

УДК 621.791.16

doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-15-22

Разработка и исследование основных особенностей соединения пластмасс с металлами

С.С. Волков, Д.С. Розанов, И.В. Станкевич

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Development and Research of the Main Features of Joining Plastics and Metals

S.S. Volkov, D.S. Rozanov, I.V. Stankevich

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены методы соединения изделий с использованием ультразвука, осуществляемые запрессовкой металлической детали в деталь из термопласта; с помощью термопластичных заклепок и винтов, устанавливаемых в отверстия с резьбой, созданной ультразвуковым формованием; сваркой металлических деталей через предварительно нанесенную на них пластмассовую прослойку; сваркой металлической и пластмассовой деталей через промежуточную пластмассовую вставку. Показано, что ввод металлической арматуры в пластмассовое изделие посредством ультразвука является прогрессивным высокопроизводительным методом изготовления качественных и прочных неразъемных соединений деталей из пластмасс. Определена зависимость силы, удерживающей металлическую арматуру в термопласте, от ее натяга. Установлена возможность соединения деталей из металлопласта с помощью ультразвука, что ранее не удавалось сделать классическими способами сварки вследствие специфических свойств этого материала. Определены основные технологические режимы соединения металлического материала с термопластом — статическое усилие, продолжительность ультразвукового воздействия и амплитуда колебаний волновода.

Ключевые слова: металлическая арматура, ультразвуковое формование, статическое давление, амплитуда колебаний волновода, рабочий торец волновода, продолжительность ультразвукового импульса

This work examines a method of ultrasonic pressing of metal parts into a thermoplastic part using thermoplastic rivets and screws installed into the threaded holes obtained by ultrasound forming, welding metal parts through a pre-applied plastic layer, and welding metal and plastic parts through an intermediate plastic insert. It is shown that the introduction of metal fittings into plastic products using ultrasound is a progressive method of obtaining permanent joints of products from plastics and metals. It leads to an increase in labor productivity and ensures production of consistently high-quality and durable connections. The dependence of the holding force of the metal reinforcement in thermoplastic on the tightness is determined. The possibility of obtaining a metal-plastic welded joint using ultrasound is established. It was previously impossible to obtain such joints using classical methods of welding due to specific features of the metal-plastic material. The main technological modes of joining metal materials with thermoplastics are determined, namely static force, duration of ultrasonic action, waveguide oscillation amplitude.

Keywords: metal reinforcement, ultrasonic formation, static pressure, waveguide oscillation amplitude, working waveguide end, ultrasonic pulse duration

Постоянный рост объема производства и применения термопластичных материалов требует решения проблемы сварки изделий, а также разработки технологии соединения термопластичных полимерных и металлических материалов. Это в свою очередь позволило решить ряд важных технических задач, потребовало разработки прогрессивных методов производства и соединения изделий и узлов из пластмассы и металла. Среди различных видов соединений важное место занимают неразъемные, связывающие изделия из пластмассы, а также из пластмассы и металла [1, 2].

При изготовлении деталей из разнородных материалов часто необходимо соединить полимер с металлом. Такими деталями являются металлические арматуры (МА), декоративные элементы, штифты, шарниры, проволоочные петли и другие закладные элементы [3].

До последнего времени соединение деталей из термопластичных и нетермопластичных материалов, из термопласта и металла выполняли склеиванием или внедрением металлической детали (МД) в предварительно нагретую деталь из термопласта [1, 4, 5]. В некоторых случаях МД вводили в деталь из термопласта с помощью сверления или фрезерования последней.

Однако такие методы малопроизводительны и часто сопровождаются деформацией и растрескиванием детали из термопласта. Полимерный материал и металл можно соединить путем нагрева приведенных в контакт связываемых поверхностей.

Прочность получаемых соединений зависит от температуры процесса и достигает максимального значения при температуре, близкой к температуре деструкции термопластов. Проведение процесса при повышенной температуре необходимо для снижения вязкости расплава полимера и лучшего заполнения микронеровностей поверхности металла, поскольку в этом

случае между полимером и металлом возникают химические связи [3, 6].

Кроме того, абсолютные значения прочности таких соединений зависят от природы металла. Высокая прочность достигается применением алюминиевого сплава Д-16, так как в нем хорошо формируется поверхность при дробеструйной обработке и легко образуется реакционно-способная оксидная пленка. Разброс прочности обусловлен нестабильностью дробеструйной обработки. В зависимости от магнитных свойств сплавов, диэлектрических свойств полимеров и формы соединяемых деталей сварку можно проводить, используя контактный или индукционный нагрев [7, 8].

