

# Технология и технологические машины

УДК 621.791.16

DOI 10.18698/0536-1044-2016-3-39-48

## Технологические особенности ультразвуковой сварки композиционных материалов на полимерной основе

**С.С. Волков, М.А. Прилуцкий**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Technological Features of Ultrasonic Welding of Polymer-Based Composite Materials

**S.S. Volkov, M.A. Prilutskiy**BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: map@bmstu.ru

**i** Определена принципиальная возможность соединения композиционных материалов на полимерной основе с помощью ультразвуковой сварки. Опробована ультразвуковая сварка конструкций, состоящих из нескольких слоев полимерных композиционных материалов. При этом максимальное число слоев, которое можно соединять при одноразовом пропускании звукового импульса, достигает 4–6. Предложено при ультразвуковой сварке слоистых однонаправленных композиционных материалов использовать промежуточную прокладку из одноименного полимера, выполненную в виде мелкочаеистой сетки. Это позволит увеличить долю связующего на свариваемых поверхностях и искусственно создать в зоне сварки концентраторы напряжений для сдвига максимальных температур к границе свариваемых поверхностей. Благодаря ультразвуковой сварке можно соединять композиционные материалы различной толщины. Наилучшей является толщина 1–2 мм, так как при сварке более тонких материалов происходит значительный теплоотвод в материал волновода-инструмента или опоры. При сварке композитов с толщиной более 2,5 мм происходит значительное рассеивание и затухание энергии ультразвуковой сварки в свариваемом материале. Разработаны технологические способы, обеспечивающие сохранение или восстановление исходной ориентационной направленности полимерного связующего, входящего в композит.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, давление, ультразвуковая сварка, амплитуда, матрица, наполнитель, волокна.

**i** The possibility of connecting polymer-based composite materials by ultrasonic welding is fundamentally confirmed. Ultrasonic welding is tested on structures consisting of several layers of polymer composite materials. The maximum number of layers that can be connected by a single-pass sound impulse is 4 to 6. When welding unidirectional composite materials, it is proposed that an intermediate filler made of the same polymer be used, in the form of a fine-mesh wire. This allows increasing the portion of the binder on the welded surfaces and artificially creating stress risers in the welding zone to shift the maximum temperatures to the boundary of the welded surfaces. Materials of various thickness can be

connected by ultrasonic welding. The optimal thickness is 1–2 mm because when welding thinner materials, there is significant heat dissipation into the material of the waveguide tool or anvil. When composites of more than 2.5 mm thickness are welded, there is significant scattering and attenuation of the ultrasonic welding energy in the welded material. Technological methods are developed that ensure preservation or restoration of the initial orientation of the polymer binder in the composite.

**Keywords:** composite materials, pressure, ultrasonic welding, amplitude, matrix, filler, fiber.

Разработка нового класса высокотемпературных термопластичных материалов, таких как полисульфон, поликарбонат и т. п., открывает широкие возможности применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) на их основе. Ультразвуковая сварка (УЗС) является одним из перспективных методов их соединения. Сварные конструкции, выполненные из усиленных короткими или непрерывными волокнами углепластиков, представляют особый интерес [1–3].

По объему применения, многообразию технологических вариантов и количеству различных типов оборудования сварка занимает важное место среди методов изготовления изделий из пластмасс и композиционных материалов. Сварка в максимальной степени позволяет реа-

лизовать основные достоинства ПКМ, не нарушая герметичности и целостности заготовки и не требуя многостадийных технологических процессов. По сравнению с другими способами соединения сварка имеет существенные преимущества: высокую производительность, низкую трудоемкость, большую прочность и плотность сварных соединений, экономичность, экологичность, улучшенные условия труда и уменьшенные производственные площади [1].

Способ УЗС композиционных материалов, выполненных на термопластичной основе, основан на нагреве контактируемых поверхностей до температуры плавления полимера в результате превращения энергии колебаний ультразвуковой частоты 20...22 кГц в тепловую энергию [1]. Детали, подлежащие сварке, сдавливают с определенным усилием и к месту сварки подают механические колебания ультразвуковой частоты. Действие колебаний и давление приводят к образованию сварочного соединения (рис. 1).

Возможность получения сварного соединения и его прочность существенно зависят от амплитуды вводимых в свариваемые изделия упругих колебаний. Значение амплитуды находится в пределах 25...60 мкм и зависит от структуры свариваемых материалов. При сварке изделие зажимают между концом волновода и опорой, которая может быть подвижной или неподвижной.

