

Волков С.С., Черняк Б.Я.

Сварка пластмасс ультразвуком

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
В67

Волков С.С.
В67 Сварка пластмасс ультразвуком / Волков С.С., Черняк Б.Я. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 255 с.

ISBN 978-5-458-36222-1

Во книге содержится обширный материал по ультразвуковой сварке пластмасс, накопленный за последние 10 лет как в СССР, так и за рубежом. Рассмотрены различные схемы сварки, дан анализ механизма образования сварных соединений. Описаны технология и режимы сварки различных полимерных материалов, показано их влияние на прочность и структуру сварных соединений. Приведены конструкции современных ультразвуковых сварочных машин и методы контроля качества сварных соединений. Предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами переработки и сварки пластмасс, а также для преподавателей, аспирантов и студентов, специализирующихся в этой области.

ISBN 978-5-458-36222-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

Более двадцати пяти лет тому назад в МВТУ им. Н. Э. Баумана были впервые разработаны методы ультразвуковой сварки полимерных материалов (А. В. Мордвинцева, Н. А. Ольшанский), впоследствии развитые авторами настоящей книги, а также рядом коллективов страны (ВНИИЭСО, НИАТ, ТАДИ, ОмПИ, ВНИИЛТЕХМАШ и т. д.). За эти годы созданы отечественные ультразвуковые сварочные установки, принципиально новые технологические процессы сварки пластмасс и синтетических волокнистых материалов, разработаны оригинальные способы сопутствующего и окончательного контроля качества сварных соединений. Большая часть работы выполнялась в рамках национальных программ и сотрудничества со странами — членами Совета Экономической Взаимопомощи.

Расширение областей применения этого прогрессивного метода соединения полимеров невозможно без создания научных основ процесса, оборудования для сварки и автоматизированного управления процессом с использованием последних достижений электроники, а также без разработки четких рекомендаций по технологии ультразвуковой сварки всей номенклатуры термопластов, используемых в различных отраслях промышленности. В некоторой степени пробел по указанным вопросам ликвидирован авторами настоящей книги. Ряд вопросов теоретического плана (тепловые процессы, объемное развитие взаимодействий на границе раздела деталей, совершенствование расчетных методов определения параметров режима сварки) и практического характера (создание экономичных источников питания, сварочных машин, средств измерения и контроля) ждут своих исследователей. Это и неудивительно, так как предмет ультразвуковой сварки, как, впрочем, и ряда других методов сварки металлов и пластмасс, стоит на стыке наук, таких, как механика вязкоупругих сред, реология, акустика, электроника и др.

Думаю, что книга послужит дальнейшему развитию работ в области ультразвуковой сварки пластмасс и синтетических волокнистых материалов. Она несомненно будет полезной для инженерно-технических и научных работников, занимающихся исследованием и внедрением этого процесса в промышленность, а также для аспирантов и студентов сварочных специальностей.

Академик Г. А. Николаев

ВВЕДЕНИЕ

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года» намечено довести выпуск синтетических смол и пластических масс до 6,8—7,1 млн. т, а химических волокон и нитей — до 1,85 млн. т. Особое внимание будет уделяться ускоренному развитию производства современных конструкционных пластических масс и других полимерных материалов.

Такое бурное развитие производства пластмасс обусловлено как экономическими факторами, так и рядом ценных, а порой и уникальных свойств этих материалов. Для производства и переработки пластмасс требуется меньше затрат энергии, чем для производства и переработки металлов; удельная стоимость их также ниже [1]. Пластмассы хорошо формуются, окрашиваются практически в любой цвет, имеют небольшую плотность, высокую химическую стойкость, эластичность, низкую теплопроводность, хорошие диэлектрические и антифрикционные свойства.

Технологический процесс изготовления даже самых простых изделий из пластмасс, как правило, включает в себя операции соединения отдельных деталей или узлов изделий друг с другом. Так, например, в производстве товаров народного потребления в настоящее время наметилась тенденция усложнения формы изделий для придания им наибольшей художественной выразительности. Технологически выполнение изделий подобного рода за одно целое зачастую практически невозможно. Эта задача успешно решается при расчленении изделия на отдельные технологические простые детали и последующем их соединении. Для этого применяются сварные, резьбовые, заклепочные, клеевые и другие виды соединений. Наиболее перспективным из названных способов является сварка, так как при ее использовании можно механизировать и автоматизировать процесс соединения деталей, повысить качество соединений и культуру производства, снизить трудоемкость операций.

