

Дальнейшее развитие промышленности пластмасс требует прецизионных, а зачастую и филигранных методов производства, которые уже используются в мембранных технологиях. Полимерные мембраны широко применяются в настоящее время во многих отраслях промышленности. Примерами тому являются акустические устройства, например микрофоны или динамики, где мембраны служат для преобразования акустических колебаний в электрические сигналы и наоборот, насосы, фильтры, медицинские приборы, например, слуховые аппараты, и др. В данной статье обсуждаются преимущества и особенности лазерной сварки мембран с материалом несущих деталей.



Миниатюрные акустические мембранные устройства, изготовленные с применением лазерной сварки и готовые к монтажу в слуховой аппарат Phonak

Лазерная сварка полимерных мембран

К. Венцлау, Leister Technologies AG (г. Кэгисвил, Швейцария)

Согласно определению, мембрана (от лат. membrana – кожа) – это тонкая гибкая пленка или пластинка, обычно закрепленная по периметру и отделяющая две среды друг от друга. В зависимости от назначения она может иметь различную степень проницаемости. По этому признаку мембраны разделяют на три вида:

- непроницаемая (impermeable);
- полупроницаемая (semipermeable);
- проницаемая (permeable).

Назначение мембраны определяет также ее структуру, форму, размеры и вид используемого для ее изготовления материала. Но в любом случае, чтобы отделить две среды друг от друга, мембрана должна быть прочно и герметично соединена по контуру с основным материалом того изделия, где она находится. Для этого, в принципе, могут использоваться такие методы соединения, как сварка, склеивание или механическая сборка.

Сравнительная характеристика возможных методов соединения мембран

Выбор вида и метода соединения мембран с основным изделием целесообразно проанализировать на примере объекта сложной конструкции, используемого в автомобилестроении, где полимерные мембраны чаще всего применяются для защиты корпусов электронных устройств от влаги, а также для выравнивания давления в гидросистемах (рис. 1). Механическое соединение редко используется в таких случаях, поскольку крепеж и другие необходимые дополнительные элементы увеличивают массу изделия

с мембраной, а также повышают затраты на хранение крепежа и производство соединения. Склеивание лишь незначительно увеличивает массу изделия, но требует дополнительных технологических операций, таких как приготовление и нанесение клея, а также его отверждение (в случае терморезактивных клеев) или затверждение (в случае термопластичных клеев-расплавов), а также увеличивает стоимость изделия. Дополнительные операции не требуются в случае тепловой сварки, однако подводящая к месту соединения тепловая энергия может негативно повлиять на эксплуатационные свойства мембран и, следовательно, должна быть строго дозируемой.

Такие распространенные методы тепловой сварки, как сварка нагретым инструментом или ультразвуком, связаны с достаточно глубоким проникновением тепловой энергии вглубь основного материала и, как следствие, с образованием сравнительно большого объема расплава, что может привести к ограничению функций мембраны, ее повреждению и даже разрушению. Характерными дефектами подобных сварных



Рис. 1. Пример сложного изделия с мембраной, используемого в автомобилестроении (все рисунки: Leister Technologies)

соединений являются нарушение тонкопористой структуры проницаемых или полупроницаемых мембран, а также высокие остаточные напряжения, возникающие в результате механического натяжения несущего материала из-за вытеснения расплава из зоны соединения в сварной валик.

Эти обстоятельства были выявлены и подтверждены в ходе первых же экспериментов. Сварка нагретым инструментом приводила к изменению геометрии пор по большой площади мембраны, что приводило к потере ее герметичности и непроницаемости по отношению к воде. Ультразвуковая сварка, хотя и оказалась более успешной в этом отношении, но отличалась слишком большим уровнем брака из-за разрыва ряда мембран. Наилучшие результаты показала лазерная сварка благодаря бесконтактному вводу энергии, небольшой термомеханической нагрузке места соединения, короткому времени цикла и высокой стабильности процесса.