Ультразвуковую энергию можно вводить на значительном расстоянии от места соединения, что позволяет сваривать большие толщины между собой и пустотелыми изделиями. Сварку можно проводить по поверхностям, покрытым маслом, жиром, соляными и кислотными покрытиями, пылью и т. п. Процесс УЗС композиционных материалов протекает очень быстро, что является его преимуществом перед другими видами сварки [4, 5].

Композиционными называют сложные искусственные материалы, в состав которых входят существенно различающиеся по свойствам

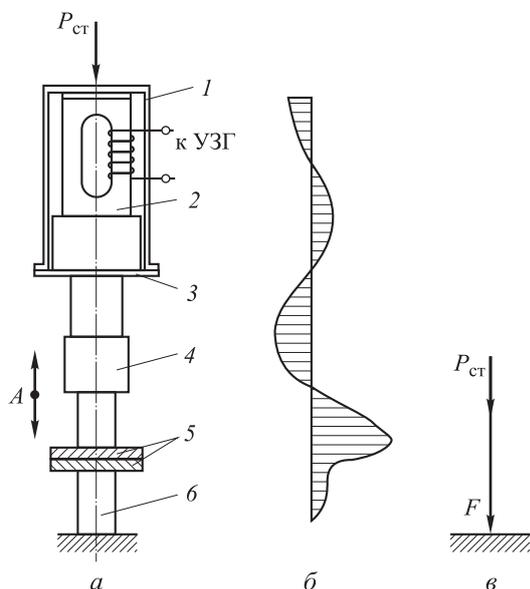


Рис. 1. Принципиальная схема УЗС с нормальным вводом колебаний:

- а — схема ультразвуковой установки (1 — корпус преобразователя с охлаждающей жидкостью;
- 2 — преобразователь с обмоткой; 3 — трансформатор упругих колебаний; 4 — волновод-инструмент;
- 5 — свариваемые детали; 6 — опора; А — амплитуда колебаний волновода; УЗГ — ультразвуковой генератор);
- б — эпюра амплитуды смещения колебательной системы;
- в — расположение векторов статического давления  $P_{ст}$  и динамического усилия  $F$

нерастворимые или малорастворимые друг в друге компоненты, разделенные в материале четкой границей. В технологии машиностроения композиционными считаются такие материалы, в состав которых входят два и более компонента. Кроме основных структурных составляющих (связующего и наполнителя), композит может содержать различные добавки, изменяющие характеристики материала. Аналогами композиционных материалов являются некоторые природные материалы. Например, в костях животных тонкие прочные нити фосфатных солей соединены пластичным коллагеном, связующим нити в монолитный материал [6–8].

Основой композиционных материалов (матриц) являются металлы или сплавы (на металлической основе), а также полимеры, углеродные и керамические материалы (на неметаллической полимерной основе). В матрице равномерно распределены наполнители, называемые упрочняющими или армирующими компонентами. Матрица связывает наполнители в общую композицию и придает ей определенную форму. Свойства матрицы в значительной степени определяют технологические режимы получения и обработки композиционных материалов и важные эксплуатационные характеристики (рабочую температуру, удельную прочность и др.). Наполнители улучшают свойства композиционных материалов в определенном заданном направлении: повышают прочность, твердость, упругость и др. [3, 4].

По форме наполнители бывают нульмерные (порошкообразные), одномерные (волокна) и двумерные (ткань, пластины). По схеме армирования одномерным наполнителем композиционные материалы подразделяют на группы с одноосным, двухосным и трехосным армированием [6].

Основными преимуществами ПКМ, определяющими их применение в производстве конструкций и деталей, являются: высокие ударная прочность и удельная жесткость, повышенная способность к пластическому деформированию (особенно при термопластичной матрице), пониженные материалоемкость и масса конструкции [6, 7].

Известно, что в качестве связующего в ПКМ могут быть использованы терморезистивные и термопластичные полимеры. В аэрокосмической и оборонной технике применяют композиционные материалы, выполненные на

основе реактопластов. Производство же композиционных материалов на термопластичной основе составляет около 40 % от общего выпуска ПКМ.

Однако, как показывает анализ зарубежной и отечественной литературы, реактопласты не являются оптимальным связующим в производстве ПКМ вследствие низкой теплостойкости, попытки повышения которой приводят к снижению деформации при разрыве и ударной прочности. Целесообразно расширить производство ПКМ на термопластичной основе, в которых в качестве связующего могут быть использованы полисульфон, полиэфирэфиркетон и другие высокотемпературные полимеры с температурой плавления от 360 до 450 °С. Такие композиционные материалы имеют повышенную способность к пластическому деформированию, большую ударную вязкость и значительно меньшее, по сравнению с реактопластами, водопоглощение (соответственно 1,5 и 5,0 %), поэтому их теплостойкость во влажной среде снижается незначительно. Композиционные материалы на термопластичной основе имеют практически неограниченный срок хранения, уменьшенный цикл переработки, а также возможность многократной переработки. Кроме того, применение конструктивных элементов из указанных ПКМ расширяет диапазон способов их соединения [3, 4].