Для анализа процессов сварки пластмасс следует привлечь хорошо разработанные термодинамические представления о сварке металлов. Согласно этим представлениям [2], в сварочной зоне протекают два основных процесса: 1) подвод и преобразование энергии и 2) движение (или превращение) вещества. Интенсивность процесса преобразования энергии и его характер определяют вид сварки.

Для осуществления процесса сварки необходима активация свариваемых поверхностей. Это достигается за счет подвода и в некоторых случаях — преобразования энергии. Введение вещества необходимо только при некоторых видах сварки пластмасс, например при сварке нагретым газом с применением присадочного материала, а также при сварке экструдированной присадкой (расплавом). В последнем случае с присадочным материалом подводится и энергия.

Движение вещества при различных видах сварки пластмасс может быть значительным. Оно обусловлено перемешиванием и диффузией, протекающими в материале, напругой до вязкотекучего состояния. Особым видом движения следует считать химическую реакцию активных групп, расположенных на свариваемых поверхностях, между собой или с активными группами промежуточного вещества, которая также может протекать при подводе энергии того или иного вида (химическая сварка) [3, 4].

Как следует из термодинамических представлений о сварке, способы сварки пластмасс следует классифицировать в первую очередь по виду энергии, подводимой к свариваемым деталям, а затем уже по наличию или отсутствию статического давления, прикладываемого к ним. Такой подход был впервые предложен А. В. Мордвинцевой и Н. А. Ольшанским и развит в последующих работах [5—7]. Энергетический анализ показывает, что все известные в настоящее время процессы сварки термопластов осуществляются путем введения трех видов энергии: *тепловой, механической и электромагнитной* (рис. 0.1). В свою очередь, *способы сварки с подводом тепловой энергии* следует разделить на термические и термомеханические.

К *термическим* относятся виды сварки, при которых статическое давление не играет существенной роли в образовании сварного соединения, например сварка экструдированной присадкой или газовыми теплоносителями. Образование сварного соединения в этом случае определяется исключительно количеством подводимой тепловой энергии.

К *термомеханическим* относятся виды сварки, при которых неразъемное соединение образуется вследствие подвода тепловой энергии и приложения статического давления. При термо-

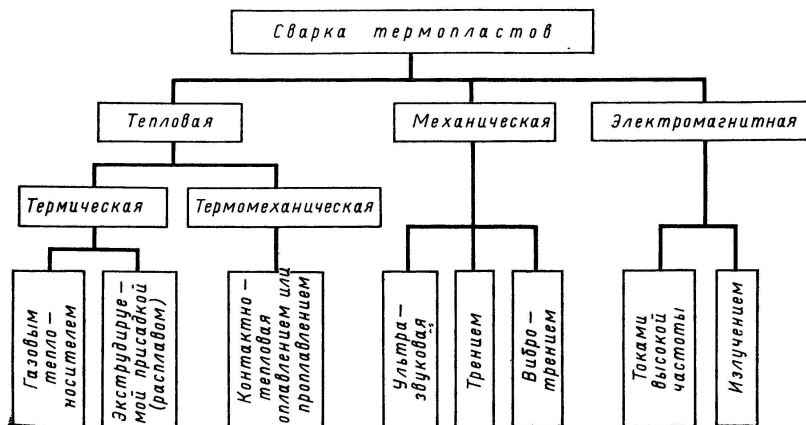


Рис. 0.1. Классификация способов сварки термопластов

механических видах сварки тепловая энергия может подводиться к границе раздела свариваемых деталей следующими путями: а) за счет теплопроводности свариваемых деталей (*контактно-тепловая сварка проплавлением*); б) за счет теплопередачи от источника теплоты к свариваемым поверхностям (*контактно-тепловая сварка оплавлением*) [7].

