

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

9/1977

СЕРИЯ
ТЕХНИКА

В. В. Клубович
П. П. Прохоренко
УЛЬТРАЗВУК
В ТЕХНОЛОГИИ



НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия «Техника»
№ 9, 1977 г.
Издается ежемесячно с 1961 г.

В. В. Клубович,

член-корреспондент АН БССР,
доктор технических наук

П. П. Прохоренко,

кандидат технических наук

УЛЬТРАЗВУК В ТЕХНОЛОГИИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1977

Клубович В. В. и Прохоренко П. П.
K51 **Ультразвук в технологии. М., «Знание», 1977.**

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 9. Издается ежемесячно с 1961 г.)

В брошюре рассматриваются возможности использования колебаний ультразвуковой частоты в современной технологии. Рассказывается о том, что нового приносит ультразвук в процессы обработки металлов давлением — листовую штамповку, прессование, прокатку, волочение; как с его помощью обрабатывать жидкие среды, паять и сваривать металлы и сплавы, осуществлять неразрушающий контроль и т. д.

Материал рассчитан на читателя, интересующегося проблемами современной техники.

20404

534

Физика процесса

Первые успехи ультразвука в практике относятся к 40—50-м годам нашего столетия. Они связаны с работами советских ученых: С. Соколова, Л. Розенберга, И. Теумина, Б. Кудрявцева, Б. Аграната, В. Северденко, Е. Коновалова. За этот сравнительно небольшой промежуток времени энергию ультразвуковых колебаний стали применять в металлургии, машиностроении, химической, пищевой и других отраслях промышленности.

Без ультразвука современная техника и технология немыслимы. Ультразвук долбит труднообрабатываемые материалы, смешивает графит с бронзой, очищает детали, старит вина, находит дефекты в изделиях, определяет структуру металлов, контролирует толщину листов и качество сварных швов, ориентирует человека в пространстве, вводит информацию в ЭЦВМ, показывает уровень жидкости в емкостях, измеряет расстояния, лечит болезни и ставит диагнозы.

Технические возможности ультразвука далеко не исчерпаны. Исследования советских и зарубежных ученых только последних лет установили перспективность использования его при обработке металлов давлением, для интенсификации технологических процессов, основанных на массопереносе жидких сред в капиллярно-пористых телах, для неразрушающего контроля методом проникающих жидкостей. Продолжается работа по повышению эффективности генераторов и излучателей ультразвуковых колебаний. Ее результаты помогут снизить их стоимость и улучшить параметры, что расширит сферу применения ультразвука в народном хозяйстве.

Упругие колебания — это периодическое изменение состояния среды. Упругие волны распространяются в материальной среде благодаря упругим связям между частицами вещества. При прохождении волны частицы среды определенным образом отклоняются от положения равновесия. Если частица отклонилась, то упругие силы будут стремиться вернуть ее в первоначальное положение. Но это может привести к тому, что соседние частицы окажутся выведенными из состояния равновесия. Инерция среды заставляет их колебаться около среднего положения и после прохождения волны.

Человеческое ухо воспринимает упругие колебания довольно низких частот — приблизительно от 16 до 16 тыс. колебаний в секунду. Когда частота колебаний частиц среды лежит в указанных пределах, то упругие волны воспринимаются нами как звук. Когда же частота колебаний превышает верхний порог слышимости человеческого уха, то колебания принято называть **ультразвуковыми**. Верхний предел частот ультразвуковых колебаний ограничивается частотами около 10^{10} Гц и граничит с гиперзвуковыми, частоты которых соответствуют тепловым колебаниям молекул в твердых телах.

Упругие колебания во всех диапазонах частот физически эквивалентны. Излучение и распространение их подчиняются одним и тем же законам акустики.

Рассмотрим, как происходит распространение колебаний в среде. Пусть колеблющаяся материальная точка находится в среде, все частицы которой связаны между собой. Ее колебания создают упругие напряжения, которые в свою очередь вызывают колебания соседних частиц среды (энергия колебания материальной точки передается окружающим частицам), а последние передают их новым частицам и т. д. Распространение колебаний в среде, процесс периодический в пространстве и во времени, называется волной.

Упругие волны бывают нескольких типов. Тип определяется видом траекторий, по которым движутся элементы среды. Если траектория параллельна направлению распространения волны, то такая волна называется **продольной**; если перпендикулярна — то **поперечной**, или **сдвиговой**. Поперечные волны могут распространяться только в твердых телах, в жидкостях и газах — нет, так как они не имеют модуля сдвига (упругости формы). Кроме того, в твердых телах могут иметь мес-

то **поверхностные** волны, не проникающие внутрь тела, волны Релея. При распространении волны может изменяться объем среды. Продольные волны, как правило, волны сжатия, поперечные — преимущественно сдвига.

В технике чаще применяют продольные ультразвуковые волны, так как они распространяются и в твердых телах, и в жидкостях, и в газах. Кроме того, их легко генерировать и обнаруживать. Скорость их распространения во многих средах невелика, следовательно, длина продольных ультразвуковых волн в обычных условиях мала по сравнению с поперечным сечением площади излучателя. Это позволяет сконцентрировать энергию в виде конусообразного пучка с небольшим углом расхождения.

Ультразвуковые волны, встречая на своем пути препятствие, отражаются от него. Это их свойство используется для обнаружения различных дефектов в металлах, сплавах и др. Ультразвук распространяется прямолинейно, он не огибает препятствий, размеры которых значительно превышают длину волны. Но если волна проходит вблизи края препятствия, то наблюдается некоторая дифракция — «загибание» волн.

Угол отражения ультразвуковых волн равен углу падения. Однако не вся энергия падающей волны переходит в энергию отраженной. Часть ее проникает в твердое тело. Величина же энергии отраженной волны зависит от волнового сопротивления среды или, иначе, от удельного акустического сопротивления (произведение плотности среды на скорость звука в нем).

При падении плоской ультразвуковой волны под косым углом на границу раздела двух сред наряду с отраженной образуется преломленная волна во второй среде, причем направление ее распространения не совпадает с направлением падающей. Угол между направлением распространения преломленной волны и перпендикуляром к границе раздела двух сред в точке падения волны называется углом преломления.

В однородной среде ультразвуковая волна постепенно затухает. Уменьшение амплитуды колебаний, а значит, и интенсивности с удалением от источника колебаний объясняется внутренним трением в среде, ее теплопроводностью.

Если сквозь среду одновременно проходит несколько ультразвуковых волн, то там, где они пересекаются, ко-

лебания налагаются друг на друга. Волны складываются, в результате интерференции в одних местах колебания усиливаются, а в других ослабевают. Частный результат интерференции двух волн — образование так называемых **стоячих** волн, которые возникают при наложении друг на друга двух встречных плоских волн с одинаковыми амплитудами.

В стоячей волне существуют точки, в которых амплитуда смещения равна нулю. Они называются **узлами** стоячей волны. Между узлами располагаются точки, в которых амплитуда смещений максимальна и равна сумме амплитуд обоих слагаемых колебаний. Эти точки — **пучности** стоячей волны. Иногда образование стоячих волн нежелательно, например, при дефектоскопии. В этом случае необходимо согласовывать акустические сопротивления систем, пропускающих волны.

Энергия единицы объема среды, в которой распространяется волна, складывается из кинетической и потенциальной. В силу того что энергия не остается локализованной в данном участке, а перемещается, введено понятие интенсивности, или силы звука: энергия, проходящая в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны. Интенсивность связана простой зависимостью с плотностью энергии.

Поняв природу ультразвука, разобравшись в механизме его возникновения и распространения, перейдем к практике его использования.

Обработка материалов

Машиностроению и приборостроению требуется все более широкий спектр твердых и хрупких материалов, таких, как вольфрам, тантал, молибден, германий, феррит, корунд, закаленные стали, титановые сплавы, керамика, стекло и многие другие. Основные сложности при изготовлении изделий из этих материалов — очень плохая обрабатываемость, а следовательно, длительность механического воздействия. Необходимо, значит, найти соответствующие принципиально новые и эффективные методы.

Для того чтобы, например, сделать отверстия в таких материалах, используют электроэрозию. Однако

электроэрозионный метод годится только для токопроводящих материалов, к тому же он «страдает» серьезными недостатками — малой точностью и плохим качеством поверхности отверстия (требуется последующая доводка и отделка).

Принцип ультразвуковой обработки материалов основан на совместном действии ультразвуковых колебаний и абразивных материалов в виде суспензии высокодисперсных острогранных кристалликов. Они, попадая в зазор между обрабатываемой деталью и продольно вибрирующим инструментом, шлифуют или долбят его. В результате в материале образуется углубление. Съем материала происходит по поверхности, перпендикулярной к направлению колебаний инструмента. Большое количество удаляющихся абразивных зерен ($30\text{--}100$ тыс./см²), а также высокая частота ударов ($10\text{--}30$ кГц) обуславливают высокую интенсивность процесса. Вибрирующий с большой частотой и небольшой амплитудой инструмент, ударяя по зернам абразива, заставляет их внедряться в обрабатываемый материал. Под долбящим воздействием абразива мельчайшие частички материала отскакивают от его наружной поверхности. Размер их незначителен, но поскольку количество ударов велико, то обработка идет сравнительно быстро. Возникающие кавитационные¹ явления в суспензии способствуют интенсивному перемешиванию абразивных зерен под инструментом и замене изношенных зерен новыми.

При ультразвуковой обработке инструмент не соприкасается с деталью, но механическое воздействие на него то же, что и на деталь. Чтобы уменьшить износ, его изготавливают из сравнительно мягкого материала. Исследования показали, что эрозия инструмента происходит в основном из-за воздействия кавитации. При захлопывании кавитационных пузырьков на торце инструмента в нем образуется углубление — результат разрушающего действия пузырьков при каждом их захлопывании.

Основные технологические параметры, характеризующие ультразвуковую обработку, — производительность, точность обработки, качество поверхности и износ инструмента. Кроме того, имеют значение матери-

¹ К а в и т а ц и я — образование в жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью.

ал детали и инструмента, амплитуда и частота колебаний, вид абразива и размер зерен, степень концентрации абразива в суспензии и т. д.

Производительность ультразвуковой обработки — один из важнейших параметров — зависит от многих взаимосвязанных факторов. Так, она возрастает при увеличении амплитуды колебаний по закону, близкому к линейному. При амплитуде колебаний 0,12 мм скорость обработки твердых сплавов примерно 0,4 мм/мин, а керамики — 8 мм/мин. При уменьшении амплитуды скорость уменьшается до 0,03—0,035 мм и 0,15—2,2 мм/мин соответственно. Скорость обработки также зависит от амплитуды смещений инструмента. На практике приходится использовать колебания с двойной амплитудой смещения, порядка 50—75 мкм, так как их величина ограничивается механической прочностью концентратора.

Число ударов частиц абразива в секунду и сила удара пропорциональны частоте колебаний. Поэтому при постоянной амплитуде следует ожидать, что скорость обработки будет увеличиваться с увеличением частоты пропорционально квадрату последней. Но квадратичная зависимость производительности обработки от частоты справедлива только для очень низких частот. Например, при изменении частоты в пределах 0—500 Гц квадратичная зависимость реализуется. При дальнейшем увеличении частоты колебаний ее влияние на скорость обработки очень незначительно, а в области ультразвуковых частот (16—25 кГц) оно совсем не наблюдается.

Существенно влияет на производительность обработки давление инструмента на деталь. При ультразвуковой обработке мы наблюдаем оптимум этого соотношения, т. е. давление, соответствует максимальной скорости съема обрабатываемого материала. Производительность обработки линейно возрастает при увеличении давления от нуля до оптимальной величины, после чего его увеличение снижает скорость обработки.

На скорости отражаются и величина зерна абразива, и его вид. Поскольку абразивные зерна являются режущим элементом, то твердость их должна быть равна или выше твердости обрабатываемого материала. Наибольшая скорость достигается при использовании в качестве абразива зерен карбида бора, а при обработке алмазов — алмазной пыли. Для более мягких мате-

риалов и керамики можно применять абразив более низкой твердости (окись алюминия), однако скорость обработки будет значительно меньше, чем при использовании карбида бора.

Концентрация абразива в суспензии также значима. При увеличении концентрации абразивной суспензии (от нуля) скорость обработки возрастает почти прямолинейно: при концентрации порядка 30% рост производительности замедляется. По данным ряда исследователей максимальная скорость обработки наблюдается при концентрации абразива в 50% по объему как для карбида бора, так и для карбида кремния. Необходимо, чтобы абразив все время сменялся в зоне обработки (под инструментом). Подавать суспензию с концентрацией абразива более 50—60% с требуемой интенсивностью технически трудно. Поэтому на практике суспензия более высокой концентрации не используется.

Жидкость для абразивной суспензии в значительной мере определяет скорость ультразвуковой обработки. Она должна быть с хорошей смачивающей способностью, высокой плотности и теплопроводности, невысокой вязкости. Наилучший вариант — вода, а наихудший — глицерин.

Производительность ультразвуковой обработки зависит и от величины обрабатываемой площади. С ее увеличением скорость съема материала уменьшается, так как это уменьшает амплитуду колебаний инструмента. Другое следствие — ухудшение условий подвода абразива в места обработки и удаления материала с обрабатываемой детали.

При ультразвуковой обработке некоторых твердых и хрупких материалов основное требование — **точность** выполнения технических условий. На точность влияют величина зерна абразива, глубина обработки, зазор между инструментом и стенкой отверстия, поперечные колебания инструмента, его износ. Да и другие факторы, например прецизионность оборудования, правильность соединения инструмента, концентратора и магнитострикционного пакета, относительного расположения инструмента и детали и т. д.

Точность изготовления сквозных отверстий в основном определяется однородностью абразива, размером его зерен и наличием поперечных колебаний инструмента. Она снижается, если величина зерен различна. В

ходе процесса под ударами инструмента зерна разрушаются; чтобы абразив изнашивался равномерно, необходимо его хорошо перемешивать во время работы.

На точность ультразвуковой обработки отверстий влияют и поперечные колебания инструмента. Они — следствие несовершенства конструкции станка или его неисправности. Это проявляется в увеличении зазора между инструментом и боковыми стенками отверстия (особенно на входе), возникновении сколов краев отверстия, а также в неравномерном износе инструмента.