Если элементы конструкций из реактопластов можно соединять тремя способами (механическим, склеиванием, химической сваркой), то соединение композиционных материалов на основе термопластичного связующего, кроме указанных способов, включает в себя различные виды сварки (токама высокой частоты, нагретым инструментом, лазерную, ультразвуковую) в зависимости от структурных составляющих композита, формы и размеров изделия и пр. Результаты предварительных исследований показали принципиальную возможность получения сварных соединений из термопластичных композиционных материалов с помощью энергии ультразвуковых колебаний. При этом свойства сварного соединения будут определяться как свойствами композита, которые зависят от свойств компонентов и их содержания, размеров, формы, степени агломерации компонента, находящегося в меньшем количестве, прочности сцепления между наполнителем и матрицей, так и технологическими особенностями сварки [1].

При производстве конструкций в основном применяют волокнистые ПКМ. Композиции, содержащие волокна (даже короткие), обладают высоким модулем упругости, повышенными прочностью и ударной вязкостью. В качестве наполнителей используют волокна различных типов (стеклянные, борные, графитовые, полимерные). При введении в полимер коротких дискретных волокон из высокомодульных материалов механическая нагрузка распределяется между матрицей и наполнителем, поэтому основные механические свойства композиции улучшаются в той или иной степени по сравнению со свойствами матрицы. Введение непрерывных волокон в матрицу еще больше улучшает эти свойства, так как непрерывные волокна принимают на себя еще большую часть механической нагрузки, а матрица служит для передачи нагрузки к волокнам и предохранения их от повреждения [3, 6].

Наполнитель может влиять не только на свойства полимера, но и на его релаксационные переходы. Например, усиленный коротким стекловолокном полиамид не претерпевает никаких изменений релаксационных свойств. В результате простого механического усиления увеличивается модуль упругости в области температур от стеклообразного до высокоэластичного состояния. В этом случае температура «стеклования», соответствующая точке, в которой начинается уменьшение модуля, не изменяется. В других случаях, например, в системе *длинное углеродное волокно — полисульфон* под влиянием наполнителя изменяются релаксационные свойства матрицы.

Введение в полимер наполнителя значительно изменяет его характеристики под воздействием температуры. Так, если увеличение теплоемкости ПКМ примерно соответствует изменению чистого полимера, то вязкость расплава в композите уменьшается менее интенсивно, чем в чистом полимере, за счет адсорбционных сил на границе *волокно — полимер*, что снижает интенсивность процессов объемного перемешивания при сварке. ПКМ и чистый полимер также различаются по характеру изменения температурного коэффициента линейного расширения. У чистого полимера он обычно положительный, в то время как у волокна он становится положительным при 250 °С. Разница в коэффициентах может сказываться на структуре и прочности ПКМ, так как вызывает возникновение внутренних напряже-

ний при сварке и охлаждении сварного соединения [2, 9].

Цель работы — повышение прочности сварного соединения одно- и многослойных конструкций, выполненных из ПКМ, при УЗС за счет применения технологических способов, позволяющих исключить разориентацию, искривление и нарушение целостности углеродных волокон, снижающих прочность сварного соединения.

Результаты исследований показали, что соединения, выполненные из ПКМ, наполненного коротким (до 5 мм) волокном, по прочности практически равны соединениям, полученным из ПКМ с длиноволокнистым наполнителем. При этом следует учитывать, что прочность у основного материала с длиноволокнистым наполнителем на порядок выше, чем у композита с коротковолокнистым наполнителем. Это связано с тем, что прочность основного материала зависит от эффективной длины волокна, т. е. матрица может передавать практически полностью напряжения волокну. Концы волокна не несут нагрузку. По мере того как длина волокна увеличивается, доля относительно неэффективных участков волокна уменьшается, в связи с чем повышается прочность композиционных материалов.

В свою очередь, матрица определяет прочность при нагружении композиций, наполненных однонаправленными бесконечными волокнами в направлении, не совпадающем с осью волокна, и с крестообразным расположением слоев непрерывных волокон под любыми углами и т. п. [3].

Таким образом, системы, в которых волокна уложены в направлении приложения нагрузки, имеют повышенную прочность и высокий модуль упругости. В то же время ортогонально ориентированные системы, в которых волокна уложены под прямым углом друг к другу, менее прочны, но имеют хорошие свойства в обоих направлениях [10].

