподвижно к концентратору 2 магнитострикционного преобразователя 1. Форма и размеры образцов должны соответствовать длине ультразвуковой волны, и во время испытаний образцы нужно охлаждать. На рис. 10 показаны кривые усталости сталей 20 и 45 при 10^7 циклах и частоте ультразвука 20 кГц. Результаты показывают некоторое увеличение усталостной прочности, что объясняется преобладанием упрочнения материала над его разупрочением. Подобные результаты получаются и при испытании алюминия.

Много исследований выполнено и по усталостной прочности меди и других металлов и сплавов. В ряде случаев испытание с ультразвуком дает более точное представление об усталостной прочности металла и о механизме разрушения.

Наряду с изменением механических свойств металлов и сплавов в твердом состоянии из-за изменения их структуры могут изменяться и некоторые их физические свойства. Установлено, что под действием ультразвука усиливается намагничивание ферромагнитных материалов (никеля), но остаточный магнетизм уменьшается. Намагничивание тем более сильно, чем больше интенсивность ультразвука. Кроме того, под действием ультразвука медленнее теряется энергия для перенамагничивания никеля.

Глава

5

**Применение
ультразвука
при термической
и химико-
термической
обработке
сплавов**

•

Г.С. АНГЕЛОВ

§ 1. СТАРЕНИЕ СПЛАВОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Процесс старения сплавов интенсифицируется под действием ультразвука. Первые исследования в этой области выполнены с легкоплавкими сплавами. Установлено [2], что под влиянием ультразвука частотой 30 кГц естественное старение дюралюминия уменьшается с 50—90 до 0,7—1,5 ч, т. е. примерно в 60—80 раз, а твердость увеличивается на 30—50%. Ускорение процесса старения связано с уменьшением энергии активации.

Значительное ускорение старения установлено и для других алюминиевых сплавов (Д1, Д16, силумина Ал4 и сплава В95). На рис. 1 и 2 [2] показано изменение твердости при естественном старении алюминиевого сплава В95, закаленного при 475°С, в зависимости от времени при 20 и 125°С. При нагревании легирующие элементы растворяются в алюминии, а при закалке фиксируется пересыщенный твердый раствор. Последующее старение связано с выделением дисперсной фазы и повышением твердости благодаря упрочнению сплава и деформации кристаллической решетки. Ультразвук ускоряет старение примерно в 20—25 раз и приводит к более сильному упрочнению сплава, чем естественное или искусственное старение без ультразвукового воздействия. При обработке сплава Ал4 (рис. 3), который обычно стареет только при повышении температуры, ультразвук вызывает резкое ускорение процесса и повышение твердости. Подобные изменения наблюдаются и у других алюминиевых сплавов. Наряду с этим интересно отметить, что данные, полученные при

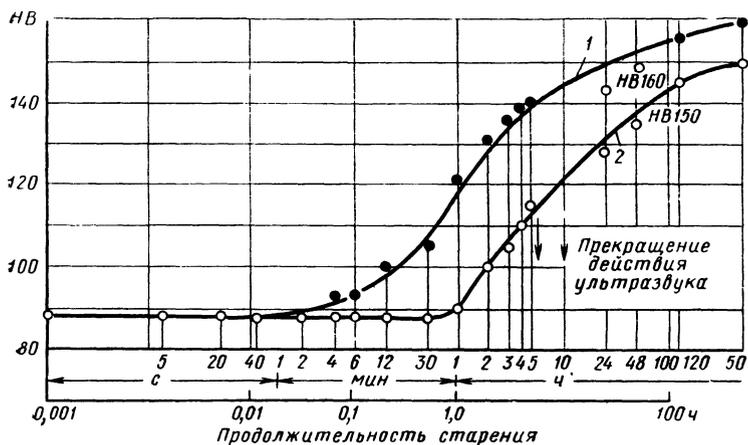


Рис. 1. Влияние ультразвука на естественное старение алюминиевого сплава В95:

1 — с ультразвуком; 2 — без ультразвука

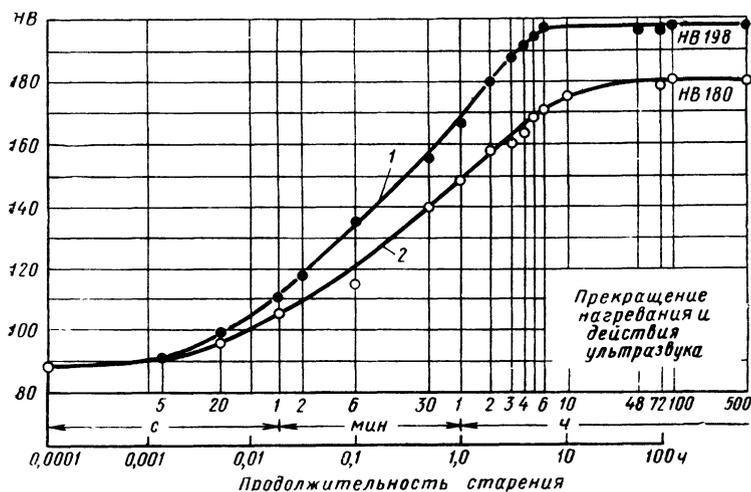


Рис. 2. Влияние ультразвука на искусственное старение алюминиевого сплава В95 при 125° С:

1 — с ультразвуком; 2 — без ультразвука

применении ультразвука частотой 1 МГц и интенсивностью 1,6 Вт/см², аналогичны для ультразвука частотой только 30 кГц и интенсивностью 10 Вт/см². Интересные исследования выполнены по влиянию частоты ультразвука в широком диапазоне (от 300 до 1500 кГц), на основании которых сделан вывод о независимости дисперсионного твердения от частоты

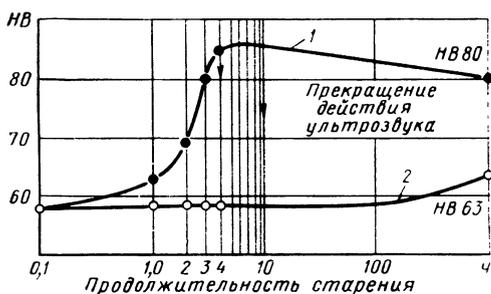


Рис. 3. Влияние ультразвука на естественное старение сплава Al4
 1 — с ультразвуком; 2 — без ультразвука

ультразвука. Наибольшее влияние на этот процесс оказывает интенсивность ультразвука. Установлено, что наряду с увеличением твердости при старении дюралюминия, кристаллизовавшегося в ультразвуковом поле и после этого подвергавшегося ультразвуковой обработке в продолжение 60 мин, значительно повышены прочность, предел текучести и относительно электрическое сопротивление, увеличена ширина и ослаблена интенсивность интерференционных линий из-за измельчения блоков с мозаичной структурой (фрагментация и отделение новой фазы) и др.

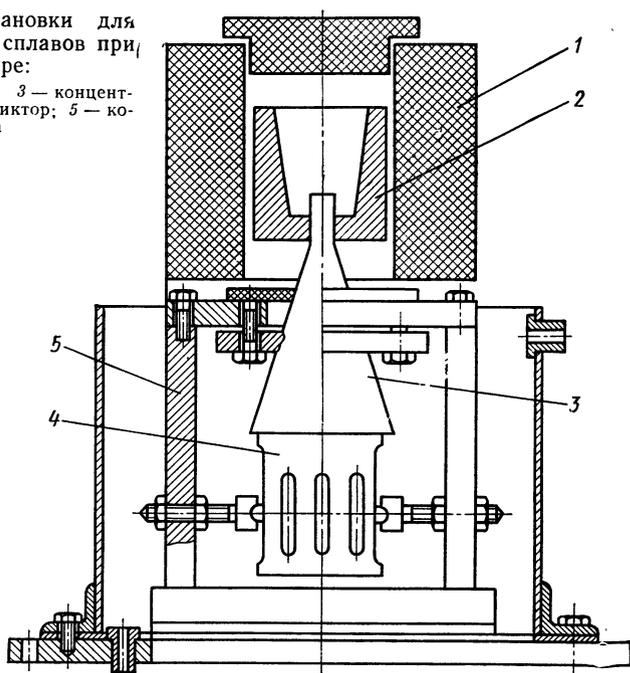
Старение различных алюминиевых сплавов и сталей было предметом ряда исследований [2, 49]. Во всех случаях ультразвук ускорял процесс и увеличивал твердость сплавов. Слабый эффект получался только при естественном старении сплава элинвара и некоторых других жаростойких сплавов [2]. Считают, что действие ультразвука при естественном старении недостаточно для сплавов, стареющих при высоких температурах (700—900° С).

Вывод о том, что процесс старения не зависит от частоты ультразвука, оказался особо полезным для практики при изучении тугоплавких сплавов и сплавов, стареющих при высокой температуре (700—1000° С). Этот вывод позволил в ряде исследований исключить применение пьезокварцевых и титанатобариевых излучателей, работающих при низких температурах (до 130° С), и использовать магнитострикционные преобразователи. При исследовании искусственного старения жаропрочного сплава на никелевой основе типа нимоник использован магнитострикционный преобразователь, излучатель которого сообщает ультразвук образцам, помещенным в ванну со свинцом при температуре 700—750° С (рис. 4). Механические испытания на твердость и удар после отжига с различной продолжительностью воздействия ультразвука частотой 21,5 кГц показали сокращение продолжительности процесса старения вдвое.

Значительно большее ускорение старения (в 40—50 раз) достигнуто [2] при искусственном старении жаропрочного никеле-

Рис. 4. Схема установки для изучения старения сплавов при высокой температуре:

1 — печь; 2 — тигель; 3 — концентратор; 4 — магнитоотриктор; 5 — кожух магнитоотриктора



вого сплава ЭИ437Б с обработкой ультразвуком частотой 20—25 кГц при температурах 700, 750 и 800°С. Ультразвук предотвращает коагулирование выделенных дисперсных фаз, полученных при искусственном старении при высоких температурах (800°С).

Эффект воздействия ультразвука наибольший во время первой стадии процесса, когда образуются зародыши новой фазы, и незначителен на стадии коагулирования отделившихся дисперсных частиц. Это оказалось особо благоприятным для процессов старения жаропрочных сталей и сплава нимоник.

Особое место в объяснении механизма влияния ультразвука на старение занимает повышение температуры при старении дюралюминия с применением ультразвука. Оказалось, что старение дюралюминия при температуре, равной полученной под действием ультразвука, протекает аналогично тому, как при воздействии последнего. Это дало повод для объяснения влияния ультразвука на старение только тем, что он повышает температуру.

Однако следует учитывать, что одного влияния температуры недостаточно для такого сильного интенсифицирующего воздействия на рассматриваемый процесс. Подтверждением этого является почти двукратное ускорение старения свинцового сплава с 1.5% сурьмы и кальциевого баббита (1% кальция,

0,8% натрия, остальное свинец), хотя эти сплавы нечувствительны к температурным отклонениям.

Однако имеются и эксперименты, при которых ультразвук не ускоряет процесс старения. Так, при искусственном старении стали с содержанием 0,06 и 0,018% углерода после закалки и деформирования сплава, содержащего 90% свинца и 10% олова, не обнаружено ускоренного старения под действием ультразвука. Однако эти результаты не являются достаточно убедительными, чтобы полностью отрицать благоприятное влияние ультразвука на старение.

§ 2. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ЗАКАЛКЕ И ОТПУСКЕ СПЛАВОВ

Эффекты, вызываемые ультразвуком в жидкостях и твердых телах, могут быть успешно использованы при закалке и отпуске сталей. Из этих эффектов особое значение имеет разрушение пограничного слоя жидкостей, непосредственно соприкасающихся с твердыми телами. Интенсивное перемешивание расплава и возникновение кавитации на поверхности твердых тел под действием ультразвука вызывают разрушение пограничного слоя и интенсификацию теплообмена с жидкостями, т. е. увеличивается ее охлаждающая способность. С другой стороны, в процессе охлаждения при закалке на поверхности деталей образуется слой газов и пара, который тоже изменяет охлаждающую способность среды. Ультразвук вызывает эффективное разрушение и этого слоя и обеспечивает более продолжительный контакт между твердыми телами и жидкостями. Таким образом, он тоже увеличивает охлаждающую способность закаливающей среды.

Опыты показали, что введение ультразвука в охлаждающую среду (масло и соляные растворы) вызывает более эффективное разрушение паровой рубашки и более энергичное охлаждение, чем обычное механическое перемешивание, очень часто применяемое на практике при закалке.

Разрушение паровой рубашки и увеличение охлаждающей способности дают возможность для замены воды и некоторых резко

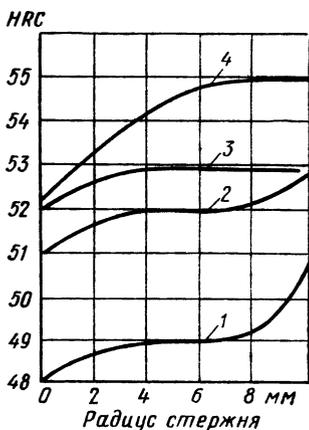


Рис. 5. Распределение твердости по радиусу стального стержня:

1 — обычная закалка; 2 — закалка с механическим перемешиванием ванны; 3 — закалка с воздействием ультразвука; 4 — закалка с механическим перемешиванием и воздействием ультразвука

охлаждающих жидкостей другими жидкостями, охлаждающими «мягче». Это приводит к уменьшению внутренних напряжений, деформаций и опасности появления трещин в закаливаемых деталях. Кроме того, увеличение охлаждающей способности среды улучшает прокаливаемость и позволяет во многих случаях заменять высоколегированные стали низколегированными или углеродистыми, что подтверждается исследованиями на различных марках сталей и сплавов цветных металлов.

На рис. 5 представлено распределение твердости *HRC* по радиусу стального стержня диаметром 17,5 мм, закаленного при различных условиях. Закалка с ультразвуком значительно эффективнее обычной закалки и закалки с механическим перемешиванием охлаждающей среды. При сочетании перемешивания охлаждающей среды и ультразвука удается получить самую большую твердость. Видно также, что распределение твердости по поперечному сечению стержня при закалке с ультразвуком более равномерно, что свидетельствует о более высокой прокаливаемости стали. Кроме того, при этом способе закалки детали получаются более чистыми и содержат меньше окалины и прилипшего масла. Последующая очистка деталей облегчается, а расход масла уменьшается примерно на 48%.

Однако чтобы достичь такого изменения охлаждающей способности среды, необходима достаточно большая интенсивность ультразвука, обеспечивающая образование кавитации в охлаждающей жидкости [2, 49].

Особый интерес представляет закалка легированных и инструментальных сталей с воздействием ультразвука для уменьшения остаточного аустенита. Последний распадается при ультразвуковой закалке, а твердость и прокаливаемость сталей У8 и Х12Ф увеличиваются. Инструменты, закаленные этим способом, имеют повышенную стойкость при резании.

Имеются и противоположные данные о применении ультразвука при закалке. При очень интенсивном охлаждении, когда ультразвук не оказывал существенного влияния на повышение охлаждающей способности среды, при закалке стали под действием ультразвука получилась меньшая твердость по сравнению с твердостью при обычной закалке.

Наряду с закалкой ультразвук оказывает положительное влияние и на отпуск закаленных изделий. Положительные результаты в этом отношении получены при экспериментах с углеродистыми, инструментальными легированными и быстрорежущими сталями.

При отпуске ультразвук увеличивает скорость нагревания. Этот эффект уменьшает продолжительность нагревания и сокращает общую продолжительность процесса. Наряду с этим ультразвук вызывает и изменения свойств отпущенной стали. Так, при отпуске стали ШХ15 воздействие ультразвука повышает прочность на удар, уменьшает твердость, удельное элект-

росопротивление и остаточные напряжения. Аналогичные изменения твердости и прочности на удар получаются и для стали 12ХНЗА. Однако применение ультразвука при отпуске стали 40ХГР, напротив, уменьшает прочность на удар и увеличивает твердость и электросопротивление этой стали. Существенное уменьшение остаточных напряжений возникает особенно при низких температурах отпуска. В различных температурных интервалах отпуска стали У8 в случае применения ультразвука получается большая или меньшая твердость, чем без его применения. Эти результаты можно объяснить не только стабилизирующим, но и диспергирующим действием ультразвука на структуру. При использовании ультразвука в процессе отпуска быстрорежущих сталей Р9 и Р18 получается более высокая твердость, а остаточного аустенита меньше.

Противоречивые результаты, полученные при отпуске некоторых марок сталей с применением ультразвука, говорят о необходимости строго соблюдать режим отпуска при промышленном применении ультразвука.

§ 3. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ГРАФИТИЗАЦИЮ БЕЛОГО ЧУГУНА

Проведено мало исследований по влиянию ультразвука на графитизацию белого чугуна. Нельзя ожидать и широкого промышленного применения ультразвука для этой цели, так как графитизирующий отжиг белого чугуна обычно производится в твердой засыпной закрытой опоке, в которой невозможно возбуждать ультразвук. Непосредственный ввод ультразвука в отжигаемые детали трудно осуществить. Несколько лучшие возможности введения ультразвука существуют при отжиге в жидкой среде во время первой стадии графитизации. Однако при этом в отжигаемые детали поступает очень малая часть ультразвуковой энергии. Дополнительные трудности возникают и в связи с высокой температурой отжига и большой продолжительностью процесса распада цементита.

Первые эксперименты по графитизации белого чугуна путем непосредственной подачи ультразвука в отжигаемые образцы дали положительные результаты. Образцы из белого чугуна диаметром 15 мм припаивали медью или же соединяли резьбовыми соединениями с излучателем ультразвука магнетострикционного преобразователя. При подаче электрической мощности 2 кВт от генератора ГУ1-6 и частоте 20,5 кГц отжигали образцы в печи электросопротивления вместе с эталонными образцами, после чего проводили металлографические исследования. Установлено, что ультразвук способствует образованию более крупных зародышей графита вследствие ускоренного распада цементита и уменьшения инкубационного периода. Кроме

того, ускорение диффузии под влиянием ультразвука увеличивает скорость нарастания образовавшихся зародышей графита. В условиях экспериментов автором получена большая разница в количестве и форме графита (рис. 6) в эталонных (а) и в обработанных ультразвуком (б) образцах. Очевидно, значительное ускорение графитизации оказалось неблагоприятным для формы графита. При экспериментах по графитизации под действием ультразвука форма графита получалась худшей, но сами графитовые включения распределялись более равномерно.

Первая и вторая стадии графитизации белого чугуна завершались значительно быстрее, если во время отжига применялся ультразвук. Чтобы избежать получения неблагоприятной формы графита, рекомендуют проводить отжиг с подачей ультразвука при более низкой температуре, чем температура отжига без ультразвука. Тогда действие ультразвука получается более эффективным. Из микроструктур на рис. 7 можно видеть, насколько процесс графитизации при подаче ультразвука опережает графитизацию в эталонном образце. При одинаковой продолжительности отжига в течение первой стадии и охлаждении до 600°C со скоростью $12^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ эталонный образец охлаждался

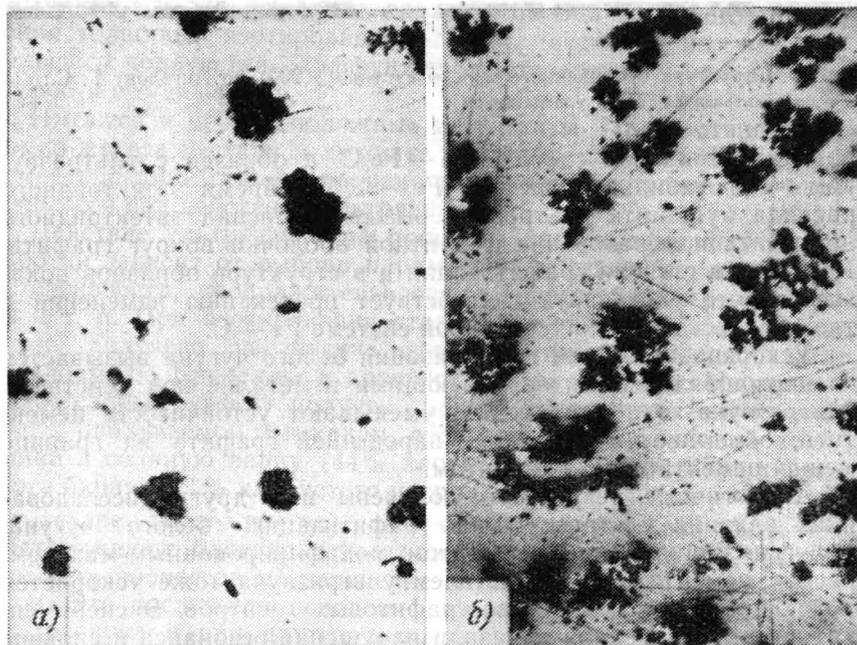


Рис. 6. Микроструктура белого чугуна ($\times 200$):
а — отжиг без ультразвука; б — отжиг с ультразвуком

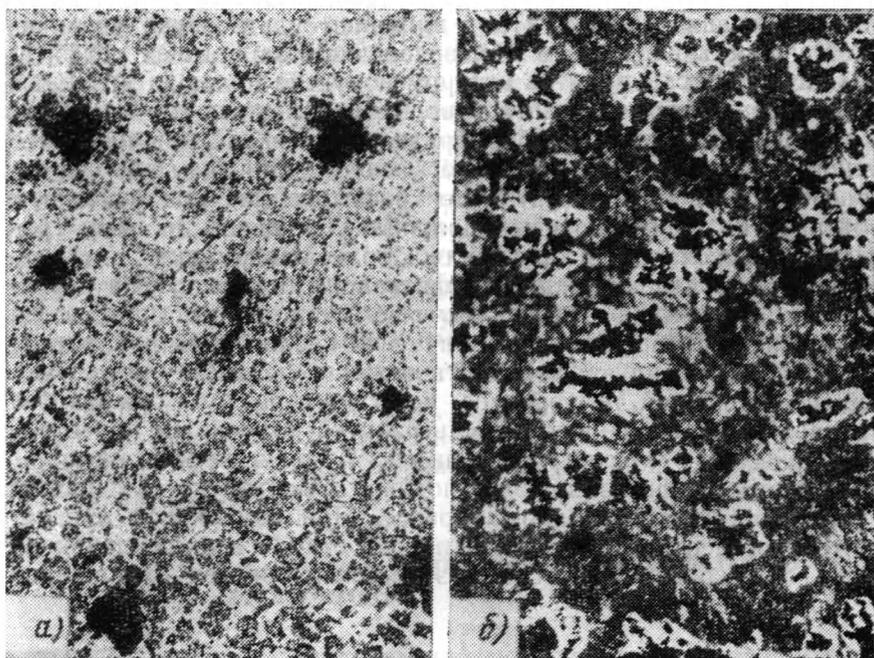


Рис. 7. Структура отожженного белого чугуна ($\times 200$) по Ангелову Г. С.:
а — без ультразвука; *б* — с ультразвуком

по метастабильной системе $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$, а образец с ультразвуком — по стабильной системе $\text{Fe} - \text{C}$. Во время эвтектоидного распада аустенита ультразвук вызывает распад эвтектоидного цементита и образование ферритной оболочки вокруг графита. Различие в степени графитизации и в структуре образцов показывает, что ультразвук способствует протеканию изменений в твердом состоянии по устойчивой системе $\text{Fe} - \text{C}$.

Ускорение процесса графитизации белого чугуна вызывается еще и напряжениями, возникающими в металле под действием ультразвука. Эти напряжения уменьшают устойчивость цементита, облегчают образование зародышей графита на границе между цементитом и аустенитом.

Аналогичные результаты получены и в других исследованиях влияния ультразвука на графитизацию белого чугуна. В чугуне с шаровидным графитом, модифицированным магнием, распад цементита под действием ультразвука тоже ускоряется и увеличивается количество графитовых центров. Экспериментальные исследования показали нарушение резонанса и сильное уменьшение интенсивности ультразвука при увеличении количества аустенита в процессе отжига. Эффект от действия ультразвука тем больше, чем больше его интенсивность.

§ 4. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ

При химико-термической обработке ультразвуком можно сообщать непосредственно в детали или в среды, в которых осуществляется обработка. Легче осуществить второй способ, но он менее эффективен. Обычно его применяют при химико-термической обработке в жидкой среде. В этом случае ультразвук вызывает появление ряда процессов, способствующих ускорению обработки. Такими процессами являются, например, очистка поверхности обрабатываемых деталей от различных загрязнений, интенсивное перемешивание активной среды, возникновение высоких давлений в результате кавитации, ускоряющих диффузию.

Исследовано влияние ультразвука на азотирование стали. Получено существенное увеличение скорости проникновения азота, увеличение глубины азотированного слоя и его твердости. У хромоникельмолибденовой стали, азотированной при 500° С и с дополнительным действием ультразвука, глубина азотированного слоя увеличивается с 0,1 до 0,35 мм, а твердость — с 380 до 1033 кгс/см².

В отличие от этих первых исследований при азотировании сталей некоторых марок не обнаружено значительного увеличения толщины азотированного слоя, несмотря на наличие большего количества диффундирующего азота и увеличение скорости его диффузии.

Имеются и противоположные результаты. При азотировании армко-железа и стали в аммиаке при температуре 550° С и при цементировании стали в пропане не обнаружено ускорения этих процессов под действием ультразвука.

Действие ультразвука на процессы химико-термической обработки зависит от выбора параметров ультразвука: частоты и интенсивности, продолжительности процесса, условий обработки и т. п. При азотировании стали в случае оптимального режима получено увеличение глубины проникновения азота, твердости по Бринеллю и прочности на растяжение. Несколько более слабый эффект получен при азотировании в жидкой среде, продуваемой аммиаком, с подачей ультразвуковых колебаний в соляную ванну (44% хлористого кальция, 35% хлористого бария и 21% хлористого натрия).

Другие исследования по цементации и азотированию подтверждают благоприятное влияние ультразвука на ускорение этих процессов и увеличение глубины термодиффузионного слоя. Это послужило поводом для расширения применения ультразвука и при других методах химико-термической обработки.

При борировании стали 45 в предварительно расплавленной смеси из 60% буры и 40% карбида бария при температуре

900° С под действием ультразвука (22 кГц) толщина борированного слоя получилась в 2—2,5 раза больше, чем без применения ультразвука. При борировании в случае нагревания т. в. ч. применение ультразвука дало ускорение процесса примерно в полтора раза и увеличение толщины борированного слоя. Металл оказался насыщенным боридами и имел повышенную микротвердость.

Применение ультразвука при силицировании коррозионно-стойкой стали в расплаве из хлористого бария и хлористого натрия, смешанных с пылевидным кремнием, также дало значительное ускорение процесса. Обнаружено и ускорение жидкой цементации под влиянием ультразвука.

Глава **6**

**Ультразвук
в процессах
пластического
деформирования**

•

В.П. СЕВЕРДЕНКО

А.В. СТЕПАНЕНКО

§ 1. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Воздействие ультразвука на процесс пластической деформации обусловлено влиянием его на контактные условия, свойства и структуру деформируемого металла, изменением схемы напряженного состояния, а в некоторых случаях дискретным и динамическим характером протекания пластической деформации. Действие указанных факторов проявляется в различной степени и зависит от направления колебаний, их типа, места расположения очага деформации, условий протекания процесса обработки. Возможны два нелинейных эффекта: «акустическое разупрочнение» и «акустическое упрочнение». Первый наблюдается в процессе воздействия интенсивным ультразвуком и заключается в уменьшении статического напряжения, необходимого для осуществления пластической деформации. Акустическое упрочнение металла достигается после воздействия ультразвуковых волн достаточно высокой интенсивности.

Подбором мощности ультразвука можно достичь различной степени разупрочнения даже у высокопрочных материалов, таких как нержавеющая сталь, бериллий, вольфрам и т. д. При достижении определенного уровня акустической энергии, зависящего от свойств исследуемого металла, последний может пластически деформироваться при комнатной температуре без приложения внешней нагрузки. При этом монокристаллы деформируются путем двойникования или изгиба; у поликристаллических тел разрушение происходит по границам зерен. На рис. 1 показаны кривые изменения статического напря-

жения при растяжении алюминиевых монокристаллов при различной интенсивности ультразвука и различных температурах. Видно, что ультразвуковые колебания и нагрев снижают статическое напряжение текучести. Однако для достижения одного и того же эффекта при применении ультразвука требуется энергии значительно меньше, чем при нагреве.

Эффект воздействия ультразвука на обрабатываемый металл проявляется в различной степени по длине образца, если в нем возбуждать стоячую ультразвуковую волну. Наиболее сильно он проявляется в плоскости действия максимальных знакопеременных напряжений, постепенно уменьшаясь по мере приближения к пучности смещений.

Снижение напряжений при наложении ультразвуковых колебаний в процессе пластической деформации наряду с действием акустических напряжений объясняется активацией задержанных дислокаций, вследствие чего процесс их скольжения облегчается. Наряду с процессом активации имеют место процессы устранения препятствий и образование новых дислокаций.

Активация дислокаций происходит в основном в результате поглощения акустической энергии в местах дефектов кристаллической решетки и других структурных несовершенств. Благодаря этому за малое время происходит локальный нагрев вокруг этих источников поглощения, снятие напряжений, разблокировка дислокаций, увеличение их подвижности, что обеспечивает более интенсивный ход пластической деформации. Поэтому дислокации в местах поглощения могут двигаться при более низких напряжениях, чем те, которые требуются исходя из измеренной температуры в объеме образца.

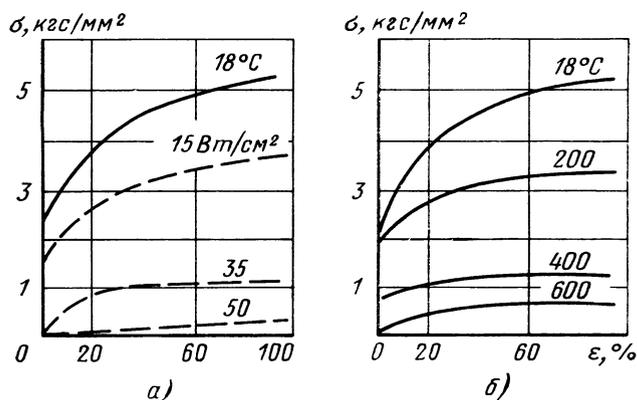


Рис. 1. Влияние интенсивности ультразвука (а) и нагрева (б) на статическое напряжение при растяжении алюминия

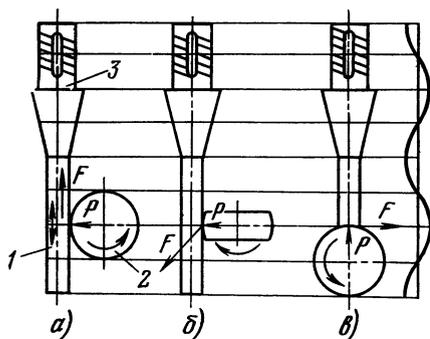


Рис. 2. Схемы колебательных систем для исследования влияния ультразвука на контактное трение:

1 — волновод; 2 — образец; 3 — преобразователь колебаний

Воздействие ультразвука на контактное трение может быть обусловлено изменением кинематики скольжения на контактной поверхности, характера взаимодействия контактируемых поверхностей и эффективности действия смазки. В первом случае это изменение в большей степени зависит от направления ультразвуковых колебаний.

Введение ультразвуковых колебаний в очаг деформации определяется в основном направлением колебаний относительно вектора сил трения и контактной поверхности (рис. 2).

При введении ультразвуковых колебаний параллельно вектору силы трения и поверхности контакта (рис. 2, а) коэффициент трения

$$\mu_y = \mu_6 \left(1 - \frac{2}{\pi} \arccos \frac{v_c}{v_m} \right), \quad (1)$$

где μ_y , μ_6 — значения коэффициентов трения при наложении ультразвуковых колебаний и в обычных условиях; v_c — скорость скольжения на поверхности контакта; v_m — амплитуда колебательной скорости волновода.

Если направление колебаний волновода параллельно поверхности контакта и перпендикулярно силе трения (рис. 2, б), то коэффициент трения

$$\mu_y = 0,63\mu_6 \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_m}{v_c}\right)^2 + 1}} K(k^2), \quad (2)$$

где $K(k^2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$ — полный эллиптический интеграл,

$$k^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_c}{v_m}\right)^2}; \quad \varphi = \frac{2\pi t}{T}.$$

При введении ультразвуковых колебаний перпендикулярно силе трения и поверхности контакта (рис. 2, в) снижение сил трения при наличии акустического контакта между ними обуславливается периодическим изменением микрогеометрии кон-

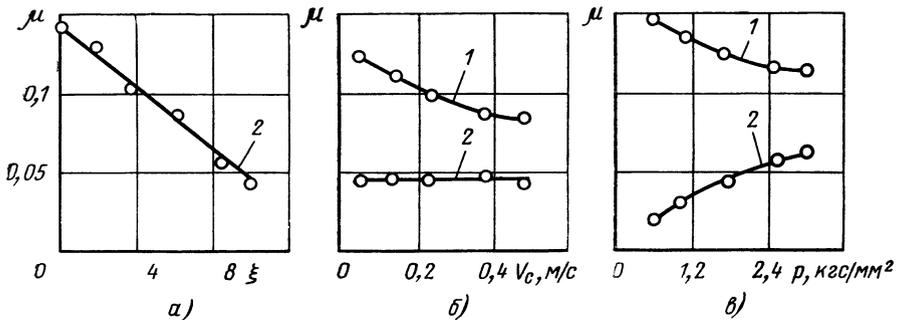


Рис. 3. Изменение коэффициента трения в зависимости от амплитуды колебаний ξ , мкм (а), скорости скольжения (б) и удельного давления (в) на поверхности контакта:

1 — без ультразвука; 2 — с ультразвуком

тактируемых поверхностей, изменением их кривизны, превращением на некотором участке реактивных сил трения в активные и рядом других факторов. Экспериментальные данные об изменении коэффициента трения при такой схеме введения колебаний представлены на рис. 3.

При изучении воздействия ультразвуковых колебаний на эффективность смазок следует учитывать их влияние на обрабатываемый металл, микрогеометрию контактируемых поверхностей и вещество смазки. Воздействие ультразвука на обрабатываемый металл заключается, во-первых, в значительном повышении поверхностной энергии, благодаря чему повышается адгезионная и адсорбционная способность металла по отношению к смазке. Во-вторых, ультразвуковые колебания способствуют развитию дефектов структуры (микротрещин, микропор), что является необходимым условием воздействию подготовки деформируемого металла к наиболее активному адсорбционных слоев.

1. Снижение контактного трения под действием ультразвука при осадке меди, %

Смазка	6-й класс шероховатости					9-й класс шероховатости			
	Степень деформации, %					Степень деформации, %			
	10	15	20	25	30	10	15	20	25
Свиной жир	52	45	40	37	34	63	47	28	22
Машинное масло	42	34	28	30	15	32	30	25	20
Касторовое масло	27	23	20	18	17	48	26	25	25
Олеиновая кислота	13	12	10	10	10	64	60	56	49
Мыло хозяйственное	15	9	5	3	3	48	31	22	22

Изменение микрогеометрии контактируемых поверхностей может вызывать засасывание смазки, ее распыление и более равномерное распределение по контактной поверхности. Различные смазки эффективны только для определенного класса чистоты обработки поверхности инструмента (табл. 1). При режимах жидкостного трения, когда эффективность смазки обусловлена ее адгезионными и прочностными свойствами, ультразвуковые колебания могут повысить эффективность смазки благодаря снижению сопротивления сдвигу.

Ультразвуковые колебания могут ускорять химические реакции на контактной поверхности, что значительно повышает эффективность смазки в случае химической адсорбции.

§ 2. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Колебательная система для обработки металлов давлением состоит из одного или нескольких преобразователей электрических колебаний в упругие, волноводной системы для трансформации, преобразования и усиления колебаний, заготовок и рабочего инструмента, соединенных в один технологический узел. Преобразователи колебаний в установках используют как стандартные, так и специального исполнения. В некоторых случаях элементы колебательной системы могут быть совмещены. Так, например, рабочий инструмент может служить звеном для трансформации и усиления колебаний. Все элементы колебательной системы должны быть строго увязаны по акустическим, механическим и конструктивным параметрам. Колебательную систему называют замкнутой, если она изолирована и при работе во всех ее звеньях возбуждается стоячая ультразвуковая волна. Если резонансный режим работы обеспечивается только в части технологического узла, то такую колебательную систему называют разомкнутой.

Колебательные системы классифицируют по акустическим и технологическим параметрам. По первому признаку колебательные системы подразделяют в зависимости от места расположения очага деформации и типа колебаний инструмента. При работе колебательной системы в режиме стоячей волны имеются пучность колебаний (узел напряжений) и пучность напряжений (узел колебаний). Эти два сечения и определяют место расположения очага деформации. Колебания инструмента могут быть продольными, радиальными, крутильными, поперечными и реже изгибными.

Продольные ультразвуковые колебания в очаге деформации можно получить в разомкнутой и замкнутой колебательных системах. Разомкнутая колебательная система получается в том случае, если один из инструментов выполнен без учета тре-

бований резонанса, т. е. форма и размеры его выбраны произвольно. Варианты такого рода колебательных систем для выполнения различных технологических операций показаны на рис. 4. Деформация заготовок во всех случаях производится за счет периодических ударов колеблющегося инструмента. Максимальное значение возникающего при этом динамического напряжения σ_d зависит от напряжения σ_c , вызванного статической силой, и приближенно

$$\sigma_d \approx 1,5\sigma_c \frac{T}{t_k}, \quad (3)$$

где t_k — время контакта инструмента с заготовкой.

Разновидностью такого способа деформации являются колебательные системы, в которых колеблющийся волновод наносит периодические удары по инструменту, не скрепленному с колеблющимся звеном. Необходимо, чтобы масса незакрепленного инструмента, по которому наносит удары резонансный волновод, была значительно меньше массы волновода. Варианты таких колебательных систем показаны на рис. 5.

Основным недостатком разомкнутых колебательных систем является ограниченное статическое усилие, которым можно ее нагружать. Поэтому разомкнутую колебательную систему следует применять для обработки материалов, обладающих низким сопротивлением деформации. При деформации относительно прочных материалов эффект такой колебательной системы может быть достигнут путем уменьшения размеров очага деформации или увеличения колеблющейся массы элементов.

Замкнутые колебательные системы основаны на присоединении к резонансной колебательной системе путем создания дополнительной нагрузки резонансных размеров. На рис. 6, а, б колебательные системы работают с отражателями, представляющими собой стержни резонансной длины, на которых закреплен инструмент. При работе с двумя преобразователями (рис. 6, в), совершающими синфазные колебания, для создания резонансной колебательной системы необходимо, чтобы общая длина волноводной системы между торцами преобразователей, включая и заготовку, была равна нечетному числу длин полуволн. Преимуществом замкнутых колебательных систем является возможность использования их при больших статических нагрузках, не превышающих, однако, предела упругости составляющих звеньев.

В замкнутой колебательной системе очаг деформации может быть расположен также в пучности напряжений, когда длина элементов колебательной системы до и после очага деформации кратна нечетному числу четвертой длины волны (рис. 7, а). Стоячая волна в такой колебательной системе может быть возбуждена только под действием статического усилия, т. е. систе-

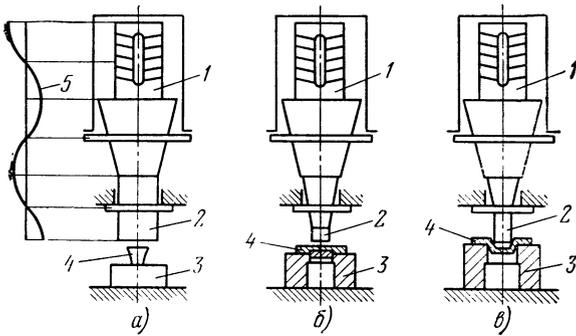


Рис. 4. Разомкнутые колебательные системы для выполнения операций осадки (а), вырубki-пробивки (б) и вытяжки (в):

1 — преобразователь; 2 — волновод-пуансон; 3 — матрица; 4 — заготовка; 5 — эпюра смещений

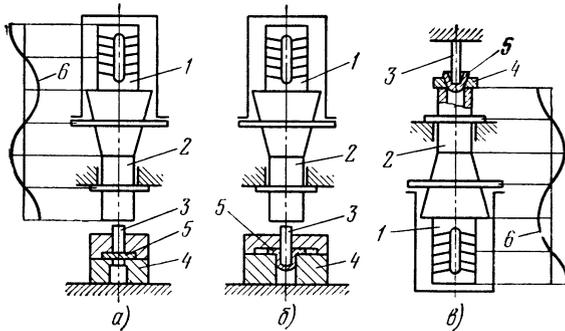


Рис. 5. Колебательные системы с незакрепленным инструментом для вырубki-пробивки (а) и вытяжки (б, в):

1 — преобразователь; 2 — волновод; 3 — пуансон; 4 — матрица; 5 — заготовка; 6 — эпюра смещений

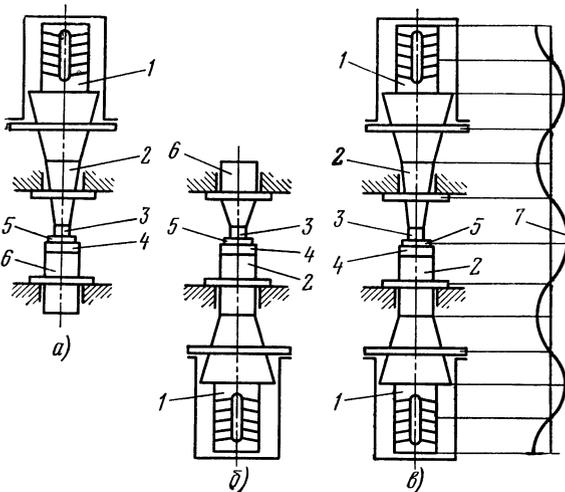


Рис. 6. Замкнутые колебательные системы с расположением очага деформации в пучности смещений:

а — колебания совершает пуансон; б — колебания совершает матрица; в — колебания совершают оба инструмента; 1 — преобразователь; 2 — волновод; 3 — пуансон; 4 — матрица; 5 — заготовка; 6 — отражатель; 7 — эпюра смещений

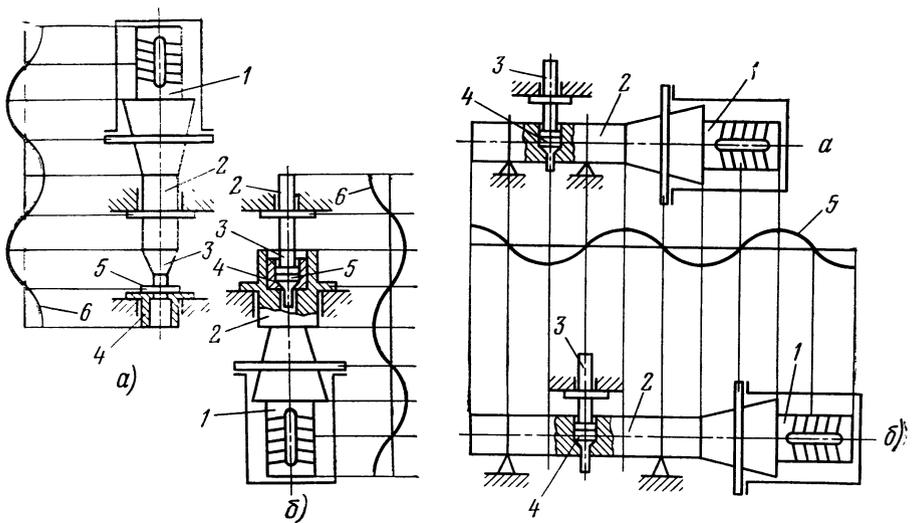


Рис. 7. Замкнутые колебательные системы с расположением очага деформации в пучности напряжений:

а — вырубка-пробивка; б — выдавливание; 1 — преобразователь; 2 — волновод; 3 — пуансон; 4 — матрица; 5 — заготовка; 6 — эпюра смещений

Рис. 8. Колебательные системы с расположением очага деформации в пучности (а) и узле (б) продольных смещений, перпендикулярных к действующему усилию:

1 — преобразователь; 2 — волновод-матрица; 3 — пуансон; 4 — заготовка; 5 — эпюра смещений

му необходимо настраивать в резонанс в процессе деформации заготовки. В момент холостого хода резонансный режим работы нарушается.