Точность изготовления глухих отверстий зависит от износа инструмента. Из-за износа отверстие приобретает дополнительную конусность, острые углы округляются. Поэтому необходимо использовать методы последовательного приближения: после чернового прохода требуется чистовой, а иногда даже и доводочные.

Износ инструмента определяется материалом — из которого он изготовлен, и обрабатываемым. Так, при обработке твердого сплава лучшие материалы для инструмента — сталь-серебрянка, стекло, керамика и другие твердые материалы, хотя изготовление инструмента из них затруднено.

Чистота поверхности при ультразвуковой обработке так же, как и точность, зависит от величины абразивных зерен, амплитуды колебаний, свойств обрабатываемого материала, суспензии и др. С увеличением амплитуды колебаний чистота поверхности ухудшается. При обработке стекла с амплитудой колебаний инструмента 0,03 мм максимальная высота микронеровностей 32 мкм, а при амплитуде 0,018 мм — 20 мкм, практически на один класс меньше.

Установлено, что чистота поверхности повышается с увеличением твердости обрабатываемого материала. Это объясняется тем, что зерна абразива проникают на меньшую глубину и соответственно уменьшается величина скалываемых частиц.

Наибольшее влияние на чистоту обработки поверхности оказывает величина зерен абразива. С их ростом микронеровности также растут (особенно на боковой стенке обрабатываемого отверстия).

При ультразвуковой обработке на поверхности отверстия иногда появляются изъёмы (продольные канавки и щелевидные полоски, глубина которых не превышает 0,1 мм, а ширина — 0,3 мм). Они могут распола-

гаться по всей поверхности отверстия и инструмента. Дело здесь в кавитационных явлениях в абразивной суспензии — кавитационной эрозии. Из-за нее чистота боковых поверхностей обрабатываемого отверстия на 1—2 класса ниже, чем чистота поверхности дна. Поэтому ультразвуковую обработку, как правило, проводят при наивысшей скорости резания, чтобы кавитационная эрозия не успевала развиваться.

В практике обработку разделяют на два этапа (для получения требуемой чистоты поверхности — предварительный и окончательный. При предварительной обработке применяют воду, а при окончательной — смазочные масла, что способствует повышению чистоты обработки.

В настоящее время для ультразвуковой обработки твердых и хрупких материалов применяются ультразвуковые станки различного назначения: универсальные и специальные, стационарные и переносные. Мощность ультразвуковых станков может быть различной: от 100 Вт до 4 кВт. В конструкцию их входят акустическая головка с колебательной системой и рабочим инструментом, рабочий стол с механизмами координатных и круговых перемещений, механизм рабочей подачи инструмента на деталь или стола с деталью на инструмент, система подачи и сбора абразивной суспензии.

В Советском Союзе создано более 30 типов ультразвуковых станков различного назначения и мощности, которая выбирается в зависимости от величины обрабатываемой поверхности.

Основные теоретические характеристики некоторых универсальных ультразвуковых станков приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Модель	Мощность, кВт	Производительность по стеклу, мм ³ /мин	Максимальная площадь обработки, мм ²	Максимальная глубина обработки, мм
4770У	0,05—0,10	50	20	5
4770	0,25—0,40	300	80	15
4771	0,4	1300	180	60
4772А	1,6	4000	1200	40
4773А	4,0	9000	3000	200

Широко применяются в промышленности и специализированные ультразвуковые станки. В табл. 2 приведены основные технические характеристики некоторых специализированных ультразвуковых станков.

Таблица 2

Модель станка	Основное назначение	Акустическая мощность, кВт	Производительность по стеклу, мм ³ /мин	Диаметр обрабатываемых отверстий, мм	Максимальная глубина обработки, мм
НУПС	Обработка мелких отверстий	0,1	60	0,2—2,5	10
МЭ-22	Обработка рабочего отверстия алмазных фильер	0,1	—	0,3—1,2	4
УЗА-5	Обработка рабочего отверстия волок, фильер	0,12	60	0,1—2,9	4
ЛЭ-400	Обработка мелких отверстий, пазов и щелей в мелких деталях	0,2	90	0,2—10	10
УЗСН-3, УЗСН-4	Нанесение рельефно-художественных изображений	0,2	90	—	10
МЭ-32	Обработка рабочего отверстия алмазных фильер	0,4	100	0,5—15	10
4770А	Раскрой на квадраты полупроводниковых материалов	0,4	300	1—50	15
УЗСК-40	Нанесение рельефно-художественных изображений	1,5	100	10—40	20
2УПС	Обработка твердых сплавов	1,5	1200	До 40	25
ЛЭ-401	Нанесение рельефно-художественных изображений	1,5	1000	До 40	5

Ультразвуковой способ обработки твердых и хрупких материалов эффективен при изготовлении твердосплавных матриц штампов, волок и пресс-форм, металлорежущего инструмента из твердого сплава и минералокерамики, дегалей из стекла, кварца, флюорита и ти-

таната бария, из ферритов и керамики, используемых в радиотехнике и радиоэлектронике, деталей из полупроводниковых материалов (германия и кремния), из алмаза технических камней и самоцветов, для клеймения и гравирования, а также в зубоврачебной технике.

Детали из твердых сплавов — взамен стальных — значительно улучшают качество изделий, повышают стойкость инструмента. Однако изготовить их весьма трудно. Использование же ультразвука уменьшает трудоемкость этого процесса.

Применение твердосплавных штампов вместо стальных дает значительный экономический эффект, так как их стойкость в несколько десятков раз выше. Ультразвуковой способ позволяет изготавливать цельные штампы вместо составных. Он наиболее эффективен при обработке неразъемных матриц сложной формы, обеспечивает достаточную точность и чистоту изготовления, поскольку это способ окончательной обработки.

Изготавливают твердосплавные матрицы вырубных штампов в несколько этапов:

прошивка предварительного сквозного отверстия (припуск 0,1—1 мм) электроискровым методом;

черновая ультразвуковая обработка с применением крупного абразива из карбида бора;

чистовая ультразвуковая обработка с обратной стороны (мелким абразивом);

ультразвуковая калибровка для уменьшения конусности.

Применение ультразвука весьма целесообразно при обработке деталей из стекла, особенно при изготовлении точных оптических деталей, а также при фасонной обработке кварца. В большинстве случаев он позволяет увеличить производительность. Так, при вырезании призм продолжительность обработки сокращается с 6 ч до 1 мин, причем значительно уменьшается брак.

Значительный эффект получается при прошивке в оптических деталях отверстий сложной конфигурации: затраты времени снижаются в несколько десятков раз; для деталей с отверстиями диаметром до 10 мм производительность труда повышается в 3 раза по сравнению с обычными методами сверления.

Широко используются автоматы для гравирования изделий из стекла и кварца. При нанесении различных узоров диаметром от 30 до 100 мм на стеклянную по-

суду с помощью такого автомата производительность можно повысить в несколько десятков раз.

При изготовлении кварцевых резонаторов используются алмазными кругами толщиной от 1 до 1,5 мм. Однако этот способ разрезки кристаллов кварца не экономичен, расходуется много алмаза и нерационально используется кварц. Ультразвук значительно уменьшил отходы кварцевого сырья. С его помощью можно вырезать из одного и того же куска кварца в 3 раза больше пластин, чем при обработке алмазным диском.

Полупроводниковые изделия из германия и кремния в большом количестве используются в различных отраслях промышленности. Механическая обработка их обычно производится беззубыми стальными пилами или вольфрамовой проволокой. Но вследствие твердости и крайней хрупкости обрабатываемых материалов производительность при этих способах сравнительно низка. Ультразвук же, например, при вырезании круглых заготовок из пластин германия и кремния позволяет увеличить производительность в 6—8 раз, повысить точность, значительно уменьшить отходы и снизить брак.

Для производства проволоки, особенно тонкой, из цветных металлов широко применяют алмазные волокна. Их изготавливают механическим и другим методами. Но опыт показывает, что ультразвуковая обработка алмазных волокон также дает хорошие результаты и в настоящее время успешно применяется как в СССР, так и за рубежом. У нее более высокая производительность, а волокна получаются лучшего качества. Так, коническое отверстие глубиной 1 мм, диаметром 1 мм обрабатывается в течение 30 мин; абразив — водная суспензия алмазного порошка, стальная игла — инструмент. Для изготовления 25 волокон диаметром 0,6 мм механическим способом нужно, чтобы в течение 25 смен одновременно работали 15 станков; при ультразвуковой обработке того же количества волокон и в тот же срок требуется один станок.

Ультразвуковая обработка волокон — процесс высокоточный. Дело в том, что воздействующий инструмент — игла, вращающаяся со скоростью 100—110 об/мин. Усилия подачи регулируются в зависимости от диаметра: продолжительность изготовления волокна диаметром 0,3—1,2 мм составляет 3—12 ч. Время восстановления изношенных волокон примерно в 3—4 раза меньше.

Ультразвук используется и для разрезки алмазов. Обычную схему — разрезание ножевым инструментом — приспособить нельзя, так как велик линейный износ инструмента. Поэтому инструментом стал тонкий вращающийся стальной диск, а алмаз припаяли к концентратору с помощью твердого припоя.

Диск изнашивается по периметру равномерно, да и износ невелик; следовательно, им можно совершать несколько резов. Кроме того, абразивная смесь непрерывно перемешивается, следовательно, абразив в ванне не оседает. Это раз, да и условия поступления свежего абразива в зону обработки улучшаются — это два. Скорость вращения диска около 500—1000 об/мин, амплитуда колебаний 35—40 мкм, усилие подачи 0,15—0,5 кг. Алмаз шириной около 4 мм и толщиной 3 мм разрезают за 30—40 мин.

Итак, ультразвуковой способ обработки деталей из алмазов увеличивает производительность более чем в 5 раз по сравнению с традиционными.

Возьмем детали из титаната бария, керамики и ферритов (электропромышленность, радиотехника)... При вырубке, например, щелей шириной 0,5 мм в керамических втулках для ртутных выпрямителей и при изготовлении катушек индуктивности на фарфоровой основе ультразвук увеличивает производительность в 3—4 раза. Особенно удобен способ при обработке сложных деталей, от которых требуется высокая точность из этих материалов. Так, при сверлении отверстия в феррите диаметром 0,38 мм на глубину до 2,3 мм обработка длится 30 с — 6 мин в зависимости от типа феррита. Относительный износ инструмента около 1%.

Ультразвук находит себе место и при обработке твердых и хрупких материалов фрезерованием, шлифованием, при нарезании резьбы и др. В этих случаях обрабатываемая деталь должна перемещаться относительно ультразвукового инструмента, причем направление резания нормально к поверхности обрабатываемой детали (при обычных процессах движение инструмента направлено параллельно обрабатываемой детали).

Ультразвуковое фрезерование и шлифование (стекла, керамики, полупроводниковых материалов и т.д.) — весьма перспективно, поскольку позволяет обрабатывать детали больших размеров. Точность фрезерования в основном определяется точностью станка. Схема пе-

ремещения детали при ультразвуковом шлифовании такая же, как и при обычном. Точность же обработки значительно выше. Например, чистота шлифованной поверхности германиевых пластинок достигает 9-го класса.

Ультразвуком можно нарезать внутренние и наружные резьбы. Это почти единственный способ, позволяющий производить такую операцию в твердых диэлектриках. При нарезании наружной резьбы инструмент представляет собой сектор гайки, а внутренней имеет вид обычного метчика. Точность зависит от амплитуды колебаний величины абразивных зерен. Чем меньше амплитуда колебаний и абразивные зерна, тем более точной получается резьба. Производительность для разных материалов неодинакова: чем тверже материал, тем большее необходимо время.

Ультразвук успешно применяется в обработке металлов давлением. Наложенные на пластически деформируемый металл, ультразвуковые колебания увеличивают его деформируемость, снижают сопротивление деформированию. Поэтому применение ультразвука при прессовании безусловно целесообразно.

Исследовали процесс прямого и обратного **прессования** металлов и сплавов (как в обычных условиях, так и с наложением ультразвуковых колебаний) на образцах из свинца, алюминия марки А1, специального алюминиевого сплава, меди марки МЗ, армо-железа, стали 20, САП-1 и магниевое сплава МА2. Образцы — цилиндры диаметром 5—12 мм и высотой 6—16 мм. Были изучены различные варианты прессования: очаг деформации расположен в пучности смещения, а колебания подводятся к матрице или к пуансону или к матрице и пуансону одновременно; очаг деформации расположен в пучности напряжений стоячей ультразвуковой волны, причем колебания подводятся к матрице и т. д.

Необходимо было выяснить, зависит ли усилие прессования от интенсивности ультразвука? Опыты поставили при трех значениях интенсивности (амплитуды) колебаний. При простом обратном прессовании свинца усилие возрастает с 90 кг при степени деформации 11% до 900 кг при степени деформации 70%, т. е. в 10 раз. Если то же самое проделать с наложением ультразвуковых колебаний, усилие равно нулю при любой степени деформации.

Аналогична картина и при прямом прессовании свинца. Здесь в первом случае усилие возрастает от 90 кг (19%) для 1100 кг (91%); при наложении ультразвуковых колебаний усилие деформации при любой степени деформации равно нулю.

При прессовании алюминия усилие деформации максимально снижается, когда ультразвуковые колебания подводят к пуансону и матрице одновременно. Несколько меньше — при подводе только к пуансону и еще меньше — только к матрице. Когда ультразвук подан на матрицу, амплитуда колебаний в зоне деформации значительно меньше, чем если его подали на пуансон. Дело в том, что матрица присоединена непосредственно к магнитострикционному преобразователю, а пуансон — через концентратор с коэффициентом усиления 2. Значит, при одной и той же выходной мощности ультразвукового генератора амплитуда колебаний пуансона в 2 раза больше, чем матрицы. Отсюда и эффект от наложения ультразвуковых колебаний при подведении их к пуансону примерно в 2 раза больше. При задействовании же пуансона и матрицы одновременно эффект равен сумме этих двух эффектов.

Далее выяснилось, что степень влияния ультразвука при прессовании малопластичных материалов зависит в основном от величины подводимой энергии. Чем выше ее значение, тем значительней воздействие на материал.