Свойства сварных соединений будут определяться как свойствами композиции, так и специфическими особенностями сварки. При УЗС это — место ввода энергии ультразвуковых колебаний (УЗК), размер и форма сварочного инструмента, технологические параметры сварки. Кроме того, на процесс сварки существенно влияет жесткость материала. В композитах модуль упругости может иметь различные значения в зависимости от расположения

волокон. В случае беспорядочного расположения волокон модуль упругости композиции определяют по формуле

$$E_c = KE_fV_f + E_m(1 - V_m), \quad (1)$$

где  $K$  — эмпирический параметр эффективности волокна, зависящий от  $V_f$  и отношения  $E_f/E_m$ ;  $E_f$  и  $E_m$  — модуль упругости волокна и матрицы соответственно;  $V_f$  и  $V_m$  — объемная доля волокна и матрицы соответственно.

Если же композиция содержит длинные и ориентированные вдоль направления волокна, то они имеют значительно более высокие модули упругости:

$$E_c = E_fV_f + E_mV_m. \quad (2)$$

Учитывая это, ввод УЗК следует осуществлять в направлении, совпадающем с осью волокна.

Основной сложностью получения соединений из углепластиков с термопластичной матрицей является необходимость сохранения структуры волокна под действием сварочного давления, которое должно быть не меньше давления акустического контакта, требующегося для ввода энергии УЗК, а также необходимость предотвращения изменения геометрии свариваемых деталей вследствие разогрева значительного объема полимерного материала сварочной зоны, связанного с длительным пропусканием звукового импульса, обусловленного высокой температурой плавления матрицы.

В связи с этим сварку рекомендуется выполнять в условиях замкнутого объема, т. е. принудительного формирования сварного шва за счет конструктивных особенностей опоры [5].

С помощью энергии УЗК можно соединять углепластики толщиной от 0,5 до 4 мм. Однако наилучшей с точки зрения свариваемости является толщина 1...2 мм, так как при сварке более тонких материалов происходит значительный теплоотвод в материал инструмента и опоры, а при сварке ПКМ толщиной более 2,5 мм — значительное рассеивание и затухание энергии УЗК в свариваемом материале.

В практике использования конструкций из ПКМ представляет интерес процесс получения многослойных соединений. При этом максимальное число слоев, которое можно соединять при одноразовом пропускании звукового импульса, 5–7 (толщина каждого слоя до 1,0 мм). Собранному таким образом пакету можно задавать определенные свойства, укладывая слои

тем или иным образом относительно оси волокна.

Известно, что прочность ПКМ в основном определяется свойствами армирующего элемента, т. е. волокна [2]. Полимерная матрица монолитизирует и перераспределяет нагрузку между волокнами композита. Вследствие высокой ориентационной направленности структуры волокна обеспечиваются высокие показатели прочности всего композиционного материала.

Однако нельзя механически сравнивать прочностные характеристики исходного образца и сварного соединения. При испытании исходных образцов по схеме одноосного растяжения установлено, что прочность ПКМ определяется структурой и количеством непрерывного высокопрочного волокна в объеме композита. В основе сварного соединения лежит полимерная матрица, поэтому прочность соединения зависит в первую очередь от ее физико-механических свойств и структуры, а также от прочности сцепления на границе *наполнитель — полимер*, как и в случае исходных образцов.

Результаты экспериментов показали, что основными причинами, влияющими на снижение прочности сварных соединений, являются разориентация, искривление (рис. 2) и нарушение целостности углеродного волокна, вызываемое действием статического давления, а также снижение прочности сцепления на границе *наполнитель — полимер* вследствие возникновения внутренних остаточных напряжений, обусловленных разницей температурных коэффициентов линейного расширения углеродного волокна и термопластичной матрицы, и низкая прочность связующего по сравнению с прочностью высокопрочного наполнителя (примерно на порядок).

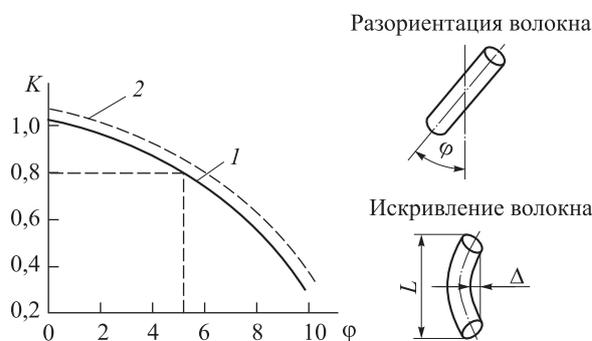


Рис. 2. Зависимость прочности ПКМ от степени разориентации (1) и искривления (2) волокон:  $K$  — коэффициент реализации прочности волокон;  $\phi$  — угол разориентации;  $L$  — длина волокна;  $\Delta$  — смещение при искривлении волокна