Этого недостатка лишена колебательная система (рис. 7, б), в которой колебания возбуждаются в волноводе полуволновой длины и очаг деформации расположен в пучности напряжений. Матрица в такой колебательной системе может быть незакрепленной («плавающей»). Это позволяет в большей степени использовать энергию ультразвуковых колебаний.

Для обработки металлов давлением могут быть применены также продольные колебательные системы, в которых направление распространения колебаний перпендикулярно действующему усилию. Очаг деформации в таких колебательных системах располагают в пучности или узле смещений стоячей ультразвуковой волны (рис. 8). Системы с радиальными колебаниями инструмента могут быть созданы на базе излучателей радиальных колебаний (рис. 9).

Диаметр диска излучателя

$$D = \frac{x}{\pi f} c, \quad (4)$$

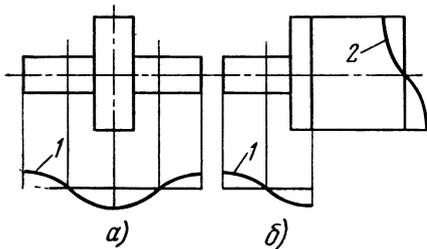


Рис. 9. Излучатели для превращения продольных колебаний в радиальные с расположением диска симметрично пучности смещений (а) и на конце резонансного волновода (б):

1 — эпюра смещений в продольной волне; 2 — эпюра смещений в радиальной волне

где x — корень уравнения

$$xJ_0(x) - \frac{1 - 2\mu_n}{1 - \mu_n} J_1(x) = 0; \quad (5)$$

здесь $I_0(x)$ и $I_1(x)$ — бesselовы функции нулевого и первого порядка; μ_n — коэффициент Пуассона.

В табл. 2 приведены значения x в зависимости от коэффициента Пуассона для колебаний различных порядков.

Такие колебательные системы могут служить для выполнения операций вытяжки, вырубки-пробивки, выдавливания (рис. 10) и др. Очаг деформации в этих колебательных системах расположен в центре диска излучателя радиальных колебаний. Вследствие большой колеблющейся массы диска форма и размеры второго инструмента могут быть выполнены произвольно. Варьируя размеры диска излучателя, можно получить колебания нескольких порядков, что позволяет создать многопозиционные ультразвуковые устройства для осуществления процессов пластической деформации (рис. 11). В одном устройстве (рис. 11, а) очаг деформации расположен в пучности радиальных смещений, а в другом — в пучности радиальных напряжений (рис. 11, б). Многопозиционное устройство может быть создано также путем закрепления инструмента на цилиндрической поверхности диска (рис. 11, в). Для лучшего монтажа инструмента поверхность диска выполняют граненой. Колебания инструмента в последней схеме будут продольными.

Системы с крутильными колебаниями инструмента аналогичны системам с продольными колебаниями (см. рис. 6 и 7).

2. Значения корней уравнения

Порядок колебания	Значения x при μ_n , равном												
	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48
1	2,06	2,08	2,10	2,12	2,15	2,17	2,20	2,22	2,25	2,28	2,31	2,33	2,35
2	5,39	5,40	5,41	5,41	5,42	5,43	5,44	5,45	5,46	5,47	5,48	5,49	5,50
3	8,57	8,57	8,58	8,59	8,59	8,60	8,61	8,61	8,62	8,63	8,63	8,64	8,64
4	11,73	11,73	11,74	11,74	11,75	11,75	11,76	11,76	11,77	11,77	11,78	11,78	11,78

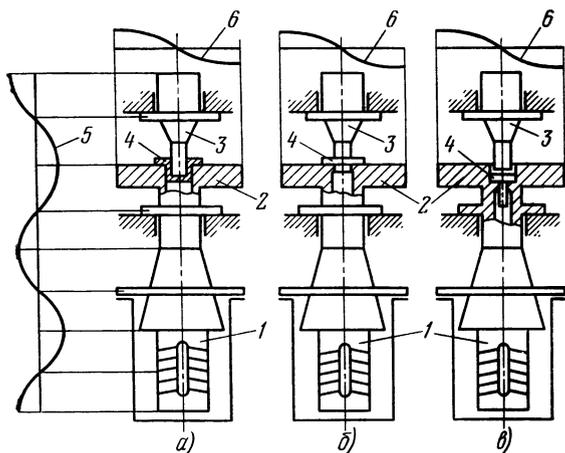


Рис. 10. Колебательные системы для вытяжки (а), вырубки-пробивки (б) и выдавливания (в) с радиальными колебаниями матрицы:

1 — преобразователь продольных колебаний; 2 — излучатель радиальных колебаний; 3 — пуансон-волновод; 4 — заготовка; 5 — эпюра продольных смещений; 6 — эпюра радиальных смещений

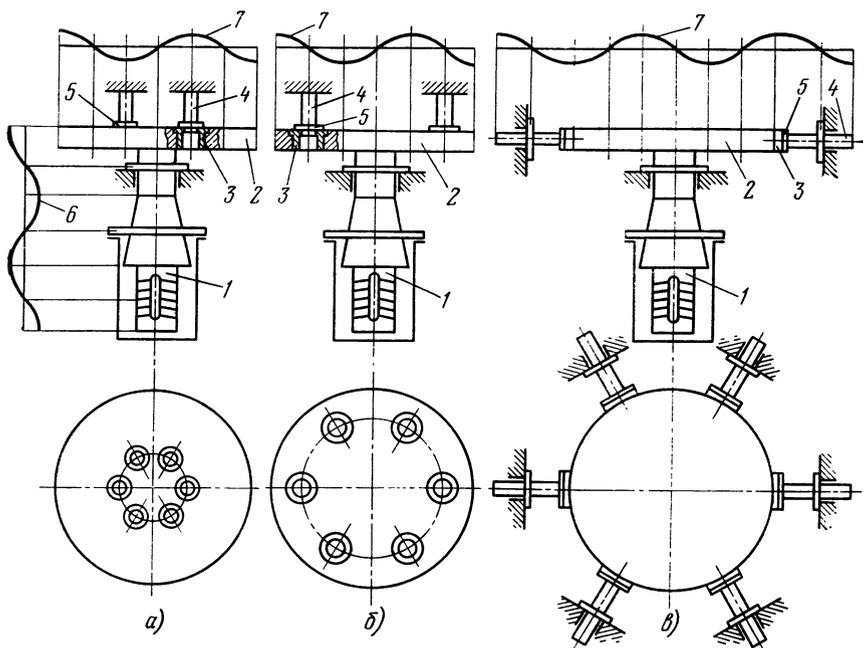


Рис. 11. Многопозиционные ультразвуковые устройства на базе излучателя радиальных колебаний:

1 — преобразователь; 2 — излучатель радиальных колебаний; 3 — матрица; 4 — пуансон; 5 — заготовка; 6 — эпюра продольных смещений; 7 — эпюра радиальных смещений

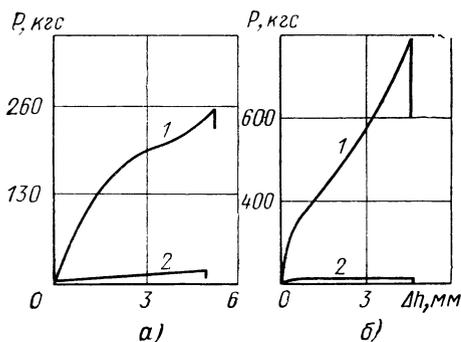
Колебательные системы для обработки металлов давлением должны обеспечивать:

1. Максимальный отбор мощности от преобразователей.
2. Минимальные потери энергии в звеньях колебательной системы.
3. Минимальные потери энергии в пассивных элементах конструкции штампа для выполнения технологических операций.
4. Наибольшую концентрацию акустической энергии непосредственно в очаге деформации.
5. Устойчивость резонансного режима колебательной системы при изменении действующей на нее статической нагрузки.
6. Равномерность излучения по всей площади очага деформации.
7. Стабильность работы колебательной системы во времени при длительной эксплуатации.
8. Конструктивную и технологическую простоту звеньев и всей акустической системы в целом.

§ 3. СВОБОДНАЯ И ЗАКРЫТАЯ ОСАДКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Сопротивление деформации при осаживании с наложением ультразвуковых колебаний зависит от типа применяемой колебательной системы. При осадке с использованием разомкнутой колебательной системы (см. рис. 4, а) деформация металла происходит практически при нулевой статической нагрузке (рис. 12) и образцы приобретают форму конуса или обратной бочки. При осадке в пучности продольных смещений с применением замкнутой колебательной системы (см. рис. 6, а) степень снижения статического напряжения, необходимого для протекания пластической деформации, зависит от свойств материала, размеров образцов (рис. 13) и степени деформации. Высота образцов — полтора диаметра.

При холодной объемной штамповке с применением колебательной системы (см. рис. 6, в) под воздействием ультразвука

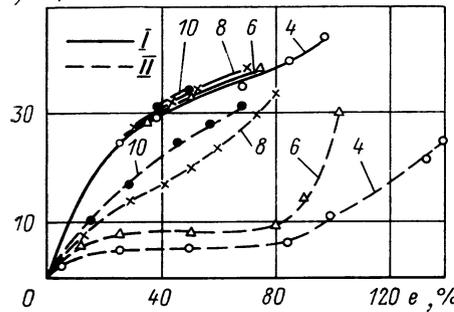


снижаются удельные давления (рис. 14), изменяется характер течения металла, повышается чистота поверхности (табл. 3) и точность

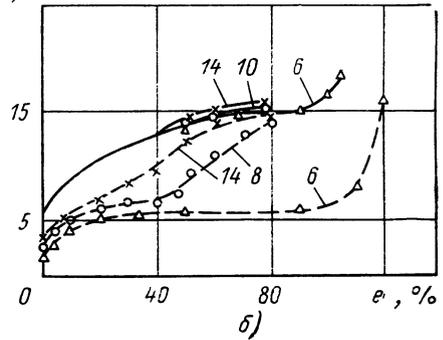
Рис. 12. Диаграммы осаживания алюминиевых (а) и медных (б) образцов:

1 — в обычных условиях; 2 — с наложением ультразвука

$P, \text{кгс/мм}^2$



$P, \text{кгс}$



$P, \text{кгс/мм}^2$

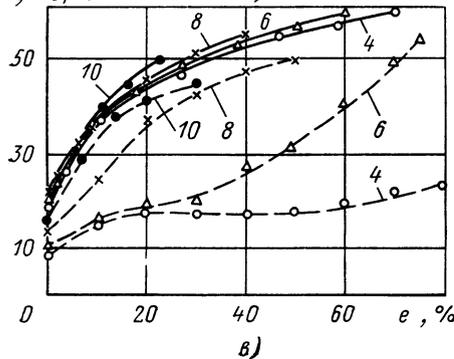


Рис. 13. Кривые напряжений при осадке медных (а), алюминиевых (б) и армо-железа (в) образцов в обычных условиях (I) и с наложением ультразвука (II). Цифры на кривых обозначают диаметр образцов, мм

3. Шероховатость поверхности штампованных изделий

Материал	№ образца	Штамповка в обычных условиях				Штамповка с наложением ультразвука			
		Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм							
		R_{a_1}	R_{a_2}	R_{a_3}	R_a среднее	R_{a_1}	R_{a_2}	R_{a_3}	R_a среднее
Алюминий	1	0,60	0,53	0,52	0,55	0,30	0,26	0,28	0,28
	2	0,45	0,41	0,46	0,44	0,28	0,32	0,31	0,30
	3	0,44	0,44	0,46	0,45	0,26	0,27	0,22	0,26
	Среднее значение	—	—	—	0,48	—	—	—	0,28
Медь	1	0,30	0,37	0,35	0,34	0,13	0,14	0,15	0,14
	2	0,39	0,37	0,38	0,38	0,11	0,11	0,12	0,11
	3	0,26	0,28	0,26	0,27	0,12	0,10	0,11	0,11
	Среднее значение	—	—	—	0,33	—	—	—	0,12

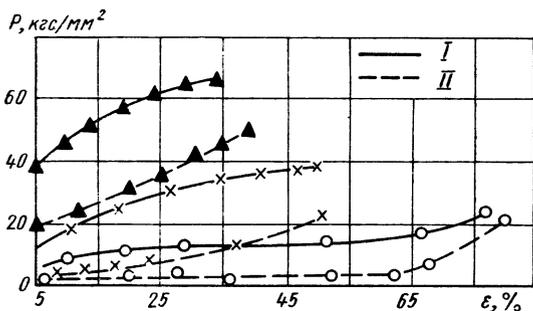
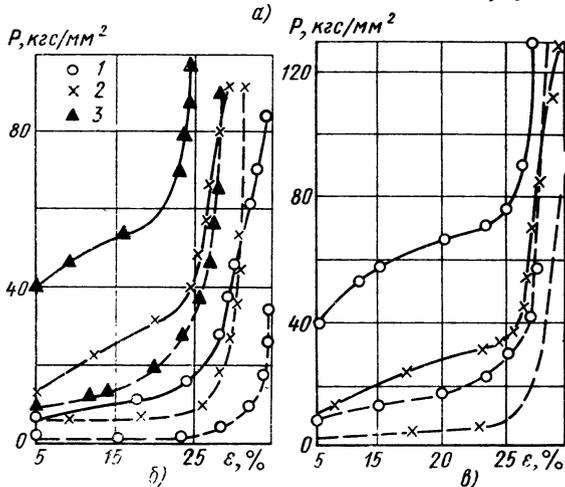


Рис. 14. Кривые удельных давлений при свободной осадке с истечением в полость (а), при свободной осадке с истечением в полость и образованием кольцевого заусенца (б) и при безоблойной объемной формовке (в):

1 — алюминий; 2 — медь; 3 — сталь 20; I — без ультразвука; II — с ультразвуком



получаемых изделий. Производили осадку с истечением в полость образцов размером 8×12 мм. Амплитуда колебаний в ненагруженном состоянии пуансона 0,015 мм, матрицы — 0,004 мм. Смазка при деформации — смесь 80% технического воска и 20% олеиновой кислоты.

§ 4. ПРЕССОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Неравномерное всестороннее сжатие, возникающее при прессовании (выдавливании), является наиболее благоприятным видом напряженного состояния для повышения пластичности при деформировании малопластичных металлов и сплавов. Однако при этом сильно возрастает сопротивление деформации. Наложение ультразвуковых колебаний способствует увеличению деформируемости и снижению действующих усилий.

Эффект от воздействия ультразвука на параметры прессования зависит от способа подвода колебаний в очаг деформации (через пуансон, матрицу или пуансон и матрицу одновре-

Рис. 15. Зависимость усилия прессования алюминия от степени деформации:

a— прямое прессование; *б*— обратное (1— в обычных условиях; 2— колебания подведены к матрице; 3— колебания подведены к пуансону; 4— колебания подведены к матрице и пуансону одновременно)

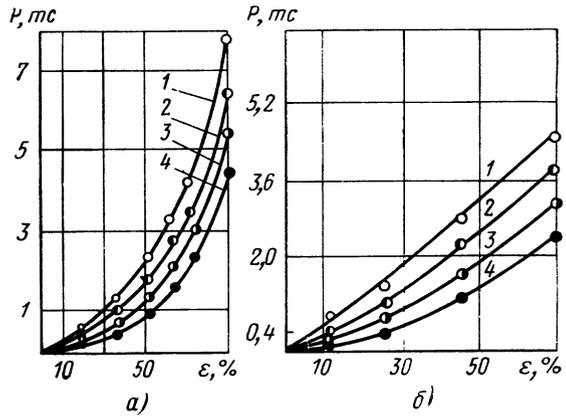


Рис. 16. Изменение усилия при прямом (*a*) и обратном (*б*) прессовании меди (1), железа (2) и стали 20 (3):

I— в обычных условиях; *II*— с наложением ультразвука

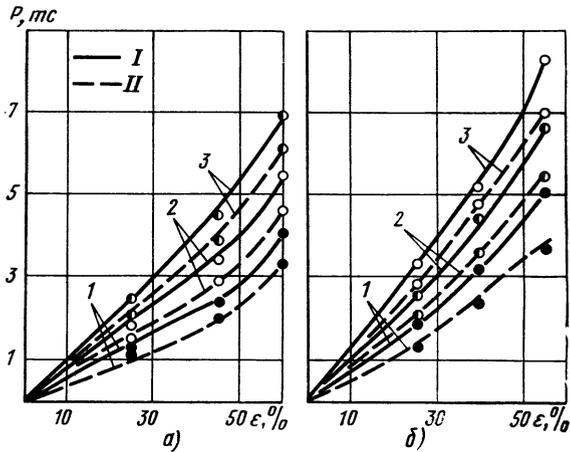
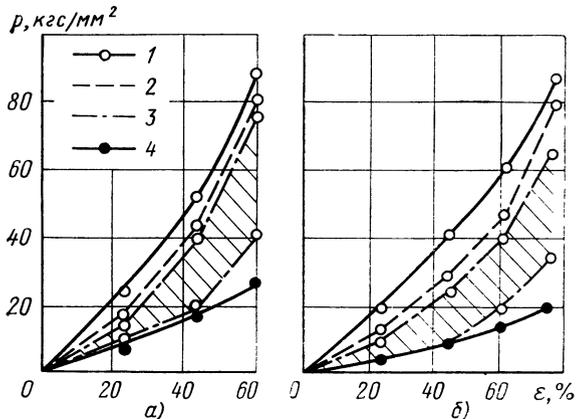


Рис. 17. Зависимость удельного давления прессования порошка САП-1 (*a*) и сплава МА2 (*б*) от степени деформации: 1— в обычных условиях; 2— с наложением ультразвука (пучность колебаний); 3— с наложением ультразвука (пучность напряжений); 4— при температуре (для САП-1 450° С, для МА2 350° С)



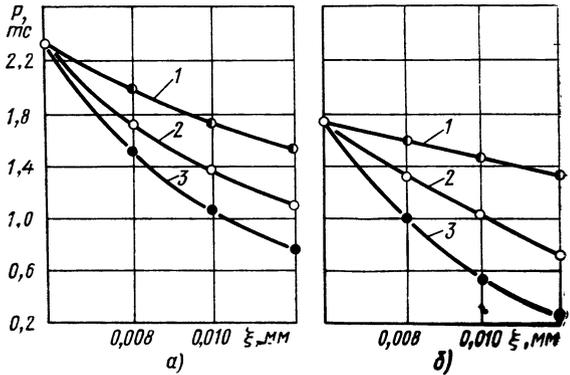
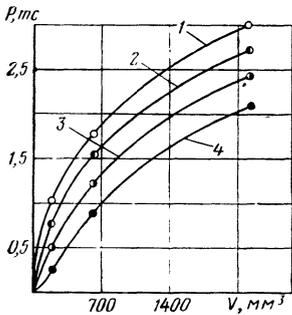


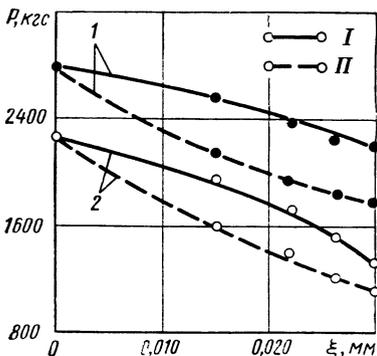
Рис. 18. Влияние масштабного фактора на снижение усилия деформации в обычных условиях (1), и при наложении ультразвука на матрицу (2), на пуансон (3), на матрицу и пуансон одновременно (4)

Рис. 19. Влияние интенсивности ультразвука на снижение усилия при прямом (а) и обратном (б) прессовании: 1 — колеблется матрица; 2 — колеблется пуансон; 3 — колеблются матрица и пуансон

менно), места расположения очага деформации, рода материала, способа прессования (прямое или обратное), объема деформируемого материала, интенсивности колебаний, степени деформации, применяемой смазки и других факторов. Результаты экспериментальных исследований прессования цилиндрических образцов диаметром 5—12 мм и высотой 6—16 мм из алюминия А1, меди МЗ, армо-железа, стали 20, спеченного алюминиевого порошка САП-1 и магниевого сплава МА2 приведены на рис. 15—20. Для деформации были использованы продольные колебательные системы (см. рис. 6, 7).

Степень деформации при прямом прессовании

$$\epsilon = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \quad (6)$$



и при обратном

$$\epsilon = \frac{D^2}{d^2}, \quad (7)$$

где D и d — соответственно диаметры пуансона и матрицы.

Рис. 20. Зависимость усилия прессования порошка САП-1 (1) и сплава МА2 (2) от интенсивности ультразвука:

I — влучности колебаний; II — влучности напряжений

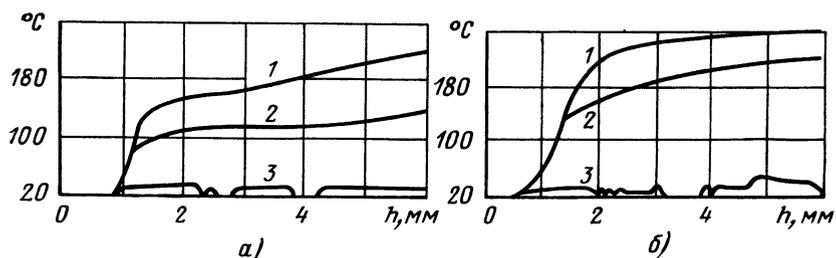


Рис. 21. Изменение температуры в процессе прессования порошка САП-1 (а) и сплава МА2 (б):

1 — с ультразвуком в пучности напряжений; 2 — с ультразвуком в пучности смещений; 3 — в обычных условиях

Снижение усилия прессования при расположении очага деформации в пучности смещений стоячей продольной волны происходит из-за уменьшения сил контактного трения, а в узле смещений — в результате действия знакопеременных напряжений. В обоих случаях вследствие поглощения акустической энергии повышается температура обрабатываемого металла (рис. 21) и снижается его предел текучести (рис. 22). Наложение колебаний в процессе прессования приводит к более равномерному распределению деформаций и микротвердости по сечению полученных образцов.

Влияние ультразвука на эффективность смазок (табл. 4) при обратном прессовании алюминия представлено на рис. 23. Степень деформации составляла 36%, амплитуда колебаний пуансона — 0,01 мм и частота колебаний — 20 кГц. Эффективность действия смазок определяли сравнением максимальных усилий, возникающих при прессовании без смазки и со

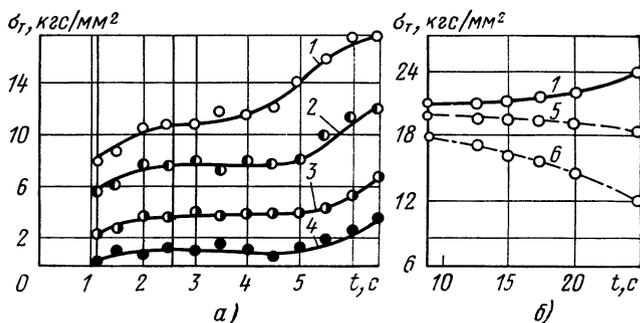


Рис. 22. Изменение предела текучести алюминия (а) и сплава МА2 (б) при прессовании:

1 — в обычных условиях; 2, 3, 4 — при наложении ультразвука (амплитуда соответственно $\xi=8$ мкм; $\xi=10$ мкм; $\xi=12$ мкм); 5 — в пучности колебаний; 6 — в пучности напряжений

4. Смазки, применяемые при прессовании

Номер смазки	Состав исследуемых смазок	Содержание компонентов смазок, %
1	Трансформаторное масло	100
2	Вазелиновое масло	100
3	Машинное масло	100
4	Автол	100
5	Солидол	100
6	Касторовое масло	100
7	Олеиновая кислота	100
8	Парафин	100
9	Мыло хозяйственное	100
10	Технический воск	100
11	Канифоль+технический воск	70+30
12	Машинное масло+графит+касторовое масло	50+40+10
13	Технический воск+олеиновая кислота	80+20
14	Технический воск+олеиновая кислота+графит	50+20+30
15	Технический воск+олеиновая кислота+сажа	50+20+30
16	Воск технический+тальк+опилки древесные	50+30+20
17	Воск технический+лигнин	60+40
18	Воск технический+целлюлоза вискозная+олеиновая кислота	40+40+20
19	Автол+олеиновая кислота+CCl ₄	80+15+5
20	Лак СБ-1С	100
21	Лак СБ-1С высушенный, а затем деталь покрыта олеиновой кислотой	100+100
22	Канторский клей	100
23	Технический воск+стеарат+олеиновая кислота	60+30+10

смазкой. Определив эффективность каждой смазки при прессовании в обычных условиях и с наложением ультразвуковых ко-

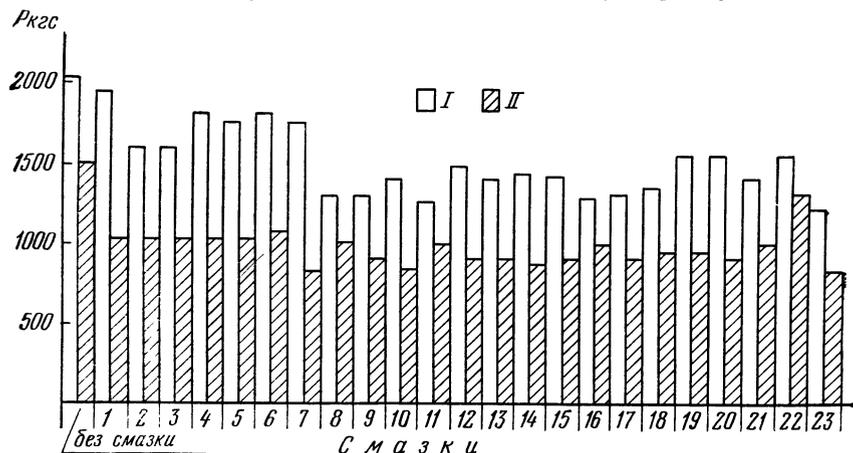


Рис. 23. Влияние ультразвуковых колебаний на эффективность смазок при прессовании:

I — в обычных условиях; II — с наложением ультразвуковых колебаний

5. Шероховатость поверхности изделий, полученных прямым прессованием

№ образца	Алюминий				Медь				Армо-железо			
	Прессование без ультразвука		Прессование с ультразвуком		Прессование без ультразвука		Прессование с ультразвуком		Прессование без ультразвука		Прессование с ультразвуком	
	R_a , мкм	Класс	R_a , мкм	Класс	R_a , мкм	Класс	R_a , мкм	Класс	R_a , мкм	Класс	R_a , мкм	Класс
1	0,44	8б	0,25	9б	0,60	8а	0,28	9а	2,3	6а	0,24	9б
2	0,34	8в	0,25	9б	0,62	8а	0,28	9а	2,0	6б	0,30	9а
3	0,38	8в	0,24	9в	0,48	8б	0,29	9а	2,2	6а	0,22	9б
Среднее	0,38	8в	0,25	9б	0,60	8а	0,28	9а	2,9	6а	0,27	9б

лебаний, можно судить об эффективности действия ультразвука.

После прессования с ультразвуком увеличивается предел прочности металла, уменьшается скорость травления в кислотах и электросопротивление, снижается шероховатость поверхности изделий (табл. 5).

§ 5. ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Вытяжка. Экспериментальные данные о влиянии ультразвуковых колебаний на максимальное усилие вытяжки и максимальную степень деформации представлены в табл. 6 и 7. Усилия деформации дано для критической степени деформации, определяемой разрушением заготовки (обрыв дна). Вытяжку вели в пучности смещений с использованием колебательных систем (рис. 6). Матрицы изготовлены из стали 20, подвергнутой цементации и закалке на *HRC* 58—60, пуансоны — из стали 45 без термообработки. Односторонний зазор между матрицей и пуансоном составлял 1,2 от толщины материала t_0 .

На рис. 24 представлены результаты исследований влияния продольных (см. рис. 6, б) и радиальных (см. рис. 10, а) ультразвуковых колебаний матрицы на процесс вытяжки с утонением стаканчиков из стали 11ЮА. Смазкой служило машинное масло СУ, скорость вытяжки составляла 10 мм/с, амплитуда смещений матрицы в ненагруженном состоянии была равной 0,01 мм, частота колебаний 18 кГц. Под действием ультразвука снижается как максимальное усилие, так и усилие установившегося процесса вытяжки, причем применение радиальных колебаний является более эффективным, чем продольных.

Вырубка-пробивка. При разделении листовых материалов в пучности напряжений стоячей продольной волны (см. рис. 7, а) из-за снижения статического усилия деформации

6. Влияние ультразвуковых колебаний матрицы на параметры вытяжки ($a_M=4$, $a_{II}=6$, $t_0=1,0$ мм)

Марка материала	Состояние материала	Усилие вытяжки, кгс		Снижение усилия под действием ультразвука, %	Максимальная степень деформации		Увеличение степени деформации под действием ультразвука при $\xi=0,012$ мм, %	
		без ультразвука	с ультразвуком при амплитуде колебаний ξ , мм		$\varepsilon=11 \frac{D}{d}$	с ультразвуком при $\xi=0,012$ мм		
								0,008
Сталь 20	В состоянии поставки	1980	1780	1680	1740	0,693	0,802	15,0
	Отожженная	1930	1740	1620	1680	0,731	0,836	14,0
Сталь 10кп	В состоянии поставки	1840	1740	1580	1650	0,731	0,852	16,5
	Отожженная	1760	1540	1480	1540	0,749	0,888	18,5
Медь МЗ	В состоянии поставки	1030	830	790	830	0,767	0,869	13,0
	Отожженная	830	640	500	530	0,802	0,901	12,5
Алюминий А0	В состоянии поставки	—	—	—	—	—	—	—
	Отожженный	370	—	—	—	0,795	—	—

D — диаметр заготовки; d — наружный диаметр стаканчика; $a_M = r_M/t_0$; $a_{II} = r_{II}/t_0$; $u_{II} = r_{II}/t_0$; r_M , r_{II} — радиусы закругления соответственно вытяжной матрицы и пуансона.

7. Влияние ультразвуковых колебаний пуансона на параметры вытяжки
 ($a_m = 4$, $a_n = 6$, $t_0 = 1,0$ мм)

Марка материала	Состояние материала	Усилие вытяжки, кгс		Снижение усилия под действием ультразвука, %	Максимальная степень деформации, $\epsilon = \ln \frac{D}{d}$		Увеличение степени деформации под действием ультразвука, %
		без ультразвука	с ультразвуком при $\xi = 0,032$ мм		без ультразвука	с ультразвуком	
Сталь 20	Нормализованная	1980	1700	14,0	0,693	0,749	7,0
		1930	1580	18,0	0,731	0,767	5,0
Сталь 10кп	Отожженная	1760	1500	14,5	0,749	0,801	7,0
		1840	1620	12,0	0,731	0,785	7,0
Медь МЗ	Нормализованная	1030	850	17,5	0,767	0,802	4,0
		830	680	18,0	0,802	0,852	6,0

8. Влияние ультразвука на усиление деформирования при вырубке-пробивке в пучности напряжений

Наименование операций	Материал	Толщина, мм	Геометрическая форма инструмента и размер, мм	Зазор между режущими кройками (двусторонний), %	Усилие деформации, кгс		Эффект от применения ультразвука, %
					без ультразвука	с ультразвуком	
Вырубка	Сталь 08кп	1,0	Квадрат 10×10	5	1320	450	69
		1,0		10	1220	400	67
		1,0		25	1050	350	66
		2,0		5	2550	1000	60
		2,0		25	2300	950	53
		3,5		7	4250	3000	29
	Сталь 12X18H10T	0,75	Квадрат 10×10	7	1655	500	70
		1,0		5	2700	920	66
		1,0		15	2100	800	62
		1,5		17	3000	1300	57
		1,5		17	3000	1300	57
	Сталь 08кп	2,0	∅ 20	5	4150	2100	49
1,0		10		2400	1200	50	
Пробивка	Сталь 12X18H10T	0,75	∅ 20	14	3100	1540	50
		1,0		10	5300	3100	41
	Алюминий А2	2,0	∅ 20	5	1000	370	63
		4,0		2,5	1900	780	54

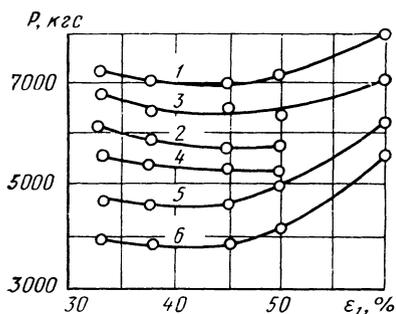


Рис. 24. Изменение усилия вытяжки в зависимости от степени деформации в обычных условиях (1, 2) и при вытяжке с продольными (3, 4) и радиальными (5, 6) ультразвуковыми колебаниями матрицы (1, 3, 5 — максимальное усилие; 2, 4, 6 — усилие установившегося процесса)

(табл. 8) улучшается поверхность среза — в 2—2,5 раза уменьшается зона скалывания. Такая схема вырубki-пробивки наиболее эффективна при разделении хрупких и малопластичных материалов (табл. 9).

Сравнение эффективности вырубki-пробивки в пучности продольных напряжений со схемами, в которых очаг деформации расположен в пучности продольных колебаний (см. рис. 6, а) и радиальных напряжений (см. рис. 10 б), приведено в табл. 10. Смазка — масло индустриальное. Преимуществом системы с расположением очага деформации в пучности радиальных напряжений является высокая стабильность ее резонансных свойств при изменении деформируемого усилия в широких пределах. Процесс вырубki-пробивки с расположением очага в пучности продольных колебаний нестабилен в работе и характеризуется резким падением амплитуды колебаний при увеличении статической нагрузки.

При пробивке отверстий в неметаллических материалах пуансоном, совершающим продольные ультразвуковые колебания, снижение усилия деформации зависит от относительного зазора между режущими кромками, скорости деформирования и амплитуды колебаний (рис. 25).

При пробивке в пучности продольных напряжений эффект от воздействия ультразвука при прочих равных условиях в 1,5—2 раза ниже, чем в пучности смещений. При увеличении статической нагрузки эффект от применения такой схемы деления возрастает. Поэтому она может быть рекомендована для вырубki-пробивки толстых неметаллических материалов.

Вследствие снижения статического усилия при пробивке неметаллических материалов с ультразвуком повышается точность обработки, а также качество поверхности среза.

Влияние ультразвуковых колебаний на процесс гибки. Основными характеристиками, определяющими прочность и пластичность металлов при изгибе, являются усилие изгиба и угол пружинения.

Схема установки для изгиба образцов с ультразвуком, показанная на рис. 26, позволяет производить гибку образца в

9. Влияние ультразвука на усиление деформирования и чистоту среза при вырубке-пробивке в пучности продольных напряжений

Материал	Толщина, мм	Размеры вырубемого круга, мм	Зазор между режущими кройками, %	Скорость деформирования, мм/с	Усиление деформирования, кгс		Эффективность действия ультразвука на		Примечание	
					с ультразвуком	без ультразвука	снижение усилия, %	класс шероховатости поверхности кромок разделения		
								с ультразвуком		без ультразвука
Чугунные плитки Сч 21-40	3	10	12	0,2—0,4	2650	4050*	35	4	Пробивка без ультразвука невозможна	
	4	10	9	0,2—0,4	5955	8130	27	5		
Гетинакс марки Б	6	10	7	0,2—5	900	2100*	57	—	Обычная пробивка осуществляется с подогревом заготовки	
	6,5	10	6	0,2—5	350	1500*	77	7		
	1	10	17	0,2—0,4	1350	1880	28	6		
	1,5	10	15	0,2—5	800	1980	59	7		
	2	10	12	0,2—5	750	1900	60	6		

* Наибольшее усиление разрушения в процессе деформации.

10. Влияние ультразвука на усиление вырубki-пробивки при различных схемах подвода колебаний

Материал	Толщина, мм	Диаметр вырубемого изделия, мм	Зазор между режущими кройками, %	Скорость деформирования, мм/с	без ультразвука	Усиление вырубki-пробивки, кгс		
						в пучности продольных напряжений	с ультразвуком	
							в пучности продольных колебаний	в пучности продольных напряжений
Сталь 08кп	1	10	12	0,4	1100	540	230	500
	2	10	15	0,4	1900	1460	750	1000
Алюминий А2	4	10	4,5	0,4	930	490	190	470
	1,5	10	14	0,4	2150	1600	1410	1540
Гетинакс	3	10	7	0,4	1000	630	400	600

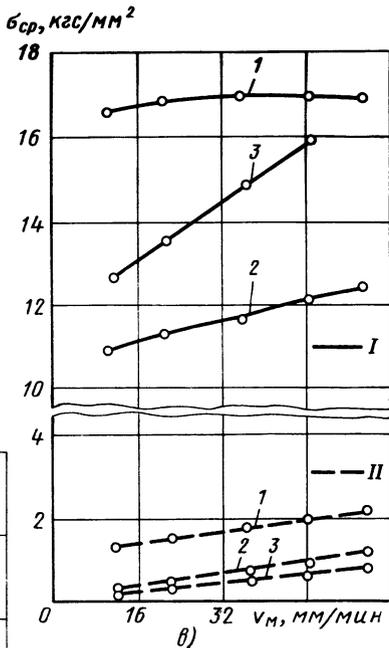
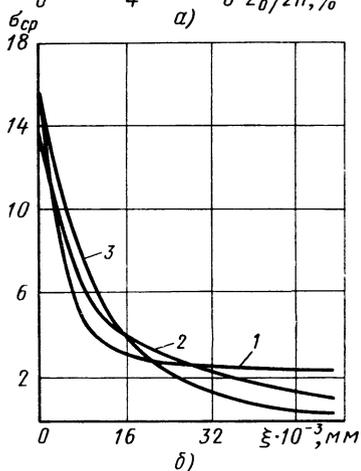
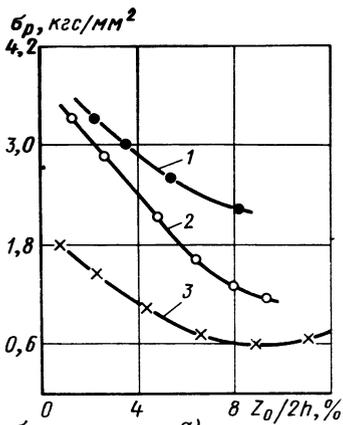


Рис. 25. Зависимость сопротивления разделения от зазора $z_0/2h$ (а) ($\xi = 38$ мкм; $v_m = 60$ мм/мин), скорости v_m передвижения траверсы машины (б) ($\xi = 40$ мкм) и амплитуды ультразвука (в) ($v_m = 60$ мм/мин; $z_0/2h = 4,5\%$):

I — СТЭФ-1; 2 — гетинакс типа I; 3 — гетинакс типа VI; I — без ультразвука; II — с ультразвуком

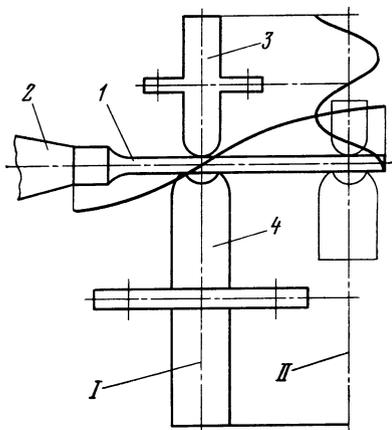


Рис. 26. Схема ультразвуковой установки для изгиба изделий:

I — образец; 2 — концентратор; 3 — пуансон; 4 — матрица (I — в пучности напряжений; II — в пучности смещений)

11. Результаты испытаний стали 10 с наложением продольных ультразвуковых колебаний при изгибе

Диаметр или сторона квадрата $a \times a$, мм	Степень деформации, %	Прочность напряжений			Пучность смещений			
		Амплитуда ξ , мкм	Усилие изгиба P , кгс	Угол пружинения Φ_2 , рад/м	Амплитуда ξ , мкм	Усилие изгиба P , кгс	Угол пружинения Φ_2 , рад/м	
5	33,3	0	890	1,41	0	890	1,41	
		10	733	3,13	9	797	1,39	
		12	683	3,18	11	790	1,67	
		15	650	5,19	14	660	2,89	
5×5		0	1190	10,35	0	1190	10,35	
		10	1110	11,35	9	1160	10,71	
		12	1020	11,43	11	1026	10,78	
		15	907	11,68	14	960	11,38	
5		14,3	0	548	-0,93	0	548	-0,93
			15	303	-0,46	14	290	-1,00
5×5			0	808	0,45	0	808	0,45
			15	597	-0,26	14	510	-0,49
5		9,1	0	298	0,51	0	298	0,51
			15	165	-1,91	14	100	-1,70
5×5			0	385	0,60	0	365	0,60
			15	227	-0,54	14	230	-0,83
7,5	33,3	0	1750	1,02	0	1750	1,02	
		10	1607	2,16	7	1543	1,09	
		12	1573	3,20	9	1513	1,17	
		15	1483	2,01	11	1390	1,09	
7.5×7,5		0	2497	5,69	0	2497	5,69	
		6	2263	4,64	5	2198	5,69	
		10	2155	4,86	8	2146	5,83	
		14	2050	3,57	11	2010	5,69	
10		0	3090	1,22	0	3090	1,22	
		6	2920	1,27	5	2963	1,44	
		10	2710	1,22	8	2880	2,11	
		14	2600	0,88	11	2814	2,40	
10×10		0	4230	3,05	0	4230	3,05	
		6	3993	2,44	5	3927	3,97	
		10	3600	2,73	8	3547	4,01	
		14	3453	2,77	11	3370	4,25	

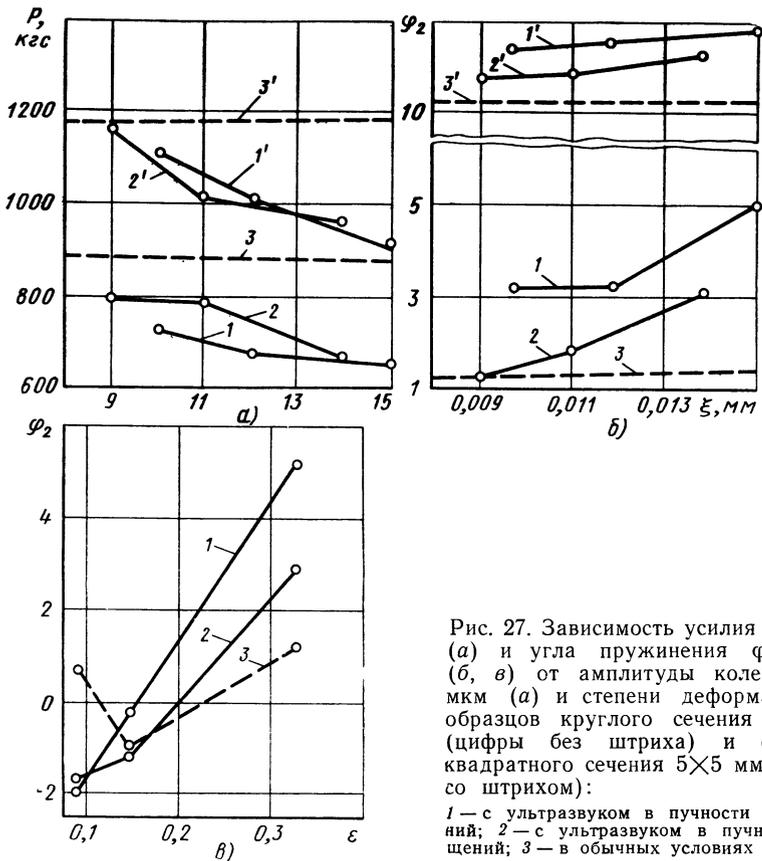


Рис. 27. Зависимость усилия изгиба P (а) и угла пружинения φ_2 , рад/м (б, в) от амплитуды колебаний ξ , мм (а) и степени деформации (в) образцов круглого сечения $\varnothing 5$ мм (цифры без штриха) и образцов квадратного сечения 5×5 мм (цифры со штрихом):

1 — с ультразвуком в пучности напряжений; 2 — с ультразвуком в пучности смещений; 3 — в обычных условиях

пучности смещений и напряжений стоячей волны. Различные степени деформации при гибке достигаются применением пуансонов и матриц с различными радиусами кривизны. Влияние ультразвука на процесс гибки углеродистых сталей представлено в табл. 11 и на рис. 27.