Один из недостатков холодного прессования — различие параметров материала в продольном и поперечном сечениях изделий. Неоднозначность эта — результат изменения течения в периферийных и центральных слоях металла. Отсюда неоднородность напряженного состояния, рост остаточных напряжений, понижение пластичности. Следовательно, локализация неравномерности деформации при прессовании — задача номер один, особенно при работе с малопластичными металлами и сплавами.

Решили, что воздействие ультразвуковых колебаний на пластически деформируемый металл при прессовании изменяет характер его течения, способствует более равномерному распределению деформаций и микротвердости по поперечному сечению готовых изделий. Чтобы проверить догадку, провели исследования по прямому и обратному прессованию. Распределения де-

формаций определяли с помощью метода координатных сеток. По величине их искажений судили о характере течения металла в обычных условиях и с приложенным ультразвуком.

Выяснилось, что деформации в обычных условиях сопровождается более интенсивное течение внутренних слоев. То есть подтвердилась гипотеза о том, что неравномерность деформации при прессовании в обычных условиях больше, чем с ультразвуком. Очевидно, периферийные слои металла при участии ультразвука попадают в более благоприятные условия. Контактное трение снижается, эффективность смазки повышается, как и температура наружных слоев, — такие условия облегчают их течение.

Итак, ультразвук при прямом и обратном прессовании способствует более равномерному распределению деформации по поперечному сечению образца. Правда, у изделий, полученных обратным прессованием с ультразвуком, среднее значение микротвердости как у стенок, так и у дна несколько меньше, чем у изделий обычного прессования. При ультразвуке пластическое течение металла более интенсивно. Из-за теплового колебания атомов снижаются внутренние напряжения, металл разупрочняется, его микротвердость снижается.

Обработка металлов давлением сопровождается контактным трением между металлом и инструментом. Оно препятствует скольжению металла, увеличивает усилие деформирования, способствует образованию задиров на поверхности изделий, повышает неоднородность деформации и остаточные напряжения. Контактное трение для подавляющего числа операций обработки металлов (особенно малопластичных и труднодеформируемых) давлением — вредный фактор. При прессовании с использованием ультразвуковых колебаний удельный коэффициент трения значительно меньше, чем обычно. Причем чем больше амплитуда ультразвуковых колебаний, тем меньше коэффициент трения.

Штамповка из листового металла — один из наиболее прогрессивных технологических процессов, максимально экономный по времени и сохранению материалов. Однако разработать технологический процесс штамповки на конкретную деталь, как правило, довольно трудно. Приходится учитывать большое количество

различных факторов технологического и конструкторского характера.

Что же мешает получать детали за минимальное количество переходов и влияет на рабочее усилие — разрушение металла в месте перехода боковой стенки в дно (так называемое опасное сечение), образование гофр на фланце детали, которые затем трансформируются в заглаженные складки на стенке готового изделия?

Существует ряд способов, создающих в той или иной мере оптимальные условия процессу штамповки. Применение металла пониженной прочности, отжиг заготовок, нагрев их фланцев, охлаждение донной части вытягиваемой детали, применение эффективных технологических смазок, устройство в штампах вытяжных ребер, применение эластичных матриц, фрикционная и вибрационная штамповка и др. — вот эти способы. Нас интересуют возможности вибрационной штамповки, когда инструмент совершает колебания с ультразвуковой частотой.

Некоторое время назад в США запатентовали установку для листовой и объемной штамповки. В ней наряду со статическим усилием работают ультразвуковые колебания. Такое «сотрудничество» позволяет формировать хрупкие, труднодеформируемые металлы и снижает величину потребного усилия. Ультразвуковые колебания уменьшают трение между инструментом и заготовкой, резко ускоряют движение инструмента. Сочетание этих двух факторов позволяет формировать материалы при более низком (в 2—3 раза) усилии штамповки. Оно, это усилие, значительнее, когда колебания сообщают матрице. Кроме того, ультразвук позволил отказаться от подогрева штампа, а также устранить имевшийся ранее брак по трещинам.

В Белорусском политехническом институте исследовали штамповку цилиндрических стаканчиков диаметром до 14 мм из стали 10КПВГ, стали 20 на гидравлической испытательной машине типа ЦДМПу-10 с максимальным усилием на сжатие 30 Тс. Листовые круглые заготовки вытягивали до и после отжига. Одновременно фиксировали усилие деформации и ход пуансона.

Было установлено, что целесообразно подавать ультразвук на вытяжную матрицу не в момент касания заготовки пуансоном, а тогда, когда между заготовкой и

матрицей будет создан надежный акустический контакт. Или, иными словами, когда процесс штамповки уже начался (для стали усилие в этот момент 200—600 кг и 100—250 кг — для цветных металлов). Снимали колебания после того, как через радиус матрицы проходил утолщенный край заготовки. Это избавляло от повторного повышения усилия. Благодаря вибрации инструмента с ультразвуковой частотой снижается усилие штамповки и увеличивается критическая степень деформации за проход, особенно если колебания подают на матрицу. Воздействие ультразвука на усилие деформации несколько выше при работе с отожженным металлом.

Современное машиностроение и приборостроение предъявляют высокие требования к качеству изделий, получаемых **вырубкой-пробивкой** из листового металла. Чтобы изготовить изделия с точными размерами и качественным срезом, существуют зачистные операции. Как известно, чистота среза и точность изделий в большой степени зависят от величины зазора между изделием и режущими кромками инструмента. С уменьшением зазора улучшается чистота среза, однако растут усилия, необходимые для выполнения разделительных операций.

Уменьшить усилие деформирования можно при помощи специального штампа для вырубки. Продольные ультразвуковые колебания подводятся к матрице или пуансону со скошенным торцом для пробивки отверстий.

Всесторонние исследования вырубки-пробивки с наложением ультразвуковых колебаний проведены в Белорусском политехническом институте под руководством В. Северденко. Проанализированы возможные схемы и предложен способ деления листовых материалов в пучности напряжений продольной стоячей ультразвуковой волны. Уменьшение усилия в этом случае объясняется действием в очаге деформации знакопеременных напряжений от ультразвуковых колебаний. Напряжения от пуансона в матрицу передаются через узкий пояс деформируемого металла вблизи режущей кромки матрицы. Здесь они и концентрируются, вследствие чего уменьшается усилие среза и повышается качество его поверхности. Зона пластической деформации при вырубке-пробивке с ультразвуком увеличивается,

поскольку уменьшается зона скалывания. Так, например, при пробивке отверстий в стали толщиной 1,5 мм протяженность зоны скалывания в 2,5 раза меньше, а зафиксированная чистота поверхности среза на 1,5 класса выше.

Вырубка-пробивка с наложением ультразвуковых колебаний наиболее эффективна для материалов с особыми физическими и механическими свойствами, изготовить детали из которых обычными способами трудно. Это относится, например, к слоистым пластикам. Они — основной материал для изготовления ответственных деталей (типа плат) радиотехнической, электронной и приборостроительной промышленности. По своим механическим свойствам они относятся к хрупким листовым пластмассам, очень чувствительны к надрезам и имеют низкую ударную вязкость.

Детали из листовых слоистых пластиков в большинстве случаев представляют собой пластины различной конфигурации с отверстиями круглого, квадратного и сложного сечений. Понятно, что наиболее целесообразно изготавливать их вырубкой-пробивкой.

Штампы, инструменты (пуансон или матрица) которых совершают крутильные или продольные колебания с ультразвуковой частотой при пробивке отверстий в пластических массах на основе резольных смол (близких по своим свойствам к слоистым пластикам), позволяют добиться лучшей по сравнению с обычной штамповкой чистоты обработанных поверхностей, уменьшить деформацию кромок, значительно снизить усилие пробивки, получать детали без подогрева материала.

С увеличением скорости деформирования эффект от энергии ультразвуковых колебаний несколько падает, причем более значительно при колебаниях с меньшей амплитудой. При амплитудах от 20 до 40 мкм в диапазоне скоростей 30—60 мм/мин с достаточной для практики точностью можно считать градиент снижения, равным нулю. То есть эффективность применения энергии ультразвука в этом диапазоне скоростей не зависит от скорости передвижения траверсы машины. В производственных условиях технолог должен не только изыскать возможности производить вырубку-пробивку на менее мощном оборудовании. Он должен пытаться и повысить производительность труда. Следовательно, можно реко-

мендовать применять максимальную скорость исследованного диапазона.

С увеличением амплитуды колебаний необходимое усилие деформирования вырубки резко снижается. Варьируя скорость передвижения траверсы машины и амплитуды колебаний (колебательную скорость) инструмента, можно снизить статическое усилие, создаваемое машиной, практически до нуля. Правда, есть ограничения — количество дополнительной энергии, введенной в заготовку за полный цикл операции. Она может чрезмерно разогреть образец по поверхности раздела и под торцом пуансона. При постоянной скорости машины эффект от введения ультразвука прямо пропорционален амплитуде колебаний инструмента. Все сказанное справедливо, если заготовка помещена в зоне максимальной амплитуды смещения.

При деформации же в зоне напряжений уменьшить усилие можно только при акустическом контакте между заготовкой и торцами «разорванного» волновода. В этом и заключается неудобство описанной схемы применения ультразвука для разделения слоистых материалов. Кроме того, в интервале низких усилий деформации зафиксированы большие потери в колебательной системе. Дело в том, что колебательная система разомкнута, а реактивная составляющая сопротивления значительна. Такая колебательная система эффективно работает лишь при больших усилиях деформации.

Ультразвуковые колебания позволяют не только использовать для вырубки-пробивки менее мощное оборудование (из-за снижения усилия деформации), но и повысить степень соответствия диаметра получаемого отверстия диаметру пуансона. При этом зазор влияет на изменение точности пробитых отверстий в большей степени, чем скорости нагружения. С его увеличением точность пробитых отверстий уменьшается. Особенно заметна эта зависимость в интервале малых (0—4%) односторонних относительных зазоров.

Как и точность отверстий, качество поверхности разделения является основной характеристикой. Именно она определяет перспективность метода изготовления деталей, надежность и долговечность последних. Анализируя профилограммы поверхности среза пробитых отверстий, можно убедиться в том, что поверхность отверстия, пробитого в ультразвуковом поле, — ступенчатый

цилиндр с плавными переходами или совокупность двух-трех конусов. В обычных же условиях на поверхности раздела наблюдается ярко выраженная зона взрыва. Очевидно, что форма поверхности, полученная в ультразвуковом поле, более качественна и надежна (меньше расслоений, острых выступов и т. д.).

Применение ультразвуковых колебаний в технологических процессах обработки металлов давлением позволяет повысить производительность оборудования, снизить усилия (и соответственно затраты) энергии, обрабатывать высокопрочные материалы, повысить качество, поверхность и точность изделий, использовать более легкое и менее мощное оборудование и т. д. Наиболее перспективен ультразвук в непрерывных технологических процессах, таких, как **прокатка** и **волочение**.

При конструировании станов для прокатки с наложенными ультразвуковыми колебаниями приходится решать такие проблемы, как подвод акустической энергии к вращающимся валкам, создание резонансной колебательной системы с режимом работы в заданных параметрах и т. д.

Исследования влияния ультразвука на прокатку были проведены на полосах из алюминия, меди и стали. Предварительно образцы отжигали в вакууме: алюминиевые — при температуре 723 К, медные — 923 К, стальные — 1223 К. Прокатывание полосы без смазки на валках 8-го класса чистоты со скоростью 0,033 м/с. Перед началом процесса полосу и валки протирали ацетоном. Полосы подаются в невибрирующие валки, чтобы зафиксировать захват, затем одновременно включают источники ультразвуковых колебаний. Напряжение на выходе генераторов 400 В, амплитуда колебаний точки валка в зоне максимальных колебаний — 0,0085 мм. Зазор между валками постоянный.

При прокатке с продольными ультразвуковыми колебаниями валков увеличиваются усилия обжатия и вытяжки полос. Одновременно снижается усилие среднего удельного давления по сравнению с прокаткой в обычных условиях. Деформирующая нагрузка остается постоянной. После выключения ультразвука она сразу же поднимается до первоначального значения. При новой подаче ультразвуковых колебаний процесс повторяется.

Наибольшее снижение усилия под действием ульт-

тразвука было отмечено при прокатке алюминия, несколько меньше — меди и еще меньше — стали. Если для алюминия при степени деформации 20% снижение усилия составило 76%, для меди и стали при той же степени деформации оно было 70 и 65% соответственно.

Снижение усилия деформирования объясняется действием переменных касательных напряжений и изменением коэффициента контактного трения. Причем действие этих факторов связано прямой зависимостью.

При прокатке стали и меди в исследованном диапазоне степеней деформации коэффициент трения с ростом обжатия увеличивается. Для меди этот процесс менее интенсивен. Для алюминия, как и при обычной прокатке, эта зависимость выражается кривой с максимумом. Уменьшается коэффициент трения в обоих случаях для алюминия при максимальном трении.

При малых степенях деформации (10—15%) усилие деформирования зависит от состояния коэффициента контактного трения. Он уменьшается (а вслед за ним и усилие деформирования) под действием продольных ультразвуковых колебаний валков. Переменные тангенциальные напряжения в этих условиях в расчет можно не принимать, так как коэффициент трения слишком мал. При повышении степени деформации, вследствие разрушения хрупкой пленки окислов, на поверхности алюминиевой полосы начинается схватывание. Оно интенсифицируется ультразвуковыми колебаниями. Это увеличивает и коэффициент трения, а следовательно, и силы контактного трения. В результате предварительное смещение увеличивается, что уменьшает скорость снижения коэффициента трения под действием ультразвуковых колебаний. И тут-то заставляют вспомнить о себе переменные касательные напряжения, их значения растут с увеличением величины обжатия. На некоторой стадии процесса прокатки совместное действие обоих факторов дает наибольший эффект. В нашем случае это соответствует степени деформации порядка 18—22%, максимальное снижение усилия при котором 86%.

Дальнейшее увеличение степени деформации делает эффект от воздействия ультразвука на контактное трение незначительным.