При механических видах сварки тепловая энергия генерируется внутри свариваемых деталей за счет превращения механической энергии, подведенной извне, в тепловую. Это может быть: механическая энергия трения или вибротрения свариваемых поверхностей, превращающаяся в теплоту, которая вследствие малой теплопроводности пластмасс локализуется в сварочной зоне; механическая энергия упругих колебаний (*ультразвуковая сварка*).

При подводе электромагнитной энергии к свариваемым деталям тепловая энергия также генерируется в них либо за счет способности звеньев макромолекул полимеров поляризоваться при наложении внешнего электрического поля (*сварка токами высокой частоты*), либо за счет поглощения энергии электромагнитных колебаний (*сварка инфракрасным излучением, сварка лазером*).

Из всех существующих способов сварки пластмасс невозможно выделить единственный, который бы удовлетворял всем экономическим, технологическим и эксплуатационным требованиям. Вид применяемых источников нагрева, технологические принципы, положенные в основу процесса сварки, степень механизации и автоматизации в немалой степени зависят от той физической формы, в которой используются пластмассы как конструкционные материалы. По этому признаку можно выделить: монолитные изделия (условно трехмерные) — детали машин, емкости, трубы, профили, плиты, фасонные детали; пленочные изделия (условно двухмерные), используемые в качестве упаковки, покрытий, подложек, изолирующих конструкций и т. п.; волокна (условно одномерные материалы), которые используются для получения нетканых полотен, бытовых и технических тканей [8]. Комбинацией последних двух физических форм являются искусственные кожи — волокнистые материалы, имеющие полимерное покрытие. Области применения различных способов сварки в зависимости от физической формы полимера и вида изделия приведены в табл. 0.1 (по данным стран — членов СЭВ) [1].

Каждый из способов соединения пластмасс имеет свои преимущества и недостатки, и в зависимости от физико-механических свойств материала, вида и назначения изделия, серийности выпуска и т. д. предпочтение может быть отдано тому или иному из перечисленных способов сварки. Например, способы сварки нагретым газом и нагретым инструментом являются наиболее простыми и экономичными, характеризующимися достаточно высокими прочностными характеристиками получаемого

Таблица 0.1. Основные области применения сварки пластмасс

Физическая форма изделия	Вид изделия	Источники энергии и технологические принципы, положенные в основу процесса сварки	Степень механизации и автоматизации процесса
Трехмерная	Трубы, плиты	Горячий газ, нагретый инструмент, трение, экструзия	Преимущественно ручной, механизированный и частично автоматизированный
	Фасонные детали	Ультразвук, нагретый инструмент, трение и вибротрение	Автоматизированный
Двухмерная	Пленочная упаковка, покрытия, подложка	Токи высокой частоты, ультразвук, нагретый инструмент, излучение	Преимущественно автоматизированный и механизированный
Одномерная	Волокнистые нетканые материалы	Нагретый инструмент, ультразвук	То же
	Ткани из синтетических волокон	Ультразвук, токи высокой частоты, нагретый инструмент, излучение	»
Комбинированная	Волокнистые материалы с пленочным покрытием (искусственные кожи)	То же	»

соединения. Однако значительная зона разогрева препятствует применению этих способов для консервации легковоспламеняющихся веществ, пищевых продуктов и лекарственных препаратов, портящихся при повышенных температурах. Вследствие загрязнения поверхностей свариваемых изделий значительно уменьшается прочность сварных соединений в этих случаях.

Сварка токами высокой частоты отличается высокой производительностью, но в чистом виде она неприменима для пластмасс с низким фактором диэлектрических потерь (например, полиэтилена, полипропилена и т. д.). При сварке токами высокой частоты емкостей из поливинилхлорида, наполненных жидкостями, может происходить электрический пробой, приводящий к разрушению изделия.

Сварку экструдированной присадкой целесообразно применять для получения швов большой протяженности при соединении материалов достаточно большой толщины и нецелесообразно — для соединения пленочных материалов.

Как следует из табл. 0.1, одним из перспективных способов соединения пластмасс, получившим в последние годы большое развитие как в нашей стране, так и за рубежом, является ультразвуковая сварка. По данным экспертных оценок существующей структуры применения в странах — членах СЭВ разных способов сварки пластмасс для различных видов изделий, в период до 1995 г. ожидается значительное увеличение объема при-

менения современных высокопроизводительных способов сварки, среди которых одно из ведущих мест принадлежит ультразвуковой сварке [1]. Интерес к ней не случаен. В литературе неоднократно отмечались преимущества ультразвуковой сварки, благодаря которым в ряде случаев этот способ соединения пластмасс становится незаменимым [5—7, 9—11].

Основными отличительными чертами ультразвуковой сварки пластмасс являются: возможность сварки по поверхностям, загрязненным различными продуктами; локальное выделение тепла в зоне сварки, что исключает перепрев пластмассы, имеющий место при сварке нагретыми газами, нагретым инструментом и т. д.; возможность сварки некоторых пластмасс на большом удалении от места подвода энергии; возможность выполнения соединения в труднодоступных местах; возможность сварки пластмасс с узким интервалом кристаллизации; возможность соединения разнородных полимеров; отсутствие радиопомех и электрического напряжения на сварочном инструменте и т. д.

Ультразвуковая сварка может заменить механические методы соединения и склеивания целой группы полимеров, например полистирола, лавсана, капрона, поливинилхлорида и др. Она широко применяется при изготовлении изделий пищевой и легкой промышленности, парфюмерии, радиоэлектроники и электротехники, товаров широкого потребления из пластмасс. О масштабах применения ультразвуковой сварки говорит тот факт, что, например, фирма «Branson» (США) предлагает 82 типа различных машин для осуществления этого процесса; производительность отдельных машин достигает 10 тыс. изделий в час; максимальные габариты изделий, получаемых сваркой на многоточечных машинах (до 14 акустических устройств в одном агрегате), составляют более 700 мм [10].

Весьма ценным является то, что оборудование, предназначенное для ультразвуковой сварки полимеров, может использоваться для заделки (запрессовки) металлической арматуры в полимеры. Можно запрессовывать втулки ступиц, манжеты, выводные зажимы, шарниры, крепежные детали, рукоятки, установочные штифты, клеммы, декоративные детали и др. Возможно также использование ультразвука для локального соединения клепкой различных полимеров с металлами. Для резки пластмасс используется тот же комплект оборудования, что и для сварки, только наконечник волновода при этом выполняется в виде ножа.

Выполненные у нас в стране работы показали, что ультразвуковые колебания могут применяться при сварке и резке металлов, биологических тканей [12].

Немаловажной является и экономическая эффективность процесса ультразвуковой сварки. По расчетам экономический эффект от внедрения одной серийной установки для ультразвуковой сварки составляет 10—15 тыс. руб. в год, а специализированных машин — 50—100 тыс. руб.

С момента выхода первого издания книги «Сварка пластмасс ультразвуком» прошло десять лет. За это время в нашей стране и за рубежом получены новые данные по теории и технологии ультразвуковой сварки пластмасс, разработаны новые схемы осуществления этого процесса, расширена номенклатура пластмасс, свариваемых ультразвуком, созданы новые сварочные установки и системы автоматического управления процессом. Все это привело к необходимости переиздания и существенной переработки книги.

В гл. I, посвященную вопросам классификации схем ультразвуковой сварки и областям их применения, добавлены новые схемы сварки: с тангенциальным вводом ультразвуковых колебаний; формированием профильного сварного шва из расплава; с управлением процессом по изменению знака ускорения деформирования и толщине сварного шва, а также ряд других схем, описание которых можно найти только в специальных изданиях. Вместе с тем авторы сочли целесообразным не приводить в новой книге те схемы ультразвуковой сварки, которые так и не нашли промышленного применения.

При изложении теоретических основ сварки (гл. II), помимо обсуждавшихся ранее вопросов преобразования энергии механических колебаний в тепловую энергию и объемного развития взаимодействия на границе раздела деталей, рассмотрены также вопросы концентрации энергии в этой зоне, взаимосвязи процессов теплообразования и деформирования со структурными превращениями и прочностью сварных соединений, приведены критерии свариваемости пластмасс ультразвуком.

Существенно расширена гл. III, посвященная технологии ультразвуковой сварки пластмасс и синтетических тканей. Здесь приведены основы расчетных методов определения параметров режима сварки, новые рекомендации по сварке широкой номенклатуры мягких и жестких пластмасс, волокнистых синтетических материалов и искусственных кож.

В гл. IV дано описание отечественного и зарубежного оборудования для ультразвуковой сварки пластмасс, а в гл. V нашли отражение различные методы контроля качества сварных соединений.

Авторы хотели бы выразить благодарность за неоценимую помощь, оказанную при проведении работ по исследованию и внедрению ультразвуковой сварки пластмасс в промышленность академику Г. А. Николаеву. Они благодарят коллективы лабораторий ультразвуковой сварки пластмасс МВТУ им. Н. Э. Баумана и Ташкентского автомобильно-дорожного института за помощь в проведении экспериментов, а также Ю. В. Холопова, К. И. Зайцева, Л. Н. Мацюк, А. В. Богдашевского, И. В. Мозгового за ценные советы, данные авторам при подготовке настоящего издания книги.

ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ СВАРКИ ПЛАСТМАСС

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Ультразвуковые колебания представляют собой упругие волны, распространяющиеся в любой материальной среде, находящейся в твердом, жидком или газообразном состоянии. Возникновение упругих волн обусловлено тем, что при смещении некоторой точки упругой среды под действием внешнего усилия возникают упругие силы, стремящиеся возвратить точку в положение равновесия.

Всякая гармоническая волна, т. е. волна, в которой все изменения состояния среды происходят по синусоидальному закону, характеризуется следующими величинами: периодом T или частотой колебаний f , равной числу колебаний в единицу времени ($f=1/T$); круговой частотой $\omega=2\pi f$; скоростью перемещения фазы, или фазовой скоростью, c ; длиной волны λ , равной расстоянию между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе ($\lambda=cT=c/f$).

Ультразвуковыми являются упругие колебания, частота которых превышает 16 000 Гц (колебаний в секунду) [13].

В случае, когда фазовая скорость зависит от частоты, возникает дисперсия скорости, и потому имеет смысл говорить о групповой скорости. Значение скорости зависит от типа волн, распространяющихся в среде. Если частицы среды в процессе колебания перемещаются в направлении распространения волны, то колебания называются *продольными*. Если же перемещение частиц перпендикулярно направлению распространения волны, то колебания называются *поперечными*. В жидкостях и газах могут распространяться только продольные волны. В твердых телах могут распространяться оба типа волн, а также *изгибные*, *крутильные* и *поверхностные* волны.

Фазовая скорость звука для продольной волны в неограниченной твердой среде равна

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}}, \quad (1.1)$$

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность среды; K — модуль объемного сжатия; G — модуль сдвига.

Для тонких стержней, поперечные размеры которых много меньше длины волны, когда можно пренебречь поперечной деформацией ($\nu=0$), из (1.1) получим так называемую стержневую скорость c :

$$c = \sqrt{E/\rho}.$$

Для толстых стержней круглого сечения, для которых $0,15 < d/(2\lambda) < 0,7$, рекомендуется [13] пользоваться следующей формулой:

$$c' = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[1 - \nu^2 \pi^2 \left(\frac{d_m}{2\lambda} \right)^2 \right], \quad (1.2)$$

где d_m — максимальный диаметр стержня.

Предположим, что в произвольной точке упругой среды действуют переменные силы. Это приведет к переменным смещениям, деформациям и напряжениям, которые будут распространяться в среде от точки приложения силы. Каждому моменту времени будет соответствовать определенное распределение смещений, деформаций и напряжений в упругой среде. Если это распределение перемещается, то упругая волна, распространяющаяся в стержне, называется *бегущей*; в противном случае она называется *стоячей*.

В идеальной среде, в которой отсутствует внутреннее трение, бегущая волна описывается выражением

$$u = A \sin(\omega t \pm kx), \quad (1.3)$$

где u — смещение вдоль оси x произвольной точки в любой момент времени t ; A — амплитуда смещения; k — волновое число ($k = 2\pi/\lambda = \omega/c$).

Дифференцируя (1.3) по t и по x , получим выражения для колебательных скоростей V , ускорения a и волны деформации ϵ :

$$V = \partial u / \partial t = A\omega \cos(\omega t \pm kx) = V_m \cos(\omega t \pm kx), \quad (1.4)$$

$$a = \partial^2 u / \partial t^2 = A\omega^2 \sin(\omega t \pm kx) = a_m \sin(\omega t \pm kx), \quad (1.5)$$

$$\epsilon = \partial u / \partial x = \pm kA \cos(\omega t \pm kx), \quad (1.6)$$

где V_m и a_m — амплитудные значения скорости и ускорения.

Исходя из того, что в упругой среде напряжения σ и деформации ϵ связаны законом Гука ($\sigma = E\epsilon$), получим

$$\sigma = \pm E k A \cos(\omega t \pm kx). \quad (1.7)$$

При распространении упругой волны происходит перенос энергии, причем в процессе колебаний энергия периодически переходит из потенциальной в кинетическую и наоборот. Кинетическая энергия в единице объема с учетом выражения (1.4) равна

$$E_{\text{кин}} = 0,5\rho V^2 = 0,5\rho [A\omega \cos(\omega t \pm kx)]^2.$$

Поскольку среднее значение квадрата косинуса равно $1/2$, то средняя кинетическая энергия в единице объема будет

$$\bar{E}_{\text{кин}} = 0,25\rho\omega^2 A^2. \quad (1.8)$$

Средняя потенциальная энергия определяется выражением, аналогичным (1.8), поэтому полная средняя энергия, или средняя плотность энергии в бегущей волне, равна

$$\bar{E} = 0,5\rho\omega^2 A^2 = 2\pi^2 f^2 A^2 \rho. \quad (1.9)$$

В реальной упругой среде всегда существуют силы, препятствующие распространению упругой волны. Это сопротивление может носить активный или реактивный характер. В результате активного сопротивления происходит поглощение механической энергии и выделение ее в виде теплоты. Активное сопротивление обусловлено внутренним трением в упругой среде. Реактивное сопротивление обусловлено тем, что любой бесконечно малый элемент упругой среды обладает массой и упругостью. Сопротивление среды распространению упругой волны характеризуется модулем комплексного сопротивления Z и определяется как отношение амплитуды колебательной силы к амплитуде колебательной скорости:

$$Z = F_m/V_m = \sqrt{R^2 + (\omega_b m - D/\omega_b)^2}, \quad (1.10)$$

где F_m — амплитуда колебательной силы; V_m — амплитуда колебательной скорости; R — активное сопротивление; ω_b — круговая частота вынужденных колебаний; m — масса; D — упругость.

Часто пользуются понятием интенсивности, или силы звука I . Это энергия, проходящая в единицу времени через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны. В плоской волне интенсивность звука равна энергии, заключенной в параллелепипеде, площадь основания которого равна единице, а высота — скорости звука c :

$$I = \bar{E}c = 0,5\rho c\omega^2 A^2 = 2\pi^2 t^2 A^2 \rho c. \quad (1.11)$$

Величина ρc , входящая в выражение (1.11), называется удельным волновым сопротивлением упругой среды. Оно носит активный характер [13], т. е. не может запасть энергию, подобно инерционному или упругому элементу. Однако оно и не преобразовывает энергию упругих колебаний в теплоту подобно элементу трения. Активный характер волнового сопротивления заключается в том, что при перемещении энергии колебаний от источника колебаний в каждом поперечном сечении среда поглощает энергию за счет передачи этой энергии следующему сечению, обладающему тем же сопротивлением.

При распространении волн в вязкоупругих средах, каковыми являются, например, полимерные материалы, происходит уменьшение интенсивности волны, описываемое уравнением

$$I(x) = I_0 \exp(-2\alpha x),$$

где I_0 — интенсивность в начальной точке (точка ввода колебаний); α — коэффициент затухания.

Для упругой среды с потерями выражения, описывающие бегущие волны, могут быть получены путем использования формулы (1.3), в которую при этом следует ввести дополнительный множитель $e^{-\alpha x}$.

Поскольку в свариваемом полимерном материале происходит поглощение энергии, то его можно рассматривать как некоторое сопротивление, которым нагружена колебательная система. По аналогии с выражением (1.9) активная мощность, подводимая к