Цель работы — разработка и исследование возможности получения качественного и прочного соединения пластмасс с металлами с помощью ультразвука (УЗ).

В промышленности наиболее надежными и производительными являются методы соединения пластмассовой детали (ПД) с МД посредством УЗ (рис. 1). Эти методы осуществляют:

- ультразвуковой запрессовкой МД в ПД;
- с помощью термопластичных заклепок и винтов, устанавливаемых в отверстия с резьбой, получаемой ультразвуковым формованием;
- сваркой МД через предварительно нанесенную на нее термопластичную прослойку;
- сваркой МД и деталей из нетермопластичных материалов через термопластичную вставку [1, 2, 4].

На кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана спроектирована и изготовлена опытная экспериментальная ультразвуковая установка для соединения полимерных материалов с металлическими и неметаллическими.

Установка включает в себя магнитострикционный преобразователь ПМС1-1,5 и ножевой волновод-инструмент (далее волновод) из ти-

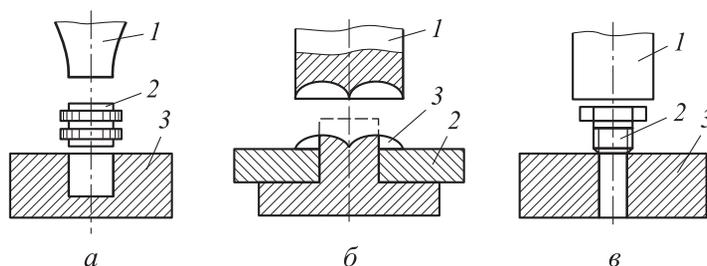


Рис. 1. Схемы соединения ПД с МД с помощью УЗ:
a — запрессовка; *б* — соединение термопластичными заклепками; *в* — формирование резьбы;
 1 — волновод; 2 — МД; 3 — ПД

танового сплава ВТ-5 с рабочей поверхностью 40×8 мм. В качестве источника питания магнетострикционного преобразователя (сварочного узла) использован модернизированный серийно выпускаемый фирмой «Ультразвуковая техника ИНЛАБ» (г. Санкт-Петербург) ультразвуковой генератор (УЗГ) ИЛ10-1,5 с расширенным диапазоном 20...70 кГц, массой 12 кг и габаритными размерами 310×310×160 мм. УЗГ оснащен плавной регулировкой мощности до 1,5 кВт, цифровым частотомером, аналоговым индикатором резонанса акустической системы, фазовой автоподстройкой частоты колебаний и источником поляризации с выходным током до 30 А. Охлаждение УЗГ — воздушное, принудительное. Выходная частота может меняться в любую сторону.

В процессе экспериментов частоту ультразвуковых колебаний контролировали с помощью цифрового частотомера, вмонтированного в УЗГ, амплитуду колебаний волноводов измеряли датчиками, разработанными на кафедре [1, 9, 10].

Усилие, под действием которого МА вводилась в ПД, прикладывали со стороны рабочего торца волновода. Продолжительность ультразвукового импульса регулировали посредством реле времени. Температуру регистрировали шлейфовым осциллографом, вводя хропеллю алюминевую термопару (со спаем диаметром 100 мкм) в зону детали, окружающую МА.

Прочность соединения МА с термопластом оценивали по усилию, необходимому для ее извлечения в осевом направлении из детали. Для испытания на прочность в МА сделали резьбовое отверстие, в которое вворачивали шпильку, закрепляемую в губках разрывной машины МР-0,5.

Основными параметрами, определяющими качество сборки и регулируемые при настройке на оптимальный режим, являлись амплитуда колебаний рабочего торца волновода, усилие прижатия, оказываемое на арматуру, и продолжительность ультразвукового импульса [1, 3, 4].

Эксперименты проводили на образцах из блочного полистирола, представлявших собой цилиндр диаметром 30×10 мм, где просверливали гладкие отверстия диаметром 8 мм. В качестве материала МА выбрали сталь Ст3. Использовали арматуру разной конфигурации — с насечкой и поднутрением, с кольцевой канавкой и гладкую (см. рис. 1, а).