Для меди характер процесса снижения усилия деформирования под действием продольных ультразвуковых колебания валков аналогичен. Только максимум

эффективности действия ультразвуковых колебаний смещен в сторону меньших степеней обжатия (12—15%). Максимальное снижение усилия деформирования составило 71%.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что степень снижения усилия деформирования под действием ультразвуковых колебаний определяется действием переменных тангенциальных напряжений и изменением коэффициента трения. В общем случае степень снижения усилия прокатки в зависимости от обжатия выражается кривой с максимумом, положение которого с увеличением прочности металла смещается в сторону меньших степеней деформации.

Следует заметить, что при прокатке с продольными ультразвуковыми колебаниями валков увеличение амплитуды повышает эффективность применения ультразвука, причем наиболее интенсивно при малых степенях деформации. Это объясняется снижением коэффициента контактного трения и действием переменных тангенциальных напряжений.

С увеличением усилия обжатия характер снижения давления металла на валки в большей мере начинает определяться переменными касательными напряжениями, так как эффективность действия ультразвуковых колебаний на контактное трение убывает. Например, при степени деформации 45% коэффициент трения под действием ультразвука снижается от 24 до 44% (в зависимости от амплитуды колебаний), а при обжатии 70% — от 8 до 25%.

Уменьшение эффекта воздействия продольных ультразвуковых колебаний валков на контактное трение при прокатке меди связано с увеличением предварительного смещения. Последнее, в свою очередь, обусловлено ростом сил трения. Силы же трения растут из-за повышения удельного давления и более интенсивного схватывания.

Скорость прокатки «регулирует» скорость скольжения (прямая зависимость) и время пребывания меди в очаге деформации (обратная зависимость). С увеличением скорости при прокатке в обычных условиях усилие деформирования несколько снижается. И оно увеличивается в случае прокатки с продольными ультразвуковыми колебаниями валков. То есть эффективность действия ультразвуковых колебаний уменьшается. Так,

например, если при скорости прокатки 0,033 м/с снижение усилия деформирования под действием ультразвука составило 38%, то при увеличении скорости до 0,25 м/с указанная величина уменьшилась до 17%.

При малых усилиях обжатия влияние скорости прокатки на степень снижения давления металла на валки менее значительно по сравнению с прокаткой при высоких степенях обжатия. Так, если скорость прокатки изменяется от 0,033 до 0,25 м/с, то степень снижения усилия деформирования при обжатии 10% — от 92 до 71%, при обжатии 30% — с 85 до 25% и при обжатии 70% — с 52 до 6%.

При малых степенях деформаций, как указывалось выше, снижение статического усилия прокатки обусловлено уменьшением коэффициента контактного трения под действием продольных ультразвуковых колебаний валков. С увеличением скорости прокатки степень снижения коэффициента трения под действием продольных колебаний валков уменьшается. Значит, эффект от воздействия ультразвука на усилие деформирования становится меньше. В исследованном диапазоне скоростей прокатки изменение эффективности действия ультразвуковых колебаний на коэффициент контактного трения при малых обжатиях незначительно. Поэтому так же примерно изменилась степень воздействия ультразвука на усилие прокатки.

Исследования влияния ультразвуковых колебаний при прокатке на свойства полученных полос нацелены на три показателя: предел прочности и относительное удлинение при растяжении и глубина лунки по Эриксену.

Испытания на растяжение были проведены на испытательной машине с максимальным усилием 250 кг. Образцы получили фрезерованием из полос шириной 22 мм, прокатанных без наложения и с наложением ультразвуковых колебаний со степенью обжатия 3, 11, 25, 40 и 60%. Материал образцов — медь МЗ. Исходные образцы толщиной 0,5 мм были предварительно отожжены в вакууме при температуре 923 К. Единственное отклонение от требований ГОСТа — несоблюдение толщины образцов. Это не существенно, поскольку в задачу исследования входило сравнение прочностных и пластических свойств металла, полученного различными способами прокатки.

Медь, прокатанная с наложением ультразвуковых колебаний, показала несколько более высокий предел прочности по сравнению с прочностью после обычной прокатки. Причем это различие увеличивается с ростом степени предварительного обжатия. Относительное удлинение у полос, прокатанных с ультразвуком, немного выше при малых обжатиях и практически не отличается от такового после прокатки полос в обычных условиях при степенях деформации выше 30%.

Итак, металл, прокатанный с помощью ультразвука, при малых степенях деформации становится более пластичным. Объясняется это более равномерной деформацией его и уменьшением остаточных напряжений из-за значительного снижения коэффициента трения под действием продольных колебаний валков. Повышением прочности металла при высоких степенях деформации связано, очевидно, с некоторым упрочнением под действием тангенциальных переменных напряжений, обусловленных колебаниями валков.

Метод технологических испытаний листового материала по Эриксену — вытяжка сферической лунки в образце пуансоном с шаровым наконечником. Мерой технологических свойств металла при этом служит глубина в миллиметрах лунки, вытянутой до появления первых трещин, видимых невооруженным глазом.

Испытание образцов производили на приборе ПТЛ в соответствии с вышеуказанным ГОСТом, применяя пуансон с диаметром сферы 3 мм. Образцы были изготовлены из меди МЗ, алюминия А0 и стали 10. Образцы начальной толщиной 0,5 мм были прокатаны с наложением ультразвуковых колебаний и в обычных условиях со степенями деформации 10, 20, 30, 50 и 60%. У полос, прокатанных с наложением ультразвуковых колебаний, при малых степенях деформации глубина лунки получилась несколько больше. При высоких степенях деформации глубина лунки в обоих случаях получается практически одинаковой.

При прокатке с продольными ультразвуковыми колебаниями валков заметно улучшается чистота поверхности реформируемой полосы. Были проведены сравнительные измерения чистоты поверхности полос из меди, стали и алюминия, прокатанных без и с ультразвуковыми колебаниями валков. Образцы размерами $0,5 \times 20 \times 100$ мм предварительно были отожжены в вакууме.

Прокатку произвели на валках 7-го класса чистоты со скоростью 0,033 м/с, степень деформации — 24%. Перед прокаткой полосы и валки обезжирили ацетоном. Напряжения выхода генераторов — 320, 400 и 500 В, которым соответствовали амплитуды смещений поверхности бочки валков в зоне максимальных колебаний 0,006, 0,0095 и 0,013 мм.

Шероховатость поверхности валков и прокатанных полос определяли на профилограф-профилометре завода «Калибр» модели 201 (запись профилограмм — на осциллографической бумаге) и по показаниям стрелочного прибора, регистрирующего отклонение микронеровностей от осредненной линии профиля. Оказалось, что поверхность полос, полученных прокаткой с наложением продольных ультразвуковых колебаний, более высокого класса чистоты по сравнению с прокатанными в обычных условиях. У полос из стали и алюминия разница выражается одним классом, а у полос из меди — одним классом и двумя разрядами (т. е. более чем на полтора класса).

Закключение: прокатка с ультразвуком на финишных операциях производства лент и полос позволяет без существенных затрат значительно повысить класс чистоты поверхности. Наиболее перспективно, на наш взгляд, применение такого процесса при производстве тонких и особо тонких лент и полос.

Волочение — один из наиболее распространенных способов обработки металлов давлением. С его помощью получают проволоку, прутки, трубы круглой, квадратной, прямоугольной и шестигранной формы, фасонные профили и вообще изделия постоянного сечения (даже весьма малых размеров поперечного сечения, с узкими допусками и повышенной прочностью и твердостью). Процесс волочения имеет свои специфические особенности. Основное отличие его от других методов обработки металлов давлением в том, что величина деформации за один переход ограничивается максимально допустимым напряжением растяжения, возникающего в поперечном сечении протягиваемого металла у выхода из очага деформации. Иначе говоря, степень обжатия при волочении прямо зависит от способности металла к упрочнению. Но определить оптимальные условия протягивания с тем, чтобы уменьшить усилия волочения и увеличить степень деформации за проход,

очень сложно. Ясно одно: число маршрутов волочения и отжигов следует сократить.

В Советском Союзе и за рубежом изучают механизм волочения при наложении упругих звуковых и ультразвуковых колебаний. Дело в том, что необходимо найти пути уменьшить силы контактного трения, существенно влияющие на схему напряженного состояния, усилие волочения, неравномерность распределения поперечной деформации, удельное давление и т. д.

В физико-техническом институте АН БССР исследовано волочение проволоки, труб, профилей и др. с ультразвуковыми колебаниями различного направления к очагу деформации. Опыты проводили как на модернизированных испытательных машинах с механической регистрацией усилия, так и на волочильном стане промышленного типа.

Испытываемый материал — медная проволока М1 стандартного состава, а также проволока из стали У12А и 65С2ВА и др. Медная проволока предварительно отжигалась и для удаления окислов травилась в 10% растворе H_2O_4 . Диаметр проволоки до волочения — 1,57 мм, после волочения — 1,25 мм. Ультразвуковые колебания подводились в направлении волочения от экспериментального концентратора. Волока запрессовывалась в выходной торец концентратора. Протягиваемая проволока через отверстие в концентраторе поступала в волоку, по выходе из которой закреплялась в захвате разрывной машины.

Усилие волочения медной проволоки, отоженной при температуре 923 К, при протягивании в обычных условиях со степенью деформации около 36,5% составляло приблизительно 40 кг, а напряжение волочения — примерно 25,6 кг/см². При обработке такой же проволоки с той же степенью деформации с наложением ультразвуковых колебаний с амплитудой 0,012 мм усилие волочения уменьшилось в 2 раза, и напряжение волочения было примерно 12,5 кг/см². Это, вероятно, произошло потому, что уменьшились силы контактного трения в очаге деформации: максимальные знакопеременные напряжения, возникшие в проволоке под действием ультразвуковых колебаний, полученные расчетно, равнялись примерно 10 кг/мм².

Усилие волочения при продольных ультразвуковых колебаниях волоки зависит от интенсивности колеба-

ний. Так, увеличение мощности ультразвука, подведенного к волоочильному инструменту, от 500 до 1000 Вт резко снижает его.

Кроме исследований с продольными ультразвуковыми колебаниями, были проведены опыты по волочению медной и нихромовой проволоки в направлении, перпендикулярном направлению распространения волн. Иначе говоря, к волоке подводились поперечные колебания. Рассматривали два случая: волоку запрессовывали в среднюю часть стального концентратора в месте максимальных напряжений стоячих ультразвуковых волн; волоку запрессовывали вблизи торца концентратора, в зоне максимального смещения. В первом случае колебания вдоль проволоки почти не распространялись, амплитуда ультразвуковых волн в концентраторе не зависела от длины и акустических свойств проволоки и от величины усилия волочения. Во втором — ультразвуковые волны распространяются, колебательная система выходит из резонанса, амплитуда значительно уменьшается и величина ее зависит от усилия волочения, т. е. колебания чрезмерно затухают. Чтобы избежать этого, необходимо создавать стоячие ультразвуковые волны и в проволоке, для чего на соответствующих расстояниях от волоки укрепляли отражатели волн.

В обоих случаях усилие волочения снижалось. Когда волока расположена в зоне максимальных напряжений, для нихромовой проволоки при степени деформации примерно 15% оно снижалось на 35—40%, а для медной (степень деформации 23%) — на 45—50%. Если же волоку поместили в место наибольших смещений при той же деформации, оно уменьшилось для нихромовой проволоки примерно на 20%, а для медной — на 20—25%.

Итак, ростом интенсивности ультразвука усилие волочения снижается на большую величину, но увеличиваются напряжения (по абсолютной величине). Следовательно, значительно повышается и температура в месте деформации, особенно когда волока находится в зоне напряжений. Поэтому необходимо охлаждать волок и проволоку.

При больших значениях амплитуды колебаний знакопеременные напряжения могут стать причиной появления концентратора в месте крепления волок. Если их крепят в зоне максимального смещения, нагрев их и

проволоки очень незначителен. Усилие волочения при тех же параметрах изменяется несколько меньше, чем в случае, когда волока помещена в пучности напряжений стоячей ультразвуковой волны. Дело в том, что в первом случае усилие снижается в основном из-за уменьшения сил контактного трения, а во втором — в связи с воздействием знакопеременных напряжений на статические напряжения.

То, что колебания ультразвуковой частоты уменьшают, тяговое усилие при волочении создает предпосылки повысить степень деформации за проход, сократить число проходов и вспомогательных операций. Результаты экспериментов показали, что коэффициент запаса прочности как при волочении в обычных условиях, так и с наложением ультразвуковых колебаний примерно одинаков. Это объясняется тем, что наряду с падением напряжения волочения снижается прочность металла. По выходе из очага деформации под действием знакопеременных напряжений и при больших амплитудах ультразвуковых колебаний протягиваемый металл может разорваться. Поэтому чтобы повысить его технологическую деформируемость, необходимо создать замкнутую акустическую систему. При продольных колебаниях ее можно организовать с помощью специальных блоков, их устанавливают на соответствующих расстояниях от волоки.

Дополнительные устройства помогают повысить коэффициент запаса прочности при волочении с наложением продольных ультразвуковых колебаний примерно в 1,3—1,4 раза, что, в свою очередь, создает предпосылки к увеличению усилия при проходе. Значит сократятся маршрут волочения, количество вспомогательных операций по термообработке и последующей очистке поверхности изделия.

Основные показатели качества изделий волочения — чистота поверхности и прочностные свойства. Они зависят не только от природы металла, но и от условий, в каких протекает процесс деформации.

В физико-техническом институте АН БССР изучали влияние ультразвуковых колебаний на прочностные и пластические свойства протянутой медной проволоки, медных труб, проволоки из труднодеформируемых металлов и сплавов. Проводили сравнительные испытания на растяжение их после волочения в обычных условиях

и с наложением ультразвуковых колебаний. Так, для медной проволоки, протянутой без воздействия ультразвуковых колебаний со степенью деформации 36,5%, предел прочности равнялся примерно 40—41 кг/см², а с наложением ультразвука и при том же обжатии — приблизительно 34—35 кг/мм² (разница примерно 15%).

Но помимо уменьшения предела прочности проволоки при волочении ее в ультразвуковом поле, наблюдается некоторое удлинение. Относительное удлинение медной проволоки, протянутой без ультразвука со степенью обжатия 36,5%, — 3—3,5%, а с ультразвуком — 5—5,5%, т. е. пластичность увеличилась на 35%.