Принцип лазерной сварки и ее разновидности

Лазерная сварка просвечиванием основана, как известно, на различии абсорбционных свойств соединяемых деталей по отношению к лазерному излучению. В этом плане многие термопласты обладают достаточной прозрачностью, необходимой для верхней свариваемой детали, сквозь которую лазерный луч проникает в нижнюю свариваемую деталь, абсорбирующую (поглощающую) лазерное излучение (рис. 2). Для обеспечения необходимой абсорбционной способности этой детали ее окрашивают или предварительно наполняют техническим углеродом, тальком, мелом или стеклянными волокнами. В результате преобразования энергии излучения в тепловую расплавляется слой нижней детали, примыкающий к месту соединения. За счет теплопроводности нагревается и переходит в расплавленное состояние соответствующий слой верхней свариваемой детали, и под действием умеренного давления прижима образуется сварное соединение, не имеющее, как правило, сварного валика. В ряде случаев для создания

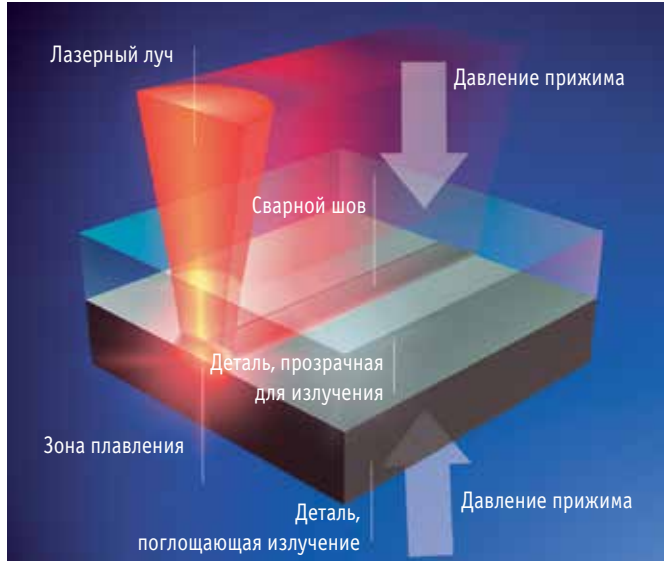


Рис. 2. Схема лазерной сварки полимерных материалов просвечиванием

давления прижима достаточно теплового расширения свариваемых деталей.

Необходимыми условиями описанного принципа сварки являются совместимость материалов свариваемых деталей и примерно одинаковая температура плавления.

Если сравнивать сварку лазерным излучением с альтернативными методами, то она прежде всего является наиболее щадящей по отношению к свариваемым деталям, что определяется низким уровнем механического воздействия на них (по сравнению, например, с ультразвуковой сваркой или сваркой трением) и отсутствием механического контакта с источником энергии. Другими общими достоинствами лазерной сварки являются:

- минимальный уровень остаточных термических напряжений в соединяемых деталях;
- высококачественный внешний вид сварного соединения с зачастую незаметным сварным швом;

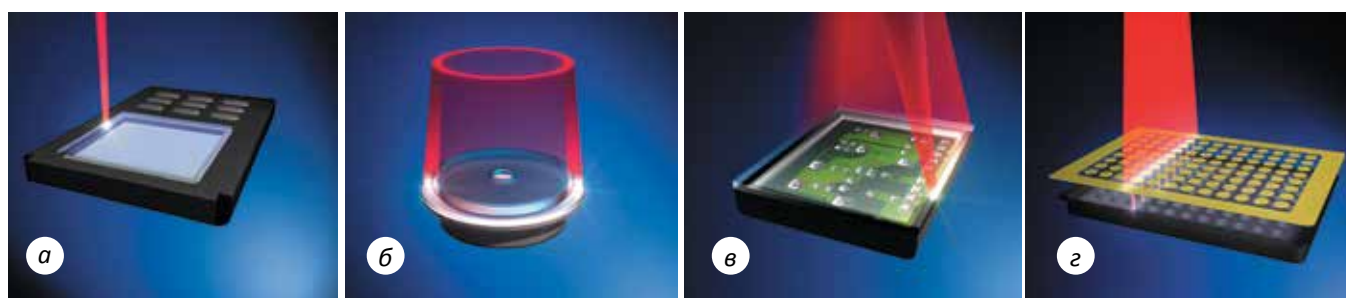


Рис. 3. Методы лазерной сварки в зависимости от схемы подачи излучения к свариваемым участкам: а – контурная; б – одновременная; в – квазиодновременная; г – с помощью трафарета

- отсутствие вибраций в процессе сварки, что особенно важно, например, при сварке деталей со смонтированными на них элементами электроники;

- пригодность для мелко- и крупносерийного производства;
- высокая прочность и геометрическая точность соединения;
- отсутствие износа сварочного инструмента.

С помощью лазерного излучения могут быть сварены практически все термопластичные материалы, в том числе армированные стекловолокном и с низкой вязкостью расплава, а также с высокой температурой текучести. Но данный метод, безусловно, не универсален, как, впрочем, и другие. Однако в случае соединения мембран он выглядит предпочтительным.

В зависимости от схемы подачи излучения к свариваемым участкам различают следующие основные разновидности лазерной сварки (рис. 3):

- контурная (contour welding);
- одновременная (simultaneous welding);
- квазиодновременная (quasi-simultaneous welding);
- по трафарету или, иначе, с помощью маски (mask welding).

Контурная сварка. В данном методе сфокусированный в пятно лазерный луч перемещается последовательно вдоль заранее назначенного контура сварного шва, осуществляя кратковременное локальное плавление материала в зоне соединения (рис. 3, а). Объем участвующего в сварке материала сравнительно мал, и тепловая нагрузка на него минимальна. Относительное перемещение могут осуществлять детали или лазерный луч или детали и лазерный луч одновременно.

Одновременная сварка. При одновременной или, иначе, синхронной сварке лазерный луч, поступающий от одного или нескольких лазеров, разогревает одновременно всю зону соединения, испытывающую высокую тепловую нагрузку (рис. 3, б). Для такой сварки используются наиболее мощные диодные лазеры, имеющие, впрочем, компактную конструкцию.

Квазиодновременная сварка. При выполнении этого метода используется оптико-механическая система сканирования, в которой два сканирующих зеркала отклоняют сфокусированный в пятно лазерный луч и направляют его с очень высокой скоростью вдоль контура сварного шва, постепенно нагревая в течение нескольких пробегов в одну секунду соединяемые участки до вязкотекучего состояния (рис. 3, в). В этом случае

тепловая нагрузка на свариваемые материалы высокая, но несколько меньше, чем при одновременной сварке.

Сварка с помощью трафарета (маски). Согласно данному методу, запатентованному фирмой Leister Technologies AG (г. Кэгсвил, Швейцария), между источником излучения и свариваемыми деталями помещают трафарет. Лазерный луч, направленный через диафрагму или сведенный в плоский пучок, перемещается вдоль соединяемой поверхности деталей и падает на них в местах, которые не затенены трафаретом (рис. 3, г). Трафарет позволяет проецировать очень мелкие структуры с размерами порядка нескольких микрометров. Поэтому данный метод сварки позволяет достигнуть очень высокой разрешающей способности. Лазерной сваркой по трафарету можно изготовить самые разнообразные по форме в плане швы, например прямолинейные или криволинейные различной ширины, и все – за одну операцию. Тепловая нагрузка на свариваемые материалы в данном методе – средняя по отношению к трем другим, описанным выше.

Особенности лазерной сварки мембран

Как упоминалось в начале статьи, для лазерной, как и для других методов тепловой сварки, необходимо обеспечить совместимость материала мембраны с материалом несущей детали, однако при соединении мембран это удается далеко не всегда. В таких случаях для достижения прочного соединения, хотя и механического, а не сварного, может использоваться, например, пористая структура мембраны, в поры которой проникает расплав материала, поглощающего лазерное излучение (рис. 4). Такой вид соединения лишен недостатков традиционного механического, осуществляемого с помощью крепежа. Благодаря малой глубине теплового воздействия лазерного излучения, поглощающий материал расплавляется только в тонком поверхностном слое и проникает в периферийную

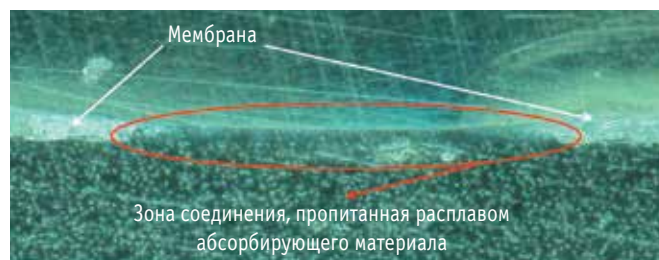


Рис. 4. Изображение сечения места соединения мембраны, полученное с помощью микроскопа

зону мембраны под небольшим давлением. Поэтому мембрана сохраняет свою прочность и, соответственно, функциональную пригодность.

Контроль качества соединений мембран, полученных лазерной сваркой

На выбор метода контроля качества сварки и сварных соединений, помимо свойств свариваемых материалов, влияют также такие факторы, как технические требования к сварным соединениям, программа выпуска, время цикла, стоимость средств контроля, а также возможность мониторинга и регулирования режима сварки. В настоящее время для многих сварных изделий практикуется непрерывный контроль заданных параметров режима сварки, подразумевающий, что его стабильность определяет стабильность свойств сварного соединения.

В случае контурной лазерной сварки имеется возможность контролировать и даже регулировать процесс с помощью бесконтактного сканирующего пирометра, измеряющего температуру привариваемой детали. При этом пятно измерения температуры перекрывает пятно нагрева, благодаря чему измеряется температура, соответствующая максимальной интенсивности теплового излучения в сварном шве. Оптимальному режиму сварки в данном случае соответствует вполне определенная форма температурной кривой на дисплее пульта управления сварочной установкой. Тогда любые отклонения в тепловом режиме лазерной сварки или возникшие дефекты, сказывающиеся на теплопроводности места соединения, вызовут аномальный температурный перепад на термограмме, являющийся признаком дефекта (принцип теплового контроля). Допустимые отклонения температуры в верхнюю или нижнюю стороны ограничиваются контрольными кривыми, и при выходе значения температуры за эти кривые сварное соединение оценивается как дефектное и отбраковывается.



Рис. 5. Характерная термограмма процесса контурной лазерной сварки с фактической температурной кривой (синего цвета) и контрольными кривыми (красного цвета) на дисплее пульта управления сварочной установкой модели NOVOLAS (пояснения – в тексте статьи)

Типичный температурный режим лазерной сварки показан на рис. 5. На основе проведенных предварительных испытаний определяются опорная (эталонная) температурная кривая, соответствующая оптимальному режиму сварки, и допустимые отклонения (красные кривые). Тогда процесс сварки оценивается как «хороший», если значения фактической температуры (синяя кривая) находятся внутри полосы, ограниченной красными кривыми.



Рис. 6. Лазерная сварочная установка модели NOVOLAS WS-AT

Для контроля режима в данном (контурном) и других методах лазерной сварки используются также такие параметры, как мощность лазерного излучения, усилие прижима и др. Примерами лазерного сварочного оборудования, пригодного к полуавтоматизированной сварке мембран и оснащенного описанной системой контроля сварочного режима, являются, например, установки серии NOVOLAS производства фирмы Leister Technologies (рис. 6).

Практические примеры лазерной сварки мембран

Одним из примеров трафаретной лазерной сварки мембран служит изготовление миниатюрных одноразовых устройств, которые компания Phonak использует для предотвращения загрязнения производимых ею слуховых аппаратов, носимых людьми с плохим слухом непосредственно в ушной раковине (рис. 7).

Для обеспечения надежности работы таких аппаратов необходимо их и ушную серу защитить от загрязнений и влаги. Для этого эластичная полимерная мембрана толщиной 15 мкм должна быть надежно прикреплена к небольшому несущему кольцу. Мембрана и несущее кольцо изготавливались из совместимых полимерных материалов и принципиально могли быть сварены между собой, но проблема в данном случае заключалась в необходимости обеспечения высокой прочности и стойкости соединения к средам при его небольшой площади, поскольку ширина сварного шва должна была составлять всего 0,2 мм.

После анализа возможных методов соединения была выбрана лазерная сварка с помощью трафарета. С учетом требований к герметичности и малых размеров слухового аппарата был отвергнут метод механической сборки. Склеивание потребовало бы предварительной подготовки соединяемых элементов с помощью плазменной обработки или нанесения грунта, что негативно повлияло бы на мембрану, как и контакт с клеем.

Применение альтернативных методов сварки выглядело сомнительным или просто невозможным из-за очень малых размеров соединяемых элементов, так что лазерная сварка мембраны и несущего кольца оказалось наиболее эффективным решением, что и подтвердили последующие эксперименты. При трафаретной лазерной сварке тепловой нагрузке подвергается исключительно место соединения, а прилегающие к нему участки соединяемых материалов оказываются в «тени» лазерного излучения. В результате данный проект успешно завершился запуском крупносерийного изготовления сварных мембранных устройств слуховых аппаратов производительностью до нескольких миллионов штук в год (см. фото у заголовка статьи).

Другой пример применения лазерной сварки мембран относится к насосной технике, где вследствие миниатюризации встроенных в насосы мембранных систем наблюдается тенденция к снижению массы и размеров мембранных элементов. Кроме того, для передачи давления мембраны должны быть эластичными, герметичными и не терять своей прочности в месте соединения. Современные полимерные мате-



Рис. 7. Слуховой аппарат (а) и схема монтажа его мембранного устройства для защиты его и ушной серы от воды и загрязнений (б)

риалы способны обеспечить очень высокую прочность тонких мембран, а технология лазерной сварки – соответствующую прочность и герметичность соединения. Данная технология была представлена фирмой Leister Technologies на международной выставке медицинского оборудования MedTec.

В принципе, для получения кольцевого шва одинаково пригодны методы одновременной и квазиодновременной лазерной сварки, однако с учетом малых размеров места соединения более предпочтительной выглядела одновременная сварка, которая и была выбрана в качестве оптимальной. При среднем диаметре сварного шва 23 мм и его ширине, равной 1 мм, время сварки составило менее одной секунды. По сравнению с другими методами при одновременной лазерной сварке место соединения нагревается одновременно и, следовательно, генерирует больше

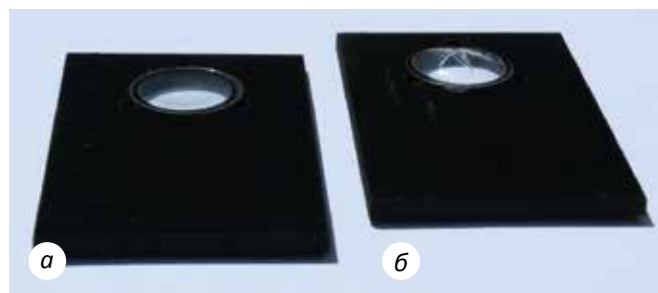


Рис. 8. Образцы соединений мембран, изготовленных с использованием одновременной лазерной сварки, до (а) и после (б) нагружения. Как видно, разрушение происходит не по месту соединения, а по основному материалу (по мембране)

тепла. Но даже в этом случае тепловая нагрузка на привариваемую мембрану достаточно мала, чтобы не повредить ее. На выставке MedTec это было подтверждено «вживую» на глазах посетителей: сваренные образцы нагружались постоянно нарастающим давлением вплоть до разрушения, которое всегда происходило по основному материалу и никогда по месту соединения (рис. 8). Таким образом, в полученном сварном соединении полностью реализуется прочность основного материала. ■