При ультразвуковой запрессовке металла в термопласте предварительно просверливают отверстие в ПД, служащее в качестве направляющего. Форму запрессовываемой МД выбирают так, чтобы после ведущей части, диаметр которой несколько больше, чем у отверстия, высверленного в термопласте, имелась полость для затекания избыточного пластифицированного материала. Это устраняет образование наплывов и заусенцев на поверхности изделия.

Перед запрессовкой МД устанавливают так, чтобы ее продольная ось совпадала с осью отверстия (см. рис. 1, а). После приложения статического давления включают УЗ, вследствие чего в зоне контакта МД и ПД выделяется тепло.

По мере размягчения термопласта происходит погружение в него МД под действием статического давления и вытеснение пластифицированного материала в полость между стенками деталей. После выключения УЗ расплавленная масса затвердевает и благодаря усадке, возникающей в процессе охлаждения, МД прочно закрепляется в ней.

Эксперименты по выбору режимов процесса проводили, настраивая УЗГ на резонансную частоту преобразователя в диапазоне 20...24 кГц. Установили, что с увеличением амплитуды колебаний с 25 до 40 мкм скорость нагрева и производительность процесса возрастают незначительно, а диаграмма путь инструмента S — время t не меняется (рис. 2).

В связи с этим дальнейшие опыты выполняли при постоянной амплитуде колебаний волновода, равной 30 мкм. На диаграмме отрезок времени ab соответствует продолжительности холо-

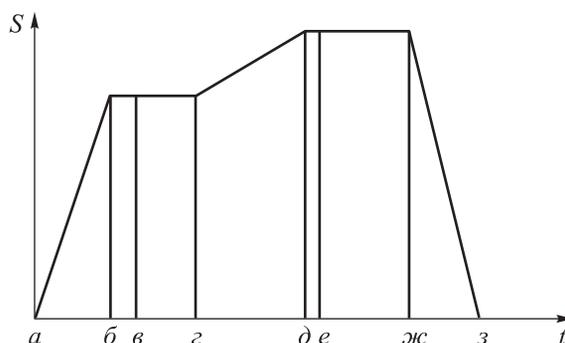


Рис. 2. Диаграмма путь инструмента S — время t при ультразвуковой сборке ПД с МА:
 а — включение пневмопривода; б — достижение волноводом МА; в и е — включение и отключение УЗ;
 г — начало запрессовки; д — окончание движения волновода и МА; ж — снятие давления; з — возвращение волновода в исходное положение

стого хода волновода, которая зависит от расстояния между его рабочим торцом и арматурой и от скорости применяемого привода. Для исключения удара волновода об арматуру в установке применяли пневмопривод с плавным ходом. В опытах отрезок времени ab составлял 1 с.

На отрезке времени bv усилие прижатия возрастает до значения, обеспечивающего плотный акустический контакт волновода с МА, после чего включается УЗ. Если УЗ включить в точке b , то наблюдается интенсивный износ арматуры и рабочего конца волновода.

Отрезок времени vg характеризуется тем, что в ПД появляются сдвиговые деформации, фиксируемые по подъему температуры, в результате чего происходит размягчение пластмассы и ввод МА. Продолжительность периода vd при заданных значениях давления и амплитуды колебаний зависит от акустических и реологических свойств пластмассы. В опытах она составляла 1,5 с (при усилии сжатия 40 Н и амплитуде 30 мкм).

Непосредственный ввод МА происходит на отрезке времени zd , в течение которого образующийся расплав заполняет поднутрение и канавки в насечке МА. Для равномерного расплавления пластика у поверхности арматуры УЗ целесообразно отключать в момент времени d или e , но не позже, чем через 0,2...0,5 с после того, как арматура встала на место.

Оптимальная продолжительность ультразвукового импульса составляла около 1,5 с. Дальнейшее озвучивание не способствовало росту прочности соединения МА с ПД, а увеличение времени обработки после посадки детали на место приводило к резкому снижению прочности.

В момент отключения УЗ начиналось быстрое охлаждение, которое на отрезке ej шло под давлением. Через 1 с пластмасса вокруг МА охлаждалась до 40...50 °С, и волновод возвращали в исходное положение (см. рис. 2, отрезок времени $жз$).

Для предотвращения смещения МА и ее точного внедрения в пластмассу на нижней части детали необходимо иметь продольные или поперечные направляющие или канавки. Усилие вырыва запрессованной детали-арматуры из ПД зависит от ее конструкции и натяга (рис. 3).