Под действием ультразвуковых колебаний происходит снижение усилия изгиба для стали 10 при всех исследованных степенях деформации. Эффект ультразвука тем больше, чем выше интенсивность колебаний и меньше степень деформации.

Глава **7**

**Ультразвуковая
сварка
и пайка**

•

А.М. МИЦКЕВИЧ

Ультразвуковая сварка относится к интенсивно развивающимся способам соединения материалов в твердом состоянии. Исследуются физический механизм образования соединения и технология сварки.

Простота технологии, хорошее качество соединений, высокая производительность и экономичность ультразвуковой сварки позволяют, например, выполнять соединение обмоток электродвигателей, соединение колпачков с основаниями полупроводниковых диодов и триодов.

Ультразвуковая сварка обладает незначительным термическим влиянием на свариваемый металл по сравнению со сваркой плавлением и длительностью процесса по сравнению с диффузионной сваркой. При сварке некоторых материалов, применяемых в атомной и ракетной технике, ультразвуковая сварка обеспечивает лучшее качество соединений по сравнению с другими способами.

Первые опыты по ультразвуковой сварке (УЗС) металлов предпринимались в Германии в 1936—1937 гг. а работы по созданию оборудования и разработке технологии УЗС начались в США в начале 50-х годов.

Советские работы, посвященные ультразвуковому способу соединения металлов, появились в 1958 г. В настоящее время в Советском Союзе и за рубежом налажен выпуск специализированных устройств для УЗС мощностью от десятков ватт до нескольких киловатт.

Ультразвуковая сварка осуществляется при сжатии соединяемых деталей силой N , нормаль-

ной к поверхности их соприкосновения, и сообщении деталям ультразвуковых колебаний ($\xi = 1 \div 100$ мкм, $f = 10 \div 100$ кГц). Существо работы установки УЗС видно на примере продольно колеблющейся стержневой колебательной системы (рис. 1). Продольные колебания деталей 3 и 2 с амплитудами ξ_1 и ξ_2 ($\xi_1 > \xi_2$), расположенных между наконечником 4 и опорой 1, вызываются наконечником 4. Ультразвуковой преобразователь 6 возбуждается генератором 7. Качество сварки определяется прочностью соединений на срез $\sigma_{ср}$, на отрыв $\sigma_{отр}$ и их отношением $\sigma_{ср}/\sigma_{отр}$, характеризующим пластичность соединения.

Выполнены работы, посвященные исследованию физики процесса сварки [27, 40, 48, 50, 54, 60, 61, 65]. За последнее время изменились представления о механизме сварки. Режим больших ξ_0 соответствовавший первоначальному представлению об УЗС как разновидности сварки трением, приводил к весьма низкому качеству сварных соединений. Были высказаны предположения о возможности сварки в условиях «предварительного смещения» или микросдвига (см. § 1). Опыт микросварки показал что величины $\xi_0 = 1 \div 3$ мкм обеспечивают образование надежного соединения. Это обстоятельство, а также усовершенствования техники и технологии УЗС выявили тенденцию снижения величины ξ_0 при соответствующем повышении усилия сжатия деталей N .

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

Процесс образования ультразвукового соединения металлов зависит главным образом от амплитуды колебаний сварочного наконечника ξ_0 и силы N , сжимающей детали. Рассмотрим схему сварки (рис. 2). Свариваемые детали 2 и 3 в виде тонких

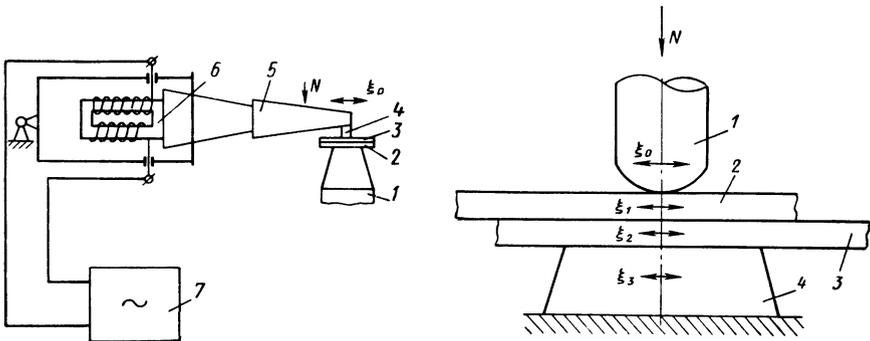


Рис. 1. Установка для УЗС металлов на основе продольной колебательной системы

Рис. 2. Схема УЗС металлов

длинных пластин зажимаются с усилием N между цилиндрическим наконечником 1 и плоской опорой 4. Колебания наконечника поляризованы в плоскости, совпадающей с поверхностью верхней пластины. Периодическое изменение напряжений в пластине 2 под наконечником увеличивает площадку его контакта с пластиной. Наконечник погружается в пластину тем быстрее, чем больше ξ_0 . Колебания наконечника вызывают колебания пластин и опоры с амплитудами ξ_1, ξ_2, ξ_3 , причем $\xi_0 > \xi_1 > \xi_2 > \xi_3$, так как в каждой из областей «наконечник — деталь», «деталь — деталь», «деталь — опора» происходит поглощение энергии колебаний. На основании опытов [48] можно считать, что на пластину со стороны наконечника действует сосредоточенная сила $F_x \sin \omega t$.

Введем сосредоточенную силу $F'_x \sin \omega t$ при $F'_x < F_x$ (с учетом поглощения энергии колебаний в месте контакта наконечника с пластиной), которая вызывает касательные колебательные смещения верхней пластины с амплитудой ξ_1 в области сварки.

Взаимодействие пластин в процессе сварки определяется сосредоточенной силой $F'_x \sin \omega t$, действующей в плоскости их контакта, и силой N , нормальной к площадке контакта. Между этими силами существует следующее соотношение:

$$F'_x \leq \psi N. \quad (1)$$

где ψN — сила трения; ψ — коэффициент сухого трения ($\psi \leq 1$). Силу F'_x называют силой трения покоя, потому что с момента, когда $F'_x \geq \psi N$, начинается относительное скольжение контактирующих тел.

Рассматривая условия сварки с учетом соотношения (1), убеждаемся, что пока амплитуда F_x мала, мала и механическая энергия, вводимая в область соединения. При увеличении F_x эта энергия растет, процесс сваривания ускоряется. Однако пока $F'_x < \psi N$, обе пластины колеблются без проскальзывания. Когда же достигается предельное условие $F'_x = \psi N$, возникает относительное проскальзывание пластин. При увеличении силы F'_x ($F'_x > \psi N$), т. е. амплитуды колебаний ξ_1 , это проскальзывание будет сильнее. Проскальзывание (трение скольжения) сухих металлических поверхностей, когда взаимодействуют микронеровности, сопровождается периодическим их схватыванием, вытягиванием металла, а затем разрывом участков («мостиков») схватывания. Указанные явления, характерные для трения скольжения сухих поверхностей, наблюдались при УЗС. На основании анализа условий сварки в связи с прочностью соединений можно заключить, что значительные пластические течения, связанные с проскальзыванием, снижают прочность и пластичность. Для улучшения качества соединений надо исключить проскальзывание. Тогда колебательные смещения сварива-

ваемых тел будут осуществляться за счет ограниченных пластических деформаций металла в области их контакта, не связанных со значительными пластическими течениями.

Таким образом, между силами F'_x и N должно существовать соотношение (1), соответствующее условию «предварительного смещения», которое представим в виде

$$F'_x = k\psi N, \quad (2)$$

где $k \rightarrow 1$, а величина ψ для многих металлов находится в пределах $0,3-0,9$. Определенное при сварке экспериментальным методом оптимальное соотношение для сил F'_x и N имеет вид $F'_x \approx (0,5 \div 0,8) N$, что совпадает с соотношением (2) при обычных значениях $k=0,9$ и $\psi=0,6 \div 0,9$. Используя соотношение (2), можно выбрать оптимальную величину ξ_0 , связанную с амплитудой F'_x при известной силе N . На основании анализа экспериментальных данных нами найдено, что обычно $N \approx N_{\text{опт}}$,

$$N_{\text{опт}} = S_n \sigma_T; \quad (3)$$

здесь S_n — площадь контакта наконечника с деталью; σ_T — предел текучести свариваемого материала при сжатии при комнатной температуре. При выборе величины N по соотношению (3) обеспечивается контакт всех микронеровностей соединяемых поверхностей, а средняя деформация контактирующих микронеровностей от действия сжимающих напряжений составляет 25%.

Рассмотрим выбор оптимальной амплитуды колебаний ξ_0 . Тангенциальная колебательная сила амплитуды $F_x = k\psi N_{\text{опт}}$ вызывает в зоне соединения сдвиговые напряжения $\tau_x \sin \omega t$. При сварке одинаковых материалов толщиной δ существует взаимосвязь амплитуд ξ_1 , ξ_2 и τ_x :

$$\xi_1 - \xi_2 = 10 \frac{\tau_x}{G} h + K, \quad (4)$$

где $\tau_x = \tau_s \sqrt{1 - \left(\frac{mN}{3\pi a^2 \tau_s}\right)^2}$, откуда $\tau_x \approx (0,7 \div 0,8) \tau_s$; h — высота области сварки, где происходят пластические деформации (для пластичных материалов $h = 120 \div 150$ мкм); K — постоянная ($K \approx 1 \div 1,5$ мкм); τ_s — предел текучести свариваемого материала при сдвиге; $m = 0,3$ при радиусе плоского наконечника $a = 3\delta$. Для сварки пластичных металлов $\xi_1 \approx 0,7 \xi_0$, а $\xi_2 \approx 0,4 \xi_0$ и

$$\xi_0 \approx 3,3 \left(10 \frac{\tau_x}{G} h + K\right). \quad (5)$$

Рассмотрим вопрос о форме сварочного наконечника. От его формы зависит распределение напряжений σ_z и τ_x в зоне соединения, что определяет кинетику развития соединения и его прочностные свойства. Известны два типа осесимметричных

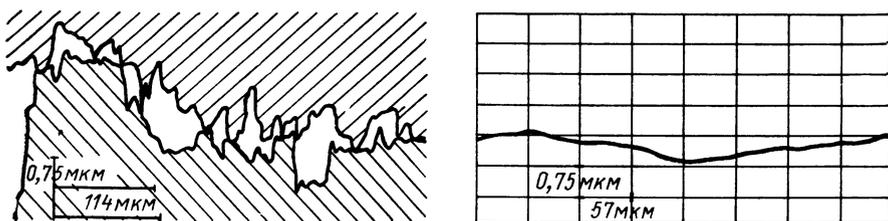


Рис. 3. Профилотграммы соединяемых поверхностей:

a — контактирование поверхностей в начале сварки; *b* — микрорельеф соединяемой поверхности через 0,1 с после начала сварки (сварка меди плоским цилиндрическим наконечником, $N=440$ кгс, $\xi_0=13$ мкм)

наконечников — сферический и плоский. Аналитическим расчетом на ЭВМ для этих наконечников получены следующие результаты [27, 50]. Для сферического наконечника в центре круговой контактной площадки пластин имеется область, где скольжение отсутствует, но металл во время сварки находится в пластическом состоянии. Его можно приближенно охарактеризовать условием наступления текучести металла (условием Мизеса), которое для осесимметричного случая имеет вид

$$2\sigma_z^2 + 6\tau_x^2 = 6\tau_s^2;$$

это состояние — результат действия сжимающих σ_z и сдвиговых τ_x напряжений от сил N и F'_x . По направлению к периферии площадки контакта располагается широкая область знакопеременного проскальзывания в виде кольца, причем сами детали не совершают знакопеременного проскальзывания.

В случае плоского цилиндрического наконечника при $a \geq 3\delta$ в центре контактной площадки имеется упругое напряженное состояние, близкое к предельному пластическому состоянию. Далее к периферии площадки контакта располагается кольцевая пластическая область, а затем узкая кольцевая область знакопеременного проскальзывания.

Рассмотрим экспериментальные данные по сварке сферическим наконечником малого радиуса $R = (5 \div 20) \delta$ и плоским цилиндрическим наконечником с $a \geq 3 \delta$ при $N \leq N_{\text{опт}}$, $\xi_0 \leq \xi_{0 \text{ опт}}$. Физические явления рассматриваются в зависимости от времени t и значений ξ_0 .

Рассмотрим сначала результаты для сферического наконечника. Процесс сварки начинается с взаимодействия микронеровностей соединяемых поверхностей (рис. 3, *a*), которые деформируются под действием силы N . После включения ультразвука в результате относительных колебаний соединяемых поверхностей контактирующие микронеровности испытывают сдвиг и частично деформируются. Это приводит к сближению соединяе-

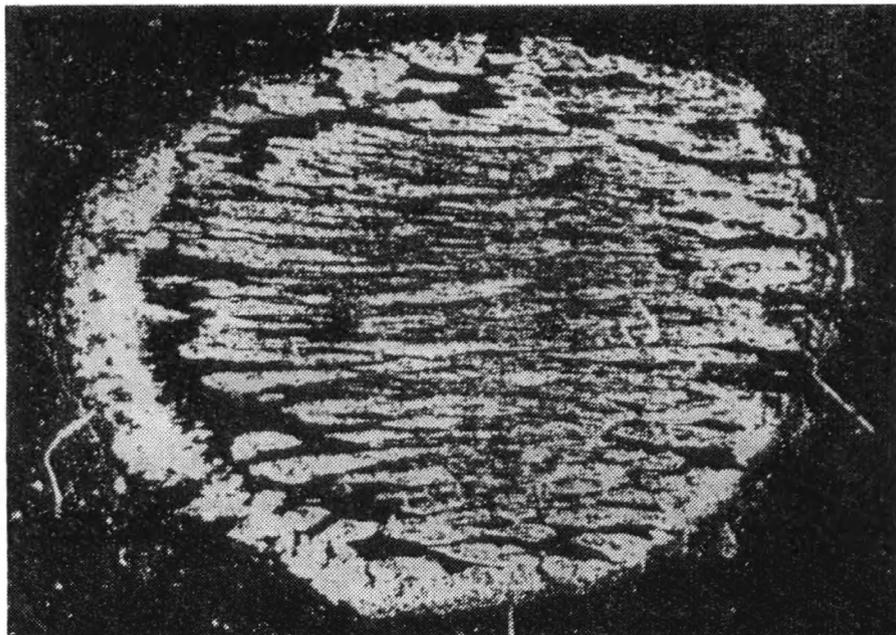


Рис. 4. Зона соединения при сварке меди, $\times 16$; $\xi_0 = 28$ мкм; $N = 165$ кгс; $R = 30$ мм; $t = 2,0$ с

мых поверхностей и нарушению непрерывности окисных пленок. Там, где пленки нарушены, возникают зоны схватывания (элементы соединения). Эти зоны разрушаются и возникают вновь при больших амплитудах колебаний $\xi_0 > \xi_{0 \text{ опт}}$ (сварка меди, $\xi_0 = 26 \div 23$ мкм) либо испытывают пластические деформации при меньших амплитудах $\xi_0 < \xi_{0 \text{ опт}}$ ($\xi_0 = 8 \div 10$ мкм) [40]. Количество зон схватывания возрастает со временем. Эти зоны образуют кольцо, что соответствует кольцевой области проскальзывания. На рис. 4 показана зона соединения, где отчетливо видна кольцеобразная область зон схватывания. Данные металлографических исследований соединений также соответствуют рассмотренному характеру напряженного состояния. В центре зоны соединения (рис. 5, а) происходят ламинарные пластические течения металла. Напротив, у краев соединения (рис. 5, б) в кольцевой области сдвига исходная структура металла полностью деградировала и видны «турбулентные» текстуры пластических течений. Для менее пластичных металлов указанные текстуры при одинаковых значениях ξ_0 проявляются слабее. Измерения микротвердости металла в зоне соединения и рентгеновские исследования свидетельствуют о наличии значительных остаточных напряжений. Максимальная микротвердость у периферии соединения (кольцевая область проскальзывания) выше исход-

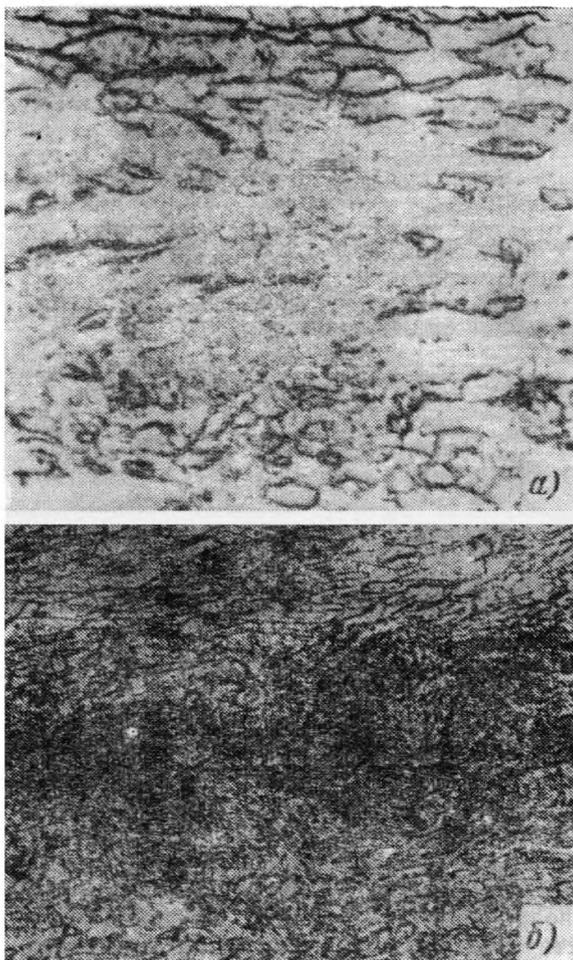


Рис. 5. Две области соединений при сварке меди сферическим наконечником:

а — середина зоны, $\times 500$;
 б — край зоны, $\times 200$

ной на 50%, а в центре на 30%. Из-за остаточных напряжений соединения имеют низкую прочность.

Воздействия, снижающие остаточные напряжения в соединении, например отжиг, повышают его прочность. Сила N не оказывает существенного влияния на характеристики получаемого соединения. Увеличение амплитуды $\xi_0 > \xi_{0 \text{ опт}}$ приводит к расширению кольцевой области скольжения к центру соединения. Указанные процессы вызывают нагрев соединения. Средние температуры не превышают температуру рекристаллизации свариваемого металла.

Рассмотрим данные по сварке меди, алюминия, магния и железа плоским цилиндрическим наконечником с радиусом $a \geq 3\delta$ при $N \approx N_{\text{опт}}$, $\xi_0 \approx \xi_{0 \text{ опт}}$. После включения ультразвука

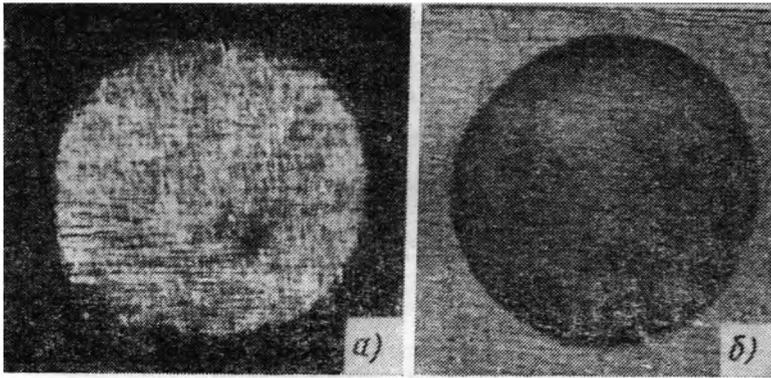


Рис. 6. Соединяемые поверхности меди, $\times 7$:

а — пластины сжаты силой $N=440$ кгс, $a=3$ мм=3 δ ; *б* — те же поверхности после воздействия ультразвука, $\xi_0=13$ мкм, $t=0,1$ с.

за время менее 0,1 с микрорельеф соединяемых поверхностей изменяется (рис. 3, б) и они сближаются. Эти поверхности выглядят как полированные (рис. 6, *а* и *б*) благодаря действию на них напряжений σ_z и τ_x . Распределение микротвердости HV на площадке контакта деталей соответствует расчетной картине напряженного состояния (сравните рис. 7, *а* и *б*). Рост $HV(t)$ означает, что повышается поверхностная энергия на «полированном пятне», что создает предпосылки для образования зон схватывания. Они возникают там, где нарушена сплошность окисных пленок, и с течением времени количество их возрастает (рис. 8). Удельная прочность даже первых зон схватывания близка к удельной прочности полностью сваренных соединений.

Зоны схватывания заполняют все «полированное пятно», образуя сплошное соединение. Напряжения в области соединения распределены равномерно, как это следует из анализа напряженного состояния. Кольцевых областей скольжения, харак-

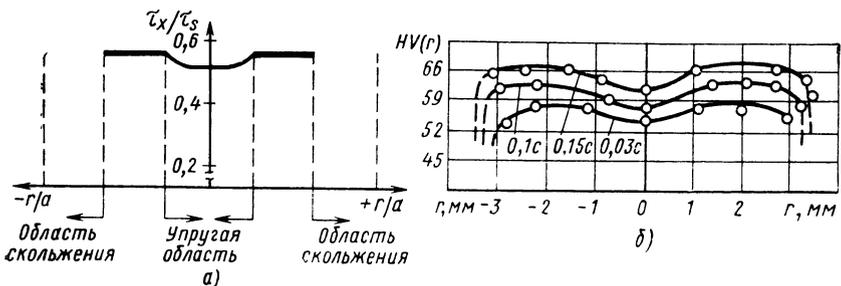


Рис. 7. К упрочнению поверхностей в начале сварки:

а — схема напряженного состояния при сварке плоским цилиндрическим наконечником, $a=3\delta$; *б* — упрочнение меди в зависимости от радиуса площадки контакта r и времени t ; $N=440$ кгс, $\xi_0=13$ мкм; жирными линиями (*а*) показана пластическая область

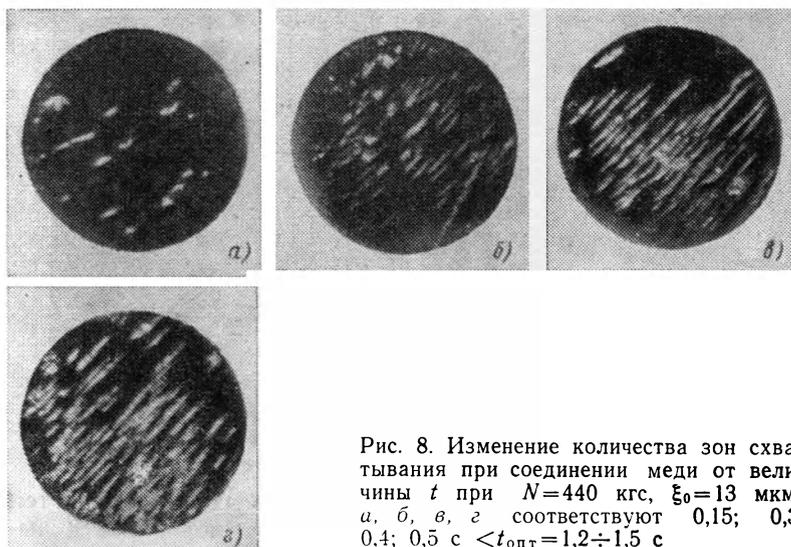


Рис. 8. Изменение количества зон схватывания при соединении меди от величины t при $N=440$ кгс, $\xi_0=13$ мкм; а, б, в, г соответствуют 0,15; 0,3; 0,4; 0,5 с $< t_{\text{опт}}=1,2\div 1,5$ с

терных для сварки сферическим наконечником, не наблюдается, зона соединения образована общими для обеих деталей зернами (см. рис. 9). Рентгеноструктурный анализ и исследования $HV(t)$ показали, что в первые 0,5—0,7 с происходит упрочнение металла зоны соединения, а в дальнейшем его разупрочнение ($t=1,1\div 1,3$ с). Разупрочнение металла вызывается диффузией в области соединения и обуславливает образование общих зерен (рис. 9). При сварке разнородных металлов в зоне соединения образуются диффузионные слои.

Исследование тепловых процессов показало, что выделение тепла вначале обусловлено потерями при деформировании соприкасающихся микронеровностей. Затем добавляется рассеяние энергии ультразвуковых деформаций в зонах схватывания. Максимальная температура при сварке не более 0,4 температуры плавления [48]. Скорости протекания процессов, обуславливающих соединение, велики. Например, сближение поверхностей в начале сварки в результате ползучести металла, вызванной действием ультразвуковых сдвиговых напряжений амплитуды τ_v , происходит в 100—1000 раз быстрее, чем при диффузионной сварке; диффузионные процессы протекают за время менее 1 с при достаточно низкой температуре.

Рассмотрим данные (табл. 1) по прочности соединений из меди $\delta=1+1$ мм. При сварке сферическим наконечником радиуса $R=(10\div 20)\delta$ прочность при сопоставимых значениях ξ_0 и N меньше, чем при сварке плоским наконечником. Когда $\xi_0 > \xi_{\text{опт}}$, прочность и пластичность соединений, полученных сферическим наконечником, еще ниже. При сварке сферическим

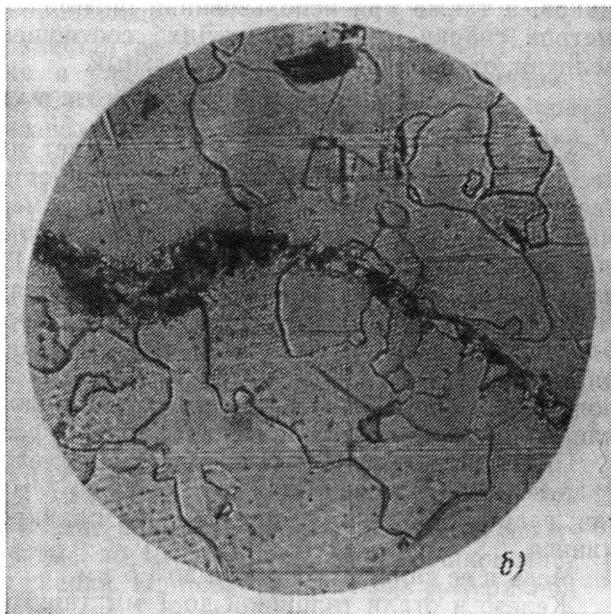
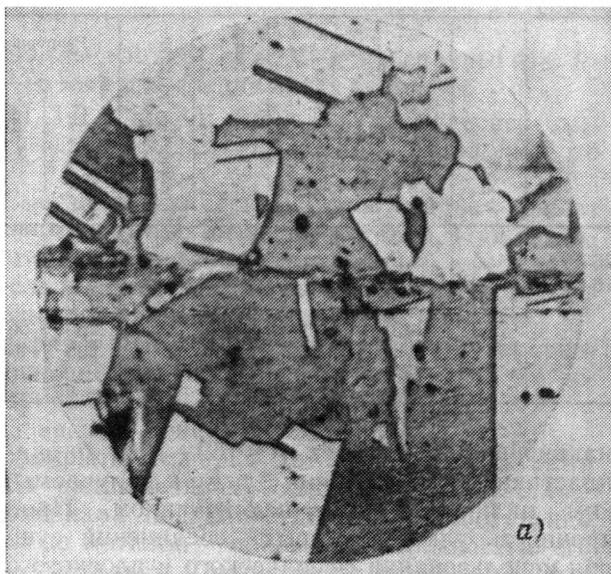


Рис. 9. Микроструктуры соединений:
a — из меди, $\delta=1,0+1,0$ мм; $N=440$ кгс; $\xi_0=13$ мкм; $t=1,3$ с;
 $\times 1000$; *b* — из армко-железа, $\delta=0,5+0,5$ мм; $N=300$ кгс; $\xi_0=$
 $=8$ мкм; $t=0,4$ с; $\times 300$

1. Зависимость прочности соединений от параметров режима сварки

ξ_0 , мкм	N, кгс	t, с	Тип наконечника	Размеры наконечника, мм	Количество испытанных соединений	Разрушающая нагрузка		Пластичность соединений $R_{отр}/R_{ср}$, %	Стабильность прочности по 95% соединений, %
						на срез $R_{ср}$, кгс	на отрыв $R_{отр}$, кгс		
26—28	165	3,0	Сфера	$R=20$	—	210	42	20	—
18—20	100	3,0	»	$R=10$	4	220	66	< 25	+ 10
16	250	3,0	»	$R=15$	200	230	70	< 25	+ 15
	300	1,5	»	$R=75$	—	280	56—112	20—40	+ 5
12	440	1,2	Плоский	$a=6$	10 000	280	140—170	50—60	+ 5

наконечником радиуса $R=(50 \div 100) \delta$ значения прочности и пластичности соединений ближе к получаемым при сварке плоским цилиндрическим наконечником. Процесс соединения и прочность ультразвуковых соединений существенно различны при использовании сферического и плоского сварочных наконечников, а также при использовании оптимальных величин параметров сварки, соответствующих соотношениям (2)—(5), и величин, отличающихся от оптимальных.

§ 2. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

Существенную роль при сварке играет диффузионный процесс. Поэтому принципиальную возможность ультразвуковой сварки устанавливают из фазовой диаграммы для данной пары материалов: они свариваются в случае полной или ограниченной растворимости в твердом состоянии. При ограниченной растворимости в зоне соединения образуются хрупкие интерметаллические соединения, что не влияет на прочность соединения благодаря их малой толщине. При отсутствии взаимной растворимости пары металлов можно наносить на них металлические покрытия, обладающие растворимостью в каждом из металлов, или вводить между деталями прокладку из фольги.

По данным работы [48] свариваются следующие материалы.

Алюминий и его сплавы толщиной до 4 мм в любом состоянии; сварка облегчается при наличии плакировки чистым алюминием.

Медь и ее сплавы толщиной до 1,5 мм.

Железо и стали толщиной до 1 мм (низкоуглеродистые стали, нержавеющие стали аустенитного класса; инструментальные стали).

Золото, серебро, платина и их сплавы в виде фольг ($\delta_{\min} = 4$ мкм) и проволок ($d_{\min} = 12$ мкм) с металлизированными

стеклом и керамикой, а также с полупроводниковыми материалами.

Жаропрочные металлы (Mo, Co, Ta, W и их сплавы; Be, Re толщиной не более 0,75 мм) при специальных условиях.

Сплавы типа САП, ТД — никель (никель с мелкодисперсным торием), свинец с мелкодисперсным торием — толщиной до 1 мм.

На образование металлических связей при сварке влияет кристаллографическая ориентация решетки металла. При совпадении средней кристаллографической ориентации зерен прочность соединений увеличивается. На прочность соединений влияет также предварительная термическая обработка.

Важен рельеф свариваемых поверхностей: наличие неровностей затрудняет сближение поверхностей и образование их непосредственного контакта.

Условия сварки зависят также от механических и физико-химических свойств покрытий. Сварка деталей с покрытиями осуществляется, когда напряжения τ_x обеспечивают пластические деформации материала покрытия. Прочность соединений определяется прочностью металла — покрытия и прочностью его сцепления с основным металлом. Покрытия из лаков, эмалей и смол препятствуют свариванию.

Подготовка поверхностей деталей путем химического травления, обезжиривания и ультразвуковой очистки увеличивает прочность соединений. Например, весьма тщательное обезжиривание и травление позволили сократить вдвое время сварки, повысить прочность и снизить ее разброс с $\pm 13\%$ до $\pm 6\%$ по сравнению с деталями в состоянии поставки.

Выбор материала сварочного наконечника обусловлен следующим. Во-первых, в течение каждого сварочного цикла наконечник подвергается высокочастотному нагружению, т. е. он должен выдерживать указанный режим длительное время. Для уменьшения возможности усталостного разрушения наконечника его поверхность должна быть высокого качества. Ввиду того, что наконечники получают наплавкой, они должны быть нормализованы. Во-вторых, материал наконечника не должен обладать адгезией к свариваемому материалу, т. е. не должен привариваться к нему. Подбор материала наплавки для наконечников, проведенный во ВНИИЭСО [50], позволил найти материалы, обеспечивающие технологичность сварки, и получать без зачистки от 4 тыс. до 10 тыс. точек. Форма наконечника зависит от объекта сварки. При сварке листовых материалов он должен быть плоским (рис. 10, а) [50]. По сравнению со сферическим (рис. 10, б) такой наконечник не вызывает отгибания верхней детали и обеспечивает более стабильные условия возбуждения колебаний, так как сразу же образует фиксированный отпечаток на детали (рис. 10, в). Сферический же

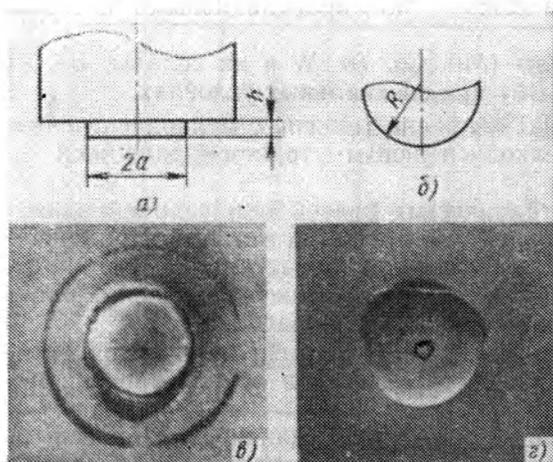


Рис. 10. Связь формы наконечника и его отпечатка:

a — плоский цилиндрический наконечник; b — сферический наконечник; ϑ — отпечаток цилиндрического наконечника на меди, $\times 4$; z — отпечаток сферического наконечника на меди, кружок в центре — размер отпечатка в начале сварки, $\times 4$

наконечник увеличивает отпечаток на детали в течение всего процесса сварки (рис. 10, z).

Рассмотрим основные параметры режима сварки: N , ξ_0 и t . Согласно соотношению (3)

$$N_{\text{опт}} = S\sigma_T. \quad (6)$$

Для плоского наконечника радиуса a при $a = 3\delta$ $S_n = \pi a^2$. Для сферического наконечника радиуса R начальная площадь отпечатка $S_{\text{сф}} = 3,87 \cdot 10^2 \frac{\sigma_T^2}{E_{\text{дет}}^2} R^2$. Удельные давления σ_z при

$N_{\text{опт}} = \text{const}$ непрерывно уменьшаются во время сварки. Для плоского наконечника величины σ_z постоянны в течение всего процесса сварки. Однако он ослабляет соединение по периферии. При выборе высоты h наконечника (см. рис. 10, a), соответствующей толщине детали, это ослабление незначительно. Использование переменной величины $N(t)$ может уменьшить глубину погружения наконечника в деталь. На рис. 11, a приведена зависимость прочности соединений от величины N . Величину N можно уточнить в процессе сварки, так как при $N_{\text{опт}}$ коэффициент бегущей волны в колебательной системе максимален [50].

Согласно соотношению (5) оптимальная для случая сварки листовых материалов величина ξ_0 для плоского наконечника

$$\xi_{0 \text{ опт}} \approx 3,3 \left[(1,2 \div 1,5) \cdot 10^3 \frac{\tau_x}{G} + (1,0 \div 1,5) \right] \text{ мкм}, \quad (7)$$

где $\tau_x = \tau_s \sqrt{1 - 7,2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{N}{a^2 \tau_s} \right)^2}$. На рис. 11, b приведена за-

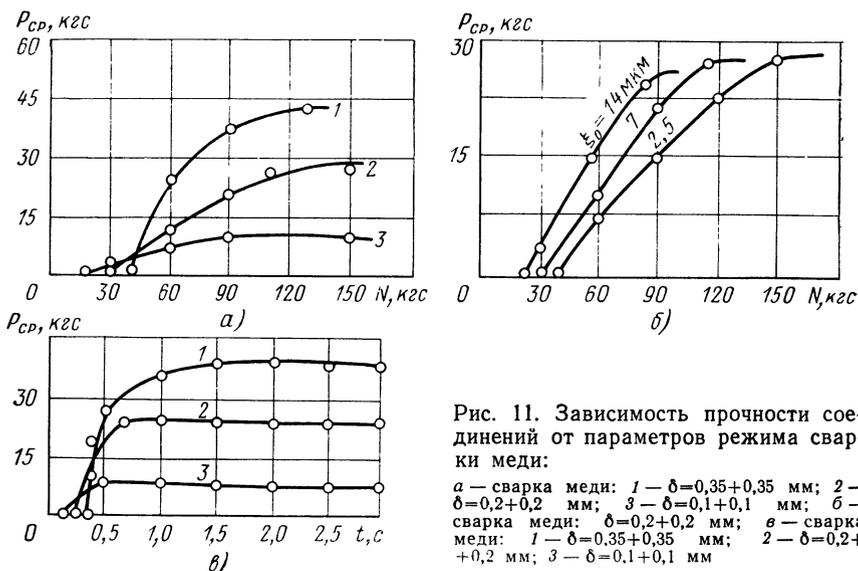


Рис. 11. Зависимость прочности соединений от параметров режима сварки меди:

а — сварка меди: 1 — $\delta = 0,35 + 0,35$ мм; 2 — $\delta = 0,2 + 0,2$ мм; 3 — $\delta = 0,1 + 0,1$ мм; б — сварка меди: $\delta = 0,2 + 0,2$ мм; в — сварка меди: 1 — $\delta = 0,35 + 0,35$ мм; 2 — $\delta = 0,2 + 0,2$ мм; 3 — $\delta = 0,1 + 0,1$ мм

висимость прочности соединений от амплитуды ξ_0 . При увеличении амплитуды $\xi_0 > \xi_{\text{опт}}$ прочность соединений снижается (табл. 1).

Выбор величины $t_{\text{опт}}$, соответствующей максимальной прочности, производится путем сварки ряда соединений при возрастающих значениях t . На рис. 11, в приведена зависимость прочности соединений от t .

Сохранение выбранных оптимальных величин параметров сварки, определяющих стабильность качества сварных соединений, зависит от особенностей работы сварочной колебательной системы под нагрузкой (см. § 3).

Ряд специфических особенностей технологии УЗС рассмотрен в работе [50]. Качество сварных соединений можно контролировать в процессе сварки [50]. Например, отключение ультразвукового генератора при заданной глубине «погружения» сварочного наконечника в деталь обеспечивает разброс прочности соединений $\pm 8\%$. При другом методе фиксируют увеличение амплитуды колебаний опоры: при максимальной ее величине выключается ультразвуковой генератор. При таком контроле разброс прочности составляет $\pm 5\%$.

§ 3. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ СВАРКИ

Для сварки применяют колебательные системы трех типов: продольную (см. рис. 1), продольно-поперечную (рис. 12) и крутильную (рис. 13). В каждой из них есть активный элемент — ультразвуковой преобразователь и пассивная часть —

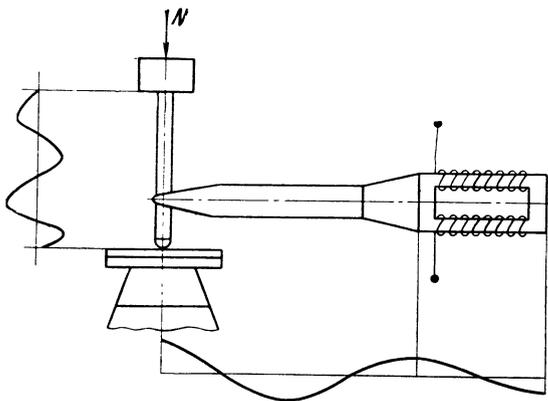


Рис. 12. Продольно-поперечная колебательная система

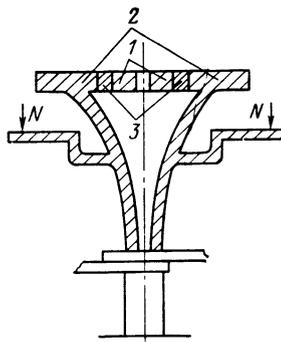


Рис. 13. Крутильная колебательная система:

1, 2 — пассивные накладки крутильного преобразователя; 3 — кольцо из активного материала

волноводная система. Она служит для передачи энергии ультразвука, приложения необходимой силы N и для согласования преобразователя с нагрузкой — объектом сварки. Пассивная часть может изменять тип колебаний, создаваемых преобразователем, и превращать их в колебания другого типа (продольно-поперечная система). Особенности конструкции колебательных систем рассмотрены в работах [48 и 50].

Крутильная сварочная колебательная система проще продольно-поперечной и обладает тем же достоинством — осевым приложением силы N . Для возбуждения крутильных колебаний стержня используют три преобразователя с концентраторами, расположенными под углом 120° друг к другу. Колебания крутильной системы можно возбудить специальным крутильным преобразователем [15]. Для анализа условий работы сварочной системы надо знать характеристики нагрузки, с которой система связана через сварочный наконечник. Часть ультразвуковой энергии, поступающей в зону сварки, необратимо рассеивается в виде тепла, т. е. нагрузка имеет активную компоненту сопротивления. Это означает, что через колебательную систему в нагрузку передается энергия колебаний — в системе существует бегущая волна. Исследуемую систему погружают в ванну с водой до половины диаметра изгибно-колеблющегося стержня и включают колебания. На рис. 14 [48] показана фотография, на которой виден различный характер колебаний в «рабочей» части стержня (между опорой 3 и продольно-колеблющимся концентратором 2), где отсутствует узел изгибных колебательных смещений, и в «опорной» части стержня (между концентратором 2 и массой 1), где регулярно чередуются узлы

Рис. 14. Нагруженная продольно-поперечная колебательная система в «водяном стенде»

(минимумы) и пучности (максимумы) смещений.