Проведены и исследования чистоты поверхности проволоки из труднодеформируемых материалов после протягивания в обычных условиях и при наложении ультразвука. Установлено, что проволока, протянутая с ультразвуком, имеет более высокий класс чистоты поверхности. Так, высота гребешков на поверхности после волочения в обычных условиях была в среднем 3—4 мкм, а во втором случае — 1,0—1,5 мкм. Значит, в результате действия ультразвуковых колебаний на проволоку в процессе волочения чистота поверхности повышается примерно на два класса.

Итак, к настоящему времени раскрыт физический механизм воздействия ультразвуковых колебаний на процессы, происходящие в самых разнообразных материалах во время их обработки. Первые установки, использующие ультразвук в прессовании, листовой штамповке, волочении, вырубке-пробивке и т. д. убеждают нас в его перспективности. Повышается пластичность металлов и сплавов, более приемлемо распределяются деформации, снижаются усилия деформирования... Все это в итоге повышает качество готовых изделий.

Пайка, сварка

Алюминий и сплавы на его основе — это и проводящие материалы в электро- и радиотехнике, это конструкционные материалы. Соединять алюминиевые детали между собой или с деталями из других материалов сложно. Дело в том, что на наружной поверхности заготовок из алюминия образуется окисный слой высокой

твердости и низкой электропроводности, толщина — около 0,001 мкм. Окисная пленка мешает попасть припою на поверхность металла, поэтому соединять алюминий обычной пайкой очень трудно.

Удалять пленку стальной щеткой непосредственно под слоем расплавленного припоя также малоэффективно, так как на качество пайки отражаются царапины, да и пленка удаляется только в отдельных местах. Этот метод трудоемок, а соединение непрочно из-за того, что в шве, в тех точках поверхности, где припой соединился с основным металлом, есть поры.

В общем, ученые установили, что трудность пайки алюминия и его сплавов — в основном в трудности удаления окисной пленки. Ультразвуковые же колебания сделали процесс безукоризненным. Более того, отпала необходимость в флюсах. Возникшая в жидком припое под действием ультразвуковых колебаний кавитация разрушает окисную пленку, расплавленный припой обслуживает неокисленные алюминиевые поверхности.

Наиболее употребительные припои при пайке алюминия и алюминиевых сплавов — чистое олово, сплав олова и цинка (90% олова и 10% цинка), оловянно-кадмиевый припой. Они незначительно корродируют основной металл и обеспечивают высокое качество соединения. Сплав олово—свинец непригоден, свинец образует большие кристаллы в месте соединения, и прочность их очень низкая: из-за высокой хрупкости паяного слоя.

Механизм ультразвуковой пайки таков. Наконечник ультразвукового паяльника нагревается обычным тепловым элементом и расплавляет припой. Он растекается по поверхности. Подключается источник ультразвуковых колебаний, наконечник паяльника начинает вибрировать, колебания передаются в расплавленный припой. Там возникает кавитация и мощные гидравлические удары (при захлопывании кавитационных пузырьков) разрушают окисную пленку. Расплавленному припою открывается доступ к чистой поверхности основного металла, что и гарантирует качество соединения.

Но это не все. Алюминий не способен противостоять кавитационной эрозии, поверхность его становится шероховатой, это укрепляет сцепление между ним и припоем благодаря диффузии припоя в алюминии. Разрушенная кавитационной эрозией окисная пленка всплы-

вает на поверхность припоя и не влияет на качество процесса. Оловянные припои — наиболее активные инициаторы кавитации, так как волновое сопротивление расплавленного олова более чем в 10 раз превосходит волновое сопротивление других жидкостей. Интенсивность ультразвуковых колебаний в олове значительно выше, чем в других жидкостях при прочих одинаковых условиях.

Прочность соединения при ультразвуковой пайке алюминия и его сплавов может достигать величины порядка 4 кг/мм².

Технологический процесс ультразвуковой пайки деталей из алюминия и алюминиевых сплавов включает три операции: подготовку деталей к лужению, лужение, пайку. Подготовка деталей — это в основном тщательная очистка от загрязнений. На втором этапе на поверхность наносится слой оловянного припоя двумя способами: окунанием детали в расплавленный припой, в котором уже возбуждены ультразвуковые колебания такой интенсивности, чтобы была кавитация; с помощью ультразвукового паяльника. Первый способ более производителен, да и качество лужения выше. Во втором варианте качество и производительность ниже и зависят, кроме того, от квалификации лудильщика.

Для ультразвуковой пайки выпускается ряд ультразвуковых паяльников и ванн. Паяльник УЗП-1 предназначен для пайки и лужения изделий из алюминия, ферритов и керамики припоями с температурами плавления до 1073 К, а паяльник УЗУП-2 и ванна УП-49 — из алюминия и его сплавов мягкими припоями, без применения флюсов. Ванна УЗВЛ-1 применяется для обслуживания легкоплавкими припоями изделий из алюминия, ферритов и керамики.

Ультразвуковая сварка — это соединение металлических деталей в твердом состоянии. В настоящее время так соединяют многие металлы и сплавы: медь, тантал, молибден, титан, алюминий и его сплавы, сталь и др. Ультразвук позволяет соединять между собой тонколистовые разнородные металлы, тонкие листы и фольгу с толстыми пластинами при минимальном изменении свойств основного металла в зоне сварки.

Детали соединяются простым «схватыванием» в поверхностных слоях. Следовательно, не образуются крупные интерметаллические соединения, что значительно

расширяет круг свариваемых металлов и сплавов в различных комбинациях. Прочность соединений при ультразвуковой сварке высока. Причем пластичность и физические свойства металла в месте соединения неизменны, что очень важно для металлов, не сваривающихся обычными способами. Так соединяют титан с нержавеющей сталью, титан с алюминиевыми сплавами и др. (при их соединении плавлением образуются хрупкие швы).

Механизм схватывания еще полностью не выяснен. Имеется ряд гипотез, согласно которым факторами, способствующими схватыванию, являются: повышенные энергии атомов кристаллической решетки металла вблизи поверхностей активизация диффузионных процессов в ультразвуковом поле; возникновение значительных сдвиговых напряжений в микроконтактах. Согласно другим концепциям образование соединения при ультразвуковой сварке аналогично сварке трением; ультразвуковая сварка рассматривается как частный случай сварки давлением при повышенной температуре (ультразвуковые колебания способствуют устранению поверхностных пленок и нагреву контактирующих поверхностей до температуры, при которой сопротивление деформированию понижается в несколько раз).

На процесс ультразвуковой сварки существенно влияют контактное усилие, время сварки, амплитуда колебаний и их частота. Роль частоты в образовании соединений пока еще недостаточно ясна. Обычно частоту ультразвуковых колебаний выбирают с учетом толщины свариваемых деталей и их свойств. При сварке тонких деталей используют колебания более высокой частоты, что позволяет понизить величину амплитуды колебаний без изменения акустической мощности. При более высоких частотах растут потери энергии колебаний, а потому считают целесообразным использовать ультразвуковые колебания низких частот (особенно для толстостенных деталей).

Контактное усилие — регулируемый параметр процесса, от него прямо зависят прочность соединения и скорость сварки. Оно передает ультразвуковые волны деталям и является причиной пластического течения металла в зоне контакта. Экспериментально установлено, что величина статического усилия, необходимого для образования соединения, для материалов с различными

пределами текучести и различными значениями твердости неодинакова. С увеличением предела текучести, твердости, а также толщины изделий увеличивается и контактное усилие.

Амплитуда колебаний. Существует оптимальная ее величина, при которой сварное соединение получается максимально прочным. Уменьшать амплитуду — значит просто снижать эту прочность, а с некоторого минимального ее значения соединение не образуется вообще. Значение амплитуды выбирают с учетом свойств свариваемых материалов, их толщины, величины контактного усилия и условий возбуждения колебаний в верхней детали. По-видимому, с повышением твердости материала верхней детали и толщины свариваемых деталей при неизменном контактном усилии и времени сварки требуется и более значительная минимальная амплитуда.

В настоящее время имеются отечественные и зарубежные аппараты различной номенклатуры для ультразвуковой сварки металлов и других материалов. В большинстве из них используются продольные колебания. К примеру, в стационарных аппаратах точечной и шовной ультразвуковой сварки, переносных установках точечной сварки в монтажных условиях и т. д.

Ультразвуковой сварочный аппарат УЗСМ-1 предназначен для точечной сварки тонколистовых металлов; ультразвуковой сварочный пистолет УЗСП-6 — для сварки фольги цветных пластичных металлов друг с другом, а также с материалами толщиной 6—8 мм; установка УПК-15 — для сварки полимерных изделий по контуру и др.

Жидкие вещества

Когда интенсивная ультразвуковая волна проходит через жидкость, в последней образуются последовательно области сжатия и разряжения. В отдельных участках возникают газовые или паронаполненные пузырьки и пустые полости. Размеры полостей колеблются от субмикроскопических до сравнительно значительных, а время их существования то очень короткое, то опять-таки сравнительно длительное. В гидродинамике, как уже говорилось, явление образования в жидкости полостей (пустот) называют кавитацией. Кавитацию можно

наблюдать, например, при быстром вращении гребных винтов, в турбинах, при вытекании жидкости из сопла. Она возникает и при подводных взрывах, ударных волнах, при нагревании жидкости под давлением, под действием звуковых и ультразвуковых волн.

Во многих случаях кавитация нежелательна. Так, из-за нее разрушаются гребные винты судов и гидравлические системы. Иногда кавитацию создают преднамеренно, для разрушения живых организмов в жидкостях, очистки металлов, получения эмульсии, коллоидных суспензий, дисперсии частиц и т. д.

Разрушающее действие кавитации было обнаружено сравнительно давно, но механизм его до настоящего времени не изучен окончательно. По мнению Кука, кавитационное разрушение это — следствие ударов жидкости о поверхность твердого тела. Но как именно это происходит, Кук не знал.

Релей доказал, что значительные давления возникают не только при ударе жидкости, но и при сокращении кавитационного пузырька, на некотором расстоянии от поверхности тела. Под действием многократно повторяющихся механических ударов происходит пластическая деформация металла.

Ультразвуковые колебания как способ смешивания разнородных жидкостей (несмешивающихся) еще совсем недавно не находил применения в промышленности. Дело было в высокой стоимости специального оборудования. Но успехи ультразвукового генераторостроения доказали возможность использовать интенсивные ультразвуковые колебания для эмульгирования и диспергирования твердых тел и в промышленных условиях. И прежде всего следует упомянуть о гидродинамических излучателях, наиболее дешевых и простых в эксплуатации.

Если взять сосуд с двумя несмешивающимися жидкостями, например маслом и водой, и действовать на них интенсивными ультразвуковыми волнами, то сразу же начинается процесс эмульгирования: масло и вода становятся мутными, в масле образуется водная эмульсия, в воде — эмульсия масла. Особенно активен процесс на границах раздела между жидкостью и стенками сосуда и между жидкостью и источником колебаний. Влияние стенок сосуда объясняется, по видимому, тем, что под действием ультразвуковых колебаний материал

стенок образует мелкодисперсный коллоидный раствор в жидкости. Кроме того, доказано, что эмульгирование не может быть осуществлено в вакууме и при достаточно высоких внешних давлениях, а также при отсутствии в жидкости пузырьков воздуха и газов. Присутствие воздуха и газа в жидкости в значительной степени ускоряет процесс эмульгирования.

Образование **эмульсий** под действием ультразвуковых колебаний — во многом следствие кавитации. Она возникает прежде всего на поверхности раздела между жидкостями и жидкостью и стенками сосуда, где энергия разрыва жидкости относительно низка. Образованию ее способствуют также растворенные газы. Но высокая их концентрация, напротив, тормозит процесс, так как удлиняется время захлопывания кавитационных полостей в жидкости. Эксперименты, однако, доказали, что эмульгирование происходит и в том случае, когда кавитационные явления мало развиты.

Нарращивание внешнего давления до 2 ат интенсифицирует эмульгирующее действие ультразвука; за этой величиной оно падает. Это объясняется тем, что более высокое давление, с одной стороны, способствует смыканию кавитационных пустот; с другой — после какого-то момента препятствует их образованию.

Кроме кавитации, на процесс образования эмульсий благоприятно влияют турбулентные течения жидкости. Они всегда сопутствуют ультразвуковым колебаниям большой интенсивности. Скорость эмульгирования увеличивается при увеличении площади соприкосновения двух жидкостей, например масла с водой. Ее можно еще повысить, если перед обработкой ультразвуком жидкости перемешивать.

Практикам важно знать количество жидкости, которую можно эмульгировать. Чтобы получить большее количество эмульсий, жидкость должна течь непрерывно и под давлением. Этот принцип позволяет достичь высоких скоростей эмульгирования даже при сравнительно малой интенсивности ультразвука, так как каждая капля масла (например, при образовании эмульсии масло—вода) проходит через зону наиболее сильного воздействия ультразвука. Так, на Егорьевском меланжевом комбинате используется установка с двумя гидродинамическими излучателями для приготовления парафиностеариновых эмульсий. На ней изготавливают

3600 л эмульсии в течение 20—40 мин — высокодисперсной и более устойчивой, чем эмульсии, полученные механическим способом.

Диспергировать твердые материалы в жидкостях можно различными путями, например раздавливанием или истиранием. Но механические методы (с помощью шаровых или роликовых мельниц) часто не позволяют получать очень мелкие частицы. Поэтому в последнее время в различных процессах диспергирования чаще стали применять звуковые и ультразвуковые колебания. По сравнению с эмульгированием процесс диспергирования твердых тел требует значительно большей их интенсивности.

Сегодня для диспергирования суспензий еще широко используются приборы с низкочастотными колебаниями, так называемые вибрационные мельницы. Принцип их работы — измельчение с одновременным наложением упругих колебаний частотой 25—50 Гц. Размеры частиц — до 1 мкм. Однако с помощью упругих колебаний звуковой частоты можно диспергировать далеко не все твердые материалы.

Дисперсность наивысшей степени получается при использовании ультразвуковых колебаний с частотой 5—40 кГц. Большинство частиц в этом случае измельчается до размеров меньше 1 мкм. С увеличением интенсивности ультразвука увеличивается и степень дисперсности. Она повышается, если ввести в суспензию небольшое количество воздуха (барботирование). Это, по-видимому, влияет на величину кавитационного эффекта, а потому процесс ультразвукового диспергирования интенсифицируется.

Применение ультразвука для диспергирования зерен бромистого серебра в желатине фотографических эмульсий — способ получить мелкозернистые фотографические пленки и сократить продолжительность их изготовления. Воздействие ультразвука увеличивает устойчивость, однородность состава и концентрацию галоидносеребряных солей в фотографических эмульсиях. У полученных таким образом пленок высокие чувствительность и разрешающая способность. Ультразвук используется и для диспергирования суспензий красителей и пигментов.

Если сконцентрировать ультразвуковой пучок на границе раздела воздух—жидкость, то на поверхности

жидкости образуется «вспучивание». При определенной интенсивности ультразвука возникает фонтан, высота которого растет с ростом интенсивности. Образование фонтанов, как правило, сопровождается туманом (при работе на высоких частотах). Исследования показали, что тенденция к образованию тумана уменьшается с увеличением вязкости жидкости. Но, увеличивая интенсивность ультразвуковых колебаний, можно также добиться образования тумана. Плотность его зависит от частоты колебаний. При увеличении частоты образуется более тонкий и плотный туман.

Большинство деталей современных приборов, машин, аппаратов (например, детали часовых механизмов, катодов и сеток радиоламп, контактов реле, оптических стекол и т. п.) высокой чистоты поверхности. От чистоты в значительной степени зависит эффективность их работы. Даже небольшие загрязнения или пылинки изменяют режим функционирования. Для очистки таких деталей применяют специальные моечные установки. С их помощью с поверхности изделий можно удалять окислы, остатки жира и масла, полировочные пасты и т. д. Но все удалить, увы, невозможно (особенно в труднодоступных местах).

Мойка вручную также не всегда позволяет получить стерильную поверхность. Кроме того, промывка вручную очень трудоемка (на ряде предприятий оптической промышленности промывка составляет примерно 10% трудоемкости изготовления деталей) и может стать источником новых дефектов.

В последние годы хорошую репутацию завоевал **ультразвуковой способ очистки** мелких деталей и деталей сложной конфигурации. Он высокоэффективен, экономичен, не портит детали при их промывке, значительно сокращает объем ручного труда, повышает культуру производства. С его помощью можно очищать детали с незначительными трещинами, микропорами, углублениями, отверстиями сложной формы, снимать частицы металлической стружки после токарной и фрезерной обработки. На предприятиях нашей страны уже работают более 500 участков ультразвуковой очистки.

Механизм воздействия ультразвуковых колебаний при очистке деталей — разрушение пленки загрязнений и проникновение интенсивно колеблющихся пузырьков.

ков в поры и зазоры между этой пленкой и поверхностью очищаемой детали. Кроме того, на границе жидкость — твердое тело возникают значительные ускорения, способствующие отрыву частиц грязи. Ускорения эти — результат действия больших переменных давлений, диффузии моечного раствора в поры и микротрещины на поверхности пленки, загрязнений.

Наиболее широко распространены два метода ультразвуковой очистки: **контактный и погружение излучателя ультразвуковых колебаний в моющий раствор.** В первом случае ультразвуковые колебания от преобразователя передаются самому очищаемому изделию. Оно работает как излучатель, т. е. совершает механические колебания ультразвуковой частоты. Способ весьма удобен при работе с внутренними полостями тонкостенных изделий, доступ к которым затруднен.

При очистке мелких и крупногабаритных деталей их, как правило, помещают в моющий раствор так, чтобы очищаемая поверхность была обращена к излучателю. Очень крупные детали и непрерывно движущиеся заготовки обрабатываются непрерывно-последовательным способом, т. е. изделие последовательно проходит у поверхности преобразователя.

Ультразвуковая очистка деталей после химической и электрической обработки. Многие детали электровакуумных и ряда других приборов обрабатывают кислотными и щелочными растворами, а также электрохимическим способом. После такой обработки с поверхности их необходимо удалить следы растворов и образовавшуюся пленку. Для этих целей разработаны ультразвуковые моечные ванны. Так, например, обработка анодной ножки вакуумных ламп после химической очистки в ультразвуковой ванне с дистиллированной водой в течение 3 мин с последующим споласкиванием в дистиллированной воде и ацетоне — гарантия того, что все следы травильных растворов удалены.

Заусенцы снижаются на ультразвуковой установке следующим образом. Первоначально детали травят в слабых кислотных растворах (без разрушения их поверхности), промывают в проточной воде и высушивают. Затем они «озвучиваются» в моющем растворе, например трихлорэтаноле, высушиваются в сушильном шкафу. Далее их снова обрабатывают ультразвуком в дистиллированной воде в течение нескольких минут, про-

мывают водой и спиртом и опять высушивают. Полный цикл обработки длится около 10 мин.

Применение ультразвука для **очистки поверхности деталей сложной формы** и изготовленных из различных материалов **от окалина и ржавчины** значительно повышает производительность, позволяет добиться высокого качества очистки всей поверхности детали. Исключен брак, который имеет место при таких методах очистки, как пескоструйная, дробеструйная и гидropескоструйная.

В последнее время ультразвуковые колебания применяют в **оптической промышленности** как для механической обработки, полировки и гравировки изделий из стекла, так и для **обезжиривания, очистки от полировальных паст, очистки вместе со стерилизацией**. С их помощью значительно сократили время и повысили качество очистки, механизировали и автоматизировали трудоемкий процесс. Кроме того, удается очищать и обезжиривать изделия в частично или полностью собранном виде и детали сложных форм с большим количеством полостей.

Для очистки мелких прецизионных деталей при серийном производстве удобны ультразвуковые установки мощностью 1—2 кВт с высокочастотными кварцевыми преобразователями частотой 400—800 кГц и интенсивностью излучения 10—20 Вт/см². Такая интенсивность — результат фокусировки ультразвуковой энергии на объекте очистки. Для деталей больших размеров используют преобразователи из титаната бария и цирконата свинца, работающие при более низких частотах и интенсивности порядка 2 Вт/см². При работе с деталями, у которых грязь прочно связана с поверхностью (например, с оптическим стеклом, с которого трудно смывается полировальная паста), удобны магнитострикционные преобразователи: частота 20—40 кГц и интенсивность больше 10 Вт/см². Ультразвук таких параметров способен очищать даже сильно загрязненные детали за несколько секунд.

В настоящее время выпускаются ультразвуковые ванны для очистки деталей в разных жидкостях — УЗВ-15М, -17М, УЗВМ-3 и т. д. Разработаны также устройства (УОГ-3) с излучателями, которые вводят в зону очистки деталей с глухими каналами и отверстиями.

Аэрозолем называется дисперсная система из измельченных твердых или жидких веществ в газовой среде, например пыль, дым, туман и т. д. Известно, что под влиянием звуковых колебаний между частицами, колеблющимися в звуковом поле, могут возникнуть силы притяжения или отталкивания. На этом явлении частично основан феномен возникновения пылевых фигур в трубках Кундта. Если в камере, через которую протекает аэрозоль, создавать периодически стоячие звуковые или ультразвуковые волны, то происходят быстрая коагуляция аэрозолей и образование осадков. Скорость коагулирования зависит от размеров частиц аэрозоля.

Советские ученые С. Горбачев и А. Северный установили, что если через сосуд с дымом пропускать ультразвуковые волны, то частички дыма начинают быстрее двигаться, чаще сталкиваться; образуются более крупные частицы, которые выпадают в осадок. При разной частоте ультразвуковых колебаний оседают частицы разных размеров. При колебаниях звукового и низкого ультразвукового диапазона наилучшие результаты получаются при коагуляции дымов и туманов (если размеры частиц в пределах 0,5—5 мкм). С. Горбачев и А. Северный считают, что причина коагуляции частиц в ультразвуковом поле — гидродинамические силы притяжения. Они возникают в результате «сужения» потока газа между частицами, так как при этом возрастают скорости потока и уменьшается давление. Внешнее давление оказывается большим и образуются гидродинамические силы, которые «сдвигают» частицы.

В последнее время исследования по применению ультразвука для коагуляции аэрозолей выходят за рамки лабораторных опытов. Как в Советском Союзе, так и за границей имеются промышленные установки с аэродинамическими преобразователями и мощными звуковыми и ультразвуковыми sireнами для акустической коагуляции. В СССР Е. Медников предложил промышленную установку с звуковой sireной для пылеулавливания. Наиболее эффективная коагуляция происходит при частоте колебаний в пределах 1—5 кГц. Ведутся работы по созданию эффективных схем и установок и для улавливания высокодисперсной сажи.

Ультразвук пригоден и для воздействия на суспензии твердых или жидких частиц в жидкостях. Об этом

говорит факт существования предельной концентрации эмульсии при ультразвуковом диспергировании — результате установления равновесия между процессами диспергирования и коагуляции. При облучении ультразвуком (даже небольшой интенсивности) неустойчивых суспензий происходит интенсивная коагуляция их частиц. Активная коагуляция наблюдается также и у многих стойких водных суспензий при длительном воздействии ультразвука. В данном случае процесс зависит от частоты ультразвуковых колебаний, интенсивности и времени озвучивания.

Процесс пропитки пористых тел в естественных условиях протекает крайне медленно. К числу общепринятых методов, ускоряющих его, относятся следующие:

1. Вакуумирование пористых тел перед погружением их в жидкость.

2. Повышение давления жидкости.

3. Замена воздуха в порах на газ, легкорастворимый в жидкости.

4. Чередование давления с вакуумированием.

5. Повышение температуры жидкости при пропитывании (уменьшается вязкость жидкости, что ускоряет процесс).

Однако все эти методы интенсификации процесса пропитки не всегда эффективны. Они требуют сложного специального оборудования и не вполне удовлетворяют разнообразным запросам производства.

Большие возможности у ультразвуковой пропитки. Несмотря на разнообразие условий протекания массопереноса жидких сред в капиллярнопористых телах (что, собственно, и лежит в основе пропитки), воздействие ультразвука почти всегда интенсифицирует процесс, улучшает свойства готовых изделий и материалов. Кроме того, в несколько раз сокращается время пропитки, в ряде случаев представляется возможным заменить многократный ее процесс на однократный (при сохранении качества). И, помимо прочего, ультразвуковая пропитка хорошо поддается механизации и автоматизации.

В последние годы способ находит все более широкое применение для пропитки металлокерамических деталей различными жидкостями, радио- и электротехнических изделий — электроизоляционными лаками, при склеивании металлических и неметаллических матери-

алов клеевыми составами в пищевой и деревообрабатывающей промышленности.

В Физико-техническом институте АН БССР Е. Коноваловым, И. Германовичем и Н. Дорожкиным были проведены опыты по ускорению с помощью ультразвука пропитки металлокерамики. Результат — авторское свидетельство на способ.

Детали укладывались в проволочную сетку, которую опускали в пропитывающую жидкость, заполнявшую ванну. Источником ультразвуковых колебаний был магнитострикционный преобразователь, питаемый от ультразвукового генератора УЗМ1,5. Мембрана магнитостриктора одновременно служила дном ванны. Машинным маслом пропитывались железоуглеродистые образцы цилиндрической формы с пористостью 20%. Коэффициент заполнения пор 75% (технические условия для пропитки деталей пористостью 20%) можно получить в течение 8—10 мин при температуре масла 291 К и за 3—4 мин — при 333 К. При обычной пропитке такой результат может быть получен за 50—70 мин при температуре 393—403 К, а при вакуумной — за 20—30 мин.

Результаты ультразвуковой пропитки железной металлокерамики смесью 50% парафина и 50% коллоидно-графитового препарата на авиационном масле при температуре 383 К показали: ультразвук позволяет значительно сократить время пропитки и достичь требуемого наполнения через 10 мин (при существующей технологии — через 1,5—2 ч). Кроме того, пропитывающая смесь интенсивно перемешивается и графит не осаждается на дно ванны, что гарантирует отличное внедрение графита в поры металлокерамических кольцевых заготовок.

Ультразвуковая пропитка трансформаторов и других электротехнических изделий электроизоляционными лаками также представила наглядные доказательства ее преимуществ перед пропиткой в вакууме и циклической (вакуум-давление) пропиткой. Например, у большинства трансформаторов, обработанных ультразвуком, сопротивление изоляции между обмотками оказалось выше, чем у пропитанных при вакууме. Компактность оборудования, сокращение времени пропитки в 3—6 раз, облегчение труда выгодно отличают ультразвуковой метод. При испытаниях не было обнаружено ни одного случая несоответствия требованиям технических усло-

вий. Так, при контрольном разрезе катушек выявилось абсолютное соответствие техническим требованиям; повреждений эмалистой изоляции и припайки концов не было. Все катушки успешно прошли проверку по электрическим параметрам, на вибропрочность, климатические испытания.

Значительный эффект получен при применении ультразвуковых колебаний для интенсификации процесса изготовления стеклопластиков. Стеклопластики представляют собой гетерогенные системы из стекловолоконного наполнителя и полимерного связующего вещества. Их механические характеристики определяются в основном свойствами и ориентацией стеклонеполнителя, соотношением стекла и смолы. Существенное влияние на прочностные характеристики оказывают такие структурные факторы, как равномерность распределения стекловолокна в объеме стеклопластика, наличие трещин, воздушных включений и других дефектов.

Было экспериментально проверено влияние ультразвука на свойства стеклопластиков из стеклоткани и эпоксидно-фенольных связующих. Питание в пропиточной ванне УЗВП-1 с водяным охлаждением лака — от генератора УЗГ-10, преобразователь магнитострикционный, ПМС-6М.

Из высушенной ткани прессованием изготавливали стеклотекстолит. Эксперименты показали, что воздействие ультразвука уплотняло структуру (изменялась форма нитей), смола распределялась равномернее, тонкими прослойками между нитями, значительных ее скоплений обнаружить не удалось. Механические характеристики материала при ультразвуковой пропитке (предел прочности при изгибе, твердость по Бринеллю) оказались почти в 1,5 раза выше, чем при обычной.