Для устранения неблагоприятного действия статического давления на ПКМ в процессе УЗС необходимо его снижать в момент расплавления полимерного связующего в полном объеме сварочной зоны. Полностью снять сварочное давление невозможно, так как процесс сварки может быть осуществлен только при наличии акустического контакта между сварочным инструментом и соединяемыми заготовками. Кроме того, статическое давление необходимо для предотвращения появления в сварочном шве таких дефектов, как воздушные пузыри и непровары, которые наиболее характерны для соединений, выполненных из материалов, содержащих два или более компонента, различных по природе. Поэтому сразу же после отключения УЗС свариваемые заготовки вновь сдавливают, что обеспечивает нормальное формирование сварного шва. Одновременно исключается нарушение целостности армирующего наполнителя и снижаются разориентация и искривление волокон.

В ряде случаев ультразвуковое воздействие повышает прочность сцепления композита на границе *волокно — полимер* и улучшает структуру последнего [10]. Однако, как правило, это воздействие исчисляется минутами, а иногда и часами. Процесс же УЗС длится обычно секунды. Этого времени достаточно для того, чтобы расплавить термопластичное связующее в необходимом количестве и стимулировать процессы диффузии и перемешивания для формирования сварного соединения. При этом возрастает опасность возникновения внутренних остаточных напряжений, появление которых связано с различием теплофизических свойств наполнителя и матрицы.

В процессе усадки при охлаждении полимерного связующего, имеющего более высокий температурный коэффициент линейного расширения, вдоль оси волокна появляются растягивающие напряжения (рис. 3), которые, в свою очередь, вызывают касательные напряжения на поверхности раздела. Во время воздействия на ПКМ ультразвуковыми колебаниями полимерное связующее находится в вязкотекучем и минимально напряженном состоянии. По мере остывания связующее претерпевает усадку. Хорошая прочность сцепления между наполнителем и полимером препятствует усадке и вызывает возникновение внутренних остаточных напряжений, значения которых можно определить, учитывая разницу

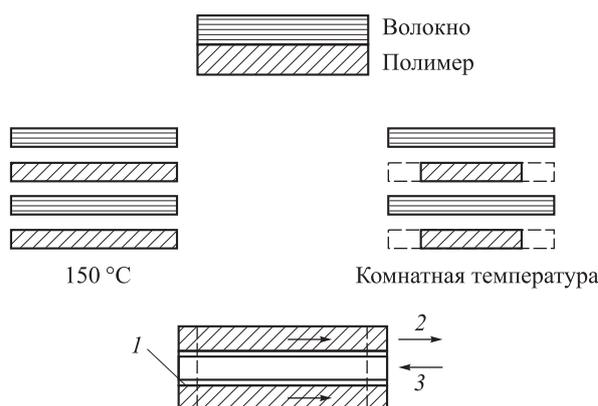


Рис. 3. Схема возникновения продольных внутренних напряжений в ПКМ:

- 1 — касательные напряжения на поверхности раздела;
- 2 — растягивающие напряжения в полимере;
- 3 — нормальное напряжение сжатия в волокне

между температурными коэффициентами линейного расширения волокна  $\alpha_f$  и связующего  $\alpha_v$  по формуле

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (3)$$

где  $E$  — модуль упругости композиции;  $\varepsilon = \Delta\alpha\Delta T$  ( $\Delta\alpha = \alpha_v - \alpha_f$ ).

В направлении, перпендикулярном оси волокна, действуют радиальные растягивающие напряжения и нормальные напряжения сжатия. Первые ослабляют прочность сцепления на поверхности раздела, а последние увеличивают ее. Эти напряжения также называют усадкой при охлаждении термопластичного связующего.

Анализ данных термографического исследования и теоретический расчет тепловых полей показали, что в процессе ультразвукового воздействия теплота в объеме композита распределяется неравномерно. Максимальные температуры развиваются в подволноводной зоне, вызывая значительный разогрев полимера и внедрение инструмента в изделие и тем самым нарушение или искривление хрупкого углеродного волокна в композитах с длинноволокнистым наполнителем, который по своим основным характеристикам представляет большой интерес для разработчиков различных машиностроительных конструкций. Одной из причин такого явления можно считать высокую теплопроводность армированных пластиков в направлении их армирования, что вызывает отток теплоты из сварочной зоны и приводит к необходимости увеличения времени сварки и тем самым — к нарушению целостности волокна и композита в целом.

Для сохранения или восстановления исходной ориентации ПКМ разработаны некоторые технологические способы, обеспечивающие получение качественного сварного соединения.