Реактивная часть нагрузки обычно носит инерционный характер и понижает резонансную частоту системы на величину Δf . Можно заранее скорректировать геометрические размеры колебательной системы с учетом величины Δf , обусловленной присоединением массы M при сварке. Колебательную систему, которая должна работать на частоте f , рассчитывают на частоту $f + \Delta f$, т. е. делают ее более короткой. При сварке она «удлиняется» за счет инерционной нагрузки и работает на заданной резонансной частоте f . Величину Δf можно определить следующим образом:

$$\Delta f = \frac{M}{M_3} f, \quad (8)$$

где M_3 — эквивалентная масса колебательной системы, а величина M/M_3 — коэффициент нагрузки. Величина M_3 для продольной колебательной системы:

$$M_{3,п} = \frac{2\rho}{\xi_0^2} \int_0^{\lambda_n/4} S(x) \xi^2(x) dx, \quad (9)$$

где $S(x)$ — сечение стержневого полуволнового концентратора; $\xi(x)$ — распределение в нем колебательных скоростей. Величины $M_{3,п}$ и Δf возрастают с увеличением коэффициента усиления концентратора.

Для продольно-поперечной системы, т. е. для изгибно-колеблющегося стержня,

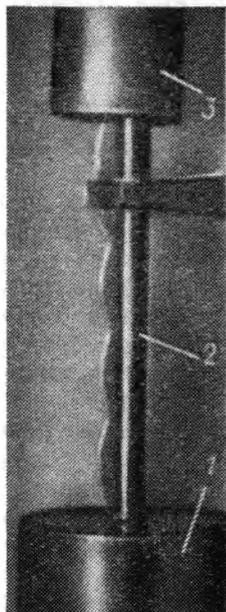
$$M_{3,и} = \frac{\rho S \lambda_n}{4}, \quad (10)$$

где λ_n — «длина волны» изгибных колебаний [50].

Величину M для малых деталей определяют взвешиванием, а для протяженных деталей в виде пластин, которые колеблются во время сварки изгибно и продольно, по выражению

$$M_n = 2b\delta\rho \frac{c}{f}, \quad (11)$$

где M_n — массовая нагрузка, обусловленная продольными ко-



лебаниями свариваемых пластин; b и δ — ширина и толщина пластин. Для изгибных колебаний

$$M_{\text{и}} \approx 0,7b\rho^{3/4} \delta^{3/2} f^{-1/2} \sqrt[4]{E}. \quad (12)$$

Наличие бегущих волн мало влияет на резонансную частоту системы. Поэтому ее рассчитывают как систему, в которой существуют лишь стоячие волны (с учетом поправки на реактивную компоненту нагрузки). Однако наличие бегущих волн следует учитывать, потому что для работы сварочной колебательной системы необходимы устройства ее крепления, в которые может отводиться энергия колебаний [15, 50]. Элемент размером $\lambda/4$, присоединяемый в максимуме (в пучности) смещений, может служить устройством крепления (опорным изолятором).

Порядок расчета сварочных колебательных систем следующий:

1. Выбирают и рассчитывают один из основных типов колебательной системы без учета нагрузки.

2. Корректируют волновые размеры системы с учетом нагрузки.

3. По расчетному распределению смещений в системе и в соответствии с конструктивными требованиями определяют место крепления волноводного изолятора и выбирают его конструкцию.

Расчет и конструктивные особенности продольной и продольно-поперечной систем приведены в работе [50].

Крутильная сварочная система (см. рис. 13) может быть рассчитана с использованием данных работы [15]. Чтобы найти расстройку $\Delta f_{\text{к}}$ и скорректировать размеры системы, надо знать эквивалентную массу крутильного стержня $M_{\text{э,к}}$. Ее вычисляют по выражению (9), куда подставляют $\lambda_{\text{к}}$ — величину длины волны.

Из рассмотренных трех типов сварочных колебательных систем наиболее перспективными являются простые по конструкции и расчету продольные и крутильные системы.

Конструкция машины для УЗС металлов, на основе рассмотренных стержневых систем, достаточно проста. Технические требования к колебательным системам и конструкциям машин, их кинематические схемы, включая машины для шовной сварки и ручные сварочные инструменты, а также электрические схемы управления и питания, рассмотрены в работах [48, 50]. Отметим только, что в сварочных машинах, выполненных на основе продольно-поперечной и крутильной систем, следует использовать стержневые опоры резонансной длины соответственно $\lambda_{\text{п}}/4$ и $\lambda_{\text{к}}/4$. Обычно стержневые опоры служат для передачи деталей давления N .

Существует ряд модификаций машин для шовной сварки

алюминиевой и медной фольги, переносные сварочные инструменты (клещи), мощные машины для точечной сварки и др. [50].

§ 4. ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

Ультразвуковую сварку применяют в производстве полупроводниковых приборов для приварки проволочных (диаметр от 10 мкм) и ленточных (толщина 70—100 мкм) выводов из золота, алюминия и других металлов. Получаемые соединения имеют малое омическое сопротивление, высокую прочность и стойкость к вибрациям. Наряду с хорошим качеством (процент брака при УЗС ниже, чем при термокомпрессионной, и составляет 10%) УЗС обеспечивает также более высокую производительность. Эти преимущества обусловили разработку и выпуск отечественных и зарубежных специализированных машин малой мощности (не более 50 Вт) для микросварки, в том числе полуавтоматических установок для приварки проводников в интегральных схемах, гибридных схемах, транзисторах.

На рис. 15 показаны примеры пленочных схем с проводниками из алюминиевой фольги, ленточные выводы приварены с помощью УЗС. Кроме того, сварочные установки, работающие на крутильных колебаниях, позволяют капсулировать полупроводниковые диоды и триоды без загрязнений, обычно сопутствующих электросварке.

В электровакуумной промышленности некоторые детали вакуумных конденсаторов (пакет алюминиевых цилиндров), которые склепываются при сборке за 1,5 ч, можно сварить УЗС за 3—5 мин.

Ультразвуком сваривают ряд изделий электротехнической промышленности. Сваривают различные проводники (даже через изоляцию), провода термопар и приваривают термопары к монтажным пластинам. Например, сваривают термопары железо-константан с Al, Cu, Ti, сталью; термопары медь-константан с Al, Cu, сталью.

Большая группа ультразвуковых соединений — выводы к изделиям из фольги, например, к анодированной алюминиевой фольге в производстве электролитических конденсаторов. Из фольги изготовляют различные детали электрических соединений. Например, шина из 20 слоев медной фольги ($\delta = 0,1$ мм) может быть получена за один сварочный цикл. Выводы заземления из медной фольги приваривают к гофрированной оболочке кабеля и к шасси радиотехнических устройств. Соединение никелевых сеток щелочных аккумуляторов с никелевыми выводами выполняют также УЗС. Контактная электросварка здесь неприменима из-за загрязнения места сварки микровключениями материала электродов (медь, серебро). УЗС применяют

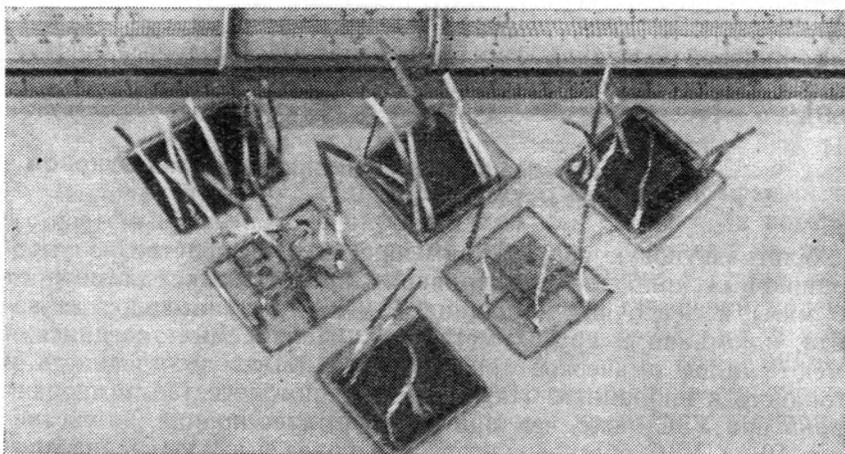


Рис. 15. Пленочные схемы

для выполнения соединений медных деталей обмоток электрических машин.

Обширная область применения УЗС — соединение фольги — соединение рулонов шириной до 180 см при производстве фольги и изготовление различных упаковок. Упаковки изготавливают роликовой сваркой (прямые швы) и сваркой по контуру за один сварочный цикл. С помощью последней упаковывают гигроскопические и биологические материалы, лекарства, пиротехнические и взрывчатые вещества [50]. Одна из перспективных областей применения УЗС — космическая техника в связи с использованием в ней специальных материалов, для которых другие виды сварки иногда оказываются непригодными. Например, конструкции атомного реактора для спутников по проекту SNAP-1A, где надо было сварить алюминиевый сплав с нержавеющей сталью ($\delta=0,75 \text{ мм}+0,75 \text{ мм}$), удалось изготовить только с помощью УЗС [65]. Другой пример конструкции, выполняемой ультразвуковой сваркой, — держатели топливного элемента атомного реактора [65]. Положительные результаты получены также при сварке шпангоутов из алюминиевых сплавов для катеров на подводных крыльях.

Приведенными примерами не ограничиваются области применения ультразвуковой сварки металлов.

§ 5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

УЗС полимеров происходит под действием нормальных к поверхности ультразвуковых колебаний инструмента (частоты $f=20 \div 50 \text{ кГц}$), прижатого к соединяемым деталям с усилием N .

Эти колебания обеспечиваются продольными колебательными системами.

Единого мнения о механизме УЗС не существует. Предполагают, что за счет колебаний инструмента, деформирующего материал, и поглощения энергии механических колебаний происходят размягчение полимерного материала иногда до вязкотекучего состояния и пластическое течение материала соединяемых деталей в области их контакта под инструментом.

В станках и ручных устройствах для УЗС полимеров используются сварочные инструменты, выполненные обычно из материалов с малыми механическими потерями. Рабочие концы инструментов имеют разнообразные формы в зависимости от типа соединения. Например, для прерывистых швов применяют ножевой тип инструмента, а для кольцевых швов — тарельчатый инструмент с кольцевым рабочим выступом. Необходимы устройства для прижатия инструмента к объекту сварки, например с помощью подвижной опоры. Опоры обычно выполняют резонансными, длиной $\lambda/4$.

Генераторы для УЗС полимеров изготавливают на полупроводниках и снабжают устройствами для регулирования времени сварки, времени сжатия деталей и величины электрической мощности.

Известен ряд отечественных станков и установок для УЗС полимеров [50], например, установка УПК-15 для сварки изделий по контуру; шовно-шаговая установка с акустической головкой типа МТУП-1,5 на базе швейной машины класса 38-А; установка АУСК-1,5 для шовной УЗС полиэтиленгтерафталатной пленки с бумагой; автомат типа АУС-1,5 для сварки и резки трикотажно-лавсанового рукава при изготовлении фильтров для систем переливания крови; модификация станка типа МТУ-0,4 для соединения различных изделий из пластмасс; установка типа БЩМ для соединения деталей одежды, выполненных из термопластичных материалов; установки РУСУ-50 и РУСУ-28 для сварки полиэтиленгтерафталатных, полипропиленовых и полиамидных пленок; ручные ультразвуковые инструменты для шовной сварки ориентированной полимерной пленки, металлизированной алюминием; установка УСП-21 для соединения полистироловых корпусов микродвигателей и т. д. Известны и зарубежные установки. Например, чехословацкая установка для сварки корпусов стоп-сигналов автомобилей «Шкода-100»; ультразвуковой пистолет японской фирмы «Сейвендиш»; установки английской фирмы «Sonoweld»; западногерманской «Лефельд» и др.

Технологические особенности УЗС полимеров во многом определяются типом свариваемого материала, его толщиной и типом соединения. От этих же данных зависят параметры режима сварки: амплитуда колебаний сварочного инструмента ξ_0 , усилие сжатия N , время сварки t_1 , время сжатия деталей t_2 и

электрическая мощность W . Величина ξ_0 от 25 до 70 мкм, N от нескольких кгс до десятков кгс, t_1 и t_2 от десятых долей до нескольких секунд, W от десятков Вт до нескольких кВт.

Специфика объектов сварки определяет особенности технологии УЗС. Например, при сварке весьма тонких (5 мкм) пленок между ними вводят прокладки из бумаги толщиной до 75 мкм. При сварке кольцевых герметичных швов (изделия из полиэтилена) используют фторопластовую пленку, вводимую между сварочным инструментом и изделием. При этом на опору наклеивают кольцо из кремний-органической резины.

На прочность ультразвуковых соединений влияют физико-механические характеристики объекта сварки, а также геометрия и размеры ультразвукового инструмента и величина исходного зазора между инструментом и объектом сварки. Обычно прочность соединений составляет 50—70% прочности соединяемого материала. Толщина соединяемых материалов составляет от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Хорошо свариваются винипласт, оргстекло, полистирол, полиамиды, полиэтилен толщиной от 0,3 до 10 мм и ткани из капрона и лавсана толщиной 0,2—0,3 мм, а также искусственные кожи, кинопленка и другие материалы.

Производительность УЗС полимеров достаточно велика. Например, синтетические ткани соединяют со скоростями, приближающимися к скоростям швейных машин. Скорость сварки пленочных материалов достигает 8 м/мин.

Можно выделить следующие виды УЗС полимерных материалов.

1. Непрерывная и прерывная (шовная) сварка иногда с использованием вращающихся ультразвуковых преобразователей для соединения тонких листовых материалов, синтетических тканей, терилена, поливинилхлорида и полимерной пленки с бумагой.

2. Сращивание или соединение внахлестку полимерных волокон или их пучков.

3. «Дистанционная» сварка жестких термопластов когда ультразвуковые колебания прикладываются к соединяемым деталям в точках, удаленных от места сварки. Колебания передаются к месту сварки главным образом за счет изгибных колебаний.

4. Соединение массивных деталей путем использования пластмассовых заклепок.

5. Фиксирование металлических деталей в пластмассе.

УЗС полимеров успешно применяют для сварки корпусов микродвигателей, реле, аккумуляторов, магнитофонов, а также для сварки кассет и игрушек. С помощью ультразвука удается значительно ускорить полимеризацию клеев при соединении биологических костных тканей [22].

§ 6. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ЛУЖЕНИЕ И ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

Ультразвуковое (УЗ) лужение и пайку осуществляют, когда металлируемый объект приведен в соприкосновение с жидким припоем, в котором происходит УЗ кавитация (рис. 16 и 17). Кавитация вызывается либо УЗ колебаниями дна ванны лужения, либо колебаниями торца УЗ паяльника.

Колебания излучающей поверхности, погруженной в расплав, приводят при интенсивностях звука более 1 Вт/см^2 к появлению в расплаве маленьких пузырьков газа — зародышей кавитации. Их количество увеличивается с ростом газосодержания расплава и с введением в расплав мелких твердых частиц. Это могут быть частицы твердой фазы, например, Zn , если температура расплава Sn—Zn находится на диаграмме состояния между линиями солидуса и ликвидуса. Пузырьки, находящиеся в расплаве возле облуживаемой поверхности, пульсируют, т. е. расширяются и затем захлопываются. При захлопывании возникает ударная волна, давления в которой могут достигать 10^5 ат. Такие микровзрывы разрушают пленки окислов и загрязнений на облуживаемой поверхности. Чистая поверхность, защищенная от окисления припоем, хорошо смачивается и облуживается. Возникающие в кавитационной области

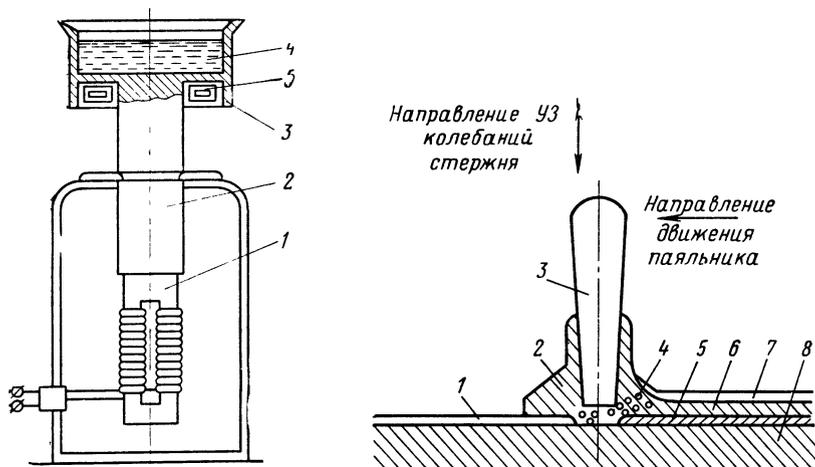


Рис. 16. Схемы ультразвукового лужения:

1 — магнотриксционный преобразователь; 2 — волновод; 3 — ванна; 4 — расплавленный припой; 5 — нагреватель

Рис. 17. Схема ультразвуковой пайки:

1 — окисная пленка; 2 — расплавленный припой; 3 — стержень паяльника; 4 — место контакта расплавленного припоя с чистым металлом; 5 — смесь припоя с чистым металлом; 6 — затвердевший припой; 7 — остатки окислов на поверхности припоя; 8 — чистый металл

микротоки уносят частицы окислов и загрязнений, перемешивают расплав и могут обуславливать абразивное действие находящихся в расплаве частиц твердой фазы. Кавитация в расплаве увеличивает также химическую активность припоя и облуживаемой поверхности и диффузию из расплава в металл поверхности.

Технология УЗ паяния и облуживания отличается от технологии обычного паяния. Основные технологические требования состоят в следующем. Необходимо стабилизация температуры ПЗ00А, содержащие Zn, Sn, Cd, Ag с температурой плавления с точностью $\pm 1\%$ и интенсивности ультразвука около 7—9 Вт/см². Интенсивность можно контролировать по интегральному уровню кавитационного шума или по его спектральному составу. Обычно время лужения составляет 5—10 с, а скорость перемещения УЗ паяльника 0,8—1,6 см/с. Перед лужением целесообразно нагревать детали до температуры расплавленного припоя. Обычно используются припои П170А, П200А, П250А, П300А, содержащие Zn, Sn, Cd, Ag с температурой плавления от 170 до 300°С; серебряные припои ПСр2 и ПСр3; оловянно-свинцовые припои. Оптимальная величина зазора между торцом паяльника и деталью от 0,2 до 3 мм.

Необходимо учитывать, что увеличение времени облуживания (паяния) и интенсивности ультразвука может вызвать кавитационный износ облуживаемой поверхности, особенно при лужении тонкой проволоки и фольги. Дно ванны лужения и жало паяльника должны быть изготовлены из кавитационно стойких материалов.

Акустические системы (диафрагмы) ванн лужения аналогичны системам, предназначенным для ультразвуковой очистки. Медные стержневые жала паяльников выполняют длиной $3/4 \lambda$ или $5/4 \lambda$, т. е. при частоте ~ 20 кГц они имеют длину ~ 119 или ~ 197 мм. Электрическая мощность установок для лужения 0,4—2,5 кВт, а паяльников 0,04—0,63 кВт.

УЗ пайка и лужение значительно упрощают технологию облуживания и пайки алюминия и его сплавов, титана, керамики (пьезокерамики), стекла, ферритов, повышают качество и прочность соединений. Можно назвать следующие примеры применения рассматриваемых процессов: лужение и пайка различных проволок—выводы к конденсаторам и сопротивлениям, провода терморпар, сращивание алюминиевых кабелей; припайка клемм и выводов заземления к проводам и кожухам, выполненным из алюминиевых сплавов; пайка крепежных лепестков и отводов к стеклу, керамике, ферритам, полупроводниковым материалам; исправление дефектов в алюминиевых отливках и пайка (лужение) деталей из силумина, титана, нержавеющей стали, чугуна и т. д.

Глава

8

**Применение
ультразвука
при механической
обработке
и поверхностном
упрочнении
труднообрабатываемых
материалов**

•

А.И. МАРКОВ

Известны четыре основные области применения ультразвука при механической обработке [25]:

а) снятие заусенцев с мелких деталей свободно направленным абразивом (рис. 1, а);

б) ультразвуковая размерная обработка деталей из хрупких материалов абразивными зернами, получающими энергию от специального инструмента (рис. 1, б);

в) очистка и смазка рабочей поверхности шлифовального круга в процессе его работы (рис. 1, в);

г) сообщение вынужденных ультразвуковых колебаний малой амплитуды режущим инструментом (металлическим и абразивным) для интенсификации обычных процессов резания (рис. 1, г).

Кроме того, перспективным процессом является ультразвуковое поверхностное упрочнение маложестких тонкостенных деталей сферическим или цилиндрическим наконечником из твердого сплава или алмаза [26, 29]. Под действием ультразвука резко снижается сопротивление поверхностных слоев металлов пластической деформации и упрочнение деталей ведется при статических силах, в 3—5 раз меньших, чем при обычном упрочнении [25].

§ 1. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ СНЯТИЕ ЗАУСЕНЦЕВ

Эрозионная активность звукового поля возрастает при добавлении в жидкость небольших абразивных зерен, размер которых соизмерим с радиусом действия ударной волны, возникающей

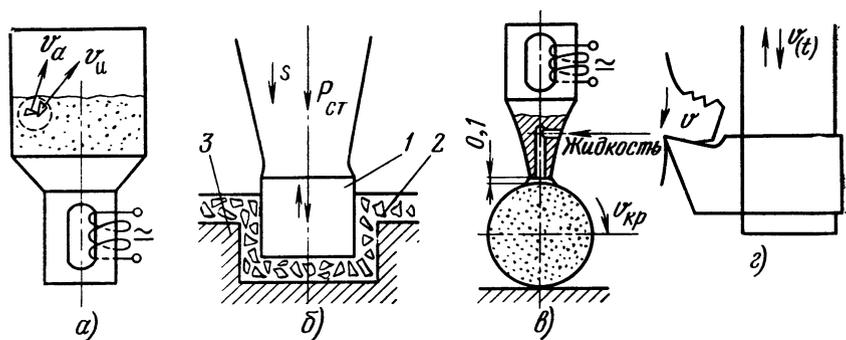


Рис. 1. Принципиальные схемы ультразвуковых методов механической обработки

при захлопывании кавитационной полости. Ультразвуковое снятие заусенцев (см. рис. 1, а) производится в ультразвуковой ванне, заполненной водно-глицериновой смесью, в которой взвешены мелкие абразивные зерна. Кроме чисто кавитационного разрушения заусенцев, происходит дополнительная обработка их абразивными зернами. При возникновении акустических течений зерна абразива и детали получают неодинаковые скорости ($v_a \neq v_d$). Происходит их взаимное проскальзывание и снятие заусенцев.

Этот способ, предложенный фирмой «Пауэртон Ультрасоник» (США), обладает низкой производительностью. В Советском Союзе он значительно усовершенствован путем создания в ультразвуковой ванне избыточного статического давления: $p = 4 \div 6$ кгс/см². Эрозия значительно интенсифицируется, и производительность процесса снятия заусенцев увеличивается в десятки раз [1].

Исследования этого процесса методом скоростной киносъемки [1, 48] показали, что кавитационные пузырьки сосредоточиваются в месте соединения заусенца с пластинкой. При атмосферном давлении пульсации пузырьков обычно не приводят к разрушению заусенца, а при повышении давления до 5 кгс/см² заусенец быстро разрушается. Установлена избирательность процесса — в первую очередь разрушается место соединения заусенца с пластинкой и его острая кромка, а поверхность самой пластинки почти не имеет следов эрозии.

Главное преимущество процесса ультразвукового снятия заусенцев — сохранение формы и точных размеров деталей, изготовленных с микронными допусками.

Снятие заусенцев под повышенным статическим давлением производится в установках типа УЗВД-6 (рис. 2). При помощи магнестрикционного преобразователя 1 типа ПМС-15А-18 и излучателя 2 в абразивной суспензии возбуждаются интенсивные ультразвуковые колебания частотой 18 кГц. Рабочий объ-

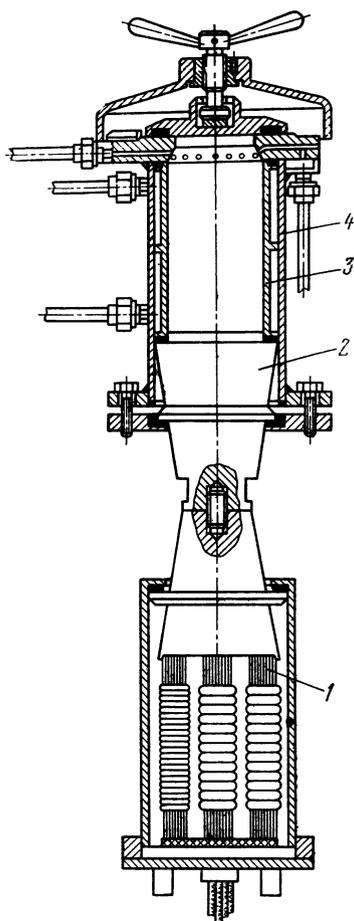


Рис. 2. Схема установки УЗВД-6 для удаления заусенцев

ем ванны, закрепленной в корпусе 3 составляет 700 и 1200 см³. Повышенное статическое давление в ультразвуковой ванне создается сжатым воздухом или азотом. В качестве абразива применяют диамантин, электрокорунд, карбид кремния с размером частиц от 3 до 20 мкм. Установка предназначена для удаления заусенцев размером до 0,08 мм с мелких (массой до 10 г) деталей из латуни ЛС-59, стали У7А, стали 20 и др. Одновременно в ванну загружают детали в 2—3 слоя: от 500 до 20 000 шт. Процесс ультразвуковой обработки продолжается 10—15 мин. Размер заусенцев снижается с 0,08 до 0,01 мм. Химически активные добавки интенсифицируют процесс снятия заусенцев. Например, 2%-ный раствор медного купороса снижает время обработки на 93%. Детали в процессе обработки должны находиться в постоянном движении. Способность деталей под действием акустических течений удерживаться во взвешенном состоянии зависит от

отношения массы детали к ее поверхности. Снятие заусенцев наблюдается у деталей с отношением не более $5 \cdot 10^{-3}$ г/мм².

Применение установок УЗВД-6 позволяет устранить операции ручной зачистки заусенцев, а также получить тонкодисперсные однородные порошки любых материалов.

Ультразвуковое снятие заусенцев внедрено на ряде предприятий СССР. Техничко-экономический эффект от внедрения одной установки типа УЗВД-6 составляет от 2 до 7 тыс. руб. в год.

§ 2. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ультразвуковую размерную обработку применяют для формообразования поверхностей деталей из твердых хрупких материалов. Этот способ наряду с рядом достоинств имеет недо-

статки: сравнительно небольшая глубина и площадь обработки, большой износ инструмента и малая производительность при обработке изделий из твердых сплавов.

Ультразвуковой метод наиболее целесообразен при изготовлении полостей и отверстий сложной формы в изделиях из твердых хрупких материалов, обработка которых другими методами затруднительна. Широкое применение стекла, кварца, керамики, ситаллов, рубина, германия, кремния в электронной, приборостроительной промышленности и различных отраслях машиностроения вызвало быстрое развитие ультразвуковой размерной обработки, создание и внедрение в производство ультразвуковых станков, разработку физических и технологических основ этого метода.

Схема процесса простая (см. рис. 1, б): инструмент 1 совершает ультразвуковые колебания, а в рабочую зону подаются взвешенные в воде зерна абразива 2. Инструмент периодически ударяет по зернам абразива и выкалывает небольшие частицы материала обрабатываемого изделия 3.

Ультразвуковая размерная обработка состоит из двух основных процессов [24]: 1) ударного внедрения абразивных зерен, вызывающего выкалывание частиц обрабатываемого материала, и 2) циркуляции и смены абразива в рабочей зоне, в результате которых происходит унос выколотых частиц и доставка свежего абразива. Обязательным условием высокопроизводительной ультразвуковой обработки хрупких материалов является интенсивное протекание этих двух процессов.

Производительность процесса в значительной степени зависит от физико-механических свойств обрабатываемых материалов, амплитуды колебаний, зернистости абразива и нагрузки $P_{ст}$. Материалы, имеющие критерий хрупкости t_x (под критерием хрупкости понимают отношение сопротивления сдвигу σ и сопротивлению на отрыв τ) более 2 (стекло, керамика, германий, кремний и др.), наиболее эффективно обрабатываются ультразвуковым методом. Производительность процесса, как показано в работе [25], примерно пропорциональна квадрату критерия хрупкости:

$$V \approx Ct_x^2.$$

Различные вопросы теории и практики ультразвуковой размерной обработки хрупких материалов рассмотрены в многочисленных работах [24, 25, 36, 37, 48, 57, 59].

В СССР выпускают универсальные (табл. 1) и специальные ультразвуковые станки.

При ультразвуковой обработке материалов, имеющих критерий хрупкости более двух ($t_x \geq 2$), на современных ультразвуковых станках средней мощности производительность процесса достигает 3000—5000 мм³/мин [25]. Значительно хуже (в

1. Технические характеристики универсальных ультразвуковых станков

Характеристика	Модель станка				
	4770	4771	4772	4772А	4Б772
Мощность генератора, кВт .	0,4		1,5		
Наибольший диаметр обрабатываемых отверстий, мм .	15		80		
Размеры стола, мм	125×165	∅ 250	250×350	∅ 300	
Частота вращения, об/мин: стола инструмента	— —	10 300	— —	2 и 4 —	2 и 4 —
Производительность, мм ³ /мин, при обработке: стекла на глубину до 3—5 мм стекла на глубину более 10 мм твердого сплава на глущину до 3—5 мм твердого сплава на глущину более 10 мм	250 — 6 —	1300 1200 10 10	1200 Менее 300 20 Менее 5	4000 4000 50 50	— — 500 500
Точность обработки (абразив № 10), мм	±0,04	±0,025	±0,04	±0,025	—
Конусность отверстий, мин .	120—180	5—4	120—180	5—40	—

100 раз и более) обрабатываемость ультразвуковым методом твердых сплавов и других материалов, имеющих критерий хрупкости менее двух ($1 < t_x < 2$).

Наиболее эффективным способом повышения производительности ультразвуковой обработки твердых сплавов и других электропроводящих материалов является метод, предложенный автором совместно с Б. Н. Ляминым. Он основан на рациональном совмещении ультразвукового и электрохимического процессов (анодного растворения) [24, 25]. При обработке твердых сплавов этот метод обеспечивает высокую производительность (до 400—800 мм³/мин при чистоте 7-го класса) и точность в пределах 0,06 мм. Производительность совмещенного метода в

50 раз выше электроэрозионного и в 10 раз выше обычного ультразвукового. Кроме того, в 8—10 раз снижается износ инструмента, в 3—5 раз уменьшается удельный расход электроэнергии. При этом абразив карбид бора можно заменить значительно более дешевым карбидом кремния.

Совмещенный метод реализован в серийном ультразвуковом станке мод. 4Б772 (табл. 1). Схема совмещенного метода (рис. 3) простая: к обычному ультразвуковому станку добавляют источник постоянного тока 7 напряжением 6—12 В (и силой тока до 600—1000 А). Абразив, взвешенный в электролите, нагнетается под давлением в инструмент 5 или деталь 6 при помощи насоса 10. Деталь, являющаяся анодом, изолирована от массы станка.

Наиболее эффективными способами улучшения процесса циркуляции и смены абразива в рабочей зоне являются вакуумный отсос и нагнетание под давлением абразивной суспензии, которые применяют в станках 4771 и 4772А. Однако применение вакуумного отсоса и нагнетания абразивной суспензии, а также совмещенного метода затруднительно при обработке глухих отверстий и деталей из очень хрупких материалов. При ультразвуковой обработке тел вращения целесообразно сообщать инструменту и заготовке вращательные движения. Создав эксцентриситет их осей, можно расширить технологические возможности ультразвуковой обработки: обрабатывать отверстия больших диаметров и вести обработку по кинематической схеме расточного станка. При вращении инструмента и заготовки можно в 1,5—2,5 раза увеличить производительность процесса и площадь обработки, снизить высоту микронеровностей. Точность обработки отверстий в стекле и керамике на специализированном ультразвуковом станке УЗСТ-1 2—3-й классы, а точность их взаимного расположения до 0,02 мм [36].

Представляет интерес оригинальный способ ультразвуковой обработки неэлектропроводящих хрупких материалов движущимся непрофилированным инструментом — тонкой проволокой [35]. В натянутой между двумя опорами проволоке-инструменте 5 (рис. 4), постоянно перематываемой с катушки 7 на катушку 6, возбуждают ультразвуковые колебания от концентратора 1 с помощью шипа 2. Обрабатываемое изделие 4 с небольшим усилием P прижимается к инструменту, а в зону их контакта подается абразивная суспензия 3. Этот своеобразный «ультразвуковой лобзик» позволяет производить контурную вырезку, обработку узких пазов и щелей (шириной $\geq 0,1$ мм), разрезку заготовок и другие операции. Производительность процесса резки по стеклу до 150—200 мм²/мин. Он наиболее эффективен при обработке очень тонких изделий из стекла, ситалла и керамики.

Ультразвуковую обработку применяют при изготовлении сувениров и художественных изображений на декоративных кам-

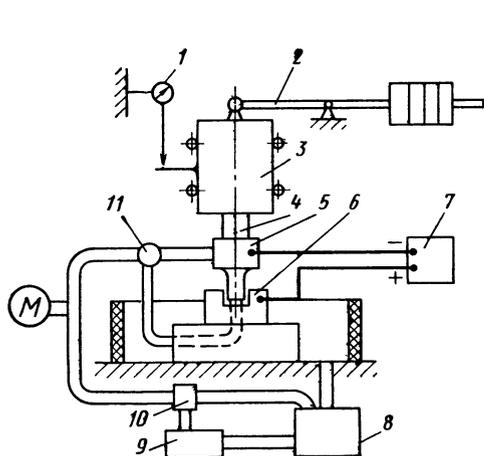


Рис. 3. Схема совмещенной обработки на ультразвуковом станке 4Б772:
 1 — индикатор; 2 — коромысло с противовесом; 3 — магнитострикционная головка; 4 — волновод; 5 — ультразвуковой инструмент; 6 — обрабатываемая деталь; 7 — выпрямитель; 8 — бак; 9 — фильтр; 10 — насос; 11 — кран

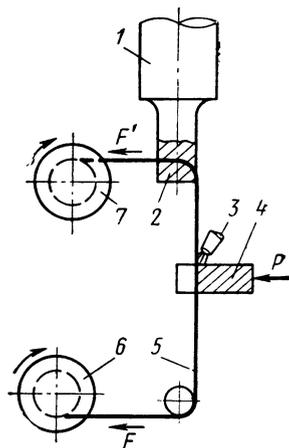


Рис. 4. Схема ультразвуковой обработки непрофилированным инструментом

нях и минералах. Однако на существующих ультразвуковых станках размер изображений ограничивается диаметром 80 мм.

В СССР разработан способ получения изображений больших размеров, основанный на использовании в качестве инструмента типографского клише. Обработка ведется без жесткого крепления клише к концентратору: кинематическая схема напоминает строчное фрезерование: инструмент, прижимаемый к клише, строчками последовательно обходит всю обрабатываемую поверхность. Указанным методом на станке мод. 4772А можно обрабатывать изображения диаметром 250 мм. Размер обрабатываемого рисунка ограничивается лишь величиной координатных перемещений стола ультразвукового станка.

§ 3. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ АЛМАЗНОЕ СВЕРЛЕНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ *

В современном машиностроении и приборостроении широко применяют изделия из твердых неметаллических материалов. При обработке деталей из минералокерамики, ситаллов и рубина сложной операцией является сверление отверстий малого диаметра. Применение обычной схемы ультразвукового резания (см. рис. 1, б), сверление твердосплавным инструментом малоэф-

* Написано совместно с канд. техн. наук Устиновым И. Д.

фективны из-за низкой производительности, малой точности и большого износа инструмента. Обработка глубоких отверстий электронным лучом и лучом лазера также малоэффективна из-за низкой точности и больших остаточных напряжений, часто приводящих к образованию трещин на обработанной поверхности.

Алмазное сверление отверстий малого диаметра на обычных металлорежущих станках удается вести на сравнительно небольшую глубину $h \leq (5 \div 10)D$.

Процесс алмазного сверления можно значительно интенсифицировать сообщением инструменту ультразвуковых колебаний малой амплитуды [34, 36, 58]. Для оценки влияния ультразвука на процесс разрушения хрупких материалов автором совместно с Устиновым И. Д. проведены эксперименты при царапании образцов из стекла ориентированными и неориентированными кристаллами алмаза. При воздействии ультразвуковых колебаний в зоне контакта алмаза с образцом на поверхности последнего образуется зона повышенной трещиноватости — зона предразрушения. Роль ультразвуковых колебаний заключается в интенсификации процесса хрупкого разрушения обрабатываемого материала за счет создания сетки микротрещин и выколов на его поверхности.

Изучение ультразвукового алмазного сверления позволило получить зависимость для расчета производительности процесса в мм/мин:

$$s_m = \frac{\alpha}{\sigma_n} \left\{ \pi r \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{1}{4} \left[\frac{12P_{ct}r(1-\mu^2)}{N_p E} \right] EDN_p F n} \right) + P_{ct} f \xi_m \right\},$$

где α , σ_n , E и μ — межатомное расстояние, удельная поверхностная энергия, модуль упругости и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала; P_{ct} , n , f , ξ_m — статическая нагрузка на инструмент, частота вращения, частота и амплитуда колебаний; r , N_p , D , F — радиус вершины зерен алмаза, число рабочих зерен, диаметр и площадь рабочего торца инструмента.

При использовании результатов опытов по царапанию эта зависимость значительно упрощается:

$$s_m = \frac{\alpha}{\sigma_n} E r h^* N_p D n,$$

где h^* — глубина внедрения алмазных зерен, мкм. Для кварцевого стекла $h^* \approx 6,5 \cdot 10^{-4} p_1^2 \sqrt{\xi_m}$, p_1 — сила, приходящаяся на одно зерно.

При глубоком сверлении отверстий малого диаметра ($D = 2,5 \div 6$ мм, h до 400 мм) испытаны инструменты трубчатой формы из природных и синтетических алмазов на металлических связках. Изучались зависимости производительности про-

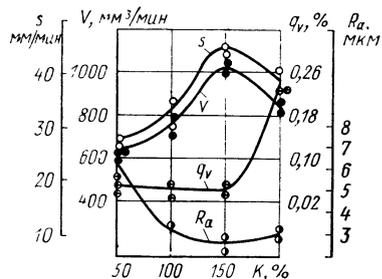
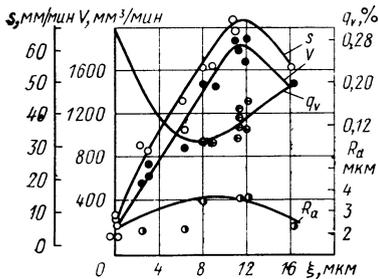


Рис. 5. Зависимость V , s_m , q_v и R_z от амплитуды колебаний инструмента ξ_m ($P=30$ кгс/см², $f=44$ кГц, М5-10, К150%, 125/100)

Рис. 6. Зависимость V , s_m , q_v и R_a от концентрации алмазов в связке ($P=30$ кгс/см², $\xi_m=6$ мкм, $f=44$ кГц, М5-10, 125/100)

цесса V (мм³/мин) и s_m , удельного износа инструмента q_v , средней высоты микронеровностей R_a , глубины микротрещин и точности обработки от акустических и технологических факторов.

Зависимость V и s_m от удельной статической нагрузки p носит экстремальный характер. Для каждого материала существует оптимальное значение $p_{\text{опт}}$, величина которого зависит главным образом от прочности материала и площади инструмента. При увеличении частоты вращения инструмента от 600 до 2500 об/мин производительность процесса возрастает.

Увеличение амплитуды колебаний инструмента ξ_m до 10—11 мкм вызывает повышение производительности (рис. 5), а дальнейшее увеличение амплитуды колебаний ξ (более 11 мкм) приводит к снижению производительности V и S . Это объясняется чрезмерным ростом нагрузки на алмазные зерна и снижением прочности связки. Максимуму производительности примерно соответствует минимальное значение удельного износа инструмента. При ξ_m более 15 мкм может происходить разрушение алмазонасного слоя из-за высоких циклических напряжений.

При ультразвуковом алмазном сверлении большое влияние на эффективность процесса оказывают концентрация алмазов, их зернистость и тип связки. При увеличении K до 150% производительность повышается, а удельный износ инструмента q_v остается практически неизменным (рис. 6); увеличение K до 200% приводит к снижению производительности и интенсивному износу инструмента, что объясняется значительным уменьшением механической прочности алмазонасного слоя [36]. При увеличении глубины обработки h наблюдается небольшое снижение производительности V и s и рост износа инструмента q_v .

Наиболее высокие режущие свойства имеют инструменты из природных и синтетических монокристаллических алмазов АСК (табл. 2) на новых металлических связках М5-10 и М5-6

2. Зависимость технологических характеристик от типа алмазов

Показатели ультразвукового алмазного сверления	Тип алмаза			
	A125/100	АСК125/100	АСВ125/100	АСР125/100
V , мм ³ /мин	1190—1480	1960—2020	1010—1080	690—690
s_M , мм/мин	55,5—60	69,5—71,7	46,3—49,4	33,3—33,6
q_v , %	0,085	0,14—0,16	0,22—0,25	0,26—0,265
R_a , мкм	3,3—6,1	4,5—9	6,4—7,5	5,7—6,2

3. Зависимость технологических характеристик от марки связи

Показатели ультразвуко- вого алмазного сверления	Марка связи				
	M1		M5-2	M5-6	M5-10
	литая	прессованная			
V , мм ³ /мин	1100—1380	1250—1340	1030—1280	1190—1480	1720—1850
s_M , мм/мин	44,2—56,6	48,1—52	44,1—52,6	55,6—60	60—63,8
q_v , %	0,09—0,15	0,16—0,18	0,24—0,31	0,085	0,08—0,18
R_a , мкм	3,8—7,1	4,3—5,2	4,2—4,8	3,6	2,7—4,8

(табл. 3). Для ультразвукового алмазного сверления минералокерамики ЦМ-332, рубина, сапфира целесообразно применять инструмент из природных и синтетических алмазов типа САМ и АСК; для менее твердых материалов (техническое стекло) — из алмазов марок АСВ и АСР.

Оптимальные размеры алмазных зерен d_a различны: при увеличении коэффициента обрабатываемости K_s оптимальное значение d_a увеличивается. Для материалов с $K_s=0,5$ $d_a=120$ мкм; для $K_s=0,5 \div 1,5$ $d_a=160$ мкм и при $K_s > 1,5$ $d_a=200 \div 250$ мкм. Обрабатываемость неметаллических материалов показана в табл. 4. Относительную обрабатываемость оценивали коэффициентом $K_s = \frac{s_M}{s_{МК8}}$. Обычно K_s снижается при увеличении твердости обрабатываемого материала.

Шероховатость обработанной поверхности при режимах, соответствующих максимальной производительности алмазной обработки, находится в пределах 4—5-го классов. Для получения более высокого класса шероховатости поверхности нужно работать на режимах с малой принудительной подачей.

Глубина проникновения микротрещин $h_{тр}$ при обычном и ультразвуковом алмазном сверлении в 2 раза больше R_a . Глубина микротрещин при сверлении без ультразвука примерно на 10—15% меньше. Величина остаточных напряжений на образцах из кварцевого стекла небольшая (не более 0,3 кгс/см²) — значительно меньше, чем при электроннолучевой обработке.