Успешно применили ультразвук и для интенсификации крашения древесины. Например, за 30 мин озвучивания краситель проникает в сосновые образцы на глубину, в 30 раз большую, чем при обычных способах.

Советским ученым Н. Гончаровым получено авторское свидетельство на способ разжижения с помощью ультразвука лака при покрытии древесных поверхностей. Стало возможным избавиться от использования дорогих и вредных для здоровья человека растворителей. Кроме того, улучшилось и качество покрытий.

Интенсификация процесса пропитки под действием

ультразвука имеет большое значение и для обогащения древесины. В. Белый и В. Анненков пропитывали древесину высоковязкими полимерными смолами с помощью ультразвуковой вакуумно-компрессорной установки. Проникающая способность раствора значительно возросла, он заполняет сосуды и полости клеток и проникает в межклеточные пространства. Это подтверждено микроструктурными исследованиями древесины, пропитанной с применением и без применения ультразвука. При давлении 7 ат озвучивание раствора в течение 7 с сократило оптимальное время выдержки под давлением с 60 до 45 мин, т. е. на 25%.

Ультразвук сокращает в 4—5 раз и время консервирования шкур: через 1,5 ч в образце накапливалось соли в 2,2 раза больше.

Ультразвуковая пропитка может идти не только в непрерывном режиме, но и в импульсном. Инженеры А. Першин и Г. Кардашев обрабатывали импульсами ультразвука графитовые аноды. Прибор, разработанный ими — широкополосный гидроакустический излучатель. Даже при сравнительно малых импульсах процесс существенно (в 2,5 раза) ускорялся, а при энергии импульса в 500 Дж скорость пропитки увеличивалась почти в 20 раз. Электроды использовались в опытном производстве и показали хорошие эксплуатационные качества.

Ультразвуковая пропитка не требует сложного специального оборудования, значительно интенсифицирует процесс, улучшает качество пропитываемых изделий.

Следующий раздел посвящен использованию ультразвука в системах неразрушающего контроля, в которых он занимает видное место.

Неразрушающий контроль

Один из методов неразрушающего контроля изделий и заготовок — ультразвуковая дефектоскопия. С ее помощью можно проверять детали больших и малых размеров, поскольку глубина проникновения ультразвука в металл достигает 10 м. Ультразвуковые дефектоскопы позволяют выявить не только уже образовавшиеся дефекты, но и контролировать структуру металла, определять величины зерна и графитных включений в

сталих, качество железобетонных конструкций, деталей из пластмасс, керамики, дерева и др.

В последние годы дефектоскопия осваивает ультразвуковые волны Релея и Лэмба. Волны Релея распространяются вдоль свободной границы твердого тела (поверхности) и быстро затухают с глубиной. Волны Лэмба — упругие волны, которые в твердой пластинке со свободными границами смещаются в направлении распространения волны и перпендикулярно плоскости пластинки. Первоначально при ультразвуковом контроле применяли продольные и поперечные волны. Однако это ограничивает возможности контроля, так как размеры исследуемых предметов должны быть намного больше длины волны.

Применение волн Релея и Лэмба значительно расширило возможности ультразвуковой дефектоскопии, позволило занять ей передовые позиции среди методов не разрушающего контроля. Релеевские волны распространяются на большие расстояния. Значит одновременно можно озвучивать большие участки изделия, обнаруживать дефекты в 0,02 мм на расстоянии более 4 м. Они «работают» со всеми видами дефектов поверхности и поверхностного слоя: трещинами, полостями, инородными включениями, усталостными трещинами и микротрещинами в металлах и т. п.

Ультразвуковые волны Лэмба удобны для контроля металлических листов, труб, определения упругих и термоупругих характеристик пластинчатых образцов. С их помощью можно обнаружить разнообразные дефекты листового проката: трещины, пустоты, дефекты сварного шва, инородные включения малых и больших размеров.

Основные методы ультразвуковой дефектоскопии — теневой, импульсный, резонансный, импедансный, метод свободных колебаний и др. Применяют их избирательно, в зависимости от особенностей контролируемых изделий, разновидностей дефектов и параметров, которые необходимо проверить.

Теневой метод использует ослабление (уменьшение интенсивности) ультразвуковых волн при встрече внутри изделия с дефектами, которые создают ультразвуковую тень. Имеются два ультразвуковых преобразователя: один излучает волны, другой принимает (регулирует) их. Недостатков у него множество. Малая чув-

ствительность (дефект обнаруживается лишь тогда, когда сигнал изменяется не меньше, чем на 15—20%), мелкие дефекты поэтому вообще невозможно обнаружить. Невозможно и определить, на какой глубине находится дефект. И тем не менее его успешно применяют при работе с тонкими изделиями, в частности, стальными листами, в контроле качества герметизации соединений. Неплотности соединений, заполненные воздухом или каким-нибудь газом, практически не пропускают ультразвуковые волны, за ними образуется звуковая тень. В этом случае контроль достаточно надежен. Прибор для определения качества герметизации — серийный дефектоскоп УДМ-1М.

В отличие от теневой **импульсная** (эхо-метод) ультразвуковая дефектоскопия использует явление отражения ультразвуковых волн. Импульс, отразившись, возвращается обратно — к преобразователю, который в это время работает как приемник. Частоту следования импульсов можно изменять с таким расчетом, чтобы при определенных размерах изделия импульс возвратился к преобразователю раньше, чем будет послан следующий.

Импульсный метод позволяет исследовать изделия при одностороннем доступе к ним. Это особенно ценно при контроле изделий, в которых трудно или невозможно расположить приемник ультразвука с противоположной стороны проверяемого участка. Чувствительность его значительно выше теневого. Он не только обнаруживает мельчайшие дефекты, но и определяет, на какой глубине они находятся. А по величине амплитуды отраженного сигнала (эхо-сигнала) можно ориентировочно установить размеры дефекта. Но, увы, его нельзя применять для контроля изделий малых размеров.

Наша промышленность выпускает различного вида импульсные дефектоскопы. Стандартные аппараты для контроля стальных, алюминиевых и латунных изделий работают на частотах от 0,5 до 10 мГц. Универсальные снабжены набором различных искательных головок, выбор которых зависит от формы и конструктивных особенностей испытываемой детали. Например, для круглых деталей применяются наклонные искательные головки, а для сильно шероховатых поверхностей — головки с резиновыми мембранами, заполненными жидкостью.

Для контроля сварных швов труб удобны дефекто-

скопы УДМ-1М, УДЦ-15Т с искательными головками типа ИЦ-2. Искательную головку перемещают зигзагообразно вдоль оси трубы на 30—50 мм и одновременно по окружности с шагом 2—3 мм. Дефект отражается на экране дефектоскопа сигналом.

Новый ультразвуковой импульсный дефектоскоп ДУК-21 контролирует качество клеевых композитных конструкций металл—стекло—пластик и выявляет дефекты клеевого шва. А ДУК-66, разработанный во ВНИИКе, предназначен для обнаружения дефектов в металлических изделиях, определения места их расположения и толщины изделий. Прибор надежен и удобен в эксплуатации, глубина эффективности работы его в стали достигает 10 м. В том же институте создана ультразвуковая установка Днестр-1 для автоматического контроля качества сварного шва труб диаметром до 820 мм с толщиной стенок 6—12 мм, длиной до 12,2 м и скорости движения труб до 80 м/мин.

Резонансный метод ультразвуковой дефектоскопии использует феномен незатухания колебаний. Во время контрольного измерения генератор настраивают на резонансную частоту колебаний изделия определенной толщины. Затем определяют момент исчезновения резонанса, что и указывает на изменение толщины или на наличие внутри изделия дефекта. Зная частоту излучения ультразвука и скорость распространения его в материале, легко определить эту толщину или расстояние до дефекта. Резонансная ультразвуковая дефектоскопия наиболее употребительна при одностороннем доступе к изделиям (обшивка кораблей, котлов, оболочек кабеля и др.). Для этого, в частности, предназначен ультразвуковой резонансный толщиномер ТУК-3.

На кишиневском заводе «Электроточприбор» создан толщиномер ТУК-4В для измерения стенок плоскопараллельных и цилиндрических изделий, выявления дефектов размерами 10×10 мм и более. Он снабжен специальным устройством непосредственного отсчета толщин. Для непрерывного контроля толщины изделий из металла, стекла, керамики, пластмасс и др. используется ультразвуковой иммерсионный дефектоскоп Металл-2м.

Резонансный метод дефектоскопии применяется не только в промышленности, но и при решении некоторых теоретических проблем. Так, его можно использовать

для определения характеристик твердого тела в условиях высоких температур.

В научно-исследовательском институте химического машиностроения (ВНИИХИММаш) разработан так называемый относительный метод ультразвукового структурного анализа металлов, создано его аппаратное оформление. Изюминка здесь в том, что показатель степени рассеяния ультразвуковых колебаний в металле, по которому определяется, например, величина зерна — отношение амплитуд эхо-сигналов при работе на разных частотах. Структурные коэффициенты определяют по эталонным образцам, которые изготавливают из материала той же марки; они должны иметь тот же диаметр, толщину и чистоту поверхности, что и контролируемые изделия. Структурный анализ применяют для контроля величины зерна в аустенитных хромоникелевых нержавеющих сталях, структуры высокопрочного чугуна и др. Метод упрощает процесс контроля, позволяет сэкономить металл, снизить затраты труда, т. е. весьма экономически эффективен.

Импедансная дефектоскопия — использование зависимости полного механического сопротивления (импеданса) контролируемого изделия от качества соединения отдельных его элементов между собой. Предназначен в основном для анализа клеевых, диффузионно паяных соединений в тех случаях, когда требуется стопроцентный надежный контроль. На кишиневском заводе «Электроточприбор» изготовлен импедансный ультразвуковой дефектоскоп ИАД-2 для работы с многослойными конструкциями. Прибор контролирует качество соединений обшивки из материалов со сравнительно высоким модулем упругости с металлическими и неметаллическими элементами. Причем контроль осуществляется только со стороны обшивки. Работа с прибором ИАД-2 очень проста. Оператор слегка прижимает датчик к контролируемому изделию и водит по поверхности, наблюдая за показаниями индикатора.

Из новейшей аппаратуры представляет интерес установка УКТС-2М для автоматического ультразвукового контроля качества точечной электросварки листов из алюминиевых сплавов толщиной 0,6—2,5 мм.

В установке использованы ультразвуковые датчики, встроенные в электродержатели сварочной машины. Ввод колебаний в зону сварки и их прием осуществля-

ются через сварочные электроды, которые для охлаждения помещены в воду. Во время расплавления металла ядро сварной точки частично экранирует ультразвуковые колебания, изменяя величину принятого датчиком сигнала, электронные блоки обрабатывают принятые сигналы и выдают результаты контроля в виде записи на самописец и световой сигнализации о браке. При необходимости подается сигнал остановки сварочной машины.

Автоматический ультразвуковой толщиномер Берилл-1. Это акустическое импульсное устройство для бесконтактного измерения толщины фольги из бериллиевой бронзы и других цветных металлов и сплавов. Прибором можно контролировать также толщину неметаллических листовых материалов, хлопчатобумажных и синтетических тканей, бумаги, картона и другой продукции химической, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности. Диапазон измерения—20—50, 40—100 мкм. По сравнению с радиоизотопными приборами аналогичного назначения имеет следующие преимущества: меньший габарит преобразователя, что облегчает установку прибора на действующие прокатные станы и другие производственные агрегаты; большой рабочий зазор и полная безопасность эксплуатации; незначительное влияние на показания плоскопараллельного перемещения материала, а также изменения его наклона относительно плоскости преобразователя; сравнительно низкая стоимость.

Перспективно применение ультразвука для интенсификации неразрушающего контроля методом проникающих жидкостей, в частности, контроля герметичности полупроводниковых приборов. Нарушение герметичности ведет к тому, что в прибор проникают влага, газовые примеси и т. д. Приборы погружаются в ацетоновую ванну, и если в них имеется течь, то влага попадает в корпус. Это отражается на таком особо чувствительном к влаге параметре, как обратный ток.

По существующей технологии испытаний на герметичность выдержка в ацетоновой ванне должна длиться не менее 72 ч. Ультразвук и избыточное давление сокращают длительность испытаний до 6—9 мин и позволяют заменить агрессивную и взрывоопасную среду (ацетон) на воду.

Для проведения испытаний на герметичность по та-

кому способу разработана установка: емкость (ее заполняют водой), дно которой — пластина магнито-стрикционного преобразователя ПМС-15. Напряжение подается от ультразвукового генератора УЗГ-2,5 или УЗГ-22-10.

Сравнительные испытания двух партий приборов, проходившие по одинаковому технологическому маршруту, показали, что предложенный метод контроля герметичности с применением ультразвука надежно выявляет дефектные приборы и значительно сокращает время отбраковки.

Металлургия

Авиация, ракетная техника, электроника требуют новых материалов, выдерживающих экстремальные условия. Получить их можно лишь при условии совершенствования производства, применении новых эффективных способов воздействия на расплавленный и кристаллизующийся материал. В частности, воздействие ультразвуком на расплавленный металл «вызывает к жизни» физические эффекты: удаление из расплава растворенного в нем газа и неметаллических включений, равномерное распределение одного металла в другом, измельчение микро- и макроструктуры и различных структурных составляющих сплавов и др. Все это повышает механические и пластические свойства материалов.

Эффективность обработки расплавленного металла или сплава в основном зависит от интенсивности ультразвуковых колебаний. Значит, главная задача при обработке расплавленного металла — ввести ультразвуковые колебания наибольшей интенсивности в расплав с высокой температурой. Для этого необходима рациональная система возбуждения упругих колебаний в расплаве и промежуточное звено для длительной передачи упругих колебаний жидкому металлу в условиях больших механических и термических напряжений.

Для возбуждения колебаний могут быть использованы различные методы. В первых опытах по изучению влияния ультразвуковых колебаний на расплав использовали колебания высокой частоты. Их вырабатывали пьезокварцевые излучатели. Затем стали использовать

магнитострикционные преобразователи. Сегодня благодаря высокой механической прочности, большим значениям допустимых рабочих температур и интенсивности вырабатываемых колебаний магнитострикционные преобразователи занимают, можно сказать, монопольное положение в сфере обработки металлических расплавов.