При небольшом натяге радиальное давление мало и основная нагрузка воспринимается кольцевым выступом. Оптимальное значение

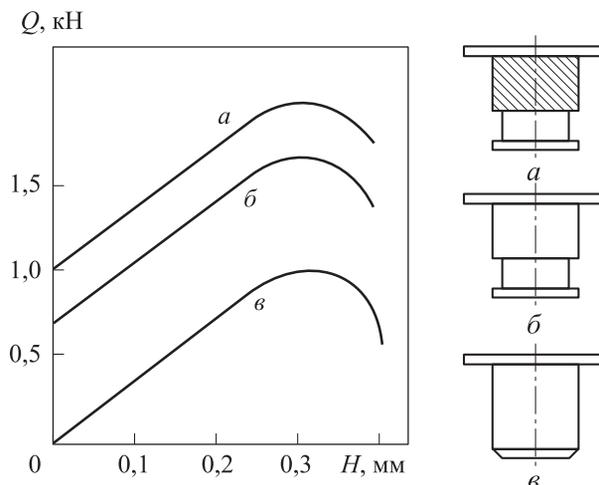


Рис. 3. Зависимость силы Q , удерживающей МА в термопласте, от натяга H для арматуры разной конфигурации:

a — с насечкой и поднутрением;
 b — с кольцевой канавкой; c — гладкой

натяга для всех конфигураций МА составило 0,3 мм (см. рис. 3). Превышение натягом предельного значения приводит к появлению трещин и резкому падению удерживающей силы.

Наименьшее усилие вырыва соответствует гладкой МА (см. рис. 3, кривая c). Нанесение насечки на выступающие части МА и оформление канавки приводят к значительному повышению усилия вырыва (см. рис. 3, кривые a и b). Насечка способствует не только увеличению поверхности сцепления, но и изменению технологических параметров процесса.

Канавка на МА оказывает существенное влияние на прочность соединения в случае приложения осевой нагрузки. Даже при гладкой поверхности детали и небольшом натяге прочность соединения определяется работой соответствующего сечения пластмассы на срез, что выгодно отличает ультразвуковой ввод арматуры от прессового соединения. Высота и глубина канавки зависят от усилия нагружения.

Радиальное давление пропорционально зависит от модуля упругости ПД. При постоянном заданном натяге осевая сила, удерживающая МА в пластмассе, больше у полимеров с высоким модулем упругости. Для ударопрочного полистирола осевое усилие составляет 0,95 кН, для дакрила-2М — 0,99 кН, для полипропилена — 0,5 кН, для полиэтилена высокой плотности — 0,38 кН.

Для МА, имеющей небольшую высоту или боковую поверхность, когда выполнение канавок и насечек является целесообразным, можно

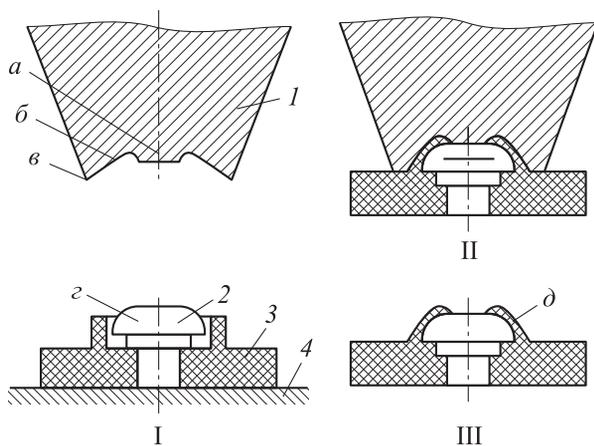


Рис. 4. Схема ввода МА, имеющей небольшую боковую поверхность, в ПД с помощью УЗ:

I и II — начало и окончание ввода; III — собранный узел;
1 — волновод; 2 — МА; 3 — ПД; 4 — опора;
а, б, в — рабочие поверхности волновода;
z — поверхность арматуры; δ — слой пластмассы

использовать специальную форму рабочего торца волновода (рис. 4).

Волновод имеет выборку, в центре которой выполнена пяточка, опирающаяся в процессе запрессовки на МА и передающая ультразвуковые колебания. Периферийные кромки рабочего торца волновода опираются на выступы ПД, оплавление которых приводит к заплвлению поверхности МА слоем пластмассы, что значительно повышает усилие вырыва.

Под действием ультразвуковых колебаний и усилия сжатия арматура входит в ПД. Диаметр отверстия ПД несколько меньше, чем у вводимой МА. В процессе ввода острые кромки волновода формируют на торце МА слой пластмассы. Последний, работая на срез дополнительно к радиальной силе, действующей на боковую поверхность МА, обеспечивает ее функционирование при более высокой нагрузке.

Оптимальные результаты, удовлетворяющие требованиям эксплуатации таких конструкций, получены при следующих режимных параметрах: амплитуда колебаний волновода — 30 мкм, усилие запрессовки — 20 Н, продолжительность ультразвукового импульса — 1,5 с. На рис. 4 показано сечение соединения, созданного при указанных параметрах, где видно, что полимер полностью затек в канавки МА и образовал слой на ее торце.

При ультразвуковом формовании [1, 5, 7] МД разной конфигурации вводят непосредственно в ПД с помощью специальных волноводов, имеющих соответствующий профиль рабочего

торца. Формование начинается в тот момент, когда МД и ПД прижимаются друг к другу. Под действием ультразвуковых колебаний пластмасса плавится, в нее запрессовывается МД. После отключения УЗ пластмасса затвердевает, в результате образуется прочное неразъемное соединение.

Формование может быть выполнено и термическими методами, но УЗ-метод производительнее и обеспечивает более прочное соединение. Это достигается тем, что при ультразвуковом методе легче регулировать процесс расплавления пластмассы, так как внедрение теплоты локализовано в зоне контакта термопласта с МД. Термическое внедрение занимает 30...50 с, а УЗ позволяет получить соединение лучшего качества менее чем за 1 с.

Благодаря локальному плавлению основная масса деталей остается холодной, поэтому в процессе обработки их можно держать в руках. Для удобства формования детали укладывают в специальные приспособления — кондукторы. Их применение позволяет автоматизировать процесс [5, 10].

При заклепочном соединении МД с ПД в первой делают отверстие, а во второй — стержень заклепки, выполненный заодно с деталью. Металлическую деталь надевают на этот стержень, в выступающую из детали часть стержня вводят ультразвуковые колебания. В результате стержень заклепки размягчается и деформируется волноводом.

Придавая рабочему торцу волновода различную форму, например, делая одно или два полусферических углубления, можно получать замковое герметичное соединение с замыкающей головкой разной формы (см. рис. 1, б). Отличительной особенностью процесса является то, что только один из соединяемых элементов нагревается до температуры плавления, тогда как температура другого остается неизменной.

Основными достоинствами таких соединений являются высокая скорость формования замыкающей головки и повышенная прочность заклепки по сравнению с таковой у основного материала. Кроме того, пластмасса не налипает на рабочий торец волновода, как при расплавлении пластмассового стержня пальником [5, 11].

При соединении пластмассовых деталей винтами (см. рис. 1, в) в детали из термопласта

предварительно формируют резьбовое отверстие. С этой целью сначала сверлят отверстие, диаметр которого меньше наружного диаметра резьбы (например, для резьбы М4 делают отверстие диаметром 3,2 мм). Это отверстие служит для первоначальной фиксации металлического винта и его дальнейшего внедрения в термопласт [3, 8].

Под воздействием ультразвуковых колебаний, вводимых через головку винта и усилия прижатия, полимер разогревается до вязкотекучего состояния. По мере продвижения винта в пластмассу расплавленный полимер обволакивает канавки резьбы и после выключения УЗ затвердевает, приобретая форму резьбы. Продолжительность запрессовки винтов М4 в отверстиях диаметром 3,2 мм составляет около 0,8 с при усилии прижатия 150 Н. Изготовленная таким образом резьба выдерживает многократное ввинчивание и вывинчивание металлических винтов [3, 4].

При соединении металлических деталей с помощью промежуточной термопластичной прослойки последнюю наносят на металлическую поверхность напылением газовыми теплоносителями или в кипящем слое. В промышленности материалы, полученные нанесением покрытий из полимерных материалов (преимущественно поливинилхлоридной пленки) с одной или двух сторон на поверхность металлических листов либо фольги, называют *металлопластами*.

Металлопласт представляет собой полосу стали толщиной 0,5...1,0 мм, покрытую с одной или двух сторон поливинилхлоридной пленкой толщиной 0,25...0,35 мм. Пленку с металлом соединяют клеем на основе эфиров акриловой кислоты [2, 9, 12].

Металлопласт как сочетание металла и пластмассы является ценным конструкционным материалом. Его отличают высокие экономическая эффективность и декоративность, достаточные прочность и жесткость, удобство в эксплуатации, а также антикоррозийные и звукопоглощающие свойства. Поэтому он находит все большее применение в таких отраслях промышленности, как химическая, радиотехническая и автомобильная, судостроение, гражданское и промышленное строительство, железнодорожный и городской транспорт.

Из металлопласта изготавливают корпуса приборов, бензобаки, электроаппараты, возду-

ховоды, защитные кожухи и трубы. Во многих случаях такой материал целесообразно использовать вместо листового металла. Металлопласт можно изгибать, сверлить, подвергать глубокой вытяжке, штамповать и т. д.

Новый материал имеет специфические свойства, затрудняющие применение известных классических способов сварки. В настоящее время используют преимущественно механические методы соединения металлопластов — с помощью заклепок или завальцовку по различному профилю. Также распространены методы контактной рельефной сварки, но они требуют предварительной зачистки соединяемых поверхностей, что вызывает дополнительную нерациональную операцию и снижает производительность процесса.

В связи с широким выпуском металлопласта и необходимостью получения его всевозможных соединений на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им Н.Э. Баумана исследовали ультразвуковую сварку (УЗС) металлопластов [1, 9].

Благодаря некоторым особенностям УЗС (возможности сварки загрязненных поверхностей и диэлектриков, отсутствию высоких температур или их существованию в незначительном объеме) удалось соединить детали из металлопласта.

Способ УЗС металлопласта, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, заключается в том, что при определенном статическом давлении через две пластины из металлопласта (с поливинилхлоридом внутри) пропускают УЗ, который воздействует на поливинилхлоридную пленку и, расплавляя ее, образует сварное соединение. Такой способ рекомендуется применять при изготовлении неотчетственных конструкций, в которых сварной шов служит для защиты от коррозии или декоративным материалом.

Способ соединения деталей с использованием термопластичных вставок, также разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, состоит в том, что вставки типа колец или манжет плотно закрепляют на МД или деталях из нетермопластичного полимерного материала и соединяют между собой с помощью УЗС. Таким способом можно связывать полусферы или цилиндрические детали из алюминия, гальванизированной стали, бакелита и др. через промежуточные вставки из полиамида [1, 2, 11].

Выводы

1. Рассмотрены особенности сборки, сварки и ввода МА в ПД. Определены основные технологические режимы этого соединения — статическое усилие, продолжительность ультразвукового воздействия и амплитуда колебаний волновода.

2. Установлена возможность соединения металлопластов с помощью УЗ, что ранее не удавалось сделать классическими способами сварки вследствие специфических свойств этого материала.

3. Показано, что ввод МА в ПД посредством УЗ является прогрессивным высокопроизводительным методом получения качественных и прочных неразъемных соединений деталей из пластмасс.

4. Для создания качественного соединения ПД с МА, имеющей небольшую боковую по-

верхность, необходимо использовать способ, при котором волновод в процессе ввода колебаний оплавляет слой полимера на торце МА. Этот слой удерживает арматуру в изделии.

5. Натяг, определяющий действие радиального давления и соединения ПД с МА, зависит от принятого соотношения размеров сопрягаемых деталей: диаметра МА и отверстия в ПД, объема пластмассы, идущей на заполнение канавки, углублений в насечке, зазорах и усадки полимера.

6. Выявлена зависимость силы, удерживающей МА в термопласте, от натяга. Показано, что на прочность соединения влияют высота арматуры, размер поверхности и задаваемый натяг. Оптимальное значение расчетного натяга составляет 0,2...0,3 мм. Превышение натягом оптимального значения приводит к повышению напряжений в соединении и увеличению продолжительности процесса ввода арматуры.

Литература

- [1] Волков С.С. *Сварка и склеивание полимерных материалов*. Москва, Химия, 2001. 376 с.
- [2] Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Королева Ю.П., Михеев А.А. Диффузионная сварка через промежуточные прослойки. *Сварочное производство*, 2012, № 7, с. 17–22.
- [3] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of nonwoven materials. *Welding international*, 2005, no. 19(6), pp. 484–489.
- [4] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Welding International*, 2011, no. 25(11), pp. 898–902, doi: 10.1080/09507116.2011.581433
- [5] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding international*, 2003, no 17(6), pp. 482–486, doi: 10.1533/wint.2003.3154
- [6] Кархин В.А. *Тепловые процессы при сварке*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 646 с.
- [7] Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
- [8] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding international*, 2013, no. 27(3), pp. 163–166, doi: 10.1080/09507116.2012.695551
- [9] Волков С.С. Шестель Л.А., Соколова В.А. Технология и оборудование для ультразвуковой сварки изделий из полиэтилентерефталатной пленки. *Сварочное производство*, 2014, № 3, с. 45–50.
- [10] Гладков Э.А. *Управление процессами и оборудованием при сварке*. Москва, Академия, 2006. 432 с.
- [11] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Welding international*, 2013, no. 27(7), pp. 720–724, doi: 10.1080/09507116.2012.753281
- [12] Гольдберг М.М., Корюхин А.В., Кондратьев Э.К. *Покрывания для полимерных материалов*. Москва, Химия, 2003. 210 с.

References

- [1] Volkov S.S. *Svarka i skleivaniye polimernykh materialov* [Welding and bonding of polymeric materials]. Moscow, Khimiya publ., 2001. 376 p.
- [2] Zeyer G.M., Zelenkova E.G., Koroleva Yu.P., Mikheyev A.A. Diffusion welding through intermediate layers. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2012, no. 7, pp. 17–22 (in Russ.).

- [3] Volkov S.S. The effect of conditions of ultrasound welding on the fracture force of nonwoven materials. *Welding international*, 2005, no. 19(6), pp. 484–489.
- [4] Volkov S.S. Main welding parameters of ultrasound contour welding of polyethylene vessels. *Welding International*, 2011, no. 25(11), pp. 898–902, doi: 10.1080/09507116.2011.581433
- [5] Volkov S.S. Effect of dimensions of the gap between edges on the strength of ultrasound welded joints in rigid plastics. *Welding international*, 2003, no 17(6), pp. 482–486, doi: 10.1533/wint.2003.3154
- [6] Karkhin V.A. *Teplovyye protsessy pri svarke* [Thermal processes in welding]. Sankt-Petersburg, Politekhnikeskii universitet publ., 2013. 646 p.
- [7] Makarov E.L., Yakushin B.F. *Teoriya svarivayemosti staley i splavov* [The theory of weldability of steels and alloys]. Moscow, Bauman Press, 2014. 487 p.
- [8] Volkov S.S. Joining thermoplastics with metallic and non-metallic materials. *Welding international*, 2013, no. 27(3), pp. 163–166, doi: 10.1080/09507116.2012.695551
- [9] Volkov S.S. Shestel' L.A., Sokolova V.A. Technology and equipment for ultrasonic welding of produce from polyethylene terephthalate film. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2014, no. 3, pp. 45–50 (in Russ.).
- [10] Gladkov E.A. *Upravleniye protsessami i oborudovaniyem pri svarke* [Management of processes and equipment in welding]. Moscow, Akademiya publ., 2006. 432 p.
- [11] Volkov S.S. Using piezoelectric oscillating system for welding synthetic fabrics. *Welding international*, 2013, no. 27(7), pp. 720–724, doi: 10.1080/09507116.2012.753281
- [12] Gol'dberg M.M., Koriukhin A.V., Kondrat'ev E.K. *Pokrytiia dlia polimernykh materialov* [Coatings for polymeric materials]. Moscow, Khimiia publ., 2003. 210 p.

Статья поступила в редакцию 15.04.2019

Информация об авторах

ВОЛКОВ Станислав Степанович — 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).

РОЗАНОВ Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: rozanovds@rambler.ru).

СТАНКЕВИЧ Игорь Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aplmex@yandex.ru).

Information about the authors

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

ROZANOV Dmitriy Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Welding and Diagnostics Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: rozanovds@rambler.ru).

STANKEVICH Igor Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Applied Mathematics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aplmex@yandex.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Волков С.С., Розанов Д.С., Станкевич И.В. Разработка и исследование основных особенностей соединения пластмасс с металлами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 15–22, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-15-22

Please cite this article in English as:

Volkov S.S., Rozanov D.S., Stankevich I.V. Development and Research of the Main Features of Joining Plastics and Metals. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 15–22, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-15-22