4. Обрабатываемость неметаллических материалов алмазными трубчатыми сверлами [$D=6$ мм, АСК125/100К150%, связка М5-10]

Материал	Производительность ультразвукового алмазного сверления		Коэффициент обрабатываемости K_s	Износ инструмента	
	s_m , мм/мин	V , мм ³ /мин		q_V , %	q_K , карат/м
Стекло К8	96,6	2106	1	0,097	0,139
Техническое стекло	129	2688	1,335	0,0179	0,0258
Стекло ЛФ-5	123	2580	1,273	0,123	0,176
Технический фарфор	103	2220	1,07	0,0288	0,041
Кварцевое стекло	97,6	2188,7	1,01	0,071	0,102
Ситалл СТЛ-6	96,0	2020	0,994	0,057	0,082
Стекло ТФ-3	91,3	1994	0,945	0,105	0,15
Ситалл СТЛ-7	89,7	1795,8	0,929	0,058	0,083
Ситалл СТБ-1	77,2	1685,1	0,799	0,13	0,186
Ситалл ЛЗ-40	65,7	1436,4	0,68	0,064	0,092
Минералокерамика ЦМ-332	25,5	556,3	0,264	0,17	0,243
Ситалл СТЛ-10	24,8	541,6	0,257	0,145	0,207
Рубин синтетический	15,6	342	0,161	0,495	0,708

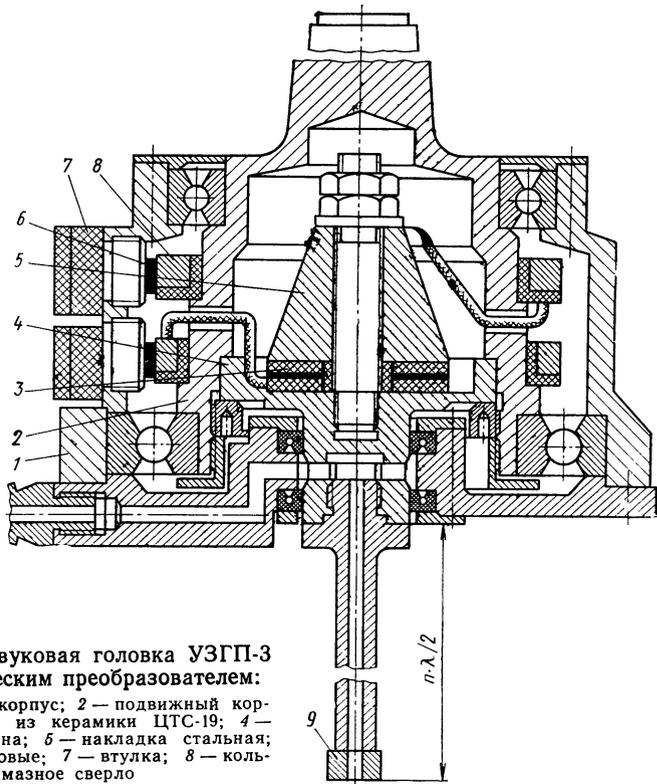


Рис. 7. Ультразвуковая головка УЗГП-3 с пьезокерамическим преобразователем:

1 — неподвижный корпус; 2 — подвижный корпус; 3 — пластины из керамики ЦТС-19; 4 — накладка из титана; 5 — накладка стальная; 6 — щетки графитовые; 7 — втулка; 8 — кольца медные; 9 — алмазное сверло

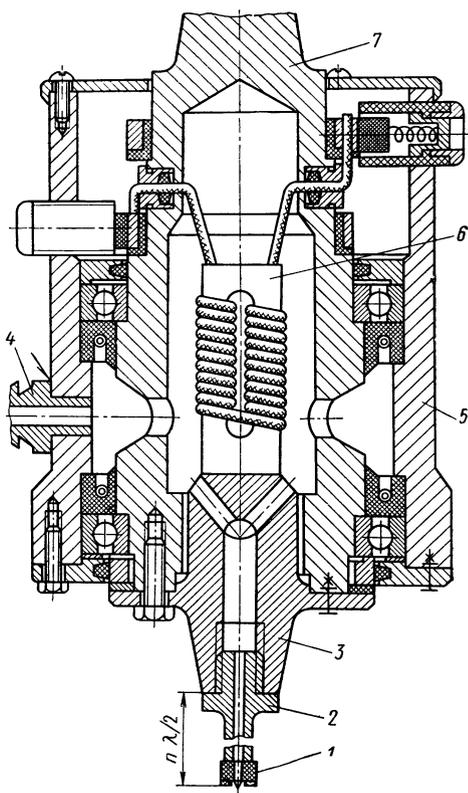
Рис. 8. Ультразвуковая головка УЗВГ-2 с магнитострикционным преобразователем:

1 — алмазоносная часть сверла; 2 — корпус сверла; 3 — концентратор; 4 — штуцер; 5 — неподвижный корпус; 6 — преобразователь; 7 — подвижный корпус

Точность алмазной ультразвуковой обработки зависит от режимов обработки, характеристик режущего инструмента, жесткости системы и кинематической схемы процесса. Применение специальных люнетов позволяет получать отверстия до 2-го класса точности. Обработка без водяного охлаждения недопустима из-за возникновения высоких температур в зоне резания, прижогов алмазной коронки или ее полного разрушения. При оптимальных режимах средняя температура на торце инструмента не превышает 220°C , а температура на контактной поверхности алмазного зерна не превышает 750°C .

Для осуществления ультразвукового алмазного сверления требуется специальное оборудование. При изготовлении небольших партий деталей рекомендуется применять ультразвуковые головки с пьезокерамическим (рис. 7) и магнитострикционным (рис. 8) преобразователями [36], которые можно устанавливать на металлорежущих станках — сверлильных, фрезерных, расточных. Обе головки имеют неподвижный и подвижный корпуса. Внутри подвижных корпусов расположены пьезокерамический 3 (рис. 7) и магнитострикционный 6 (рис. 8) преобразователи. Пьезокерамический преобразователь более удобен: не требуется водяное охлаждение.

Алмазное сверло имеет трубчатый корпус 2 (рис. 8) и алмазоносную часть 1, (на металлической связке М1, М5-6 или М5-10). Общая длина его l кратна полуволновой длине $\lambda/2$ ($l = n\lambda/2$). Величину n выбирают в зависимости от глубины сверления h . Например, для $h = 200 \div 220$ мм $n = 4$. Для сверл со стальным корпусом и рабочей частоты 44 кГц $\lambda/2 = 58$ мм.



В процессе сверления необходимо закреплять неподвижный корпус головки. Это крепление можно осуществлять различными способами в зависимости от конструкции станка. Один из возможных способов — крепление при помощи двух пар полуколец. Верхнюю пару полуколец закрепляют на пиноли станка, а нижнюю — на головке. Обе пары полуколец соединены тремя шпильками.

§ 4. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Известны три области применения ультразвука при шлифовании:

- 1) возбуждение вынужденных колебаний малой амплитуды в системе «шлифовальный инструмент — заготовка» [25];
- 2) воздействие на рабочую поверхность круга через жидкую среду для очистки его зерен и пор (см. рис. 1, *в*);
- 3) правка и обработка фасонного профиля абразивных кругов. Последняя область, являющаяся разновидностью размерной ультразвуковой обработки хрупких материалов, не получила распространения.

Способ ультразвуковой очистки рабочей поверхности круга в процессе шлифования предложен в Советском Союзе А. М. Федотовым. Исследованиями установлено, что этот способ наиболее эффективен при шлифовании вязких труднообрабатываемых материалов, а также при высоких требованиях к качеству поверхностного слоя. При воздействии ультразвука значительно замедляется процесс засаливания круга; вершины абразивных зерен продолжительное время остаются острыми. Поэтому снижаются силы резания, что приводит к повышению точности обработки и уменьшению степени и глубины наклепа и снижению

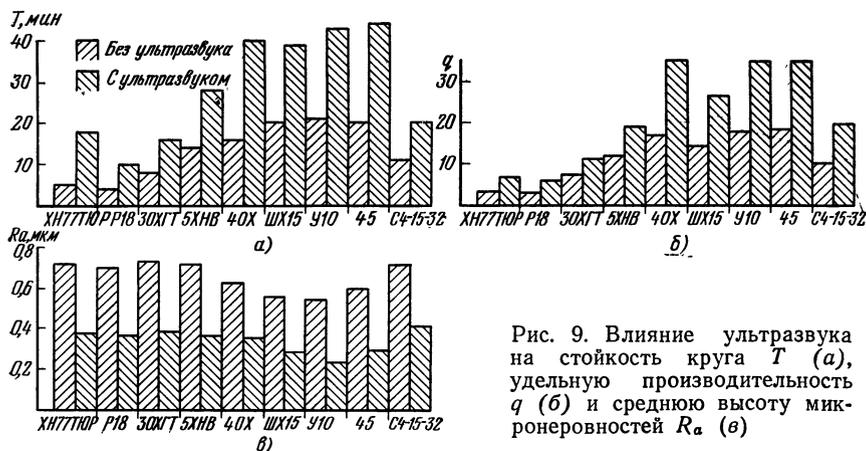


Рис. 9. Влияние ультразвука на стойкость круга T (а), удельную производительность q (б) и среднюю высоту микронеровностей R_a (в)

растягивающих остаточных напряжений. На рис. 9 показаны результаты изучения эффективности влияния ультразвука на стойкость шлифовального круга T , удельную производительность q и среднюю высоту микронеровностей R_a при наружном круглом шлифовании большой группы материалов: жаропрочного сплава ХН77ТЮР, закаленных инструментальных сталей Р18, У10, 30ХГТ, 5ХНВ, конструкционных сталей ШХ15, 40Х, стали 45 и серого чугуна СЧ 15-32 [36]. Стойкость круга под действием ультразвука возрастает от 2 до 3,5 раз, удельная производительность в 2 раза, качество поверхности улучшается в среднем на один класс. Расход абразива при правке кругов снижается в несколько раз.

Ультразвуковая очистка круга эффективна и при работе алмазными кругами на металлической связке.

Для повышения эффективности воздействия ультразвуковых колебаний на рабочую поверхность круга целесообразно [25] подавать жидкость под избыточным давлением — до 3—5 кгс/см².

§ 5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сообщение вынужденных ультразвуковых колебаний обычным режущим инструментам для интенсификации обычных процессов резания было предложено в СССР в 1956 г. Сообщение режущему инструменту вынужденных ультразвуковых колебаний (см. рис. 1, з) оказывает очень сложное и многогранное воздействие на процесс резания [25].

Эффективность действия ультразвука на процесс резания зависит от величины амплитуды и частоты колебаний; отношения колебательной скорости к окружной скорости заготовки, сечения срезаемого слоя, физико-механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Наиболее широко ультразвуковые колебания применяются при резании с тонкими стружками, особенно при нарезании метчиками резьб среднего диаметра (10—30 мм) в нержавеющей, жаропрочных и титановых сплавах. Для этой цели разработаны [24] станки мод. УЗР-2118 (М8-М12), УЗР2-2А125 (М10—М30), УЗР4-2А125 (М10—М18), а также ультразвуковые головки ЛЭ-405 и ЛЭ-406. Последние можно устанавливать на вертикально-сверлильных станках.

В СССР разработано ультразвуковое нарезание резьб малого диаметра (от М1,0 до М6) в деталях из труднообрабатываемых материалов [36]. При сообщении метчику малого диаметра ультразвуковых колебаний крутящий момент снижается на 25—30% и улучшается качество обработанной поверхности. Оптимальные значения амплитуды продольных колебаний метчика находятся в пределах 2—4 мкм. Колебания такой амплитуды не оказывают влияния на точность резьбы, которая находится в пределах 2-го класса.

5. Технические характеристики станков для нарезания резьбы с воздействием ультразвука

Характеристика	СРС-2	СРС-3
Нарезание резьбы, мм	М1—М3	М2,5—М6
Частота вращения шпинделя, об/мин	100—600	50—350
Диапазон регулирования крутящего момента предохранительной муфтой, Н·м	0,2—3	1,0—15
Габаритные размеры, мм:		
деталей	120×120×150	150×150×200
стола	200×300	200×300
станка	680×500×1425	680×500×1435
Масса станка, кг	120	150

Специальные станки мод. СРС-2 и СРС-3 предназначены для нарезания резьбы в труднообрабатываемых материалах соответственно от М1 до М3 и от М2,5 до М6. Характеристики их приведены в табл. 5. Источником ультразвуковых колебаний являются пьезокерамические преобразователи из керамики ЦТС-19. В цепь главного движения станков встроены электромагнитные муфты предельного крутящего момента.

Наличие предохранительной муфты исключает возможность поломки метчиков при нарезании резьбы. Автоматика станков обеспечивает при увеличении момента резания до критической величины включение обратного вращения на 1—2 оборота и последующее переключение на рабочий ход.

Применение станков позволяет улучшить качество резьбовой поверхности, увеличить производительность резьбонарезания до 3 раз (за счет уменьшения количества метчиков в комплекте и устранения их заклиниваний в отверстии), стойкость инструмента возрастает в 1,5 раза, и исключается брак, вызываемый поломками метчиков.

§ 6. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ И АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ

Для повышения надежности деталей машин и приборов широко применяют упрочняюще-чистовую обработку поверхностным пластическим деформированием. Алмазное выглаживание находит широкое применение в различных отраслях промышленности.

Однако имеется большое количество нежестких деталей и деталей переменной жесткости, форма которых искажается даже при малых нагрузках, характерных для алмазного выглаживания (25—30 кгс).

Поэтому актуальной задачей является изыскание новых способов упрочняюще-чистовой обработки, при которых процесс

ведется со значительно меньшими статическими нагрузками ($P \geq 10$ кгс).

Эффективным методом снижения величины статических нагрузок при пластическом деформировании металлов является сообщение инструменту ультразвуковых колебаний. При воздействии ультразвука возникают сложные процессы: наложение динамических знакопеременных нагрузок на статические нагрузки, локальное поглощение ультразвуковой энергии, что в конечном итоге приводит к изменению условий течения металла и облегчению пластического деформирования.

В СССР проведены большие исследования упрочняюще-чистовой обработки деталей из незакаленной и закаленной стали, серого чугуна шаром, вибрирующим с ультразвуковой частотой в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности [29].

Ультразвуковое упрочнение позволяет улучшить такие характеристики поверхностного слоя, как опорная поверхность, контактная жесткость, коэффициент трения скольжения и количество искажений в кристаллической решетке.

В табл. 6 приведены сравнительные результаты, полученные при ультразвуковом упрочнении и обкатывании шаром.

Ультразвуковое упрочнение обеспечивает большую поверхностную микротвердость, большие остаточные напряжения сжатия и повышенную износостойкость при трении скольжения.

Исследования показали [49], что при сообщении инструменту ультразвуковых колебаний динамические силы в несколько раз превышают статические нагрузки. Сложение статического напряжения с амплитудой знакопеременного напряжения в определенной части цикла делает суммарное напряжение достаточным для преодоления дислокациями потенциальных барьеров и более раннего пластического течения. Воздействие ультразвука может также активизировать движение дислокаций, задержанных на препятствиях, способствовать зарождению дислокаций внутри существующих источников и таким образом облегчать процесс пластической деформации. Для определения эф-

6. Качество поверхности стали 45 при обкатывании шаром и ультразвуковом упрочнении

Показатели качества поверхности	Обкатывание шаром	Ультразвуковой метод
Класс шероховатости (исходный 5-й)	8—9	9—10
Степень упрочнения (наклепа), %	20—50	120
Величина сжимающих остаточных напряжений, кгс/мм ²	35	100
Относительная износостойкость при трении скольжения, %	100	200

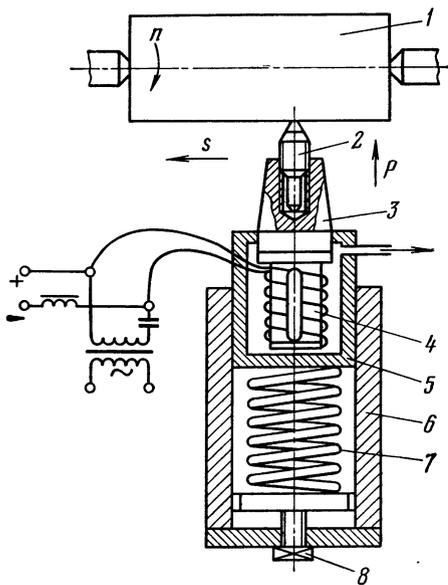


Рис. 10. Схема ультразвукового алмазного выглаживания

фektivности воздействия ультразвука на процесс алмазного выглаживания проведены исследования [26], включавшие разработку специальных ультразвуковых головок, изучение основных характеристик качества поверхностного слоя (шероховатость R_z , степень и глубина наклепа ΔH и h , остаточные напряжения σ_{ϕ} , микроструктура), эксплуатационных свойств (износостойкость η_n и усталостная прочность σ_{-1}), выбор оптимальных режимов ультразвукового алмазного выглаживания. Опыты по

выглаживанию проводились на образцах из аустенитной стали 12X18H9T ($\sigma_B = 55$ кгс/мм²; $\delta = 40\%$) и мартенситной стали X15H5Д2Т ($\sigma_B = 140$ кгс/мм²; $\delta = 9\%$) наконечниками из природного алмаза с радиусом сферы $R = 3$ мм.

Эффективность воздействия ультразвука оценивали коэффициентами: по величине статической силы $K_P = \frac{P_1}{P_2}$, шероховатости $K_{R_z} = \frac{R_{z1}}{R_{z2}}$, степени наклепа $K_{\Delta H} = \frac{\Delta H_2}{\Delta H_1}$, износостойкости $K_{\eta} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} \cdot 100\%$, усталостной прочности $K_{\sigma_{-1}} = \frac{\sigma_{-1_2}}{\sigma_{-1_1}}$, где величины с индексом 1 относятся к обычному алмазному выглаживанию, а с индексом 2 — к ультразвуковому выглаживанию.

На рис. 10 показана схема экспериментальной установки. Источник ультразвуковых колебаний — магнестрикционный преобразователь 4 с резонансной частотой 41,5 кГц возбуждается от ультразвукового генератора. На обрабатываемую деталь 1 действует алмазный наконечник 2 со статической силой P . Наконечник закреплен в концентраторе 3. Резонансная акустическая система (2—3—4) укреплена в подвижном корпусе 5, который может перемещаться вдоль оси неподвижного корпуса 6. Регулирование и установка необходимой силы выглаживания P производится при помощи тарированной пружины 7 и винта 8.

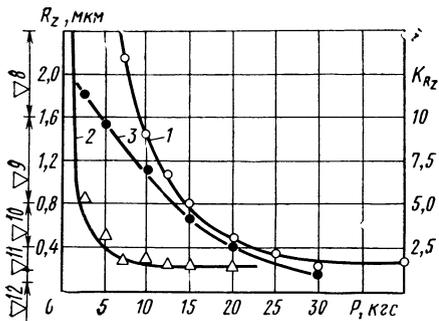


Рис. 11. Зависимость высоты микронеровностей R_z и коэффициента K_{Rz} от силы P :
 1 — при обычном выглаживании; 2 — при ультразвуковом выглаживании ($\xi_m = 5$ мкм);
 3 — $K_{Rz} = f(P)$

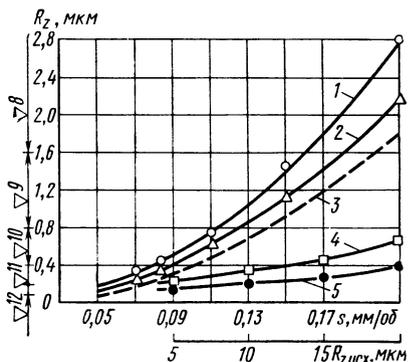


Рис. 12. Зависимость высоты неровностей R_z от подачи s и исходной высоты неровностей $R_{z \text{ исх}}$:
 1 и 4 — при обычном выглаживании; 2 и 5 — при ультразвуковом выглаживании ($\xi_m = 5$ мкм);
 3 — $H_p = \frac{s^2}{8R}$; 4 и 5 — $R_z = f(R_{z \text{ исх}})$

Шероховатость поверхности. На шероховатость выглаженной поверхности оказывает влияние большое число факторов: статическая сила P (рис. 11), подача s , исходная шероховатость $R_{z \text{ исх}}$ (рис. 12), окружная скорость заготовки v , число проходов i , амплитуда колебаний ξ_m (рис. 13).

Из рис. 11 видно, что шероховатость поверхности образцов из стали 12Х18Н9Т уже при $P \geq 5$ кгс почти не изменяется, находясь в пределах 11-го класса (при исходном 6-м классе шероховатости). Значительное уменьшение статической силы было получено при выглаживании образцов из стали Х15НД2Т и других сплавов.

Зависимость величины R_z от подачи s при ультразвуковом выглаживании носит такой же характер, как и при обычном выглаживании. Разница заключается лишь в том, что в первом случае увеличение R_z при работе s происходит менее интенсивно, чем во втором, и кривая $R_z = f(s)$ ближе к расчетной:

$$H_{z \text{ расч}} = \frac{s^2}{8R}.$$

Окружная скорость заготовки изменялась в пределах $v = 50 \div 300$ м/мин. При обычном выглаживании сталей и $v \geq 150$ м/мин происходит некоторое увеличение высоты неровностей R_z , связанное с появлением вибраций, а при ультразвуковом выглаживании рост R_z почти не наблюдается — при возбуждении колебаний повышается динамическая устойчивость системы СПИД. Изучение влияния числа проходов i ($i = 1 \div 6$) показало, что целесообразно применять однопроходное выгла-

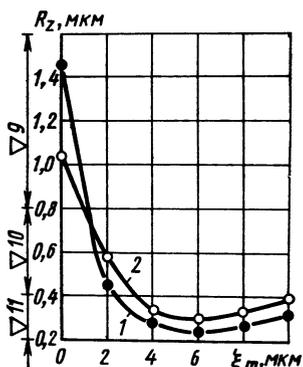


Рис. 13. Зависимость высоты неровностей R_z от амплитуды колебаний ξ_m : 1 — сталь 12X18H9T при $P=10$ кгс; 2 — сталь X15H5D2.T при $P=15$ кгс

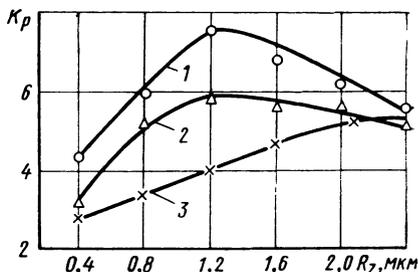


Рис. 14. Зависимость коэффициента K_p от высоты неровностей R_z при алмазном выглаживании:

1 — сталь 12X18H9T; 2 — сталь ЭИ691; 3 — сталь X15H5D2T

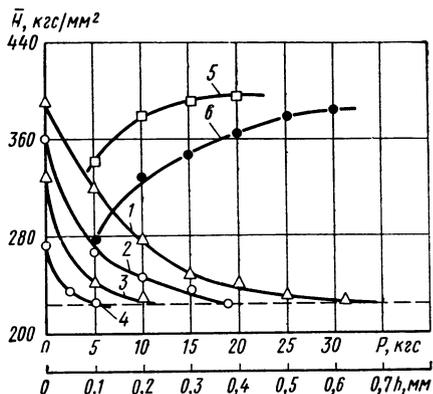
живание. На рис. 14 показаны зависимости коэффициента K_p от требуемой величины R_z , из которых видно, что в результате применения ультразвуковых колебаний при алмазном выглаживании сталей (аустенитных и мартенситных) статическая сила уменьшается от 3 до 7,5 раз.

Микротвердость поверхности. На микротвердость выглаженной поверхности ультразвуковые колебания также оказывают большое влияние, т. е. максимальная микротвердость наблюдается при значительно меньших силах P (рис. 15). При обработке измерений микротвердости выглаженных образцов построены гистограммы и теоретические кривые распределения, рассчитаны средние арифметические \bar{H} значения и средние квадратические отклонения σ микротвердости. Анализ показал, что под действием ультразвука величина \bar{H} выглаженной поверхности значительно увеличивается, а σ несколько уменьшается и соответственно уменьшается поле рассеяния значений микротвердости, т. е. наблюдается более стабильное и равномерное упрочнение поверхностного слоя. Расчет критерия Стьюдента показал, что экспериментальный критерий t_a значительно больше теоретического t_t , т. е. средние значения \bar{H} существенно отличаются друг от друга.

Сравнение дисперсий по критерию Фишера показало, что $F_a > F_t$ и различие дисперсий не является случайным, т. е. ультразвук способствует некоторому уменьшению среднего квадратического отклонения.

Остаточные напряжения σ_ϕ . В поверхностном слое всех исследованных образцов наблюдались остаточные напряжения сжатия. Эпюры напряжений, характерные для процессов по-

Рис. 15. Зависимость микротвердости H от глубины h и силы P при обычном (кривые 2, 4, 6) и ультразвуком (кривые 1, 3, 5) алмазном выглаживании стали 12X18H9T:
 1 — $P=20$ кгс; $\xi_m=5$ мкм; 2 — $P=20$ кгс; $\xi_m=0$; 3 — $P=5$ кгс; $\xi_m=5$ мкм 4; — $P=5$ кгс; $\xi_m=0$; 5 — $H=f(P)$ при $\xi_m=5$ мкм; 6 — $H=f(P)$ при $\xi_m=0$



верхностного упрочнения, показывают, что сжимающие напряжения увеличиваются по мере стравливания слоев, достигают максимума и начинают уменьшаться. При росте P увеличиваются $\sigma_{\text{д max}}$ и глубина их залегания. Применение ультразвука обеспечивает значительное снижение (в 2,5—3,5 раза) статической силы выглаживания, при которой формируются максимальные сжимающие напряжения.

Износостойкость при трении скольжения. Испытания на износостойкость при трении скольжения проводили на машине трения «Эйвери» при наличии смазки. Величина относительной износостойкости $\eta = \frac{l_1}{l_2}$, где l_1 и l_2 — длины лунок износа на

поверхности полированного и выглаженного образцов. Алмазное выглаживание производилось при подаче $s=0,07$ мм/об. Полированные образцы имели такую же шероховатость (в пределах 11-го класса). Исследования показывают, что при алмазном выглаживании по сравнению с полированием относительная износостойкость η повышается почти в 1,5 раза, причем при ультразвуковом выглаживании наблюдается большее повышение износостойкости. Зависимость коэффициента K_η от силы выглаживания носит экстремальный характер: максимальное значение K_η наблюдается при оптимальной силе P .

Эффективность применения ультразвука заключается в получении наиболее износостойкой поверхности при малых силах выглаживания.

Усталостная прочность. Нагружение образцов при испытаниях на усталостную прочность производилось по схеме чистого изгиба при вращении круглых образцов и базе испытаний 10⁷ циклов на машине типа МВП с частотой нагружения 2800 цикл/мин. Для каждого режима обработки образцов испытывалось не менее 15 образцов. На рис. 16 показаны кривые усталости образцов из стали 12X18H9T. Предел выносливости σ_{-1} выглаженных образцов примерно на 40% выше, чем полированных. Ультразвуковое выглаживание по сравнению с обычным выглаживанием обеспечивает некоторое повышение σ_{-1} , что объясняется более благоприятным микрорельефом поверх-

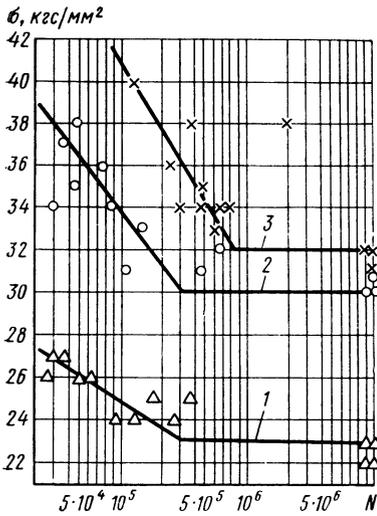


Рис. 16. Кривые усталости образцов из стали 12X18H9T:

1 — при полировании; 2 — при обычном выглаживании ($P=20$ кгс); 3 — при ультразвуковом выглаживании ($P=7,5$ кгс)

ности, формируемым под действием ультразвуковых колебаний. Сравнение кривых усталости образцов, обработанных обычным и ультразвуковым выглаживанием при различных P и s , показало, что ультразвук позволяет вести процесс не только с меньшими силами, но и в 1,5—2 раза большими подачами. В табл. 7 приведены результаты испытаний на усталостную прочность и уравнения кривых усталости.

7. Усталостная прочность образцов при полировании и выглаживании

Сталь	Вид обработки	Режимы обработки			Предел выносливости σ_{-1} , кгс/мм ²	σ_{-1} выгл. 100% σ_{-1} полир	Уравнение кривой усталости
		P , кгс	s , мм/об	ξ_m , мм			
12X18H9T	Полирование	—	—	—	23	100	$\lg N = 26,483 - 15,385 \lg \sigma$
	Выглаживание	20	0,07	—	30	130	$\lg N = 21,165 - 10,6 \lg \sigma$
		7,5	0,07	5	32	139	$\lg N = 19,126 - 8,787 \lg \sigma$
X15H5Д2Т	Полирование	—	—	—	48	100	$\lg N = 40,319 - 20,307 \lg \sigma$
	Выглаживание	15	0,07	—	58	121	$\lg N = 39,214 - 18,671 \lg \sigma$
		25	0,07	—	62	129	$\lg N = 36,622 - 16,961 \lg \sigma$
		35	0,07	—	66	138	$\lg N = 40,044 - 18,573 \lg \sigma$
		25	0,07	—	56	117	$\lg N = 46,204 - 22,727 \lg \sigma$
		7,5	0,07	5	65	136	$\lg N = 42,778 - 20,233 \lg \sigma$
		10	0,07	5	68	142	$\lg N = 34,318 - 15,461 \lg \sigma$
		15	0,07	5	69	144	$\lg N = 36,156 - 16,4 \lg \sigma$

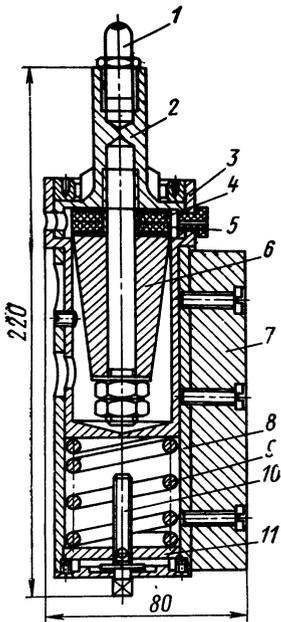
8. Качество поверхности при алмазном выглаживании

Сталь	Вид обработки	P , кгс	R_z , мкм	\bar{H} , кгс/мм ²	h , мм	$\sigma_{\text{ф макс}}$, кгс/мм ²	$h_{\text{ф}}$, мм	σ_{-1} , кгс/мм ²
12Х18Н9Т	Обычное выглаживание	10	1,42	330	0,20	—	—	—
		15	0,77	357	0,31	—	—	—
		20	0,49	370	0,38	—	—	30
		25	0,32	380	0,43	—	—	—
	Ультразвуковое выглаживание	5	0,46	375	0,2	—	—	—
		7,5	0,30	360	0,35	—	—	31
		10	0,26	380	0,42	—	—	—
		20	0,25	390	0,50	28	0,1	—
Х15Н5Д2Т	Обычное выглаживание	10	2,8	420	0,11	—	—	—
		15	1,02	438	0,16	26	0,04	58
		25	0,44	474	0,25	33	0,09	62
		35	0,30	495	0,29	29	0,12	66
	Ультразвуковое выглаживание	5	0,84	427	0,15	30	0,07	—
		7,5	0,52	452	0,21	—	—	65
		10	0,39	466	0,25	38	0,14	68
		15	0,30	500	0,28	—	—	69
		20	0,30	506	0,30	36	0,14	—
		—	—	—	—	—	—	—

Взаимосвязь элементов качества поверхности, режимов выглаживания и эксплуатационных свойств деталей. В табл. 8 приведены результаты исследования образцов из сталей 12Х18Н9Т и Х15Н5Д2Т в зависимости от силы выглаживания P . Анализ полученных данных позволяет оптимизировать исследуемый процесс по наиболее изученному параметру качества поверхности — шероховатости. Оптимальные параметры ультразвукового выглаживания наблюдаются при силах, в 1,5—3,5 раза меньших, чем при обычном выглаживании. Шероховатость в определенной мере характеризует остальные элементы качества поверхности. Поэтому наиболее целесообразным методом регулирования режима обработки является выбор силы P в зависимости от требуемой высоты неровностей R_z .

Результаты проведенных исследований показали, что основным преимуществом алмазного выглаживания является получение высоких характеристик качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей при статических силах P , в 2,5—5 раз меньших, чем при обычном алмазном выглаживании. Это позволяет применять прогрессивный процесс алмазного выглаживания — упрочняюще-чистовую обработку маложест-

9. Технические характеристики ультразвуковых головок для алмазного выглаживания



Характеристики	УЗМ-1	УЗП-2
Тип преобразователя	Магнито- стрикцион- ный	Пьезоке- рамиче- ский
Рабочая частота, кГц	44	22
Мощность генератора, кВт . .	0,25—0,4	0,25
Амплитуда колебаний, мкм . .	До 15	До 9
Статическая сила, кгс	2—15	2—15
Габаритные размеры, мм . . .	235×105	210×95
Масса головки, кг	4,8	2,7

Рис. 17. Ультразвуковая головка УЗП-2 для алмазного выглаживания

ких деталей, а также деталей переменной жесткости. Для осуществления процесса ультразвукового алмазного выглаживания созданы два типа ультразвуковых головок: УЗМ-1 с магнито-стрикционным преобразователем (рабочая частота 44 кГц) и УЗП-2 с пьезокерамикой ЦТС-19 (рис. 17). Технические характеристики головок УЗМ-1 и УЗП-2 приведены в табл. 9. В головке УЗП-2 применен пьезокерамический преобразователь с рабочей частотой 22 кГц, состоящий из четырех частей, соединенных шпилькой. Две средние пластины 4 и 5 изготовлены из пьезокерамики, а накладки 2 и 6 — из титана и стали. Алмазный наконечник 1 ввернут в рабочий торец излучающей накладки 2. Преобразователь укреплен в подвижном корпусе 3 и может перемещаться относительно неподвижного корпуса 8. Необходимая сила P обеспечивается тарированной пружиной 9 при помощи винта 10 и гайки 11. Для закрепления головки в резцедержателе токарного станка служит планка 7. Питание головки УЗП-2 осуществляется от серийного полупроводникового генератора УЗУ-0,25 мощностью 0,25 кВт. Опыт эксплуатации головок показал их достаточную надежность в работе.

Применение ультразвука при механической обработке и поверхностном пластическом деформировании (упрочняюще-чистовая обработка) является перспективным и прогрессивным: удастся повысить производительность, улучшить качество и надежность изделий, а также значительно расширить технологические возможности этих методов.

Глава **9**

**Ультразвуковая
очистка
прецизионных
деталей**

•

Ю.Ф. ПИСКУНОВ

Физические основы и общие технологические приемы ультразвуковой очистки широко освещены в литературе [6, 16, 31, 43, 48, 62]. Разработано и выпускается большое количество ультразвукового оборудования для очистки деталей и полуфабрикатов.

Однако специфические условия прецизионного машиностроения ограничивали масштабы применения ультразвуковой очистки.

Изделия прецизионного машиностроения — топливная аппаратура двигателей, пневмо- и гидроаппаратура высокого давления и др. характеризуются высокими требованиями к шероховатости (до 13-го класса) и геометрической точности (до $2 \cdot 10^{-4}$ мм) поверхностей деталей. Получение такой высокой точности и чистоты обычно достигается доводкой деталей мелкозернистыми абразивными пастами на основе жирных кислот и нефтепродуктов. При доводке происходит частичное окисление углеводов и шаржирование обработанной поверхности абразивными зёрнами, а канавки, полости и отверстия забиваются пастами и продуктами разрушения притира и детали. Сложность удаления таких загрязнений и высокие требования к качеству поверхности деталей приводят к тому, что очистка их является одной из наиболее трудоемких операций.

§ 1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Разрушение поверхностных пленок в жидкости под действием ультразвука происходит в результате кавитации и акустических течений. При очистке тонкостенных деталей, а также очистке контактным методом наряду с кавитацией и акустическими течениями определенную роль играют знакопеременные напряжения, возникающие в пленке загрязнений при колебаниях детали. Эти напряжения способствуют отслаиванию и разрушению пленки.

Скорость очистки зависит от вида загрязнения и прочности его связи с поверхностью, конфигурации и габаритов детали, активности моющей среды и параметров ультразвукового поля. Влияние основных факторов на эффективность ультразвуковой очистки показано на схеме (рис. 1).

Рассмотрим влияние отдельных факторов на процесс.

Производственные загрязнения и моющие среды. Прецизионные детали изготавливают из высоколегированных инструментальных и конструкционных сталей: P18, ХВГ, 30Х13, 12ХНЗА и др. В процессе производства детали проходят термическую обработку на высокую поверхностную твердость HRC 57—67, а затем поступают на механическую обработку, включающую шлифование, хонингование, электроискровую обработку и доводку притирами. После каждого технологического перехода детали проходят контроль, выполнение которого невозможно без высококачественной очистки деталей.

Производственные загрязнения деталей, поступающих на очистку, следующие: а) частицы пригоревшего карбюризатора и окисные пленки; б) жировые загрязнения и абразивно-металлическая пыль после шлифования и хонингования; в) продукты электроэрозии; г) доводочные пасты, смешанные с частицами материалов детали и притира.

Эти загрязнения можно разделить на три группы: 1) твердые неорганические загрязнения, механически связанные с металлической поверхностью — микропорошки, стружка, пыль, в том числе абразивные зерна, вдавленные в поверхность; 2) загрязнения, химически связанные с поверхностью — окалина, окисные пленки и карбюризаторы; 3) органические загрязнения — олеиновая и стеариновая кислоты, животные жиры, керосин, минеральные масла и парафин, входящие в состав доводочных паст, охлаждающих и диэлектрических жидкостей при хонинговании и электроискровой обработке.

По трудности удаления с поверхности детали органические загрязнения можно разделить на два класса: а) вещества с преимущественной ориентацией молекул в монослое на границе с металлической поверхностью; б) вещества, в которых это явление не обнаруживается.

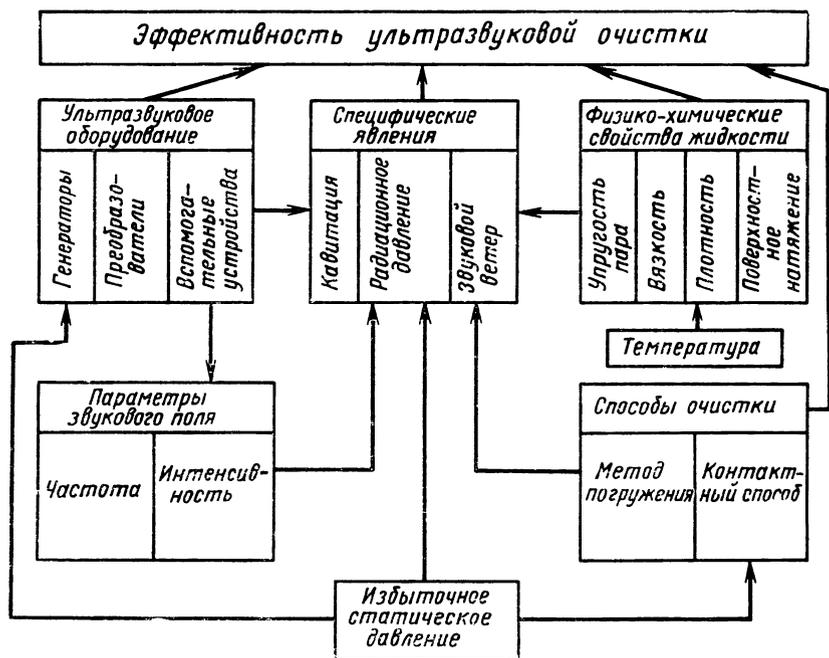


Рис. 1. Основные факторы, определяющие эффективность процесса ультразвуковой очистки

Молекулы, не обладающие большими дипольными моментами, имеют неупорядоченную ориентацию в слое, непосредственно прилегающем к поверхности металла. Эти вещества, например парафин и минеральные масла, удерживаются на поверхности вандерваальсовыми силами и ненасыщенными металлическими связями.

Молекулы олеиновой кислоты имеют большие дипольные моменты и проявляют определенную преимущественную ориентацию в монослое, непосредственно прилегающем к поверхности металла. Карбоксильная группа ($-\text{COOH}$) адсорбируется на поверхности металла, а углеводородная часть молекулы $-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ ориентируется в направлении нормали к поверхности. Такой ориентированной монослой прочнее связан с поверхностью и труднее удаляется. При очистке в растворителях с низкими дипольными моментами молекул такой монослой всегда остается на поверхности изделия.

При очистке в водно-щелочных растворах жирные кислоты превращаются в водорастворимые мыла, что способствует переходу загрязнений в эмульсию.

Минеральные масла, керосин и парафин нерастворимы в воде и не взаимодействуют с кислотами и щелочами. Они хо-

рошо растворяются в предельных хлорированных и хлорфторированных углеводородах (бензин, трихлорэтилен, фреоны и др.).

Окалина, окисные пленки и пригоревшие к металлу карбураторы не реагируют со щелочами и не растворяются в растворителях, а удаляются травлением в сильных кислотах или длительным кавитационным воздействием.

Твердые загрязнения, химически не связанные с поверхностью детали (микropорошки, стружка, пыль), обычно смешаны с органическими связующими и удаляются вместе с ними. Исключение составляют зерна абразива, шаржированные в поверхность металла и имеющие с ним прочные механические связи.

Среды для ультразвуковой очистки кроме физико-химической активности к загрязнению должны обладать свойствами, обеспечивающими оптимальные условия воздействия ультразвуковой энергии. При ультразвуковой очистке деталей обычно применяют водные моющие растворы и растворители.

Из органических растворителей получили распространение легкие нефтепродукты (керосин, бензин, уайтспирит), хлорированные и хлорфторированные углеводороды (трихлорэтилен, дихлорэтан, четыреххлористый углерод, фреоны). Эти растворители, обладая высокой растворяющей способностью большинства жировых и масляных загрязнений, имеют низкую кавитационную активность. Кроме того, удаленные в процессе очистки загрязнения, находясь во взвешенном или растворенном состоянии, могут оседать на очищенной поверхности или адсорбироваться ею [43]. Явление ресорбции усиливается, если раствор содержит взвешенные намагниченные частицы или молекулы, обладающие большими дипольными моментами (жирные кислоты). Поэтому при очистке стальных деталей от доводочных паст применение органических растворителей возможно только в сочетании с другими методами (окончательная очистка в водных моющих растворах, протирка деталей салфетками и т. п.).

Водные моющие растворы, применяемые для очистки, должны обладать хорошей смачиваемостью, эмульгирующими свойствами и химически не реагировать с материалом изделия.

В практике ультразвуковой очистки нашли применение водные растворы щелочей, фосфатов и карбонатов как в чистом виде, так и в различных сочетаниях. Для повышения моющей способности щелочные растворы применяют совместно с поверхностно-активными веществами (ПАВ), которые, адсорбируясь на поверхности твердого тела и снижая поверхностное натяжение, облегчают доступ моющего раствора в щели, отверстия, зазоры. Вследствие разной растворимости отдельных частей молекулы, т. е. растворимости одной части молекулы в воде, а другой в жирах, ПАВ обволакивает частицы жировых

загрязнений и препятствует осаждению их на поверхность металла.