Механические свойства и структура металлов и сплавов в значительной степени зависят от растворенных в них газов и неметаллических включений. Чем меньше газов и неметаллических включений в слитке, тем выше его механические свойства. Поры, раковины, газовые пузыри и т. д. — это заведомый брак при фасонном литье и производстве полуфабрикатов. Поэтому добиться того, чтобы получать **слитки с минимальным количеством газов** — первостепенная задача в производстве металлов и сплавов.

Ультразвуковые колебания в расплавленном металле приводят к тому, что газ сначала высвобождается в виде пузырьков в областях низкого давления волны и соединяется с другими пузырьками. Они становятся все больше и больше и, наконец, всплывают на поверхность расплава.

Механизм газовой выделения под действием ультразвука, по мнению ряда исследователей, таков. Газ в расплаве находится в двух состояниях: в растворенном и в свободном, в виде пузырьков. Пузырьки (имеются в виду пузырьки, имевшиеся в расплаве к началу дегазации) в беспорядке распределены по объему жидкого металла. После того как начинает действовать ультразвук, происходит коагуляция пузырьков в расплаве, и они выходят на поверхность. Для выделения газа, находящегося в растворенном состоянии, необходимо вполне определенное время на образование мельчайших пузырьков и время на рост до размеров, по достижении которых они всплывают.

Эффективность дегазации зависит и от материала излучателя, соприкасающегося с расплавом. Это, вероятно, связано с тем, что интенсивность ультразвуковых колебаний, отдаваемых в расплав при всех прочих равных условиях, неодинакова. У разных материалов в неравномерном температурном поле (один конец волновода в расплаве, другой охлаждается водой) различная способность поглощать звук. Так, полезная мощность излучателя из ниобия на 25% ниже, чем из титана, при

одинаковой мощности преобразователя, а нагревается он значительно сильнее.

Длительность дегазации зависит от количества расплава и мощности ультразвука. С увеличением массы расплава время процесса возрастает; так, для алюминиевого сплава массой 3 кг оно равно 9 мин, а 10 кг — 25 мин при одной и той же интенсивности ультразвуковых колебаний. Обратная картина при увеличении интенсивности излучения.

Если сравнить ультразвуковой способ дегазации с такими, как рафинирование хлористыми солями и дегазация при пониженном давлении, становятся очевидными его преимущества.

Свойства металла тесно связаны со структурой его. При изменении структуры или состава изменяются и его свойства. Поэтому, изменяя тем или иным способом литую структуру, можно регулировать показатели механических характеристик металлов и сплавов. А под «тем или иным способом» мы имеем в виду наложение упругих колебаний ультразвуковой частоты на расплав в процессе его затвердения.

Еще в 1935 г. советский ученый С. Я. Соколов исследовал влияние ультразвуковых колебаний частотой 700 кГц — 3 мГц на процесс затвердевания расплавов цинка, олова и алюминия. Он показал, что эти колебания ускоряют затвердевание чистого цинка, причем температура затвердевания снижается на 10—20°.

Затем в нашей стране и за рубежом исследовалось действие упругих колебаний различных частот на процессы зарождения и роста кристаллов, а также влияние колебаний на структуру и свойства металлов и сплавов. Общеизвестно, что их структура тем более мелкозерниста, чем быстрее зарождаются центры кристаллизации и чем меньше скорость роста кристаллов. Поэтому исследователи в основном изучали указанные параметры при введении в расплав низкочастотных колебаний и ультразвука.

Изучение кристаллизации прозрачных веществ при воздействии ультразвуковых колебаний позволило визуально наблюдать резкое увеличение количества центров кристаллизации, зарождающихся в переохлажденной жидкости.

Опыты, проведенные советским ученым А. П. Капустиним по кристаллизации тимола при «облучении»

ультразвуковыми колебаниями частотой 700 и 2 кГц, позволили установить, что увеличение скорости роста твердой фазы связано с давлением, возникающим в ультразвуковой волне на границе фаз. Под действием этого давления кристаллы малого размера отрываются от поверхности и становятся новыми центрами кристаллизации. Однако диспергирующее действие ультразвуковых колебаний наблюдается при увеличении интенсивности до определенной величины. Кроме этого, Капустин показал, что ультразвуковые колебания способствуют устранению столбчатой структуры.

Наиболее полно исследовано влияние упругих колебаний на структуру таких металлов и сплавов, как сурьма, кадмий, алюминий и его сплавы, висмут, сплав Вуда, олово, цинк и др., в зависимости от интенсивности вводимых в расплав колебаний. Исследования позволяют утверждать, что существует критическое значение интенсивности колебаний, когда наступает существенное изменение структуры металла. При уменьшении интенсивности эффективность обработки расплава снижается. Это проявляется в укрупнении размера зерна, в возникновении структуры столбчатого характера, а также в уменьшении объема расплава. Однако следует отметить, что даже эта столбчатая структура все же отличается в лучшую сторону от структуры, получаемой при кристаллизации расплава в обычных условиях.

Превышение критического значения интенсивности упругих колебаний существенно не влияет на изменение макроструктуры металла, а только стабилизирует этот процесс. Этим, вероятно, и можно объяснить такой большой разброс значений интенсивности колебаний, которые рекомендуют вводить в расплав для улучшения структуры металла различные исследователи. Так, зерно расплава измельчается в одних опытах при 2 Вт/см^2 , в других — 8—40, а в некоторых — даже 100 Вт/см^2 при обработке расплава одного и того же состава.

Неодинаковость значений интенсивности колебаний, по-видимому, связана и с тем, что величина критического значения интенсивности зависит от природы и состава расплава.

Так как при воздействии ультразвука на расплав значительно изменяется структура металла, то изменяются и его механические свойства. Советский ученый

И. Теумин с группой сотрудников всесторонне изучил механические свойства ряда высокотемпературных сплавов после их кристаллизации в обычных условиях и в ультразвуковом поле. Исследования проводили со сплавами ЭИ530, Х27, Х25Н20, Н35ХМВ, ЭИ535 и с чугуном, но наиболее полно были изучены механические свойства стали Х27 и Х25Н20. В расплав подавали упругие колебания частотой 18 кГц и акустической мощностью 1 кВт снизу через данное отверстие в тигле. Температура расплава поддерживалась постоянной. Механические свойства исследовали на микромеханической машине РФ2, на образцах, вырезанных из цилиндрических слитков параллельно их главной оси симметрии.

Итак, упругие колебания, наложенные на кристаллизующуюся сталь Х27, значительно улучшают механические свойства металла не только в литом состоянии, но и после термической обработки (диффузионный отжиг при 1500—1550 К в течение часа, охлаждение на воздухе). Изменения пределов прочности и текучести сравнительно небольшие по сравнению с этими характеристиками при обычной кристаллизации. Пластические же характеристики металла, обработанного упругими колебаниями, значительно улучшились. Так, в литом состоянии относительное сужение возросло примерно в 7 раз, относительное удлинение — более чем в 3 раза, ударная вязкость — примерно в 2,5 раза (в горячедеформированном состоянии ударная вязкость повысилась примерно в 4 раза). Кроме того, показано, что суммарное обжатие при холодной прокатке литой стали Х27 после обработки кристаллизующегося слитка упругими колебаниями увеличивается примерно в 2—4 раза. Это имеет большое значение для холодной деформации таких материалов.

Изменение механических характеристик при обработке упругими колебаниями у всех исследованных сплавов объясняется улучшением структуры литого металла, так как химический состав и содержание газов в металле практически не изменялись. Во всех сплавах обнаружилось, что зерна измельчены, практически отсутствует дендритная структура, ликвационные прослойки стали тоньше, распределение неметаллических включений по объему слитка более равномерно.

Да, упругие колебания при обработке кристалли-

зующегося расплава улучшают механические характеристики металла. Более того, в ряде случаев уменьшается склонность металла к образованию кристаллизационных трещин. Однако эффективность и экономичность ультразвуковой обработки расплава зависят от ряда факторов, например от «обрабатываемости» расплава ультразвуком. Под этим свойством подразумевается совокупность всех изменений структуры металла, закристаллизовывающегося в ультразвуковом поле, по сравнению со структурой, получающейся при обычных условиях кристаллизации. В свою очередь, степень обрабатываемости металлов и сплавов зависит от эффективности проникновения ультразвуковых колебаний в объем расплава, от его физических свойств, влияющих на условия кристаллизации, от температуры разливки, метода обработки, скорости отвода тепла и т. д. На деятельности ультразвуковых колебаний в расплаве отражаются также величина поверхностного натяжения на границе между излучателем и расплавом, плотность (вязкость) его и волновое сопротивление.

Все перечисленные выше факторы определяют величину необходимой мощности ультразвуковых колебаний, а следовательно, экономичность ультразвуковой обработки металлов в процессе их кристаллизации.

Практическое использование ультразвука, как уже упоминалось, началось в 40—50-м годах нашего столетия. Но и за этот небольшой срок ученые и инженеры сумели выявить множество возможностей его применения в самых разнообразных технологиях. Проведены серьезные исследования, создано солидное аппаратное оформление. Но, как читатель мог уяснить, прочтя книжку, это лишь первые шаги. Тем не менее технический прогресс уже не может обходиться без ультразвука. А это свидетельствует о том, что в ближайшее время ультразвуковые колебания станут неотъемлемой частью инструментария самых различных отраслей техники.

Литература

1. А. И. Марков. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. М., «Машиностроение», 1968.
2. В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. Обработка металлов давлением с ультразвуком. Минск, «Наука и техника», 1973.
3. В. П. Северденко, В. В. Клубович, А. В. Степаненко. Прокатка и волочение с ультразвуком. Минск, «Наука и техника», 1970.
4. И. Г. Хорбенко. Ультразвук в машиностроении. М., «Машиностроение», 1974.
5. Б. И. Быборнов. Ультразвук в машиностроении. М., «Машиностроение», 1974.
6. О. В. Абрамов. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М., «Металлургия», 1972.
7. Б. А. Агранат. Ультразвуковая технология. М., «Металлургия», 1974.
8. Л. Д. Розенберг. Физические основы ультразвуковой технологии. М., «Наука», 1970.

СОДЕРЖАНИЕ

Физика процесса	3
Обработка материалов	6
Пайка, сварка	32
Жидкие вещества	36
Неразрушающий контроль	47
Металлургия	53
Литература	59

**Владимир Владимирович Клубович,
Петр Петрович Прохоренко**

УЛЬТРАЗВУК В ТЕХНОЛОГИИ

Гл. отраслевой редактор В. П. Д е м ь я н о в
Редактор Г. И. Ф л и о р е н т
Мл. редактор Н. А. Л ь в о в а
Обложка художника А. А н и с и м о в а
Худож, редактор Т. И. Д о б р о в о л ь н о в а
Техн. редактор А. М. К р а с а в и н а
Корректор В. В. К а н о ч к и н а

Т-13707. Индекс заказа 75009. Сдано в набор 11/VII-77 г. Подписано к печати 8/VII-77 г. Формат Бумаги 84×108 1/32. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,18. Тираж 60990 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 1264. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 11 коп.

СЕРИЯ «ТЕХНИКА»

Брошюры серии освещают проблемы научно-технического прогресса, вопросы экономической стратегии КПСС, дальнейшего наращивания технической мощи страны, развития тяжелой индустрии и машиностроения, интенсификации и автоматизации производства, создания новых технологий, средств повышения надежности, применения счетно-решающих устройств, разработки новых материалов, контрольно-измерительной аппаратуры, энергетических установок и т. д. Особое внимание уделяется проблемам качества и эффективности.

Серия рассчитана на специалистов различных отраслей народного хозяйства, пропагандистов новой техники, студентов технических вузов, на всех тех, кто интересуется техническим прогрессом.

В 1977 году подписчики получают 12 номеров. Среди них.

Колесов И. М., доктор технических наук

СЛУЖЕБНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Автор показывает, что качество, эффективность машины, прибора, аппарата находятся в прямой зависимости от точности формулировки его служебного назначения и технических условий; что ошибки в этих формулировках заранее обрекают конструктора на неудачу. Показаны пути устранения подобных ошибок.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ И СОЗДАНИЕ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Десятая пятилетка — пятилетка эффективности и качества. Следовательно, критерий «качество» будет одним из основных при оценке новой техники. Автор рассматривает жизненный цикл из-

деля: разработка — создание — транспортировка к месту использования — эксплуатация и показывает, как на каждом из этих этапов можно управлять качеством. Читатель узнает, каким образом качество формируется в процессе исследований и проектирования, воспроизводится при изготовлении, сохраняется при обращении и реализации и поддерживается во время эксплуатации.

XXV СЪЕЗД КПСС И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Как известно, XXV съезд КПСС поставил задачу перейти в десятой пятилетке от создания и внедрения отдельных машин и технологических процессов к разработке и производству высокоэффективных систем машин, оборудования, технологий, обеспечивающих комплексную механизацию и автоматизацию. Именно с этих позиций в брошюре рассматриваются достижения отраслей, производящих средства производства, энергетики, химии, приборостроения, проблемы автоматизации. Показано, как процесс совершенствования технологического оборудования — от гигантских металлорежущих станков до микродатчиков — объективно отражается на качестве и эффективности его работы.

**В 1978 ГОДУ
НАМЕЧЕНЫ К ИЗДАНИЮ
СЛЕДУЮЩИЕ БРОШЮРЫ:**

ТЕХНИКА ПЯТИЛЕТКИ

АВТОМАТИЗАЦИЯ — НОВЫЕ ИДЕИ

**В. И. Моссаковский, академик АН УССР
МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ И НОВАЯ ТЕХНИКА**

**Е. А. Панфилов, кандидат технических наук, Ю. И. Бло-
жин, кандидат технических наук
СТАНДАРТЫ И ИНФОРМАЦИЯ**

**Н. И. Хисамутдинов, кандидат технических наук
ГОРИЗОНТЫ БУРЕНИЯ**

**Е. А. Авсиевич, кандидат технических наук
ЛАЗЕРЫ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**Л. В. Черневский, доктор технических наук, Н. В. Ми-
хайлова, кандидат технических наук
ПОДШИПНИКИ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ**

**Н. И. Комяк, доктор технических наук
РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ В ТЕХНИКЕ и др.**