Для смещения зоны максимального тепловыделения к границе соединяемых деталей предложено использовать промежуточную прокладку из чистого полимера того состава, который входит в композит в виде связующего. Использование прокладки в виде мелкоячеистой сетки позволяет значительно изменить картину тепловых полей в сварочной зоне за счет создания искусственных концентраторов напряжения и одновременно увеличить долю термопластичного связующего на стыковых поверхностях, которая, как правило, в объеме композита не превышает 30...42 %. Этого недостаточно для успешного протекания процессов объемного взаимодействия и диффузии на границе соединяемых деталей в процессе сварки.

Увеличение времени воздействия ультразвуковых колебаний от 4...5 до 6...8 с при одновременном уменьшении интенсивности от 40 до 30 кГц на рабочем торце волновода позволяет выполнять сварку в более благоприятном режиме, создавая условия для плавного нарастания температуры в сварочной зоне и более медленного охлаждения полимера. Этап охлаждения соединяемых участков важен, так как на этой стадии происходит формирование структуры матрицы, определяющей межслойные свойства композиционного материала и, как следствие, прочность сварного соединения и его стойкость против действия органических растворителей и окружающей среды.

Например, увеличение скорости охлаждения пластиков, выполненных на основе термопластичного связующего — полиамида, широко используемого в производстве различных конструкций, до значения свыше 300 °С/мин приводит к резкому уменьшению сферолитов в кристаллической структуре матрицы, а следовательно, к снижению механических свойств композита и увеличению проницаемости. При малой скорости охлаждения (10 °С/мин) степень кристаллизации полиамида может превышать 30...35 %, что также ухудшает физико-механические свойства ПКМ.

Указанные меры недостаточны для улучшения структуры термопластичного связующего. Для повышения и стабилизации прочностных свойств полимерной матрицы рекомендуется воздействовать на расплав полимера слабым

магнитным полем напряженностью до 398 000 А/м. С помощью постоянного магнитного поля можно ориентировать молекулярные цепи расплавленного полимерного материала в нужном направлении, в частности, в направлении приложения рабочих нагрузок, тем самым повышая прочность исходного материала, а следовательно, и сварного соединения. При этом следует учитывать, что кратковременное воздействие магнитного поля имеет ограниченные возможности. Наилучший эффект достигается при обработке материалов малых толщин (до 1 мм). Для обработки больших толщин и площадей необходимо увеличивать как время воздействия, так и напряженность магнитного поля [7].

Воздействие на ПКМ постоянного магнитного поля осуществляется одновременно и в течение всего процесса УЗС. Наибольший ориентирующий эффект от действия магнитного поля достигается, когда матрица композита находится в вязкотекучем состоянии.

Для получения качественного сварного соединения необходимо стремиться к концентрации ультразвуковых колебаний непосредственно на стыкуемых поверхностях. В связи с этим для проведения экспериментов по свариваемости ПКМ были выбраны две схемы сварки: встык и внахлестку. Из тонколистовой пластины ПКМ на основе полисульфона были изготовлены образцы размером 100×10×0,2 мм. Перед сваркой для предотвращения смещения свариваемых кромок образцы укладывались в специальный кондуктор.

В результате проведенных экспериментов были определены оптимальные параметры режима сварки:

- время 10...15 с;
- сварочное давление 1,5...2,0 МПа;
- плавно нарастающая амплитуда колебаний 20...40 мкм;
- частота колебаний 22 кГц.

Вследствие маленькой толщины ПКМ в процессе сварки наблюдается большой теплоотвод в материал опоры и волновода, поэтому время ввода ультразвуковых колебаний достаточно большое. Кроме того, в процессе сварки происходит рассеивание вводимой энергии. Постепенное же повышение величины амплитуды ультразвуковых колебаний предотвращает перегрев полимера, а следовательно, не нарушает его структуру. С помощью энергии ультразвука было получено соединение внахлест-

ку. Прочность соединения составила 50...60 % от прочности основного материала. Низкая прочность обусловлена тем, что для предотвращения подплавления материала под волноводом необходимо прикладывать достаточно большое давление, что вызывает нарушение структуры углеродного волокна [8–10].

Была опробована возможность получения многослойного соединения из пластин толщиной 0,3 мм. Установлено, что число слоев не должно превышать 4–6. Дальнейшее увеличение числа слоев приводит либо к пережогу пластин за счет длительного термического воздействия на материал, либо к непровару нижних пластин вследствие наличия воздушной прослойки между отдельными пластинами и ухудшения в связи с этим акустических свойств соединяемых деталей. Следует отметить, что соединение трех или четырех пластин может быть получено за один ход волновода. При соединении шести пластин сварку проводят поочередно с двух сторон.