При ультразвуковой очистке деталей от доводочных паст наиболее распространены водные моющие растворы на основе фосфатов и неионогенных поверхностно-активных веществ типа ОП. Типичным представителем этой группы является раствор, содержащий 3% $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и 0,3% ОП-7. Обладая поверхностной активностью к минеральным маслам и являясь химически активным реагентом в отношении жирных кислот, тринатрийфосфат также активизирует поверхностно-активные свойства ОП. Активизация моющих свойств раствора с помощью так называемых псевдоземульсий (смесь моющего раствора и растворителя) на основе бензина, керосина и других растворителей [49] не всегда эффективна. При очистке деталей от доводочных паст в интенсивных ультразвуковых полях применение псевдоземульсий дает отрицательный эффект. Кроме ОП в последние годы получили распространение новые ПАВ — синтанолы МЦ-10 и ДТ-7, альфанолы, синтаמיד и др. Обладая свойствами, близкими к ОП-7 и ОП-10, новые ПАВ подвержены биологическому разложению и более перспективны для промышленного использования.

Рекомендуемые составы некоторых растворов для ультразвуковой очистки приведены в табл. 1. В графе «Композиция» приведена оптимальная концентрация водного раствора, состоящая из смеси тринатрийфосфата, кальцинированной соды и метасиликата натрия, пропорциональной концентрациям, приведенным в таблице. Наряду с хорошими моющими способностями эти растворы обладают слабым пенообразованием и имеют достаточно высокую кавитационную активность в ультразвуковом поле.

Ультразвуковая очистка зависит от интенсивности кавитации, скорости и характера акустических течений величины радиационного давления, которые, в свою очередь, определяются амплитудой и частотой колебаний излучателя, величиной внешнего статического давления, свойствами жидкости и ее температурой.

1. Растворы на основе новых ПАВ

Моющий раствор	Оптимальная температура, °С	ПАВ	Тринатрийфосфат	Кальцинированная сода	Метасиликат натрия	Композиция
Альфанол 8 . . .	60—65	2—2,5	35	20	35	30
Альфанол 12 . . .	75—80	1,60—2,0	20	25	30	30
Синтаמיד 5 . . .	55—65	4—4,5	40	10	20	30
Торжетол	60—65	2,5	30	10	40	20

Частота колебаний f . Увеличение f приводит к сокращению времени роста и уменьшению максимального радиуса кавитационной полости при постоянном значении амплитуды звукового давления. Снижение радиуса кавитационных полостей способствует повышению давления парогазовой смеси в пузырьке к началу захлопывания, что должно снижать интенсивность ударных волн. Анализ, проведенный в СССР [48], показал, что эрозионная активность пузырька линейно уменьшается с ростом f в диапазоне 20—50 кГц. По американским данным, изменение частоты с 38 до 20 кГц уменьшает время очистки в водных растворах в 2 раза. Эффективность очистки на частотах ниже 20 кГц не изучена. Однако чрезмерное снижение частоты колебаний приводит к резкому возрастанию шума установок и усложняет их звукоизоляцию. Увеличение же частоты приводит к росту скорости акустических течений, способствуя удалению загрязнений, слабо связанных с очищаемой поверхностью, особенно при очистке в растворителях. Большинство промышленных установок для очистки в водных растворах работает на частотах 18—22 кГц. При очистке в растворителях наблюдается тенденция к повышению частоты до 40—80 кГц.

Амплитуда колебаний излучателя ξ_m . Амплитуда колебаний ξ_m определяет интенсивность ультразвукового поля в жидкости и оказывает существенное влияние на процесс очистки. По данным работы [16], нецелесообразна интенсивность выше 2,5 Вт/см². При большей интенсивности происходит экранирование ультразвукового поля кавитационным облаком близ поверхности излучателя, что увеличивает расход энергии. Однако анализ исследований показал, что это положение справедливо лишь для процессов, протекание которых определяется только кавитационной активностью ультразвукового поля.

При ультразвуковой очистке деталей от доводочных паст наблюдается ярко выраженная зависимость времени очистки от амплитуды колебаний излучателя (рис. 2). Очистку проводили в водном растворе (Na_3PO_4 12H₂O—3%, ОП=7—0,3%) при температуре 45°С плоским титановым излучателем. Опыты показали, что чем сложнее деталь и больше ее габариты, тем выше амплитуда, при которой происходит эффективная очистка. Например [48], при очистке щелевых зазоров шириной 0,2 мм и глубиной до 10 мм оптимальная амплитуда излучателя находится в пределах 35—40 мкм. Дальнейшее увеличение ξ_m приводит к снижению эффективности очистки (табл. 2).

Для определения экономической целесообразности повышения амплитуды колебаний при очистке деталей сложной конфигурации сделан расчет энергоемкости процесса \mathcal{E} для случаев, приведенных на рис. 2 (рис. 3).

Энергоемкость процесса \mathcal{E} определяли по интенсивности J , измеренной калориметрическим способом, и времени полной

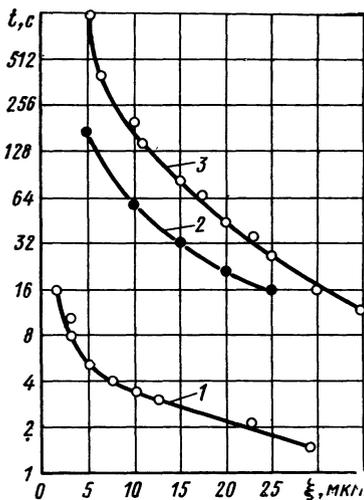


Рис. 2. Зависимость времени очистки t от амплитуды ξ_m :
 1 — для седла клапана; 2 — для детали с отверстием диаметром 2,5 мм и длиной 40 мм; 3 — для корпуса распылителя

2. Эффективность очистки кольцевого зазора

Амплитуда колебаний на торце излучателя ξ_0 , мкм	Расстояние от излучателя до поверхности обработки, мм	Площадь очистки, см ² , при времени обработки, с		
		10	20	30
20	1,0	4,1	4,8	5,8
	3,0	2,5	3,0	3,2
	5,0	2,2	2,6	3,0
30	1,0	4,8	7,5	10,7
	3,0	3,2	3,8	4,4
	5,0	1,8	3,3	3,5
37	1,0	8,2	10,1	12,3
	3,0	3,5	4,6	5,2
	5,0	Вспенивание раствора — очистки нет		
45	1,0	7,0	7,7	9,5
	3,0	3,6	4,7	5,5
	5,0	Вспенивание раствора — очистки нет		

очистки детали $t: \mathcal{E} = It$. Сравнивая рис. 2 и 3, можно видеть, что оптимальная с точки зрения энергоемкости процесса амплитуда не всегда совпадает с амплитудой, при которой время очистки минимально. Однако и в этом случае наблюдается рост оптимальной амплитуды колебаний при усложнении условий очистки и увеличении габаритов детали.

На скорость очистки большое влияние оказывают физические свойства жидкости и ее химическая активность к загрязнению. Теоретические и экспериментальные исследования [48, 53] показали, что при увеличении поверхностного натяжения, снижении упругости пара и плотности жидкости наблюдается рост кавитационной активности. Повышение вязкости жидкости до величины $5 \cdot 10^{-2}$ Нс/м² не оказывает существенного влияния на кавитационную активность. Влияние физических параметров жидкости на скорость очистки не установлено, так как изменение одного из параметров моющей жидкости ведет к изменению остальных ее свойств.

Исследована [48] зависимость эрозии алюминиевых образцов от температуры для различных жидкостей. При повышении температуры происходит увеличение давления насыщенных паров и числа кавитационных зародышей в единице объема жидкости. Ослабление интенсивности ударных волн при повышении

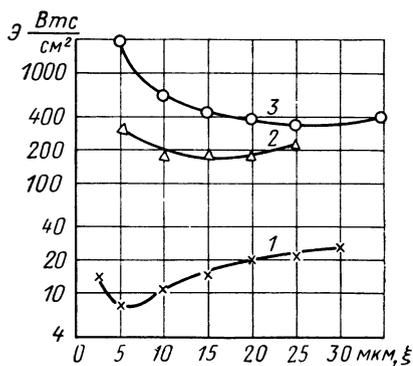


Рис. 3. Зависимость энергоёмкости процесса \mathcal{E} от амплитуды ξ_m :
1, 2, 3 — то же, что на рис. 2

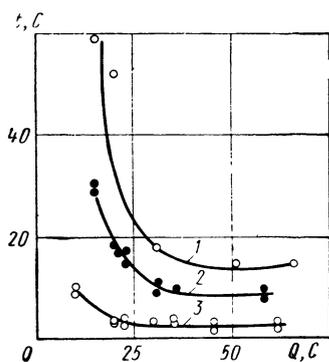


Рис. 4. Зависимость времени очистки t от температуры моющего раствора:
1 — $\xi_m = 10$; 2 — $\xi_m = 15$ и 3 — $\xi_m = 20$ мкм

упругости пара компенсируется ростом числа кавитирующих пузырьков, и интенсивность кавитационного разрушения образца растёт до оптимальных значений температуры.

При очистке деталей от загрязнений зависимость времени очистки от температуры обусловлена рядом факторов: интенсивностью кавитации и акустических течений, химической активностью жидкости, свойствами загрязнений. Для каждого раствора и вида загрязнений существует оптимальная температура, не всегда совпадающая с температурой максимума интенсивности кавитации.

На рис. 4 показана зависимость времени очистки корпуса распылителя форсунки от температуры при различных значениях амплитуды колебаний излучателя. Очистка производилась в водном растворе излучателем, показанным на рис. 9, в [32]. Характерно, что с ростом амплитуды колебаний уменьшается влияние температуры на продолжительность очистки.

§ 2. ТЕХНОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ

Процесс ультразвуковой очистки можно разделить на операции, предшествующие ультразвуковой очистке, собственно ультразвуковую очистку и операции, следующие за очисткой.

Для подготовки загрязненной поверхности к ультразвуковой очистке детали замачивают в воде, моющем растворе или органических растворителях. Замочка деталей в моющем растворе позволяет снять основное количество загрязнений и снизить время ультразвуковой очистки в 2—4 раза [16]. Для замочки

деталей, загрязненных доводочными пастами, рекомендуются ацетон, фреон 113, бензин, керосин [16].

Однако при наличии в составе загрязнений жирных кислот и парафинов замочка деталей в легколетучих растворителях не только не сокращает, но и значительно затрудняет процесс ультразвуковой очистки. Вымывая легкорастворимые жидкие компоненты пасты, эти растворители засушивают и уплотняют загрязнения. Уменьшение в составе загрязнения жирных кислот, образующих с тринатрийфосфатом водорастворимые мыла, затрудняет процесс эмульгирования загрязнений.

Для предварительной замочки деталей, загрязненных доводочными пастами, рекомендуется применять керосин. Удаляя значительную часть загрязнений, он хорошо удерживается на поверхности детали, размягчая оставшиеся загрязнения.

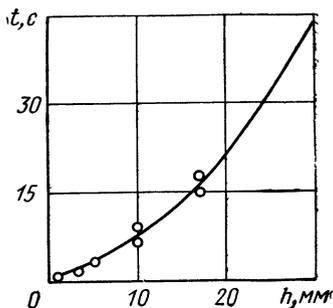
При очистке мелких деталей со слабо связанными загрязнениями, когда время очистки мало, замочка деталей перед ультразвуковой очисткой нежелательна, так как керосин, не оказывая существенного влияния на длительность очистки, загрязняет моющий раствор.

Процесс ультразвуковой очистки является сочетанием ряда одновременно протекающих физических, физико-химических и химических процессов. Оптимальный режим очистки зависит от характера загрязнений, состава и температуры моющей среды, материала и состояния поверхности детали, способа очистки и интенсивности ультразвука. Выбор способа очистки зависит от конструкции деталей и требований к состоянию их поверхности. Ультразвуковую очистку производят: а) погружением в ванны; б) контактным методом; в) введением излучателя в полость очистки; г) непрерывно-последовательным методом. Очистку осуществляют как при нормальном, так и повышенном статическом давлении.

При очистке прецизионных деталей, имеющих высокий класс шероховатости обработанной поверхности, применение повышенного статического давления не рекомендуется, так как может происходить кавитационная эрозия доведенных поверхностей.

При очистке методом погружения в ванны детали устанавливают специальные подвески, предотвращающие соприкосновение доведенных поверхностей с поверхностью излучателя и другими твердыми телами, находящимися в зоне очистки. При расположении подвески в ванне необходимо учитывать, что зона наибольшей активности находится в непосредственной близости к излучателю (рис. 5), а очищаемые детали и конструкция подвески экранируют ультразвуковое поле. Чтобы очистка была высококачественной, ее необходимо производить в специальных ваннах с двусторонним излучением либо поворачивать подвеску с деталями во время очистки. При выборе условий очистки необходимо учитывать, что при кавитационном

Рис. 5. Зависимость времени очистки t от расстояния до излучателя h



воздействии на деталь может возникнуть нежелательное явление — эрозия прецизионной поверхности.

Для повышения интенсивности ультразвукового поля получили распространение генераторы, работающие в импульсно-модулированном режиме [62]. Применение их позволяет значительно увеличить пиковые мощности и интенсивность воздействия ультразвука на технологическую среду не повышая средней мощности оборудования.

Очистку деталей, имеющих глубокие отверстия и высоту более 20—30 мм, целесообразно проводить в ваннах с повышенной интенсивностью ($\xi_m = 10 \div 20$ мкм). Увеличение скорости очистки при росте амплитуды колебаний значительно опережает повышение скорости кавитационного разрушения. При этом суммарное кавитационное воздействие на деталь снижается, уменьшая вероятность кавитационного повреждения доведенных поверхностей.

Кавитационная эрозия деталей в ультразвуковом поле наступает через определенный промежуток времени. Это объясняется тем, что в начальный период при захлопывании кавитационной полости происходит пластическое деформирование поверхности изделия, улучшающее эксплуатационные показатели деталей. В дальнейшем и при многократном воздействии кавитационного пузырька появляются усталостные микротрещины и происходит отрыв частиц металла.

Начало кавитационной эрозии зависит от состояния поверхности детали и характеристик кавитационной активности ультразвукового поля. Поэтому при очистке прецизионных деталей сложной конфигурации необходимо подбирать условия, при которых время очистки всех поверхностей детали было бы значительно меньше времени начала кавитационной эрозии поверхностей детали, расположенных у излучателя.

Однако чрезмерное снижение кавитационного воздействия подбором растворителей с низким уровнем кавитационной эрозии или повышением частоты колебаний нежелательно: снижается качество очистки.

Изучение качества поверхности деталей показало, что при доводочных операциях происходит их шаржирование абразивными зернами. Ультразвуковая очистка в водном моющем растворе в ванне УЗВ-15 в несколько раз уменьшает количество абразивных частиц по сравнению с очисткой в раствори-

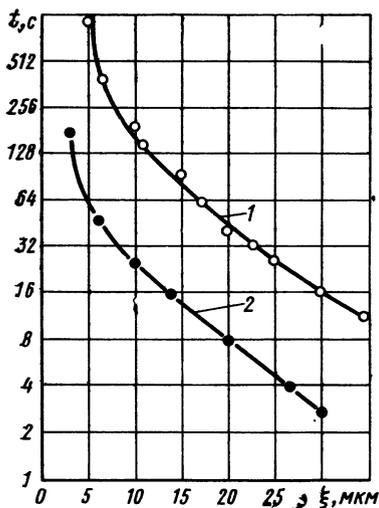


Рис. 6. Зависимость времени очистки t корпуса распылителя от амплитуды колебаний ξ_m :

1 — для плоского излучателя; 2 — для профилированного излучателя

теле с последующей протиркой. Износостойкость трущихся пар при этом увеличивается в 2—3 раза.

Очистку деталей введением излучателя в зону обработки применяют при наличии глубоких глухих отверстий, полостей канавок, карманов. Очистка производится специальными волноводами как на продольных так и на изгибных

колебаниях. Излучатели с продольными колебаниями целесообразно применять в тех случаях, когда глубина отверстия или полости не превышает четверти длины волны в материале излучателя. При этом конструкция излучателя позволяет производить одновременную очистку наружных и внутренних поверхностей детали [33]. При очистке более глубоких отверстий целесообразны излучатели с изгибно-колеблющейся трубкой, длина которой может достигать 10—20 длин волн изгибных колебаний [48]. Для очистки внутренних поверхностей цилиндров большого диаметра существуют погружные устройства, в которых используются радиальные колебания полых излучателей.

С применением излучателей указанных типов значительно ускоряется процесс очистки деталей сложной конфигурации, а иногда является единственным методом высококачественной очистки. На рис. 6 показана зависимость времени очистки корпуса распылителя форсунки от амплитуды колебаний при очистке плоским излучателем (1) и излучателем (2), вводимым в центральное отверстие (см. рис. 9, в). Очистка деталей плоским излучателем при малых интенсивностях ($\xi < 8$ мкм) практически невозможна, а профилированный излучатель позволяет производить качественную очистку при амплитудах до 4 мкм.

При очистке контактным методом ультразвуковые колебания возбуждаются в детали за счет механического контакта с преобразователем. Контактный метод используют для очистки внутренних полостей деталей сложной конфигурации, когда доступ к этим полостям затруднен. При очистке этим методом прецизионных деталей необходимо учитывать следующее: 1) контакт прецизионной поверхности детали с излучателем вызывает ее повреждение; 2) возбуждение в детали знакопере-

менных напряжений может привести к ухудшению геометрической точности детали. Поэтому применять контактный метод очистки можно только после тщательного его исследования в конкретных условиях производства.

Очистка непрерывно-последовательным методом, при котором детали перемещаются относительно излучателя, является разновидностью метода погружения и контактного метода.

Правильный выбор метода очистки определяет не только величину затрат, но и показатели процесса. Эффективность способов очистки корпуса распылителя форсунки показана в табл. 3. Очистка на автомате 6610М, описание которого дается ниже (стр. 200), производилась сводом излучателя в полость детали.

После ультразвуковой очистки деталей необходимо удалить остатки моющего раствора и подготовить их к межоперационному или складскому хранению. Требования к состоянию поверхности детали определяются особенностями операций, следующих за очисткой, условиями и длительностью хранения. Обычно заключительные операции включают удаление остатков моющего раствора, пассивацию и сушку детали.

При межоперационной ультразвуковой очистке, после которой детали проходят контроль или обработку, величина пассивирующей защитной пленки не должна изменять размеры детали. При этом защитная пленка должна надежно предохранять детали от коррозии при межоперационном хранении.

Для прецизионных деталей топливной аппаратуры, контроль размеров которых осуществляют с точностью до $2 \cdot 10^{-4}$ мм, пассивация может быть достигнута обезвоживанием деталей в спиртобензиновой смеси. Однако высокая стоимость смеси и взрывоопасность паров препятствуют применению ее в промышленных условиях.

3. Эффективность очистки корпуса распылителя форсунки

Способ очистки	Количество загрязнений на 100 деталях до очистки, г	Количество загрязнений после очистки, г
Ручная очистка в керосине и бензине и протирка тканевыми салфетками	17,5	0,48
Ручная очистка в керосине, двойная очистка в ваннах УЗВ-16 по 10 мин, пассивация, протирка тканевыми салфетками	16,3	0,29
Ультразвуковая очистка на полуавтомате 6610М: ультразвуковая очистка — 14 с, ополаскивание, пассивация и сушка	17,2	0,003
Ультразвуковая очистка в ванне УЗУ-0,1 в трихлорэтилене — 30 с, ополаскивание в чистом растворе	13,8	0,574

При пассивации деталей из черных металлов в водорастворимых ингибиторах удовлетворительные результаты получены при использовании 1% раствора олеинового мыла или 0,3% раствора триэтаноламина. Для получения пленки толщиной менее 10^{-4} мм пассивация производится в холодном растворе (при 15—20° С). После пассивации производят обдув сухим холодным воздухом и сушку деталей.

Ингибиторы в виде растворов солей (NaNO_2 , Na_2CO_3 и т. д.) недопустимы, так как выпавшие в осадок соли могут привести к механическому повреждению поверхности и вызвать погрешности при измерениях.

Требования к точности контроля и сортировки деталей после доводочных операций не позволяют производить пассивацию и сушку деталей непосредственно после ультразвуковой очистки. Соли, содержащиеся в моющем растворе, выпадают на поверхности детали и приводят к большой погрешности измерений. Удаление остатков моющего раствора с поверхности деталей осуществляется, как правило, проточной водой. При содержании в водопроводной воде большого количества растворенных солей рекомендуется предварительная обработка ее препаратами, переводящими соль в осадок, отстой и фильтрация. Увеличение температуры до 60—80° С несколько сокращает время и расход воды на ополаскивание. Однако это вызывает рост энергоемкости процесса. Кроме того, нагрев деталей перед пассивацией увеличивает толщину пассивирующей пленки и способствует образованию на поверхности деталей натеков.

Сушку деталей производят подогретым сжатым воздухом. Воздух, поступающий в сушильные камеры, должен быть очищен от влаги масла и пыли. При очистке готовых деталей и узлов, подлежащих длительному хранению, операцию пассивации деталей рационально заменить консервацией.

Разработанный типовой технологический процесс ультразвуковой очистки прецизионных деталей топливной аппаратуры [14] содержит подготовительные операции, двойную ультразвуковую очистку, удаление с поверхности деталей моющих растворов, пассивацию и сушку деталей. В зависимости от габаритов и конфигурации деталей очистку производят введением излучателя в полость обработки, контактным способом или методом погружения. Технологический процесс рассчитан на применение стержневых колебательных систем с большой интенсивностью излучения (до 30 Вт/см²)

§ 3. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ

Очистка прецизионных деталей невозможна без надежных методов контроля ее качества. Большинство исследований влияния параметров ультразвукового поля на эффективность очистки проведено на прозрачных моделях с использованием эталон-

ных эмитаторов загрязнений [13, 48]. Такая методика имеет преимущества в быстроте и наглядности опытов, но она неприменима при отработке режимов конкретных технологических процессов. Рассмотрим методы контроля качества очистки прецизионных деталей.

Метод испытания на разрыв водной пленки основан на способности воды смачивать металлические поверхности и не смачивать масляные и органические вещества. При испытаниях деталь вынимают из воды в вертикальном направлении. Если контролируемая поверхность свободна от жировых загрязнений, высыхающая водная пленка распределится тонким слоем и покроет всю поверхность. Разрывов пленки не будет наблюдаться до появления сухих участков или появления интерференционных цветов. На поверхности, загрязненной гидрофобными веществами, стекающая водная пленка стремится разорваться и стянуться к смоченным участкам. Время до разрыва пленки служит ориентировочной оценкой количества загрязнений. На сильно загрязненных участках пленка разорвется сразу. Там, где загрязнения присутствуют в количестве одного монослоя, разрыв происходит через 30—60 с. Этот метод не позволяет определить количество механических загрязнений (абразив, стружку, пыль) на поверхности металла. Однако опыт очистки в водных растворах деталей, загрязненных доводочными пастами показал, что он является надежным критерием качества очистки. Это объясняется тем, что все механические включения покрыты слоем жировой пленки и при эмульгировании жировых загрязнений удаляются вместе с ними.

Контроль качества очистки деталей, обезжиренных в растворителях, невозможен из-за наличия мономолекулярного жирового слоя на поверхности даже хорошо очищенных деталей. К недостаткам этого метода относится невозможность контроля качества очистки внутренних поверхностей деталей.

Наиболее полную информацию о качестве очистки можно получить введением радиоактивных изотопов в доводочные пасты и измерением интенсивности радиации очищенной детали. Однако из-за опасности облучения обслуживающего персонала и большой трудоемкости получения и обработки информации этот способ не получил широкого применения в производственных условиях.

Для определения качества очистки в прецизионном машиностроении осуществляют контрольную протирку деталей тканевой салфеткой, смоченной в этиловом спирте, и осмотр ее под микроскопом. Не давая информации о качестве очистки труднодоступных мест, этот метод служит критерием качества очистки доведенных поверхностей и может применяться для контроля качества очистки на рабочих местах.

Одним из методов выборочного контроля качества очистки может служить контрольная промывка деталей. Контрольную ультразвуковую очистку производят в небольшом объеме моющего раствора в течение времени, гарантирующего полное удаление загрязнений. Для предотвращения загрязнения раствора продуктами кавитационной эрозии очистку производят в растворителях, имеющих низкую кавитационную активность (бензин, спирт и т. п.). Время очистки деталей подбирают опытным путем. Количество вымытых загрязнений определяют по помутнению раствора, сравнивая его с эталонами. Анализ загрязнений производят обычными химическими методами после выпаривания раствора.

§ 4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Десятки фирм многих стран мира — США, Англии, ФРГ, Франции, Швейцарии и Японии выпускают оборудование для ультразвуковой очистки. Известно большое количество различных ультразвуковых ванн емкостью от 0,5 до нескольких сотен литров и мощностью от десятков ватт до десятков киловатт. Основную массу оборудования составляют ванны небольшого объема с пьезокерамическими преобразователями мощностью 25—500 Вт и с частотой 20—80 кГц. Большинство установок имеет автоматическую подстройку частоты. Для питания таких установок широко используют полупроводниковые генераторы. Малые габариты и простота обслуживания обеспечили их широкое распространение. Обычно интенсивность ультразвукового поля создаваемого указанным оборудованием, не превышает 0,5 Вт/см².

В последние годы некоторые фирмы начали выпускать магнитострикционные преобразователи с распределенным ультразвуковым полем мощностью до нескольких киловатт. Такие преобразователи выпускают отдельными блоками, которые монтируются в технологическом оборудовании: Однако и в этом оборудовании интенсивность поля не превышает 1 Вт/см².

В СССР серийно выпускают следующее ультразвуковое оборудование для очистки:

1. Малогабаритные настольные установки УЗУ-0,1, УЗУ-0,25 и УНО1-0,4 мощностью 0,1; 0,25 и 0,4 кВт. Они предназначены для очистки мелких деталей в основном приборного и часового производства от жировых и механических загрязнений. Установки УЗУ-0,1 и УЗУ-0,25 состоят из двух ванн ультразвуковой и промывочной и питаются от малогабаритных транзисторных генераторов. В дно ультразвуковых ванн встроены пьезокерамические преобразователи из ЦТС-19 типа ПП1-0,1/18, работающие без водяного охлаждения. Установка УНО1-0,4 снабже-

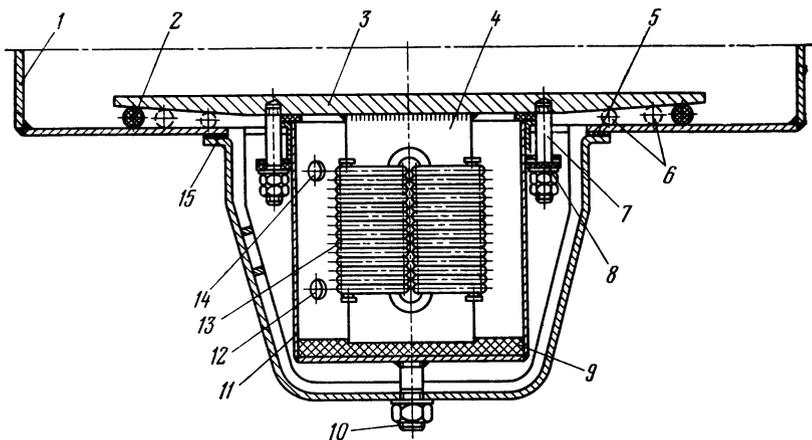


Рис. 7. Магнестрикционный преобразователь ПМС-6-22 [48]:
 1 — ванна; 2 — уплотнительное кольцо; 3 — диафрагма; 4 — пакет перпендиора;
 5 — прокладка; 6 — возможные варианты уплотнений; 7 — шпилька; 8 — проклад-
 ка; 9 — акустическая резина; 10 — болт; 11 — бачок для охлаждения; 12 — вход
 воды; 13 — обмотка пакега; 14 — слив воды; 15 — кронштейн

на магнестрикционным преобразователем и питается от лампового генератора.

2. Ультразвуковые ванны УЗВ-15М, УЗВ-16М, УЗВ-17М и УЗВ-18М. Источником ультразвуковых колебаний служат магнестрикционные преобразователи ПМС-6-22 (рис. 7) мощностью 2,5 кВт, которые встраиваются в дно ванны (в количестве от 1 до 4 шт.). Питаются ванны от генератора УЗГ-10-22 мощностью 8 кВт.

3. Ультразвуковая установка для очистки топливных фильтров типа УЗУ4-1,6-0. Установка имеет две технологические ванны. Снабжена кареткой для вращения фильтров и для переноса их из одной ванны в другую. В каждой ванне установлен магнестрикционный преобразователь типа ПМ1-1,6/18 мощностью 1,6 кВт с равномерным полем излучения. Охлаждение преобразователя воздушное. Генератор встроенный. Установка может быть использована для очистки различных деталей.

4. Ультразвуковой генератор УЗГ-10-22 с магнестрикционными преобразователями ПМС-6-22, имеющими площадь излучения 300×300 мм и интенсивность около $1,5 \text{ Вт/см}^2$, предназначены для встраивания в действующие технологические линии очистки.

Перечисленное оборудование имеет плоскую излучающую поверхность с интенсивностью не более $1,5 \text{ Вт/см}^2$ и может быть использовано для очистки прецизионных деталей небольших габаритов и простой формы. Для очистки деталей сложной

формы, имеющих глубокие отверстия и полости, указанное оборудование можно применять только в сочетании с другими методами очистки (прокачка растворителя, протирка и т. п.).

Для получения более высокой интенсивности ультразвука ($3-5 \text{ Вт/см}^2$) на большой площади используют настроенные излучатели изгибных колебаний типа ПМС-38. Преобразователь состоит из плоской пластины (излучателя) и восьми магнетострикционных двигателей, припаянных попарно в пучностях изгибных колебаний пластины. Длину излучателя выбирают краткой длине волны изгибных колебаний. Габаритные размеры преобразователя $226 \times 538 \times 160 \text{ мм}$. Мощность — 4 кВт.

В СССР и в других странах наряду с серийным оборудованием разрабатывается и выпускается небольшими партиями специализированное оборудование для ультразвуковой очистки деталей различных производств. Во ВНИИТВЧ им. В. П. Вологодина разработаны автоматические и полуавтоматические установки для очистки деталей автотракторной промышленности: поршней, шатунов, поршневых колец, деталей автоматного производства и т. п. Во всех этих установках используются магнетострикционные преобразователи с распределенными полями и цилиндрические преобразователи. Разработан [49] полый полуволновой экспоненциальный излучатель для очистки глубоких отверстий большого диаметра (до 200 мм). Излучатель рассчитан на работу с преобразователями ПМС-15А-18 или ПМС-7. Излучатель можно применять при очистке гидроцилиндров, блоков двигателей внутреннего сгорания и других крупногабаритных изделий.

Для очистки отверстий малого диаметра (от 4 до 8 мм) разработана [12] ручная ультразвуковая головка УОГ-3 (рис. 8). В очищаемое отверстие вводится трубчатый волновод, в котором возбуждаются изгибные колебания. Преобразователь охлаждается моеющим раствором, поступающим в очищаемую полость по трубке волновода. В Англии запатентовано устройство [55] для ультразвуковой очистки внутренних каналов распылителя топливной форсунки, в котором предусмотрен ввод наконечника ультразвукового преобразователя внутрь канала, а деталь фиксируется в двух гнездах держателя. Ввод излучателя непосредственно в полость позволяет приблизить излучатель к очищаемой поверхности и существенно сократить время очистки. С помощью этих устройств производят очистку только внутренних поверхностей, очистку же остальных поверхностей детали производят на другом оборудовании. Эти устройства целесообразно применять для очистки прецизионных деталей сложной формы при небольших масштабах производства.

Для очистки прецизионных деталей массового производства, к которому относится топливная аппаратура дизельных двигателей, необходимо создание автоматизированного оборудования,

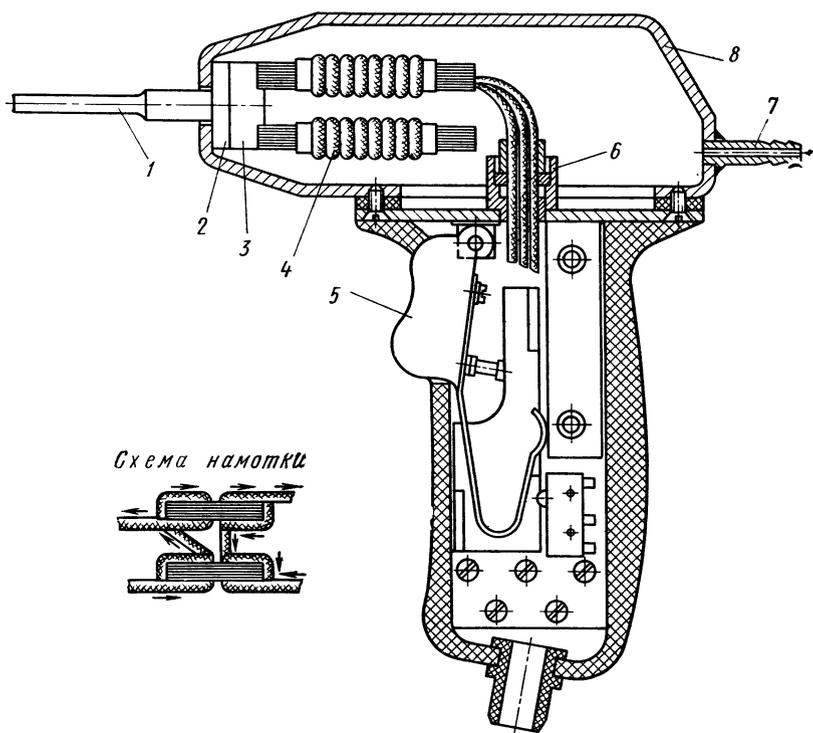


Рис. 8. Головка для очистки глубоких отверстий:

1 — волновод; 2 — прокладка; 3 — диафрагма; 4 — магнестрикционные пакеты; 5 — курок-выключатель; 6 — уплотнение; 7 — штуцер для подачи моющей жидкости; 8 — корпус

обеспечивающего выполнение комплекса операций — очистки, пассивации, сушки и консервации деталей.

Алтайским научно-исследовательским институтом технологии машиностроения (АНИТИМ) спроектирован карусельный пятипозиционный ультразвуковой автомат УЗА-1 для очистки прецизионных деталей топливной аппаратуры. В автомате предусмотрены операции замочки в керосине, двукратной ультразвуковой очистки в водном моющем растворе, пассивации олеиновым мылом и обезжизивания поверхности дизельным топливом. Транспортировка деталей по технологическим позициям производится в специальных кассетах, имеющих гнезда, удерживающие детали в ориентированном положении. Источником ультразвуковой энергии служат преобразователи ПМС-6-22, встроенные в дно ванн 1-й и 2-й ультразвуковой очистки. Установка оборудована системой пароподогрева и циркуляции моющих растворов.

Автомат обеспечивает очистку деталей небольших габаритов (например, клапана топливного насоса). После очистки на

автомате требуется промывка деталей в бензине или протирка салфетками. Автоматы УЗА-1 работают на Алтайском моторном заводе, Ногинском и Вильнюсском заводах топливной аппаратуры.

В МАДИ спроектирована универсальная установка ЛЭМФО-1, предназначенная для ультразвуковой очистки 20 типоразмеров корпусов распылителей судовых двигателей [14]. В установке предусмотрены операции замачивания в керосине, ультразвуковой очистки в водных моющих растворах, ополаскивание в проточной воде, пассивация и сушка деталей. Очистка производится стержневыми плоскими излучателями диаметром 40 мм. Питание установки осуществляется от генератора УЗГ-1,6/22 мощностью 1,6 кВт.

Транспортировка деталей по технологическим позициям производится в кассетах, имеющих сменные вкладыши с ячейками под детали. Кинематика установки содержит три движения: шаговое перемещение кассет с деталями; периодический подъем ванн для погружения кассет в растворы и непрерывное возвратно-поступательное движение блока излучателей над деталями.

В НИИТракторосельхозмаше спроектированы и выпущены специализированные полуавтоматы 6610М для очистки корпуса распылителя. Полуавтомат выполняет ультразвуковую очистку; ополаскивание, пассивацию и сушку деталей. Очистка производится двумя стержневыми колебательными системами с титановыми излучателями. На торце излучателя имеются штырьки, которые вводятся в центральные отверстия двух распылителей при вертикальном перемещении колебательных систем. На позиции очистки детали фиксируются призматическими зажимами. Загрузку деталей осуществляют вручную. Транспортировка по технологическим позициям производится в ориентированном положении при помощи шагового толкателя и вибротранспортеров. Ванна ультразвуковой очистки выполнена в виде камеры проходного типа с отверстиями в боковых стенках, профилированным по наружному контуру очищаемых деталей.

Технические характеристики установок приведены в табл. 4.

В НИИТракторосельхозмаше в период 1969—1972 гг. разработаны унифицированные автоматические установки для очистки прецизионных деталей топливной аппаратуры, выпускаемой в СССР, и проведены их промышленные испытания. В установках детали транспортируются по технологическим позициям в специальных кассетах, которые могут использоваться в качестве технологической тары на всех этапах производства. Эти установки не имеют общепринятых ванн, и все технологические операции осуществляются в объемах, образуемых ячейками кассеты.

4. Характеристики ультразвуковых установок для очистки деталей топливной аппаратуры

Основные параметры	УЗА-1	ЛЭФМО-1	6610М
Средняя производительность, шт./ч . . .	1000	600	1000
Средняя потребляемая мощность, кВт . . .	22	7	5
Выходная мощность ультразвукового генератора, кВт	10	1,6	1,6
Продолжительность цикла, с	150—500	300—900	7,2
Габаритные размеры, мм	2200×2300× ×2000	2000×900× ×1600	1450×600× ×1700

Очистка производится при помощи стержневых колебательных систем мощностью 0,4—0,6 кВт и частотой 22 кГц, состоящих из магнитострикционного преобразователя сечением 30×30 мм, полуволнового стального волновода и сменного титанового концентратора-излучателя. Форма и размеры излучателей зависят от формы и сложности деталей, подлежащих очистке. Примеры конструктивного исполнения излучателей показаны на рис. 9.

Питание акустических головок осуществляется генератором УЗГ5-1,6/22 мощностью 1,6 кВт. От одного генератора могут одновременно работать 2—3 головки. В зависимости от количества акустических головок установка комплектуется одним или двумя генераторами.

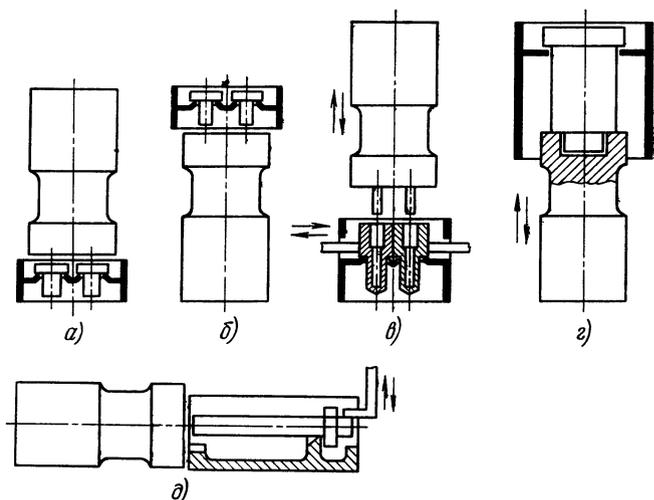


Рис. 9. Примеры расположения излучателей при очистке: а — сверху; б — снизу; в — ввод излучателя в полость очистки; г — контактная очистка; д — сбоку

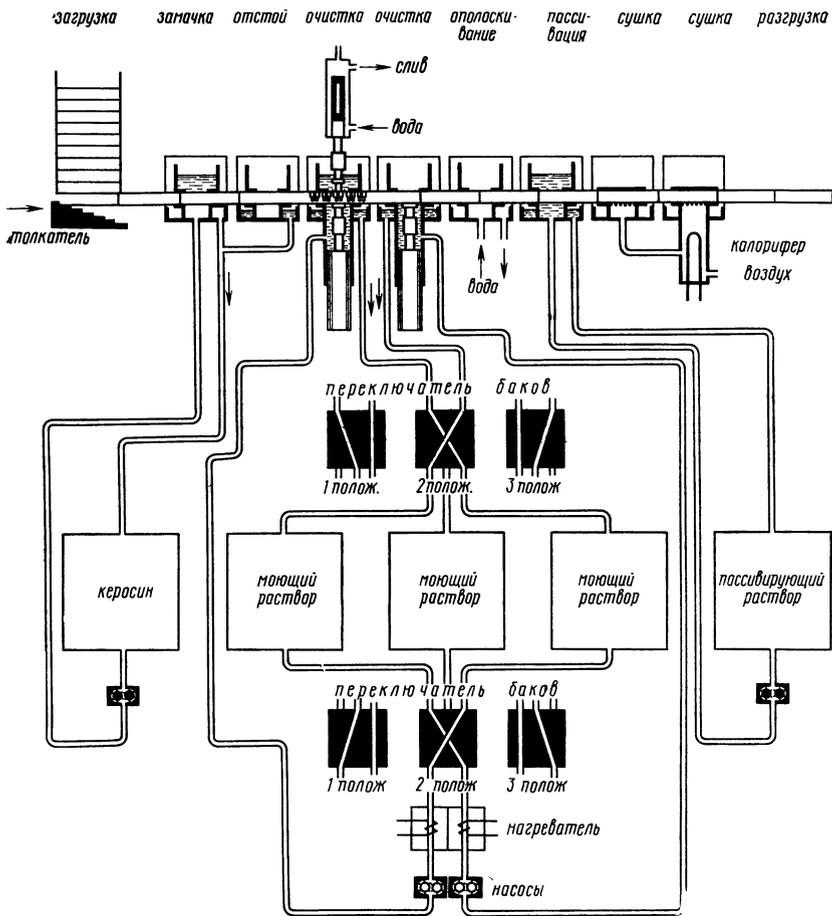
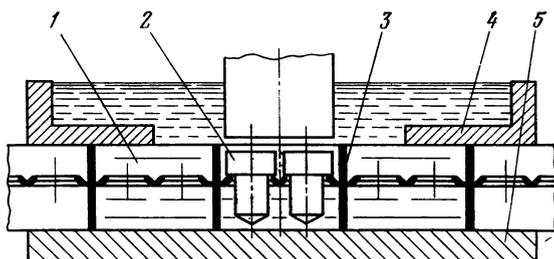


Рис. 10. Принципиальная технологическая схема установок

Принципиальная технологическая схема установки показана на рис. 10. Установка работает следующим образом: кассеты с деталями устанавливают в шахту-накопитель. Емкость накопителя обеспечивает 10—20-минутную работу установки. Из накопителя кассеты автоматически подаются на плоскость подачи и перемещаются по технологическим камерам толкателем барабанного типа. Толкатель не имеет подвижных деталей, надежно работает в условиях сильного загрязнения абразивными пастами и обеспечивает точность остановки ячейки с деталями на технологической позиции $\pm 0,2$ мм [14]. Используются механизмы подачи двух типов (с шагом 26 и 40 мм), имеющие модификации для различных габаритов кассет.

Рис. 11. Схема расположения кассеты в технологической камере



Технологическая цепочка установки включает восемь позиций. Каждая позиция имеет предметный столик с направляющими для кассет и корпус ограждения слива раствора. Подача раствора производится через отверстия в столе либо через форсунки, устанавливаемые над верхним уровнем кассет с деталями. Все столики устанавливаются строго в одной плоскости. Кассета (рис. 11) состоит из нескольких ячеек 1 для установки деталей 2, разделенных между собой перегородками 3. Вместе с боковыми стенками кассеты и плоскостью стола 5 ячейка образует замкнутый объем, в котором и осуществляются все технологические операции. Утечка растворов через зазор между стенками ячейки и столом компенсируется постоянной подачей свежего раствора из бака. Отработанный раствор собирается в корпусе ограждения и подается снова в бак. При необходимости увеличения высоты столба жидкости над деталью (при верхнем расположении излучателя на позициях ультразвуковой очистки) над кассетой устанавливаются шлюзовые заслонки 4. Транспортировка деталей осуществляется линейным шаговым толкателем кассет с шагом, равным размеру ячейки.

Конструкция камер ультразвуковой очистки определяется количеством, формой и расположением излучателей, устанавливаемых на позиции. В установках для ультразвуковой очистки простых деталей типа узла клапана и втулки плунжера насоса, в которых используются плоские неподвижные излучатели, камеры снабжены верхним и нижним стаканами для крепления акустических головок и шлюзовыми заслонками. В установках же для очистки деталей сложной конфигурации, когда необходим ввод излучателя во внутренние полости деталей, камеры имеют механизмы ориентации, фиксации деталей и подъема акустических головок. Движения механизмов камеры увязаны по циклу с движениями механизма подачи, работа которых осуществляется от одного привода. Для изменения времени цикла привод имеет коробку скоростей со сменным набором зубчатых колес.

Установки имеют блок питания, служащий одновременно станиной, на которой монтируются технологические камеры и

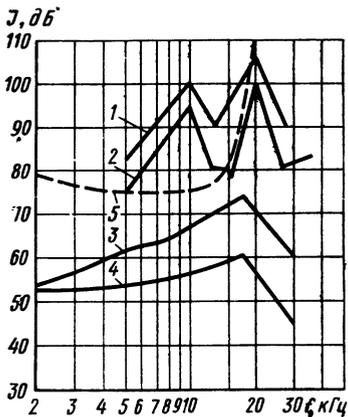


Рис. 12. Спектры шума, создаваемого ультразвуковыми установками:

1 — для ванны УЗВ-16; 2 — для преобразователя ПМС-6; 3 — для установки 6610М 4 — для установки 6610М с дополнительной изоляцией излучателей; 5 — нормативная кривая

накопители. В блоке размещены пять откидных блоков емкостью по 100 л, система нагрева и подачи технологических растворов и воздуха, электрический шкаф и пульт управления установкой.

Нагрев растворов производится электронагревателями, установленными в проходных камерах небольшого объема. Нагреватели включаются только при работе насосов подачи растворов. При такой системе потери тепла на радиацию и испарение минимальные, а время прогрева установки — несколько минут.

Система подачи растворов и количество баков обеспечивают замену моющего раствора при работе установки. При этом по мере загрязнения бака, питающего камеру первой ультразвуковой очистки, он отключается специальным трехходовым краном, а вместо него подключается бак, питающий вторую ультразвуковую камеру. Ко второй камере подключается бак со свежим раствором. Одновременно производится аналогичное переключение и сливных магистралей. При такой системе расход моющего раствора составляет всего 5—10 л на 1 кг загрязнений, что позволяет отказаться от его очистки и регенерации. Все технологические операции контроля и поддержания заданных режимов работы установок выполняются автоматически.

Для защиты обслуживающего персонала от шума все установки имеют звукопоглощающую обшивку. Мощность, потребляемая установкой, не более 4 кВт. Габаритные размеры установок 3000×950×1900, масса примерно 2800 кг.

С применением стержневых колебательных систем и звукопоглощающей обшивки значительно снизился уровень шума по сравнению с серийным оборудованием для очистки (рис. 12).

Технические характеристики установок приведены в табл. 5. В установках типа 6631, 6632, 6635 и 6678 очистка деталей производится плоскими излучателями, расположенными снизу и сверху от кассеты на расстоянии 1 мм. Конструктивно установки отличаются только габаритными размерами кассет и механизма загрузки. Кроме того, в установке типа 6631 первые две позиции (замочка и отстой) отключены, а в установке типа 6635

5. Технические характеристики ультразвуковых установок

Основные показатели	Тип установки							
	6631	6632	6634	6635	6636	6637	6638	6678
Очищаемая деталь	Детали и узел клапана УТН-5	Втулка плунжера УТН-5	Корпус расплывлятеля ФД-22	Узел расплывлятеля 16-С42Б	Втулка плунжера НД-21	Плунжер НД-21	Корпус расплывлятеля 16-163-7	Плунжер УТН-5
Производительность, шт./ч	2000	1000	720	1000	530	1660	1000	1800
Количество генераторов УЗГ-5-1,6/22, шт	1	2	1	1	2	1	1	2
Количество преобразователей, шт.	3	4	3	3	4	3	2	4

Основные показатели	Тип установки							
	6631	6632	6634	6635	6636	6637	6638	
Рабочий объем технологической камеры (ячейки), мм ³	24×50×23	24×60×56	36×60×54	27×63×30	36×75×70	36×85×25	36×60×37	24×60×74
Шаг подачи, мм	26	26	40	29	26	40	40	26
Продолжительность операций, с: замочка в керосине отстой 1-я ультразвуковая очистка 2-я ультразвуковая очистка охлаждение пассивация сушка холодная → сушка горячая консервация	— — 3,6 3,6 18 32 32	32 64 6,5 6,5 32 32 58 58	89 160 20 20 80 80 120 120	— — 7,2 7,2 3,6 3,6 — 6,5 3,6 14	54 108 13,6 13,6 54 54 82 82	27 54 6,8 6,8 27 27 40 40	57 144 14,4 14,4 57 57 86 86	55 110 11 11 55 55 100 100
Средний экономический эффект на одну установку, тыс. руб./год	—	29	47	—	34	12	40	8

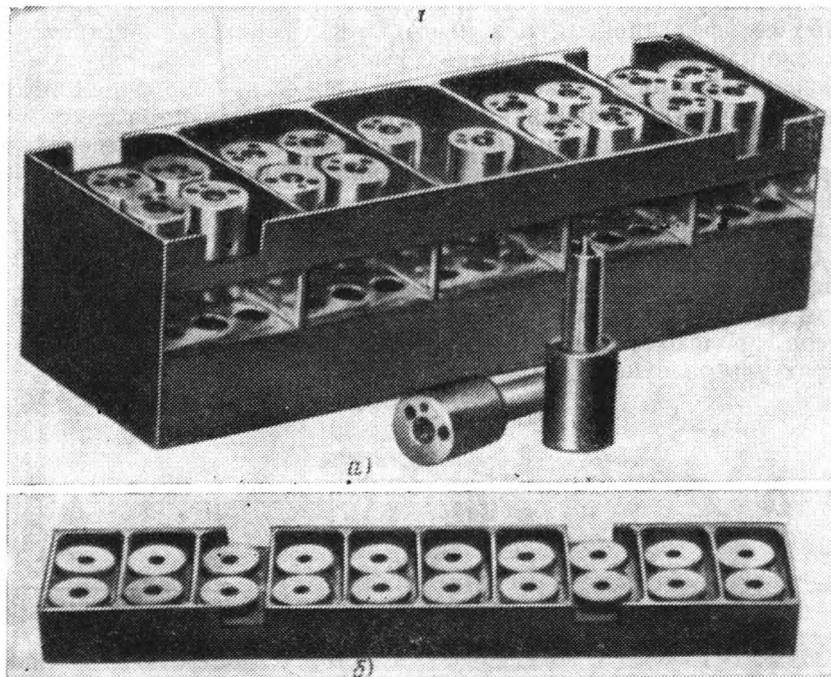
одна из позиций сушки используется для консервации узла дизельным топливом.

На установках можно производить очистку любых прецизионных деталей, укладываемых в рабочий объем ячейки кассеты.

Установки типа 6634 и 6638 предназначены для очистки деталей излучателями, вводимыми во внутренние каналы распылителя. При этом очистка внутренних каналов и полостей осуществляется наконечником, а наружных поверхностей детали — торцом излучателя. Излучатель имеет четыре наконечника и производит одновременную очистку четырех деталей. Установки снабжены механизмами вертикального перемещения верхних излучателей и фиксации деталей. В боковых стенках кассеты предусмотрены окна для ввода фиксаторов (рис. 13).

В установке 6636 очистка втулки плунжера осуществляется контактным методом. Нижние излучатели снабжены углублениями, обеспечивающими контакт с торцом детали, имеющим низкий класс шероховатости обработанной поверхности и сво-

Рис. 13. Кассеты для очистки деталей:
а — корпус распылителя; б — седла клапана



бодный размер. Нижние излучатели имеют привод вертикального перемещения (см. рис. 9, з), а верхние излучатели закреплены неподвижно. Контакт осуществляется за счет веса детали.

В установке 6637 очистка плунжера осуществляется верхними и боковыми излучателями. Для предотвращения контактной эрозии доведенной поверхности во время очистки деталь приподнимается под дном кассеты специальными упорами (см. рис. 9, д).

Опытные образцы установок внедрены на Ногинском и Вильнюсском заводах топливной аппаратуры, Челябинском тракторном заводе. С внедрением ультразвуковых установок уменьшилось количество загрязнений по сравнению с ручной очисткой в 100—500 раз, сократились трудоемкость операций и затраты на технологические материалы. Значительно улучшились условия труда работников и снизилась пожароопасность помещений. С применением высококачественной ультразвуковой очистки прецизионных деталей и пар повысилась точность измерений и сортировки деталей, сократился возврат узлов с испытательных стендов и уменьшился процент аварийного выхода аппаратуры из строя в процессе эксплуатации.

Годовой экономический эффект от внедрения 15 единиц разработанного оборудования составил 457 тыс. руб.

Ультразвуковая очистка прецизионных деталей является наиболее эффективным, а в некоторых случаях и единственно возможным методом получения высокочистых поверхностей. Правильный выбор технологического процесса, оборудования и режимов очистки позволяет получить высокое качество очистки деталей с наименьшими энергетическими и технологическими затратами и предохранить прецизионные поверхности от кавитационного повреждения.

Дальнейшие работы в области ультразвуковой очистки должны быть направлены на исследование и разработку мощных и более экономичных колебательных систем, повышение надежности источников ультразвуковой энергии и исследование процессов, происходящих в моющей среде при высоких интенсивностях ультразвука.

Глава **10**

**Ультразвуковая
дефектоскопия
и контроль**

•

И.Н. ЕРМОЛОВ

§ 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Применение ультразвука для контроля и измерений составляет обширную область ультразвуковой техники. В этой области можно выделить ряд самостоятельных направлений: ультразвуковая дефектоскопия, измерение толщины, гидролокация, медицинская диагностика, исследование свойств материалов по их упругим характеристикам, измерение скорости потока и высоты **уровня жидкости**, ультразвуковая сигнализация и т. д.

В этой главе рассматриваются вопросы ультразвукового контроля материалов и изделий — дефектоскопии и толщинометрии, т. е. вопросы, наиболее тесно связанные с машиностроением.

В ультразвуковом контроле используется ряд методов, значительно отличающихся по своим физическим принципам [10] (рис. 1): 1) методы, в которых используются излучение и прием ультразвуковых волн; 2) методы, основанные на регистрации волн, возникающих в материалах и изделиях.

В первой, наиболее многочисленной группе методов, применяются бегущие и стоячие волны или резонансные колебания контролируемого объекта. На использовании бегущих волн основаны следующие методы:

Теневой метод или **метод сквозного прозвучивания** (рис. 2, а). Излучатель и приемник размещаются по разным сторонам изделия. Дефект, если он появится на пути ультразвуковых волн, вызывает ослабление принимаемого сигнала или запаздывание времени его прихода (огибание дефекта вызывает удлинения пути ультразвука).

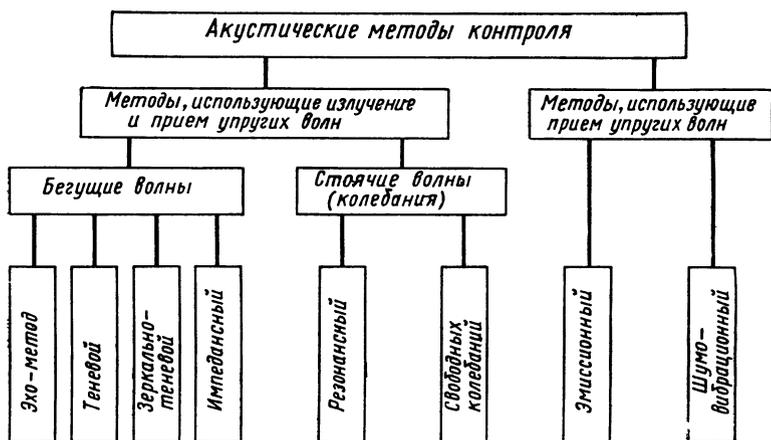


Рис. 1. Классификация ультразвуковых методов контроля

Импульсный эхо-метод (рис. 2, б). Искатель генерирует короткий ультразвуковой импульс, который отражается от дефектов поверхности изделия и других неоднородностей, а затем принимается тем же или другим искателем. Временная развертка позволяет фиксировать время прихода сигналов и различать сигналы, приходящие от дефектов и от «дна» изделия.

Зеркально-теневой метод контроля. Контроль ведется обычным эхо-методом, но признаком наличия дефекта служит ослабление донного сигнала.

Импедансный метод (рис. 2, г) заключается в наблюдении за режимом колебаний стержня, опирающегося на поверхность изделия. Наличие дефекта, близкого к поверхности изделия, ослабляет акустический импеданс данного участка поверхности, т. е. делает его более «мягким». Это приводит к увеличению амплитуды колебаний стержня, уменьшению напряжения на его конце и смещению частоты резонансных колебаний. По одному из этих признаков судят о наличии дефекта.

На использовании резонансных явлений основаны следующие методы.

Резонансный метод дефектоскопии и толщинометрии (рис. 2, в). При контроле определяются резонансные частоты колебаний по толщине в исследуемом участке изделия (например, в стенке трубы или в листе). На наличии дефекта указывает уменьшение толщины или исчезновение резонансов.

Метод свободных колебаний (рис. 2, д) основан на анализе спектра частот изделий, вибрирующих на собственной частоте. Ранее это выполнялось только на слух (например, проверка по звону стеклянной посуды). В настоящее время разработана

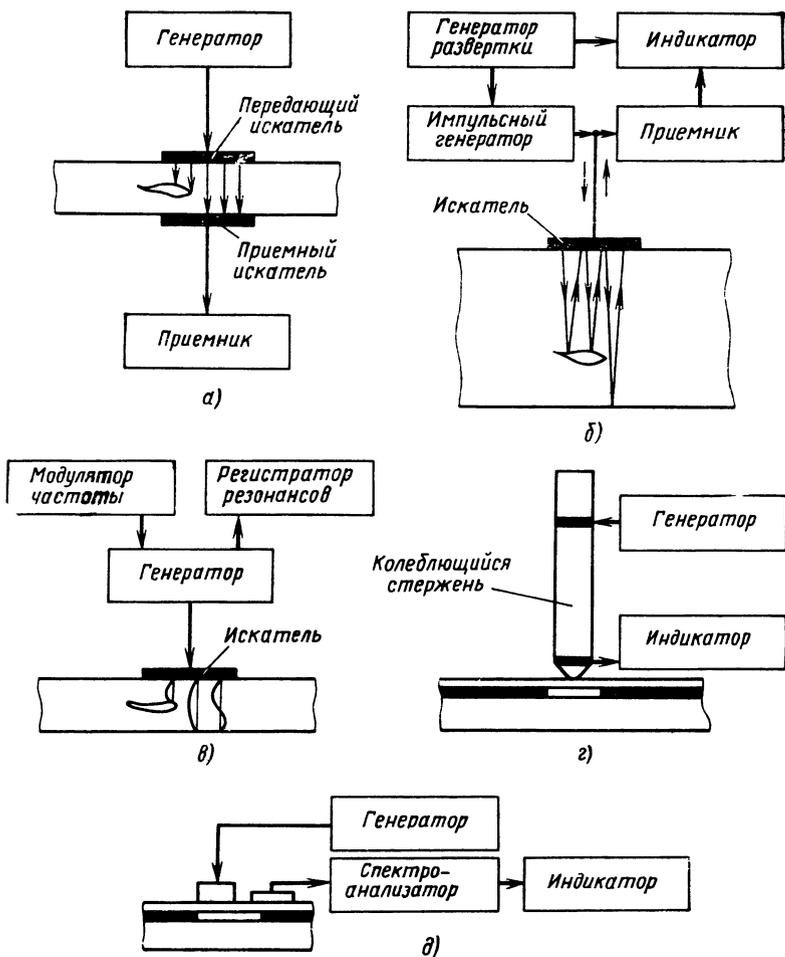


Рис. 2. Принципиальные схемы основных методов ультразвукового контроля

аппаратура, позволяющая выделять и количественно анализировать наиболее характерные частоты спектра.

Ко второй группе относится метод **акустической эмиссии** основанный на регистрации упругих волн, возникающих в момент образования или развития трещин. Излучателем является сам образующийся дефект. Даже небольшие изменения структуры материала служат источником волн эмиссии. Признаком опасного состояния конструкции является увеличение частоты следования или амплитуды сигналов в определенном диапазоне частот.

Шумно-вибрационный метод, основанный на наблюдении спектра частот работающего механизма в целом или отдельных его компонентов. Датчик прижимается к отдельным точкам механизма или воспринимает сигналы по воздуху. Для контроля применяют не только ультразвуковые, но и звуковые волны.

Перечисленными методами контроля материалов и конструкций не исчерпывается многообразие способов акустического контроля.

Наибольшее распространение получил импульсный эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии. Этим методом контролируют поковки, прокат, литье, сварные швы, пластмассы, строительные материалы, измеряют толщину и структуру материалов.

Теневой метод применяют в основном для контроля проката малой и средней толщины, некоторых резиновых изделий (покрышек колес), исследования упругих свойств стеклопластиков, бетона и т. п. Он применим лишь при двустороннем доступе к изделию. Там, где это условие не выполняется, может быть использован зеркально-теневой (для контроля железнодорожных рельсов) или резонансный метод. Последний применяют в основном для измерения толщины тонкостенных труб и сосудов. Конечная длительность импульсов ограничивает применение импульсного эхо-метода, создавая зону нечувствительности («мертвую зону») вблизи поверхности, с которой контактирует искатель. Резонансный метод не имеет этого недостатка.

Импедансный метод и метод свободных колебаний применяют для контроля тонкостенных клееных или паяных конструкций из металла и пластмасс.

Метод акустической эмиссии перспективен для контроля различных сварных конструкций в процессе прочностных испытаний, а также во время эксплуатации. Шумо-вибрационный метод служит для контроля работающих машин и механизмов.

§ 2. АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭХО-МЕТОДОМ

Функциональная схема эхо-дефектоскопа показана на рис. 3. Наряду с основными узлами, отмеченными на рис. 2, *а*, включен ряд дополнительных блоков. Синхронизатор 1 обеспечивает одновременный запуск генератора зондирующих импульсов 2 и генератора разверки 5 луча электроннолучевой трубки (ЭЛТ) 6. Благодаря этому достигается синхронное перемещение луча по экрану ЭЛТ и ультразвукового импульса, излученного искателем 3 в изделие. Принятые эхо-сигналы усиливаются приемником 4 и подаются на вертикально-отклоняющие пластины ЭЛТ. Электрическое питание прибора обеспечивается блоком 7.

На рис. 4, *а* показана характерная картина на экране электроннолучевой трубки. Сигнал 1 соответствует генерируемому (зондирующему) импульсу, сигнал 2 — отражению от противо-

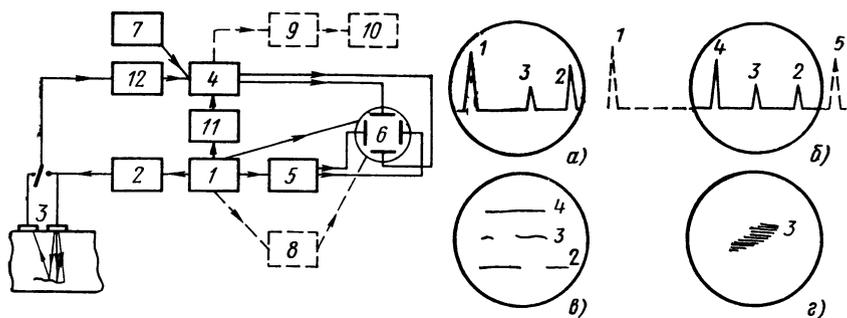


Рис. 3. Функциональная схема импульсного ультразвукового дефектоскопа

Рис. 4. Изображения на экране эхо-дефектоскопа:

а, в — в контактном варианте; *б, г* — в иммерсионном варианте (штриховой линией изображены импульсы, невидимые на экране при нормальной работе дефектоскопа); *1* — зондирующий импульс; *2* — донный сигнал; *3* — эхо-сигнал от дефекта; *4* — начальный импульс; *5* — двукратное отражение ультразвука между искателем и верхней гранью изделия

положительной поверхности (дна) изделия. Между ними располагается эхо-сигнал от дефекта *3*.

Расстояние от зондирующего импульса до эхо-сигнала вдоль линии развертки характеризует время прихода отражения, а следовательно, расстояние до отражателя. Погрешность измерения расстояния определяется линейностью системы развертки луча. Для повышения точности измерения расстояний (что особенно важно при измерении толщины изделий) применяют специальные блоки измерения времени *8* (рис. 3). В наиболее совершенном виде такой блок дает цифровой отсчет расстояния до измеряемого объекта. Автоматический сигнализатор дефектов (АСД) *10* включает световой или звуковой сигнал при появлении импульса от дефекта. Для того чтобы сигнализатор не реагировал на зондирующий и донный импульсы, применяют временный селектор *9*, который избирательно пропускает импульсы в зависимости от времени их прихода.

Амплитуда сигналов от дефектов быстро убывает с увеличением расстояния. Для компенсации этого явления применяют временную регулировку чувствительности (ВРЧ) *11*. Этот блок, управляемый задающим генератором, резко уменьшает коэффициент усиления приемника в момент излучения зондирующего импульса, а затем постепенно увеличивает его по закону, обратному закону убывания амплитуды сигналов с расстоянием до дефектов.

При усилении импульсы, поступающие на вход дефектоскопа, значительно искажаются. Поэтому по амплитудам сигналов на экране нельзя судить об их истинной величине. Для точного измерения амплитуд сигналов дефектоскопы снабжают калиброванным ослабителем сигналов — аттенюатором *12*, рас-

полагаемым на входе приемного тракта дефектоскопа. Величина ослабления поступающих сигналов аттенуатором до некоторого уровня на экране определяет амплитуду поступающего сигнала. Обычно амплитуды сигналов измеряют в отрицательных децибелах, причем за 0 децибел принимается максимально возможный эхо-сигнал. Если отношение амплитуд двух сигналов A/A_0 , то величина сигнала в децибелах

$$N = 20 \lg A/A_0.$$

Схема контроля, показанная на рис. 3, соответствует непосредственному контакту искателя с изделием через тонкий слой смазки.

Применяют способы контроля, при которых между искателем и изделием вводится задержка времени из твердого или жидкого материала. Например, в установках для автоматического контроля широко распространен иммерсионный способ контроля, при котором между искателем и изделием создается толстый слой жидкости. Для этого изделие целиком погружают в резервуар с жидкостью или создают локальные ванны. Иммерсионный способ контроля обеспечивает более стабильную передачу ультразвука от искателя к изделию по сравнению с контактным способом, у которого качество акустического контакта изменяется в связи с изменением толщины слоя масла, его частичного или полного исчезновения.

На рис. 4, б показана характерная картина на экране ЭЛТ при контроле иммерсионным способом. Первый импульс после зондирующего, соответствующий отражению ультразвука от границы жидкость — изделие, называют начальным. Далее следует участок развертки, где возможно появление импульсов от дефектов и виден донный сигнал. Расстояние от искателя до поверхности изделия выбирают таким, чтобы время прохождения ультразвука в жидкости было больше времени прохождения импульса в изделии. Благодаря этому сигнал, соответствующий двукратному прохождению ультразвуковым импульсом расстояния между искателем и изделием, появится после донного сигнала и не будет мешать выявлению дефектов.

Скорость развертки и задержка запуска развертки выбирают такими, чтобы на экране ЭЛТ был виден только рабочий участок с начальным и донным сигналами, а остальные импульсы оставались за пределами экрана.

Современные дефектоскопы для ручного контроля выполняют на полупроводниках, габариты и масса их сравнительно небольшие (6—12 кг). Они могут питаться как от сети, так и от батареи аккумуляторов. Установки для автоматического ультразвукового контроля, включающие устройства для перемещения искателей и ванны для размещения изделия, являются более громоздкими устройствами.

§ 3. ИСКАТЕЛИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

Современные дефектоскопы укомплектованы набором различных искателей — излучателей и приемников ультразвуковых волн, у которых чувствительным элементом служит пьезопластина. По способу контакта с изделием различают искатели:

а) контактного типа, которые прижимают к поверхности изделия, предварительно смазанной жидкостью (маслом, глицерином, клейстером и т.п.), до непосредственного соприкосновения;

б) щелевые, в которых между поверхностью искателя и изделием создается небольшой зазор, заполняющийся подаваемой жидкостью;

в) иммерсионные, предназначенные для контроля через слой жидкости большой толщины.

По направлению ультразвуковых колебаний к поверхности изделия различают прямые (или нормальные) и наклонные (призматические) искатели. По способу соединения с дефектоскопом различают отдельные искатели, в которых один преобразователь выполняет излучение, а другой — прием ультразвука, и совмещенные искатели, в которых один преобразователь выполняет обе функции.

Ниже дано описание наиболее широко применяемых искателей дефектоскопов.

На рис. 5 показана конструкция нескольких нормальных искателей контактного типа, предназначенных для работы по смещенной схеме. В советских искателях (рис. 5, а, б) пьезопластина / изготовлена из цирконата-титаната свинца. В искателях фирмы «Крауткремер» (рис. 5, в) пьезопластина чаще изготовлена из кварца (искатели серии Q); иногда применяют титанат бария (искатели серии В). Применение кварца, обладающего сравнительно низкой чувствительностью, обусловлено его высокой стабильностью и равномерностью излучения всех элементов пьезопластины. Толщина пьезопластины d_1 равна половине длины волны, т. е. $d_1 = \lambda/2 = c/2f$, где c — скорость звука в пьезоматериале.

На пьезопластину с двух сторон наносят серебряные электроды, которые системой проводников соединяют с кабелем, а через него с дефектоскопом. Пьезопластину приклеивают к демпферу. Для того чтобы ультразвуковые колебания, отраженные от задней поверхности демпфера, не вызывали помех, демпфер делают из звукогасящего материала: текстолита, эбонита или эпоксидной смолы. Для сокращения длительности ультразвукового импульса акустическое сопротивление демпфера стремятся увеличить.

Протектор искателя должен обладать высокой износостойчивостью, обеспечивать высокую чувствительность искателя и стабильность акустического контакта его с изделием. Протек-

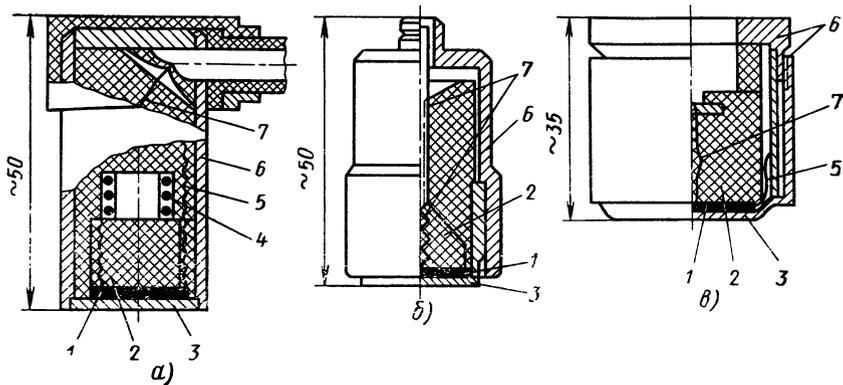


Рис. 5. Конструкция нормальных искателей:

a — к дефектоскопу ДУК-66 (СССР); *б* — типа ИЦ-1 (СССР); *в* — типа Q4S (фирма «Крауткремер», ФРГ); 1 — пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — протектор; 4 — катушка индуктивности; 5, 7 — проводники; 6 — корпус

тор искателя, показанный на рис. 5, *a*, изготовлен из металло-керамики. Высокой стабильностью акустического контакта обладает искатель ИЦ-1, протектор которого изготовлен из эпоксидной смолы с металлическим (предпочтительно бериллиевым) наполнителем. В искателе (см. рис. 5, *в*) протектор сделан из эластичного материала типа полиуретана. Это дает возможность протектору деформироваться и до некоторой степени облегать неровности поверхности изделия, что также благоприятствует стабильности акустического контакта.

Размеры искателя выбирают с учетом поля излучения — приема пьезопреобразователя. Это поле может быть определено, если в различные точки перед искателем помещать небольшой (точечный) сферический отражатель. На рис. 6 показано, как при этом будет изменяться амплитуда эхо-сигнала от точечного дефекта. За единицу принята амплитуда сигнала от рефлектора, расположенного в непосредственной близости от преобразователя. Если рефлектор находится на расстоянии $r < r_f = a^2/\lambda$, то амплитуда эхо-сигнала резко изменяется (осциллирует) при перемещении как вдоль, так и поперек оси искателя. Усредненная по площади пьезоэлемента интенсивность излучения в этой области практически сохраняется постоянной. Область, где $r\lambda/a^2 < 1$, называют ближней зоной искателя.

За пределами ближней зоны поле излучения — приема имеет вид расходящихся лепестков. 80% энергии сосредоточено в основном лепестке, расположенном вблизи оси. Лучи основного лепестка расходятся под углом $\theta \leq \arcsin 0,61 \lambda/a$. Исходя из энергетических соображений, поле излучения — приема искателя схематически изображают, как показано на рис. 7. При увеличении диаметра пьезопреобразователя сжимается основной

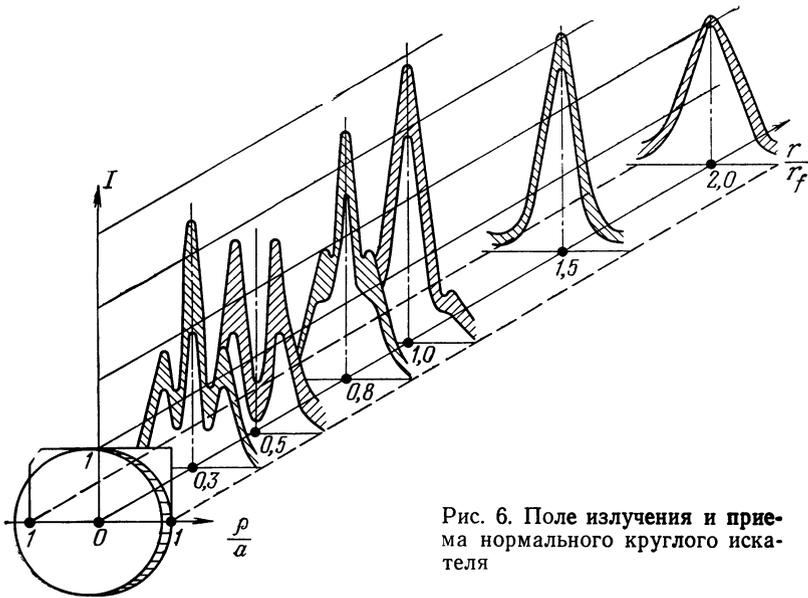


Рис. 6. Поле излучения и приема нормального круглого искателя

лепесток в дальней зоне, излучение делается более направленным. Одновременно увеличивается протяженность ближней зоны, где выявление дефектов затрудняется наличием максимумов и минимумов сигнала. Целесообразно применять маленькие искатели для контроля тонких изделий и большие — для контроля изделий значительной толщины. В искателях советских дефектоскопов отношение диаметра пьезопластины к длине волны в стали $2a/\lambda$ колеблется от 2,5 до 8. В других странах чаще применяют искатели большего диаметра ($2a/\lambda = 4 \div 20$).

На рис. 8 показана конструкция искателя щелевого типа. Искатель катится на роликах по поверхности изделия. Чувстви-

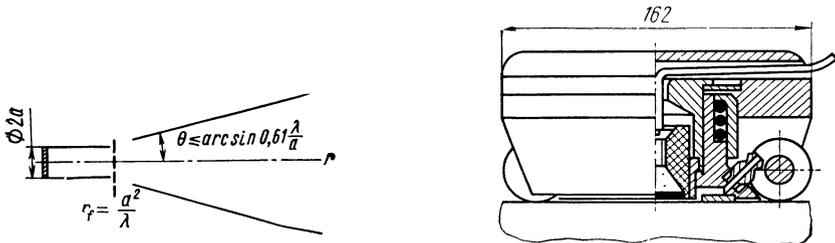
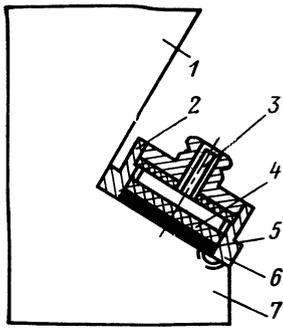
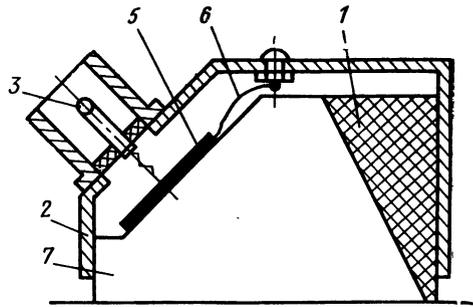


Рис. 7. Схематическое изображение поля излучения и приема искателя

Рис. 8. Искатель типа ИЦ-23 со щелевым контактом на катящейся платформе



а)



б)

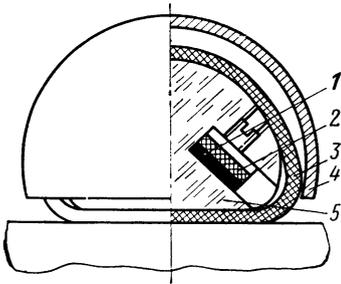


Рис. 9. Наклонные искатели:

а — типа ИЦ (СССР); б — типа WB (фирма «Крауткремер», ФРГ); 1 — ловушка; 2 — корпус; 3 — соединительные проводники; 4 — демпфер; 5 — пьезопластина; 7 — призма

Рис. 10. Искатель типа ИЦ-15 со скользящим резиновым протектором:

1 — пьезопластина; 2 — демпфер; 3 — скользящий протектор в виде непрерывной ленты; 4 — корпус; 5 — призма

тельный элемент перемещается в корпусе с помощью телескопического устройства и прижимается к поверхности изделия пружиной. Металлическая оправка головки обеспечивает образование тонкого зазора между пьезопластиной и изделием. Такой искатель позволяет осуществлять контроль горячекатаных изделий без обработки поверхности.

На рис. 9 показаны две конструкции наклонных призматических искателей, получивших наиболее широкое распространение. Основной деталью, отличающей наклонный искатель от нормального, является призма 7 из оргстекла. Пьезоэлемент излучает в призму продольные волны, которые на границе призмы с изделием частично отражаются, а частично преломляются и трансформируются в поперечные. Не попавшая в изделие часть ультразвуковой энергии гасится в ловушке. В искателе, показанном на рис. 9, а, ловушкой служит верхняя часть призмы, а в искателе на рис. 9, б — передняя часть. Пьезопластина прижимается к призме через слой масла (рис. 9, а) или приклеивается к ней (рис. 9, б). Угол падения луча или преломляющий угол α выбирают таким, чтобы в изделии возникали только поперечные волны. Для пары плексиглас — сталь угол выбирают в пределах 30—55° С. Для повышения износоустойчивости иска-

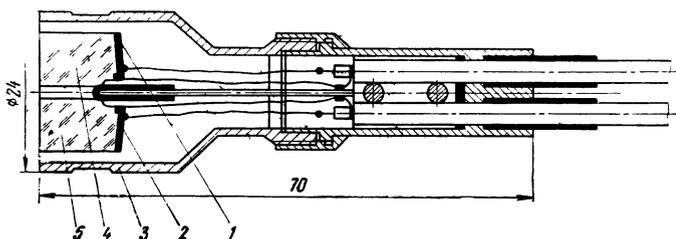


Рис. 11. Раздельно-совмещенный искатель:

1, 2 — пьезопреобразователи; 3 — корпус; 4, 5 — преломляющие призмы

теля и качества акустического контакта при контроле по грубой поверхности применяют искатели со скользящим эластичным протектором (рис. 10).

Для контроля изделий вблизи поверхности применяют раздельно-совмещенные искатели (рис. 11). Излучающий 1 и приемный 2 пьезопреобразователи этих искателей разделены акустически и электрически, а конструктивно они объединены в одном корпусе 3. Пьезопреобразователи раздельно-совмещенных искателей обычно располагают на призмах 4 и 5 с небольшим углом наклона так, чтобы излучающий и приемный искатели были направлены навстречу друг другу. В раздельно-совмещенном искателе зондирующий импульс, генерируемый излучающим элементом, практически не попадает на приемник. В результате мертвая зона снижается до 1—2 мм (против 5—10 мм для нормальных искателей). Максимум чувствительности раздельно-совмещенных искателей располагается вблизи пересечения центральных лучей излучателя и приемника. При увеличении расстояния их чувствительность убывает быстрее, чем у искателей нормального типа.

§ 4. МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭХО-МЕТОДОМ

Перед контролем следует определить участки изделия, где возникновение дефектов наиболее вероятно или наиболее опасно, а также выяснить наиболее вероятную ориентацию дефектов в пространстве. Далее выбирают поверхность изделия, через которую удобно вводить ультразвук, и направление ультразвуковых лучей. Поверхность эта должна быть, по возможности, ровной, а направление ультразвуковых лучей по отношению к плоскости наиболее вероятной ориентации дефектов должно составлять угол, возможно близкий к прямому.

Например, в поковках и прокате дефекты обычно располагаются перпендикулярно направлению деформирующего усилия, т. е. параллельно поверхности изделия, к которой это усилие

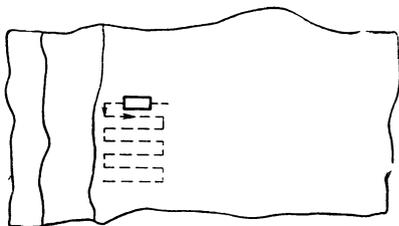
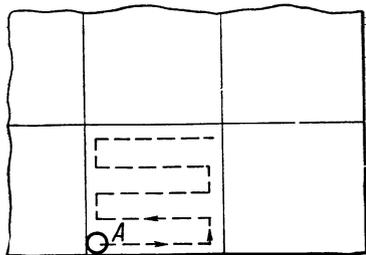
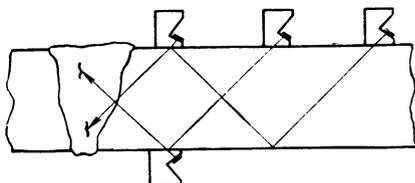
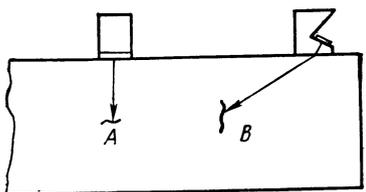


Рис. 12. Схема контроля поковок и проката на расслоения и поперечные трещины

Рис. 13. Схема контроля сварного шва наклонным искателем

прикладывалось (дефект *A* на рис. 12). Такие дефекты легко выявить, если ввести ультразвук перпендикулярно к поверхности изделия. При контактном способе контроля это достигается применением искателя нормального типа. В поковках и прокате могут возникать также и поперечные трещины (дефект *B* на рис. 12). Для их выявления применяют наклонные искатели или дополнительный контроль со стороны боковой поверхности.

Наиболее опасные дефекты сварных швов обычно располагаются параллельно поверхностям свариваемых кромок. Для контроля применяют наклонные искатели, которые перемещаются по относительно ровной поверхности основного металла (рис. 13). Ультразвуковые лучи в данном случае падают на плоскость дефекта не перпендикулярно, однако угол падения оказывается достаточным, чтобы рассеянные на неровностях дефекта лучи давали хорошо регистрируемый эхо-сигнал.

Чтобы обеспечить контроль всего металла изделия, необходимо перемещать искатель по поверхности этого изделия. Построчный процесс поиска дефектов называют сканированием поверхности. Путь искателя на рис. 12 и 13 показан штриховой линией.

Когда контроль производят контактном способом, шероховатость поверхности, по которой перемещается искатель, должна быть не ниже 4-го класса. В ответственных случаях чистота обработки повышается до 6—7-го классов.

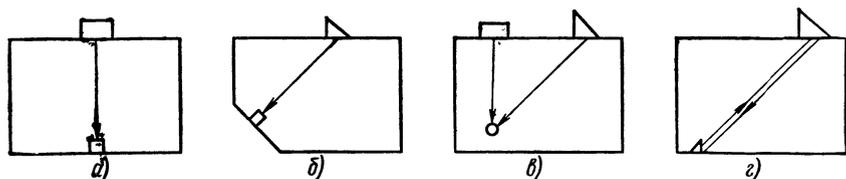


Рис. 14. Искусственные дефекты для настройки чувствительности:
 а — плоскодонное отверстие для прямого искателя; б — плоскодонное отверстие для наклонного искателя; в — цилиндрическое отверстие; г — угловой отражатель (зарубка)

Для успешного контроля очень важно обеспечить правильную настройку дефектоскопа. Скорость развертки луча ЭЛТ должна обеспечить изображение на экране всего контролируемого объема изделия.

Выбор частоты для ультразвукового контроля обусловлен следующими рекомендациями. Чем больше толщина контролируемого материала, тем меньше частота. Контроль стальных кованных и катаных изделий ведется на частотах 2—2,5 мГц. При повышении толщины до 500 мм целесообразно снижение частоты до 1,5 мГц. Изделия толщиной 10—20 мм лучше контролировать на частоте 4—5 мГц, так как при этом уменьшается мертвая зона и повышается чувствительность. В этом случае целесообразно применять раздельно-совмещенные искатели. Частоты менее 1,5—2 мГц применяют преимущественно для контроля крупнозернистых материалов на грубые дефекты, когда затухание ультразвука в материале изделия велико.

Чувствительность настраивают по искусственным дефектам в образцах, изготовленных из материала изделия. В СССР общепринята оценка чувствительности по искусственному дефекту в виде отверстия с плоским дном (рис. 14, а, б). Мерой чувствительности служит площадь дна этого отверстия. В США и ряде других стран при контроле поковок и проката чувствительность настраивают по плоскодонному отверстию, а при контроле сварных швов — по отражению от цилиндрического отверстия (рис. 14, в). В некоторых случаях при контроле наклонным искателем в качестве искусственного дефекта используют угловой отражатель (рис. 14, г) в виде зарубки, выполненной специальным зубилом в образце или непосредственно в изделии.

Наиболее высокая чувствительность соответствует выявлению плоскодонного отверстия диаметром 0,5 мм. Площадь дна такого отверстия около 0,2 мм². Таким образом, в данном случае чувствительность по плоскодонному отверстию равна 0,2 мм². Обычный контроль ведут при чувствительности 3—7 мм².

Современные дефектоскопы позволяют выполнять контроль материалов с однородной мелкозернистой структурой на глубину от 0,5 до 5000 мм. Если величина зерна в материале (литая сталь, чугун, медь) увеличивается, приближаясь в длине волны ультразвука, то чувствительность резко падает и в некоторых случаях контроль совершенно невозможен.

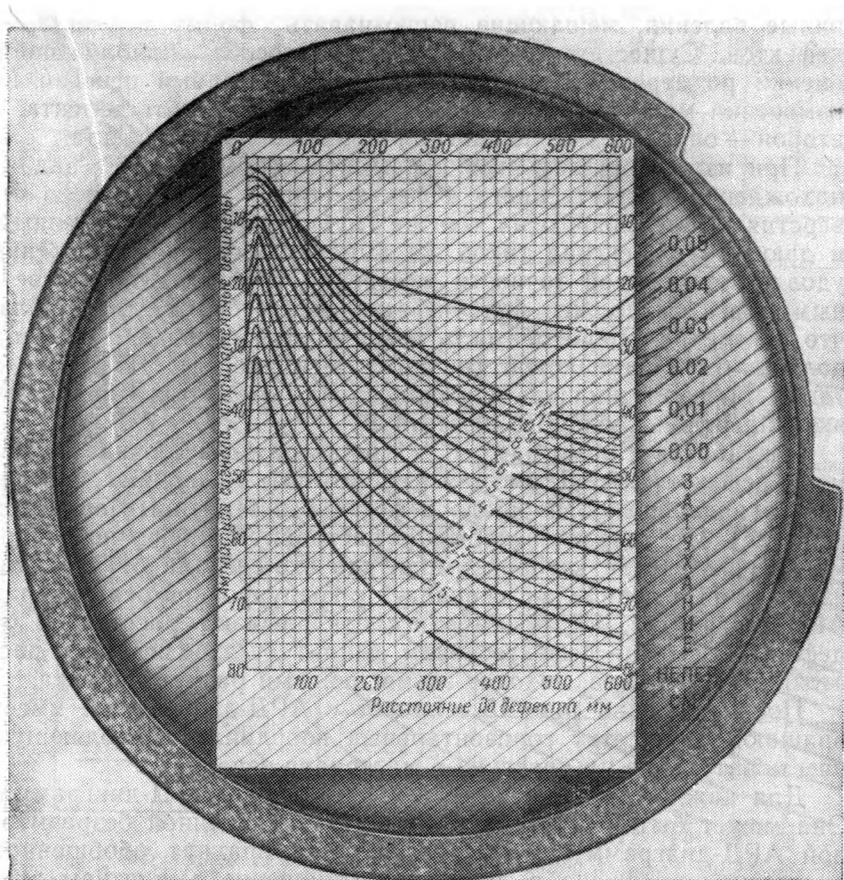


Рис. 15. Планшет с АД-диаграммой для нормального искателя на частоту 2,5 мГц ($\lambda=2,34$ мм) с пьезоэлементом диаметром 12 мм

Координаты выявленных дефектов определяют по местоположению искателя на поверхности изделия (в момент наилучшего обнаружения дефекта) и времени пробега ультразвукового импульса до дефекта. При контроле нормальным искателем дефект в момент выявления залегает непосредственно под искателем. Точность измерения координат дефекта определяется размерами искателя и точностью измерения глубины эталонном времени дефектоскопа (1—3% от измеряемого расстояния).

При контроле наклонным искателем координаты дефекта относительно искателя зависят от направления ультразвуковых лучей. Точно измерить размеры дефектов при ультразвуковом контроле трудно потому, что они обычно соизмеримы с длиной волны ультразвука. В результате возникают дифракци-

онные явления, мешающие распознавать форму и очертания дефектов. Существует два основных способа приближенной оценки размеров дефектов ультразвуком. Первый основан на измерении максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта, а второй — определении положения крайних точек дефекта.

При измерении дефектов первым способом ставится задача нахождения искусственного дефекта (типа плоскодонного отверстия), залегающего на той же глубине, что и естественный, и дающего эхо-сигнал такой же амплитуды. Для достижения удовлетворительной точности измерений образец с искусственным дефектом должен быть изготовлен из того же материала, что и изделие. Шероховатость поверхностей изделия и образца должна быть одинаковой (не ниже 5-го класса). Найденную таким образом площадь плоскодонного отверстия называют эквивалентной площадью дефекта S_3 .

Разработаны номограммы «амплитуда — расстояние — диаметр дефекта» (АРД-диаграммы), которые позволяют определять эквивалентную площадь дефекта без эталонных образцов (рис. 15). Производят несложную настройку прибора по донному сигналу, после которой амплитуда эхо-сигнала от дефекта, измеренная в децибелах, совпадает с градуировкой оси ординат АРД-диаграммы. По оси абсцисс откладывают расстояние от дефекта. Измерив дефектоскопом амплитуду эхо-сигнала и расстояние до дефекта, находят эквивалентный размер дефекта.

Показанный на рис. 15 планшет с АРД-диаграммой имеет вращающуюся сетку горизонтальных координат, позволяющую учесть затухание ультразвука в материале изделия.

Для каждого типа искателей нужна своя АРД-диаграмма. Она может быть построена с помощью обобщенной безразмерной АРД-диаграммы (рис. 16). По оси ординат обобщенной диаграммы отложено в децибелах отношение амплитуды эхо-сигнала от дефекта к амплитуде максимально возможного эхо-сигнала, которую можно определить по донному сигналу с учетом потерь на расхождение лучей и затухание ультразвука. Параметр семейства кривых — величина d/D (d — диаметр плоскодонного отражателя, D — диаметр пьезопреобразователя).

Верхняя кривая (∞) соответствует донному сигналу, т. е. отражению от дефекта бесконечно большого размера. Все кривые построены при условии, что искатель можно перемещать по поверхности изделия, отыскивая максимальную амплитуду отражения от дефекта, расположенного на заданной глубине. По этой причине на кривых сглажены резкие изменения амплитуд эхо-сигнала, которые имеются в ближней зоне искателя (см. рис. 6). Заштрихованные области — разброс амплитуд эхо-сигналов от дефектов из-за различной длительности и формы эхо-сигналов.

Второй способ измерения размеров дефектов заключается в том, чтобы найти положения искателя, связанные с положением

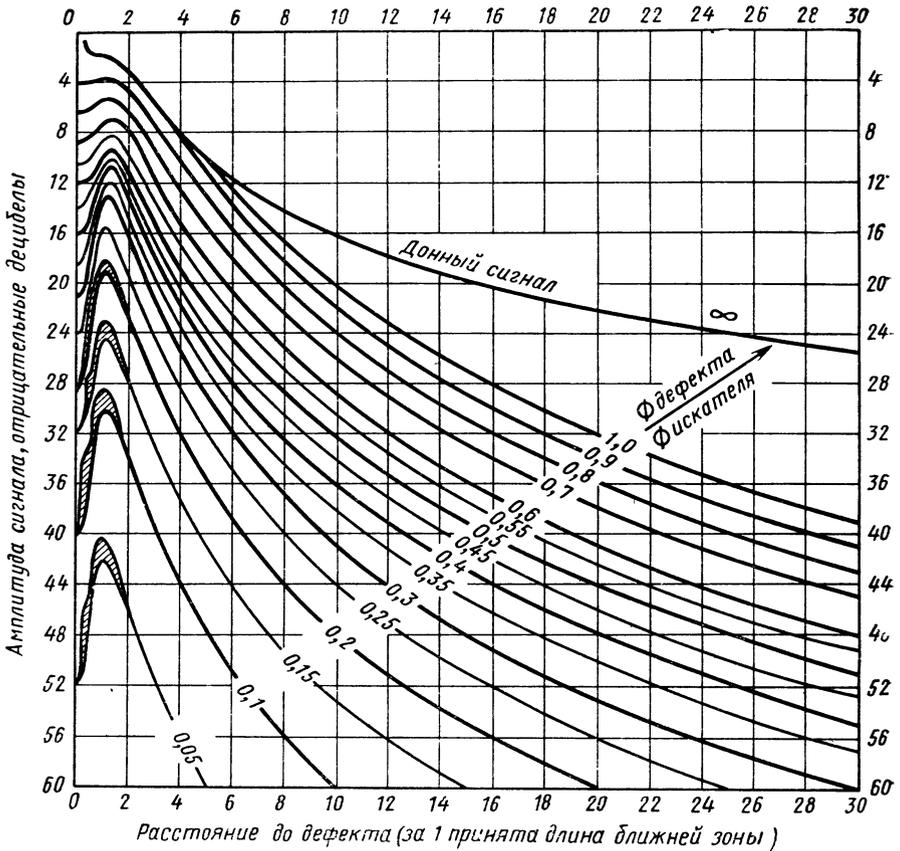


Рис. 16. Обобщенная АРД-диаграмма. Длина ближней зоны $r_f = a^2/\lambda$

крайних точек дефекта (рис. 17), и, если дефект расположен наклонно к поверхности, измерить глубину залегания крайних точек (рис. 18). Амплитуда эхо-сигнала при перемещении искателя вблизи края дефекта меняется по-разному, в зависимости от формы и величины дефекта. Часто это изменение происходит немонотонно, поэтому точно определить местоположение искателя невозможно. В результате при этом способе также возможны погрешности тем больше, чем меньше размер дефекта. Обычно крайними считают те положения искателя, которые соответствуют уменьшению амплитуды эхо-сигнала от дефекта в 2 раза по сравнению с максимальным значением (положения искателя 2 и 4 на рис. 17 и 18).

Одной из наиболее сложных задач является определение характера дефекта по данным ультразвукового контроля. Существует ряд признаков, позволяющих отличить округлые дефекты

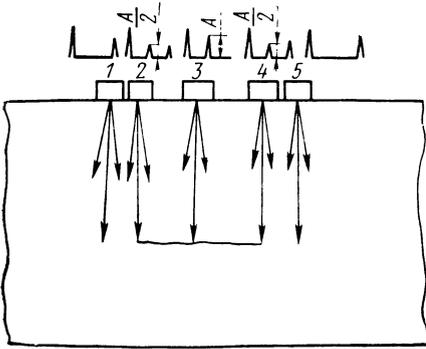


Рис. 17. Схема измерения условной протяженности дефекта

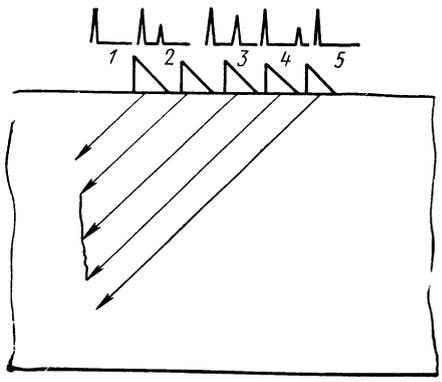


Рис. 18. Измерение условной высоты дефекта

(шлаковые включения и поры) от более опасных дефектов с малым раскрытием (трещины и непровары). При отражении ультразвука от округлого дефекта интенсивный сигнал наблюдается для различных направлений падающих ультразвуковых лучей (рис. 19, а), а в случае отражения от трещины или непровара интенсивный эхо-сигнал наблюдается только при одном направлении, когда лучи падают на дефект перпендикулярно плоскости его преимущественной ориентации (рис. 19, б).

Особенно эффективно применение этого признака при контроле сварных соединений, когда дефект выявляется двумя способами: непосредственно отраженным лучом (рис. 20, положение искателя A_1 и A_2) и по способу «тандем».

Рис. 19. Выявление плоских и округлых дефектов при различных направлениях ультразвуковых лучей

Рис. 20. Выявление плоских и округлых дефектов непосредственно отраженным лучом и способом «тандем»

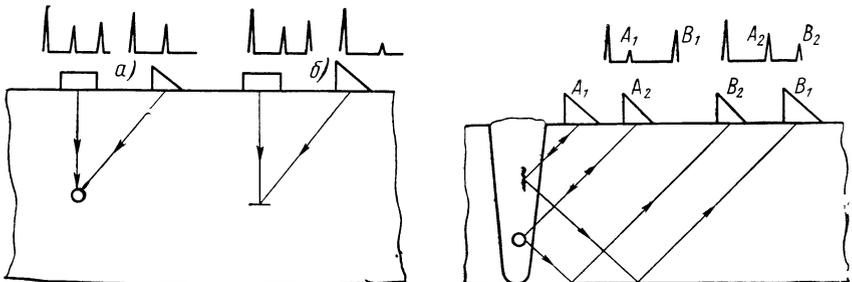


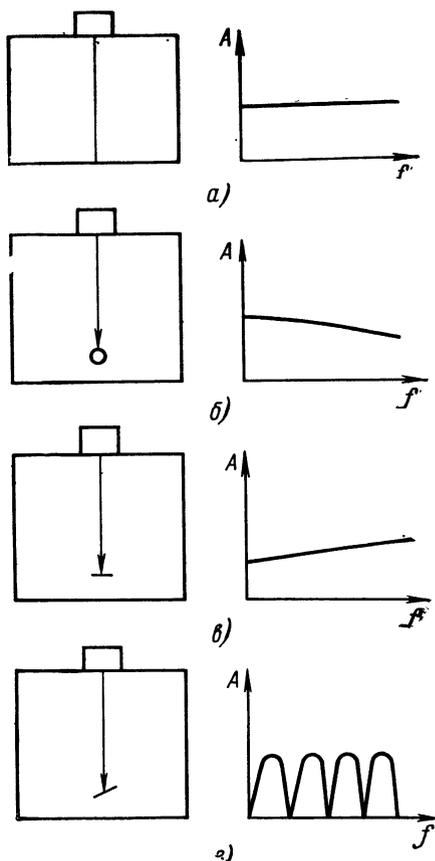
Рис. 21. Спектральный анализ сигнала для определения формы дефекта

Способ «тандем» разработан для определения плоских вертикально ориентированных дефектов. По этому способу ультразвук излучается издателем A_1 (или A_2), претерпевает двойное отражение (от дефекта и нижней поверхности сварного соединения) и принимается другим издателем B_1 (или B_2), расположенным в том месте, куда должен идти зеркально отраженный эхо-сигнал. Отношение амплитуд сигналов, принятых в точках A и B , будет больше единицы ($\frac{A_2}{B_2} > 1$), если дефект имеет округлую форму, и меньше 1, когда дефект плоский ($\frac{A_1}{B_1} < 1$).

Эффективным способом определения характера дефекта является также спектроскопический анализ эхо-сигналов.

Исследование спектра частот отраженных сигналов (при условии, что длина волны ультразвука меньше размера дефекта) показывает, что для дефекта округлой формы амплитуда эхо-сигнала медленно уменьшается с ростом частоты (рис. 21, б) или остается постоянной. [За уровень отсчета принимают амплитуду донного сигнала (рис. 21, а)]. В случае плоского дефекта, перпендикулярного к направлению ультразвука, амплитуда сигнала увеличивается с ростом частоты (рис. 21, в), а если плоский дефект ориентирован наклонно к направлению ультразвука, то амплитуда эхо-сигнала испытывает осцилляции при изменении частоты (рис. 21, г), причем с увеличением угла падения и размера дефекта частота осцилляций увеличивается. Для реализации спектрального способа анализа необходима специальная аппаратура.

Статистика показывает, что при наличии дефектов типа трещин величина их и количество на единицу объема металла



больше, чем при наличии шлаковых включений или пор. Поэтому измерение величины и количества дефектов дает некоторую возможность судить и об их характере.

§ 5. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ

Измерение толщины труб, сосудов и других изделий, доступ к которым имеется только с одной стороны, представляет одно из наиболее эффективных применений ультразвука. В качестве толщиномеров могут быть использованы обычные импульсные эхо-дефектоскопы, поскольку они снабжены устройствами для измерения времени прихода импульса. Однако более удобны специальные приборы-толщиномеры.

Импульсные толщиномеры делят на два основных типа: приборы для высокоточного измерения толщины изделий с относительно гладкими поверхностями и приборы для менее точного измерения толщины изделий с грубыми корродированными поверхностями. Толщиномеры последнего типа применяют для периодического контроля толщины эксплуатируемого оборудования, особенно трубопроводов, склонных к внутренней коррозии.

Приборы для измерения по грубой поверхности работают с раздельно совмещенными искателями (см. рис. 14), имеющими небольшую мертвую зону. Несмотря на наличие электроакустических экранов между излучателем и приемником, сильно ослабленный зондирующий импульс все же попадает в приемный тракт. В результате интерференции с импульсом, отраженным от внутренней поверхности, последний может быть погашен, и тогда измерение толщины будет ошибочно произведено по второму донному сигналу. Эта особенность ограничивает минимальную измеряемую толщину приборов.

Примерами толщиномеров данного типа являются «Кварц 6» (СССР), ДМ-1 (ФРГ) и др. «Кварц-6» имеет минимальную толщину измерения 2 мм и три диапазона максимальной измеряемой толщины; 10, 25 и 50 мм. Погрешности в этих диапазонах соответственно равны 0,1; 0,25 и 0,5 мм. Отсчет толщины ведется по стрелочному прибору. Масса прибора 5 кг. Питание автономное.

Прибор ДМ-1 имеет диапазон измерения толщины в пределах 1,2—100 мм с погрешностью $\pm 0,1$ мм. Отсчет производят по цифровому индикатору. Масса прибора 1 кг, питание автономное.

Примерами толщиномеров, предназначенных для контроля по хорошо обработанной поверхности, являются прибор УТ-30ПЦ, выпускаемый в СССР, французский прибор М-215, американские толщиномеры «Калипер 105». Особенность этих толщиномеров заключается в быстром подавлении зондирующего импульса с целью уменьшения мертвой зоны. За счет

применения компенсирующего напряжения на входе приемника или системы шунтирования длительность зондирующего импульса удастся уменьшить до одного-двух периодов колебаний. Однако система подавления импульса рассчитана на возбуждение зондирующего импульса определенной формы, возникающей при высококачественном контакте искателя с изделием, т. е. при хорошей чистоте поверхности изделия. Кроме того, при использовании коротких акустических импульсов чувствительность оказывается небольшой, а следовательно, недопустимо ее дальнейшее ослабление за счет плохого качества акустического контакта.

Приведем технические характеристики одного из толщиномеров этого типа. Прибор «Калипер 105» имеет два диапазона измерений: 0,25—3,75 и 1,25—50 мм. Погрешность измерений 0,1% от полного значения шкалы. Прибор имеет цифровой индикатор, сигнализатор дефектов и систему регистрации.

Ранее задачу измерения толщины изделий с хорошо обработанными поверхностями решали при помощи резонансных толщиномеров контактного типа. Принцип работы этих приборов заключается в следующем. На частотах f_n , при которых в изделии толщиной δ укладывается целое число n полуволн ультразвука, возбуждаются резонансы колебаний:

$$\delta = n \frac{\lambda_n}{2} = \frac{nc}{2f_n};$$

$$f_n = \frac{nc}{2\delta}.$$

Резонансные толщиномеры контактного типа вытесняются импульсными приборами. Это объясняется двумя причинами: сложностью системы отсчета толщины (между толщиной и резонансной частотой имеется обратно пропорциональная неоднозначная, связанная с n зависимость) и существенными погрешностями, присущими контактному резонансному методу. Погрешность связана с конечной шириной резонансного пика и со смещением резонансных пиков, вызываемых тем, что прибор регистрирует не моменты установления резонанса в стенке изделия, а акустические резонансные явления в пакете «изделие — пьезопластика — промежуточные слои» (в том числе слой контактной жидкости). Нестабильность толщины слоя контактной жидкости не дает возможности учесть вызванное этим смещение резонансных пиков. В результате погрешность измерения толщины контактным резонансным толщиномером в 1—2% является систематической и не может быть устранена за счет повышения точности отсчетных устройств.

Широкое распространение получили иммерсионные резонансные толщиномеры, позволяющие непрерывно измерять толщину стенок труб. В этих приборах используются явления резкого

уменьшения амплитуды отражения от слоя, толщины которого равна целому числу полуволн. В этом случае уравнение $\delta = \frac{nc}{2f_n}$ выполняется точно, если акустические сопротивления сред, граничащих с измеряемым слоем, меньше акустического сопротивления слоя.

Иммерсионно-резонансный толщиномер «Монолит», выпускаемый в СССР, позволяет измерять толщины от 0,25 до 0,5 мм с погрешностью 1,5%. Возможен контроль труб диаметром 6—15 мм.

§ 6. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Некоторые акустические свойства материалов (скорость и затухание звука, акустический импеданс) связаны определенной зависимостью с такими физико-механическими свойствами, как величина зерна, содержание включений, текстура, прочность, твердость, величина упругих постоянных и внутренних напряжений. На этой основе разработаны акустические методы и приборы, которые позволяют производить неразрушающие испытания важных эксплуатационных свойств материалов.

Контроль величины зерна металлов. Величина зерна влияет прежде всего на затухание ультразвука, поэтому любой метод измерения затухания позволяет оценить величину зерна. Наибольшее распространение получил метод измерения на двух или нескольких частотах. Одну из частот выбирают низкой, и затухание на ней слабо зависит от структуры, а другую — высокой, чтобы отношение длины волны к среднему размеру зерна находилось в диапазоне от 4 до 15. Отношение амплитуд двух донных сигналов, полученных на этих частотах, называют структурным коэффициентом. Измерение производят путем сравнения структурных коэффициентов в изделии и на эталонных образцах с известной величиной зерна. В СССР выпускаются приборы ДСК-1, «Кристалл-1», работающие по этому принципу, их частоты 0,5—10 мГц, они позволяют контролировать зерно в аустенитных сталях, алюминиевых сплавах и других материалах.

Контроль содержания включений. Для материалов, содержащих вещества с резко различающимися акустическими свойствами, наблюдается зависимость скорости и затухания звука от размеров включений. Например, в чугунах наблюдается четкая зависимость скорости и затухания ультразвука от размеров графитных включений.

Контроль материалов порошковой металлургии. Гранулометрический состав, пористость, температура и продолжительность спекания порошковых материалов могут быть проконтролированы по скорости и затуханию ультразвука. Исследованиями

М. Минкова (Болгария) было установлено влияние технологических характеристик порошковых материалов на их акустические свойства, что дает возможность раздельного контроля технологических характеристик.

Контроль прочности и упругих постоянных материалов. Непосредственное измерение прочности неразрушающими методами без приложения к изделию значительных механических напряжений, как правило, невозможно. Однако для ряда материалов наблюдается корреляционная зависимость прочности от модуля упругости, который непосредственно связан со скоростью звука. На этом основаны акустические методы измерения прочности таких материалов, как бетон, огнеупоры, электроизоляторы, стеклопластики, технические ткани, а также клееных конструкций.

Контроль прочности бетона производят, например, теневым методом с помощью импульсных приборов УФ-90ПЦ, ИСУ-БЕ-ТОН (СССР), DIUS (ЧССР), работающих на частотах 20—200 кГц. Путем измерения корреляционной зависимости скорость — прочность на нескольких десятках образцов (подвергающихся затем разрушающим испытаниям) строят градуировочную кривую для бетона данной марки, которую затем используют для оценки прочности изделий по времени пробега ультразвукового импульса заданного расстояния (база) между излучателем и приемником.

Упругие постоянные (модули нормальной упругости и сдвига) металлов и других материалов измеряют с помощью обычных эхо-дефектоскопов. По скорости распространения продольных и поперечных волн модули упругости могут быть рассчитаны с помощью несложных формул (стр. 15, табл. 2). Погрешность измерения не превосходит обычно 2—3%.

Контроль напряженного состояния. Пропорциональная зависимость между напряжением и деформацией материала (закон Гука) в действительности является лишь приближенной. Отклонение от пропорциональной зависимости приводит к тому, что скорость звука c изменяется под действием приложенных напряжений. Поэтому, измеряя скорость с погрешностью Δc не более 0,01%, можно определять интегральное значение напряжений на пути распространения ультразвука. Задача облегчается тем, что достаточно измерить лишь относительное изменение скорости $\Delta c/c$. Например, опытный образец установки «Сигма-3», разработанной в СССР, обеспечивает измерение $\Delta c/c$ для поперечных волн с точностью 0,0035%.

Напряжения в массивных резьбовых деталях (болтах, шпильках) определяют путем измерения относительных изменений времени пробега ультразвука до и после затяжки соединения. В упругой области увеличение времени пробега пропорционально напряжению. Использование импульсного прибора с

точным эталоном времени обеспечивает точность определения напряжений в болтах ± 1 кгс/мм².

Использование электромагнитно-акустического метода возбуждения и приема упругих волн позволяет получить в изделии сразу три волны: продольную и две поперечные с разной плоскостью поляризации. По измеренным значениям скорости распространения этих волн с большой точностью определяют упругие постоянные, внутренние напряжения, главные направления кристаллических осей и анизотропию свойств по разным направлениям (текстуре).

Контроль твердости. Для измерения твердости используют частотный вариант импедансного метода контроля (см. рис. 2, *з*). Датчик имеет вид стержня с алмазным индентором на конце. Его прижимают к поверхности изделия. Глубина внедрения индентора с увеличением твердости уменьшается. Это изменяет собственную частоту колебаний стержня. Прибор, с помощью которого измеряют частоту, градуирован непосредственно в единицах твердости по Роквеллу. Основанный на этом принципе твердомер «Сонодур» (США, фирма Бренсон) имеет пределы измерения *HRC* 20—40.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агранат Б. А., Кириллов О. Д., Хавский Н. Н. Ультразвук в гидрометаллургии. М., «Металлургия», 1969, 303 с.
2. Абрамов О. В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М., «Металлургия», 1972, 256 с.
глухих глубоких отверстий.— В кн.: Электрофизические и электрохимические методы обработки. НИИМАШ, 1969, № 5—6, с. 77—78.
3. Ангелов Г. О механизме уплотнения структуры металлов и сплавов под действием вибрации и ультразвука.— «Известия ВМЕИ», т. XXIV, кн. I. София, 1970, с. 133—156.
4. Ангелов Г., Длъгников И. Относительное влияние ультразвука на спонтанную кристаллизацию металлов.— «Известия ВМЕИ», т. XXVII, кн. I, София, 1971, с. 37—48.
5. Ангелов Г. Влияние ультразвука на кристаллизацию белого чугуна.— «Годишник МЕИ», т. XII, кн. III, София, 1963, с. 33—52.
6. Ангелов Г. Влияние ультразвука и вибрации на жидкотекучесть силумина.— «Литейное производство», 1969, № 2, с. 28—29.
7. Ангелов Г. Влияние ультразвука на усадку силумина Ал9.— «Известия ВМЕИ», кн. I. София, 1970, с. 15—23.
8. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., Изд. иностр. лит., 1956, 726 с.
9. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., «Наука», 1966, 168 с.
10. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев, «Техника», 1972, 312 с.
11. Гутин Л. Я. Магнестрикционные излучатели и приемники. «ЖТФ», 1945, т. 15, № 4—5, с. 239—246 и № 15, с. 924—938.

12. Гинин В. Н., Мамет Б. Т. Ультразвуковая очистка глухих глубоких отверстий. — В кн. Электрофизические и электрохимические методы обработки. НИИМАШ, 1969, № 5—6, с. 77—78.

13. Гутнова Л. Б. О возможности использования эталонного загрязнения для контроля эффективности работы установок ультразвуковой очистки. — В кн.: Новые разработки в ультразвуковой технике. ЛДНТП, 1972, с. 14—20.

14. Иванова Т. Н., Панов А. П., Пискунов Ю. Ф. Опыт внедрения ультразвуковой очистки деталей топливной аппаратуры. — В кн.: Применение ультразвука в машиностроении. М., 1972, с. 140—144.

15. Источники мощного ультразвука. Под ред. Л. Д. Розенберга. М., «Наука», 1967, 379 с.

16. Келлер О. К., Самолетов В. К., Супонина М. А. Технология ультразвуковой очистки. 1971, ЛДНТП, с. 34.

17. Келлер О. К., Донской А. В., Кратыш Г. С. Ультразвуковые электро-технологические установки. Л., «Энергия», 1968, 276 с.

18. Коковалов Е. Г., Дроздов В. М., Тявловский М. Д. Динамическая прочность металлов. Минск, «Наука и техника», 1969, 304 с.

19. Коршунов Б. С. Удаление заусенцев с мелких деталей ультразвуковым способом. — «Вестник машиностроения», 1969, № 12, с. 40—41.

20. Кондратьев А. Ф., Эунап А. В. Ультразвуковые излучатели для очистки глубоких отверстий. — «Электрофиз. и электрохим. методы обработки», НИИМАШ, 1969, № 5—6, с. 37—40.

21. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Механика сплошных сред. Изд-во АН СССР, 1954, 322 с.

22. Лоцилов В. И., Леоничев В. А., Завьялов Л. И. Ультразвуковой сварочный инструмент для сварки биологических тканей. — В кн.: Применение пластмасс в машиностроении. Под ред. Г. А. Николаева. М., «Машиностроение», 1969 (НТО Машпром), 56 с.

23. Макаров Л. О., Розенберг Л. Д. О механизме ультразвуковой очистки. — «Акустический журнал», 1957, № 4, 374 с.

24. Марков А. И. Резание труднообрабатываемых материалов при помощи ультразвуковых и звуковых колебаний. М., Машгиз, 1962, 332 с.

25. Марков А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов, М., «Машиностроение», 1968, 367 с.

26. Марков А. И., Озерова М. А., Устинов И. Д. Применение ультразвука при алмазном выглаживании деталей. — «Вестник машиностроения», 1973, № 9, с. 57—61.

27. Мицкевич А. М. Напряженное состояние в области соединения при ультразвуковой сварке металлов. — В кн.: Новые разработки в ультразвуковой технике. ЛДНТП, 1972, с. 23—30.

28. Мощные ультразвуковые поля. Под ред. Л. Д. Розенберга. М., «Наука», 1968, 267 с.

29. Муханов И. И., Голубев Ю. М. Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой. — «Вестник машиностроения», 1966, № 11, с. 52—53.

30. **Неразрушающие** испытания. Под ред. Р. Мак-Мастера, т. 2, М., «Энергия», 1965, 375 с.
31. **Непайрас Е. А.** Некоторые вопросы ультразвуковой очистки. — «Акустический журнал», 1962, № 6, с. 1—7.
32. **Панов А. П., Пискунов Ю. Ф.** Ультразвуковая очистка деталей топливной аппаратуры. — «Ультразвуковая техника», 1966, вып. 4.
33. **Пискунов Ю. Ф.** Ультразвуковая очистка деталей излучателями — концентраторами с большим коэффициентом усиления. — В кн.: Новые методы обработки металлов ультразвуком. НИИМАШ, М., 1965, с. 27—28.
34. **Петруха П. Г., Марков А. И., Устинов И. Д.** Ультразвуковое сверление глубоких отверстий. — «Вестник машиностроения», 1970, № 10, с. 54—57.
35. **Пискунов Ю. Ф.** Ультразвуковая обработка хрупких материалов непрофилированным инструментом. — В кн.: Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1969, № 5—6, НИИМАШ, с. 71—76.
36. **Погодин — Алексеев Г. И.** Ультразвуковая обработка расплавов в металлургии. М., «Машиностроение», 1969, 96 с.
37. **Розенберг Л. Д., Казанцев В. Ф., Макаров Л. О.** Ультразвуковое резание. М., изд-во АН СССР, 1962, 251 с.
38. **Северденко В. П., Клубович В. В., Степаненко А. В.** Прокатка и волочение с ультразвуком. Минск, «Наука и техника», 1970, 180 с.
39. **Северденко В. П., Клубович В. В., Степаненко А. В.** Обработка металлов давлением с ультразвуком. Минск, «Наука и техника», 1973, 286 с.
40. **Силин Л. Л., Баландин Г. Ф., Коган М. Г.** Ультразвуковая сварка. М., Машгиз, 1962, 252 с.
41. **Скучик Е.** Основы акустики, т. I. М., изд-во иностр. лит., 1958, 380 с.
42. **Стрет Д. В. (Релей).** Теория звука. М., Гостехиздат, 1955, т. I, 456 с., т. II, 423 с.
43. **Спринг С.** Очистка поверхности металлов. «Мир», 1966, 349 с.
44. **Статников Ю. Г.** Микропотоки у газового пузырька в жидкости. — «Акустический журнал», 1967, вып. 3, с. 464—466.
45. **Теумин И. И.** Ультразвуковые колебательные системы. М., Машгиз, 1959, 231 с.
46. **Ультразвуковые преобразователи.** Под ред. Е. Кикучи. М., «Мир», 1972, 424 с.
47. **Физическая акустика.** Под ред. У. Мэзона, т. I. М., «Мир», [1966—1973].
48. **Физические основы ультразвуковой технологии.** Под ред. Л. Д. Розенберга. М., «Наука», 1970, 688 с.
49. **Харкевич А. А.** Теория преобразователей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948, 191 с.
50. **Холопов Ю. В.** Ультразвуковая сварка. Л., «Машиностроение», 1972, 152 с.
51. **Шрайбер Д. С.** Ультразвуковая дефектоскопия. «Металлургия», 1965, 316 с.
52. **Эскин Г. И.** Ультразвуковая обработка расплавов алюминия. М., «Металлургия», 1965, 224 с.
53. **Antony O. A.** Technical Aspects of Ultrasonic Cleaning. «Ultrasonics», 1963, 1, p. 194.

54. **Crowford A. E.** The application of ultrasonics to thermoplastic welding. «Applied Plastics», 1968, Febr.
55. **Herbst I. Ch.** Improvements in or relating to apparatus for performing an operation on a workpiece. Eng. pat., kl. COZE 3D (c. 23 G 5/04), N 1271943 or 8.VII.69.
56. **Krautkrämer J., Krautkrämer H.** Ultrasonic Testing of Materials. Berlin (Heidelberg), 1969.
57. **Markov A. I.** Ultrasonic machining of intractable materials, London, Iliffe books, 1966, 350 p.
58. **Markov A. I., Ustinov I. D.** A study of the Ultrasonic diamond drilling of non-metallic materials.—«Industrial Diamond Review» 1972, March, p. 97—99.
59. **Neppiras E. A.** Ultrasonic machining. — «Metalworking Production», v. 100, N 27—31, 33—34.
60. **Neppiras E. A.** Ultrasonic Welding of metals. — Ultrasonics», July-September, 1965, p. 123—126.
61. **Neppiras E. A.** Ultrasonic plastics Welding.—Ultrasonics», v. 10, 1972, N 1, p. 10—16.
62. **Nolting B. E., Neppiras E. A.** Cavitation Produced by Ultrasonics. — «Proc. Phys. Soc.», 1950, N 9, p. 674—679.
63. **Pohlman R., Werden B.** The Ultrasonic Cleaning Process. — «Ultrasonics», 1972, July, p. 156—161.
64. **Shiro Benjamin P.** Method and apparatus for applying ultrasonic energy to a workpiece. Pat. USA; kl. 134—I (BO8 7/02), № 3535159 or 7.XII.1967.
65. **Welding Handbook** 4 ed. N Y Amer. Weld. Soc., 1964.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	3
	Принятые обозначения	5
<i>Глава I.</i>	Физические основы ультразвуковой техники и технологии (Марков А. И.)	7
	§ 1. Свободные и вынужденные механические колебания	9
	§ 2. Звуковые волны в газах, жидкостях и твердых телах	13
	§ 3. Ультразвуковые преобразователи, концентраторы и волно- воды	17
	§ 4. Акустическая кавитация и акустические потоки	24
<i>Глава II.</i>	Применение ультразвука при производстве металлов и спла- вов (Ангелов Г. С.)	27
	§ 1. Методы введения ультразвука в расплавленный металл	28
	§ 2. Влияние ультразвука на физико-химические свойства метал- лических расплавов	32
	§ 3. Влияние ультразвука на растворимость металлов и получе- ние дисперсных сплавов	47
	§ 4. Модифицирование металлов и сплавов в ультразвуковом поле	47
	§ 5. Ультразвуковая дегазация и рафинирование металлов и сплавов	49
	§ 6. Влияние ультразвука на кристаллизацию и свойства метал- лов и сплавов	56
<i>Глава III.</i>	Применение ультразвука в литейном производстве (Анге- лов Г. С.)	69
	§ 1. Применение ультразвука для подготовки формовочных ма- териалов	70
	§ 2. Влияние ультразвука на литейные свойства металлов и сплавов	75
	§ 3. Применение ультразвука при производстве отливок	80
<i>Глава IV.</i>	Влияние ультразвука на фазовые и структурные изменения и свойства металлов и сплавов, находящихся в твердом со- стоянии (Ангелов Г. С.)	83

§ 1. Влияние ультразвука на диффузию металлов и сплавов, находящихся в твердом состоянии	84
§ 2. Методы введения ультразвука в твердые тела	85
§ 3. Влияние ультразвука на полиморфные превращения	86
§ 4. Влияние ультразвука на свойства металлов и сплавов в твердом состоянии	88
Глава V. Применение ультразвука при термической и химико-термической обработке сплавов (Ангелов Г. С.)	95
§ 1. Старение сплавов под действием ультразвука	96
§ 2. Применение ультразвука при закалке и отпуске сплавов	100
§ 3. Влияние ультразвука на графитизацию белого чугуна	102
§ 4. Влияние ультразвука на процессы химико-термической обработки сплавов	105
Глава VI. Ультразвук в процессах пластического деформирования (Северденко В. П., Степаненко А. В.)	107
§ 1. Влияние ультразвука на процесс пластической деформации	108
§ 2. Ультразвуковые колебательные системы для обработки металлов давлением	112
§ 3. Свободная и закрытая осадка металлов и сплавов	118
§ 4. Прессование металлов и сплавов с наложением ультразвуковых колебаний	120
§ 5. Листовая штамповка с применением ультразвука	125
Глава VII. Ультразвуковая сварка и пайка (Мицкевич А. М.)	133
§ 1. Основные представления о процессе ультразвуковой сварки металлов	135
§ 2. Основы технологии ультразвуковой сварки	144
§ 3. Колебательные системы для сварки	147
§ 4. Промышленное применение ультразвуковой сварки металлов	151
§ 5. Ультразвуковая сварка полимерных материалов	152
§ 6. Ультразвуковое лужение и пайка металлов	155
Глава VIII. Применение ультразвука при механической обработке и поверхностном упрочнении труднообрабатываемых материалов (Марков А. И.)	157
§ 1. Ультразвуковое снятие заусенцев	159
§ 2. Ультразвуковая размерная обработка деталей из твердых хрупких материалов	160
§ 3. Ультразвуковое алмазное сверление глубоких отверстий в хрупких неметаллических материалах	164
§ 4. Применение ультразвука при шлифовании труднообрабатываемых материалов	170
§ 5. Ультразвуковая интенсификация процессов резания труднообрабатываемых материалов	171
§ 6. Ультразвуковое поверхностное упрочнение и алмазное выглаживание деталей	172
Глава IX. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей (Пискунов Ю. Ф.)	181
§ 1. Факторы, определяющие эффективность ультразвуковой очистки	183
§ 2. Технология ультразвуковой очистки	189

§ 3. Контроль качества очистки	194
§ 4. Оборудование для ультразвуковой очистки прецизионных деталей	196
<i>Глава X. Ультразвуковая дефектоскопия и контроль (Ермолов И. Н.)</i>	209
§ 1. Области применения и классификация ультразвуковых методов контроля	210
§ 2. Аппаратура для контроля эхо-методом	213
§ 3. Искатели ультразвуковых дефектоскопов	216
§ 4. Методика контроля изделий импульсным эхо-методом	220
§ 5. Ультразвуковые толщиномеры	228
§ 6. Ультразвуковой контроль физико-механических свойств материалов	230
Список литературы	233

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

(Болгаро-советское издание)

Редактор издательства *Т. С. Грачева*
Технические редакторы *Е. П. Смирнова*
и *Т. И. Андреева*
Корректор *Л. Я. Шабашова*
Переплет художника *Ф. Ю. Элинбаума*

Сдано в набор 21/IV 1975 г.
Подписано к печати 23/X 1975 г. Т-00535
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1.
Усл. печ. л. 15,0. Уч.-изд. л. 14,75.
Тираж 12 500 экз. Заказ 424. Цена 1 р. 20 к.

Издательство «Машиностроение», 107885.
Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.

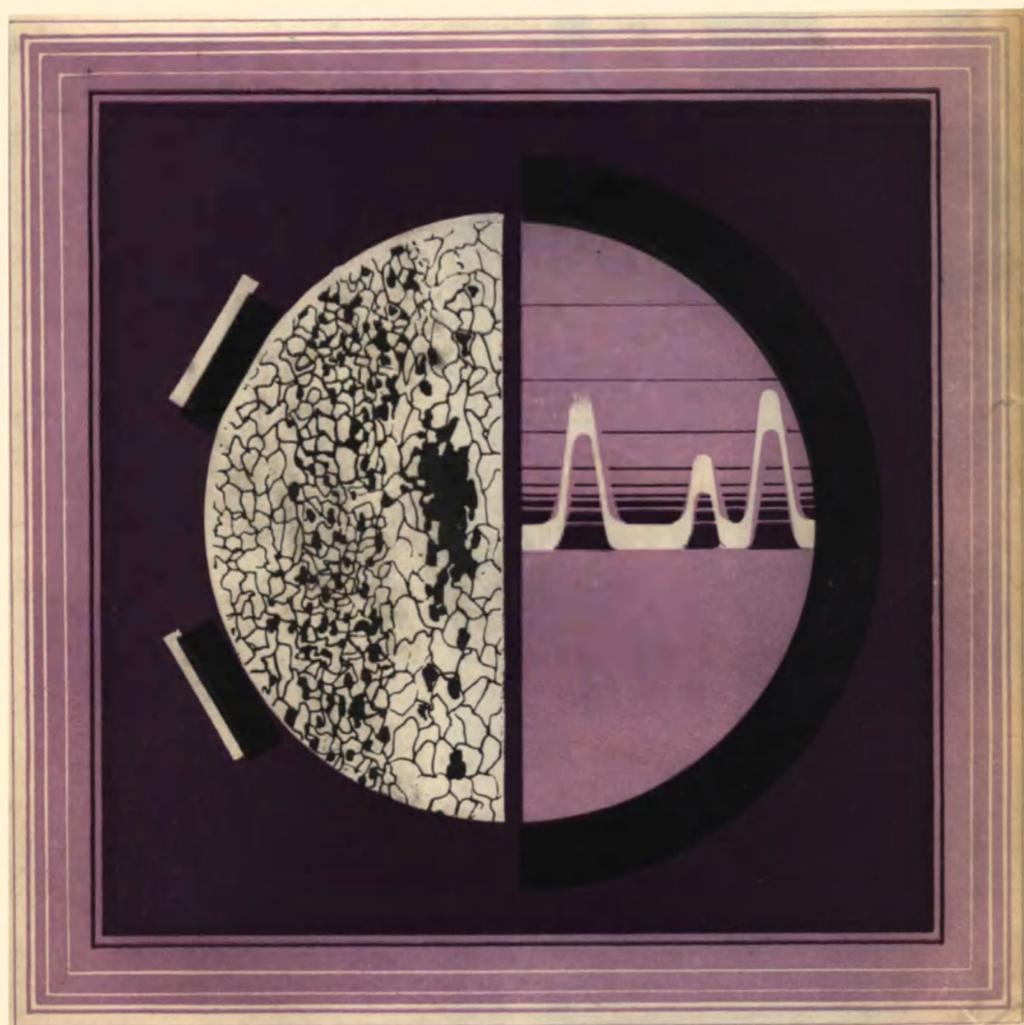
Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета
Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

применение УЛЬТРА- ЗВУКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1 р. 20 к.



Ультразвук — один из современных электрофизических методов обработки, который позволяет повысить научно-технический уровень многих технологических процессов в машиностроении, усовершенствовать, а в некоторых случаях принципиально по-новому решать технологические вопросы производства.

В книге впервые обобщен многолетний опыт использования ультразвуковых колебаний для улучшения качества изделий, интенсификации технологических процессов, а также дефектоскопии, контроля и измерений в различных отраслях промышленности.

Авторы книги — болгарские и советские специалисты в области ультразвуковой техники и технологии.