При сварке углепластика толщиной 2 мм наиболее целесообразна схема соединения внахлестку. В процессе экспериментальных исследований были определены оптимальные параметры режима сварки образцов из углепластика толщиной 2 мм: амплитуда ультразвуковых колебаний, сварочное давление и продолжительность звукового импульса, частота колебаний.

Специфической особенностью ПКМ на основе углеродного волокна и термопластичного связующего является то, что при достаточно высоких показателях прочности термопластичная матрица под термическим воздействием, вызванным переходом энергии механических колебаний сварочного инструмента в тепловую, переходит в вязкотекучее состояние и утрачивает свои монолитизирующие свойства. При этом возникает опасность повреждения хрупких углеродных волокон под действием сварочного давления. Для предотвращения этого явления необходимо использовать схему сварки, которая предусматривает снижение сварочного давления на соответствующий образец в тот момент, когда под действием ультразвука углеродные волокна находятся в вязкотекучем состоянии. Оптимальные значения сварочного давления составляют: минимальное — от 1,2 до 1,5 МПа, максимальное — от 1,5 до 2 МПа. Особое влияние на качество сварного соединения оказывает продолжительность ультразву-

кового импульса, время воздействия которого на свариваемые детали зависит от величины вводимой энергии и условий ввода амплитуды колебаний волновода.

В данном случае было найдено оптимальное значение амплитуды колебаний волновода, определяющее количество подведенной к свариваемым поверхностям энергии. Амплитуда составляет 30...40 мкм, что позволяет достаточно быстро ввести необходимое для сварки количество энергии. Однако при этом возможно подплавление верхней детали от прикладывания волновода и, как следствие, значительное нарушение структуры композиционного материала. Для улучшения условий протекания процесса сварки и формирования сварного шва свариваемые детали перед тем, как укладывать в опору, обертывают во фторопластовую пленку, через которую и вводят ультразвуковые колебания.

Если конструктивные особенности свариваемых изделий не позволяют использовать фторопластовую пленку в процессе УЗС, то необходимо уложить детали в специально разработанный кондуктор, обеспечивающий формирование сварного шва в замкнутой зоне.

Проведенные механические испытания сваренных образцов толщиной 2 мм показали, что прочность соединений составляет 60...65 % от прочности основного материала. Зависимость прочности соединения от амплитуды колебаний и сварочного статического давления приведена на рис. 4.

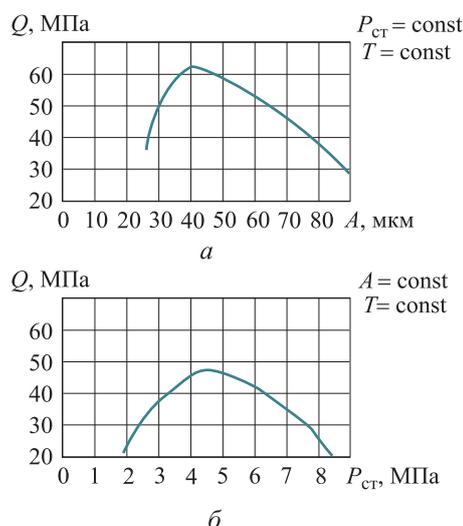


Рис. 4. Зависимости прочности соединений от амплитуды колебаний (а) и сварочного статического давления (б)

## Выводы

1. УЗС можно применять для получения элементов конструкций из композиционных материалов на термопластичной основе с высокими механическими свойствами.

2. Разработаны технология и оборудование для УЗС композиционных материалов на полимерной основе.

3. Благодаря УЗС можно соединять углепластики различной толщины, но наилучшей является толщина 1...2 мм, так как при сварке более тонких материалов происходит значительный теплоотвод в материал волновода.

4. Опробована сварка конструкций, состоящих из нескольких слоев ПКМ, при этом максимальное число слоев, которое можно соединить при одноразовом пропускании звукового импульса, достигает 4–6 (при толщине каждого слоя до 1 мм).

5. Проведенные механические испытания образцов ПКМ показали, что прочность сварных соединений, выполненных ультразвуком, составляет 60...65 % от прочности основного материала.

## Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Кадыкова Ю.А., Артеменко С.Е., Васильева О.Г., Леонтьев А.Н. Физико-химическое взаимодействие в полимерных композиционных материалах на основе углеродных, стеклянных и базальтовых волокон. *Химические волокна*, 2003, № 6, с. 39–40.
- [3] Карабутов А.А., Кобелева Л.И., Подымова Н.Б., Чернышова Т.А. Измерение упругих модулей композиционных материалов, упрочненных частицами, лазерным методом. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2009, т. 75, № 3, с. 27–33.
- [4] Перов Б.В., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф., Строганов Г.Б. Применение высокомодульных полимерных композиционных материалов в изделиях авиационной техники. *Авиационная промышленность*, 2002, № 8, с. 28–31.
- [5] Новые высокопроизводительные технологии сварки фирмы «Фрониус»: Зарубежный опыт. *Автоматическая сварка*, 2004, № 7, с. 39–46.
- [6] Неровный В.М., ред. *Теория сварочных процессов*. Москва, МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2007. 752 с.
- [7] Sannikov D.V., Volkov S.S. Ultrasound cutting of polymer materials. *Welding International*, 2002, № 16(3), pp. 237–239.
- [8] Khryakova E.S., Volkov S.S. Increasing the parameters of the quality of butt welded joints in polyamides. *Welding International*, 2001, № 14(9), pp. 749–752.
- [9] Tetslav O.V., Volkov S.S. Examination of the process of heat generation in ultrasound welding Dacron cloth. *Welding International*, 2001, № 14(3), pp. 219–221.
- [10] Fomenko A.F., Volkov S.S. Ultrasound welding of polymer multilayered film materials. *Welding International*, 2001, № 15(7), pp. 583–584.

## References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivanie polimernykh materialov* [Welding and gluing of plastics]. Moscow, Khimiia publ., 2001. 376 p.
- [2] Kadykova Y.A., Artemenko S.E., Vasil'eva O.V., Leont'ev A.N. Physicochemical Reaction in Polymer Composite Materials Made from Carbon, Glass, and Basalt Fibres. *Fibre Chemistry*, 2003, no. 6, pp. 39–40.
- [3] Karabutov A.A., Kobleva L.I., Podymova N.B., Chernyshova T.A. Izmerenie uprugikh modulei kompozitsionnykh materialov, uprochnennykh chastitsami, lazernym metodom [Measurements of the Elastic Modulus of Composite Materials Strengthened with Particles Using Laser Optic-Acoustic Method]. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory]. 2009, vol. 75, no. 3, pp. 27–33.
- [4] Perov B.V., Guniaev G.M., Rumiantsev A.F., Stroganov G.B. Primenenie vysokomodul'nykh polimernykh kompozitsionnykh materialov v izdeliakh aviatsionnoi tekhniki [Application of high-modulus polymer composites in aviation technology products]. *Aviatsionnaia promyshlennost'* [Aviation industry]. 2002, no. 8, pp. 28–31.

- [5] Novye vysokoproizvoditel'nye tekhnologii svarki firmy «Fronius»: Zarubezhnyi opyt [New high-performance welding technology of the company «Fronius»: Foreign experience]. *Avtomaticheskaya svarka* [The Paton Welding Journal]. 2004, no. 7, pp. 39–46.
- [6] *Teoriia svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Ed. Nerovnyi V.M. Moscow, Bauman Press, 2007. 752 p.
- [7] Sannikov D.V., Volkov S.S. Ultrasound cutting of polymer materials. *Welding International*, 2002, no. 16(3), pp. 237–239.
- [8] Khryakova E.S., Volkov S.S. Increasing the parameters of the quality of butt welded joints in polyamides. *Welding International*, 2001, no. 14(9), pp. 749–752.
- [9] Tetslav O.V., Volkov S.S. Examination of the process of heat generation in ultrasound welding Dacron cloth. *Welding International*, 2001, no. 14(3), pp. 219–221.
- [10] Fomenko A.F., Volkov S.S. Ultrasound welding of polymer multilayered film materials. *Welding International*, 2001, no. 15(7), pp. 583–584.

Статья поступила в редакцию 17.11.2015

## Информация об авторах

**ВОЛКОВ Станислав Степанович** (Москва) — кандидат технических наук, профессор кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: map@bmstu.ru).

**ПРИЛУЦКИЙ Максим Андреевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: map@bmstu.ru).

## Information about the authors

**VOLKOV Stanislav Stepanovich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

**PRILUTSKIY Maxim Andreevich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: map@bmstu.ru).

### ОСНОВЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СООРУЖЕНИЙ



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

вышла в свет монография

**Г.А. Бигуса, Ю.Ф. Даниева, Н.А. Быстровой,  
Д.И. Галкина**

### «Основы диагностики технических устройств и сооружений»

В монографии приведены основные понятия технической диагностики — области знаний, охватывающей теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Значительное внимание уделено методам неразрушающего контроля, правильное применение которых позволяет получить исходные данные для анализа, проводимого при техническом диагностировании. Изложены элементы теории надежности и методы расчета показателей надежности в приложении к технической диагностике. Рассмотрены вопросы идентификации состояния объекта по измеренным диагностическим параметрам и оценки его ресурса.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru