

Сварка полимерных материалов (ПМ) остается одним из наиболее востребованных способов соединения деталей при сборке изделий и строительных конструкций с участием этих материалов. В то же время по результатам анализа доступных литературных источников за последние несколько лет можно констатировать отсутствие принципиально новых ее вариантов, в том числе в таких движителях прогресса в сварке ПМ, как автомобилестроение и строительство. В основном наблюдается эволюционное распространение сварки на новые, состоящие из нескольких частей объекты, в том числе в более сложных условиях строительства, например, трубопроводов. Все чаще встречаются публикации о попытках сварить сильно различающиеся по свойствам разнородные материалы, уточняются возможности разных методов достижения их повышенной эффективности. Вместе с тем общее число публикаций на сварочные темы по сравнению с публикациями, например, о склеивании ПМ сократилось.



Одной из современных тенденций в области сварки пластмасс является все более широкое практическое применение цифровых технологий (источник: Emerson)

# Некоторые тенденции в сварке полимерных материалов

Г. В. Комаров, д. т. н., Всероссийский институт научной и технической информации РАН

*(Окончание.*

*Начало в ПМ № 9, 2018)*

1. Ультразвуковая сварка.
2. Соединение разнородных материалов.
3. Лазерная сварка.
4. Соединение трением с перемешиванием.
5. Сварка нагретым инструментом.
6. Другие разработки.

## 2. Соединение разнородных материалов

Заметной тенденцией в зарубежных работах в последнее время стали сообщения о соединениях разнородных материалов. Об этой тенденции говорят экспозиции многих зарубежных выставок, в том числе выставки Fakuma (г. Фридрихсхафен, Германия). Использование элементов конструкций из нескольких материалов, таких как сталь-алюминий, сталь-титан, алюминий-ПМ и т.п., позволяет добиться оптимальных свойств с точки зрения требований обслуживания и может часто

приводить к снижению массы и стоимости. Однако изготовление эффективного соединения материалов различной природы и, соответственно, с сильным различием термических свойств, микроструктуры и деформационного поведения представляет большую проблему при использовании обычного метода соединения и (или) крепления. Это особенно сказывается на стоимости производства, а в большинстве случаев рынок ориентируется на снижение стоимости соединений. Хотя использование механического крепления и склеивания в большинстве случаев прокладывает путь для сборки изделий из разнородных материалов, эти процессы только подчеркивают необходимость наличия доступной в стоимостном отношении сварки, пригодной для эффективного соединения деталей из разнородных материалов независимо от их состава, свойств или температуры плавления. Речь идет о соединении уже не разнородных

металлов, а материалов, имеющих весьма различающиеся температуры плавления и свойства и (или) химическую структуру, таких как металлы и ПМ, в том числе композиционные (КМ), которые в большинстве случаев не совместимы с известными процессами сварки. Стремление к использованию сварки может быть обусловлено таким ее достоинством, как высокая скорость образования соединения. Однако появившиеся в последнее время публикации о соединениях, часто авторами называемых сварными, строго говоря, правильнее относить к публикациям по склеиванию, если при их выполнении используется дополнительный промежуточный полимерный слой, или по приформовке. Причиной присвоения названия «сварного» соединению могло быть то, что оно преимущественно выполняется на сварочном оборудовании. Об одном таком соединении речь шла в цитированной ранее работе [7]. Ведущие специали-

сты понимают абсурдность термина «сварное соединение» для такого случая и пытаются найти выход из ситуации. Появились, например, такие названия: «термическое прямое соединение», «склеивание без клея» [18] и просто «прямое соединение» [19]. Направленность исследований соединений разнородных материалов за последнее время была самой разнообразной.

Например, в соединении двух пластин из эпоксидного углепластика (СЭУП), изготовленном по схеме прессования слоистого пластика с использованием прокладки из термопласта, китайские исследователи изучали образование остаточных термических напряжений, которые, по их мнению, могли возникнуть из-за большого различия термических коэффициентов линейного расширения компонентов соединения [20]. Предметом экспериментального и численного исследований было влияние скорости охлаждения на прочность соединения. Эксперименты показали, что снижение скорости охлаждения позволяет достичь более высокой прочности соединения. Считают, что под влиянием различных скоростей охлаждения изменились свойства материала термопластичного слоя в СЭУП. Так называемый метод зоны повреждения был использован в численной модели для предсказания свойств материала полимерного слоя в СЭУП. Результаты исследования, проведенного с помощью численного метода, подтвердили, что использование низкой скорости охлаждения способствует образованию полимера в СЭУП с более высокой прочностью и жесткостью, положительно отражающихся на прочности СЭУП. Сочетание экспериментов и конечно-элементной модели в работе позволили предсказать прочность СЭУП, не прибегая к разрушающим испытаниям. Анализируя данные изучения структуры СЭУП, нельзя сделать вывод о том, что оно может быть отнесено к сварному, как его называли авторы, так как нет признаков, характеризующих непрерывное и плавное изменение в структуре шва при переходе от одной детали из УП к другой детали, также из УП.

По той же причине нельзя отнести к сварному соединению внахлестку металлов и ПМ трением [21], хотя оно и выполнялось на сварочной машине и рассматривалось в сварочном журнале. Можно лишь утверждать, что соединение внахлестку без изменения фазового состояния материалов не может привести к созданию плавной (тем более однородной) переходной зоны в шве.

Среди публикаций о соединении разнородных материалов выделяются своей оригинальностью **соединения с помощью лазерного излучения и соединения трением с перемешиванием стержнем.**

Первый вид соединения выполняется преимущественно по схеме просвечивания. Это соединение перспективно, например, для того, чтобы занять нишу в технологии изготовления элементов медицинских устройств из комбинации ПМ и металлов. Возможности прямого соединения ПМ с металлами без дополнительных промежуточных слоев указанным методом продемонстрированы в ряде исследований последнего времени. Однако еще отсутствует надежный и количественный метод определения площади контакта между полимерной и металлической деталями, облегчающий расчет прочности при сдвиге гибридного соединения. В работе китайских исследователей был предложен новый метод количественной оценки указанной площади контакта на границе раздела фаз, основанный на принципах подобия [22]. Было впервые сообщено о влиянии обесцвечивания на механические характеристики гибридного соединения. Биосовместимый полиэтилентерефталат (ПЭТ) и коммерчески чистый титан были отобраны для выполнения соединения с помощью волоконного лазера мощностью 200 Вт. Изучали влияние мощности лазера, скорости сканирования и расстояния между наконечником сопла и верхней поверхностью ПМ на формирование контакта. Результаты эксперимента анализировали с помощью программ Taguchi L9 и ANOVA. Морфологию поверхности контакта, структуру и эле-

ментный состав на границе раздела ПЭТ и Ti после сдвига или расслаивания характеризовали с помощью методов сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и др.

Более глубокое исследование прямого лазерного соединения ПЭТ с металлом, в частности с коррозионностойкой сталью (КСС) и, как было подчеркнуто авторами, без использования клеев провели японские ученые [19]. Ими были отмечены актуальность и сложность задачи выполнения соединений в металлополимерных конструкциях. В данном случае как способ соединения была фактически использована не «сварка», как утверждают авторы, а приформовка, что, впрочем, косвенно указывает на сложность склеивания ПЭТ с реализацией его свойств в изделии. Поскольку исследование было выполнено на 2 года раньше работы в КНР [22], с его авторами можно согласиться в том, что оно было инновационным. Цель исследования состояла в оценке надежности соединения. Эксперименты проводили с пластинами из КСС типа 304 толщиной 3 мм и листами из ПЭТ толщиной 2 мм при различных скоростях перемещения луча диодного лазера мощностью 170 Вт. Нахлесточные образцы шириной 30 мм разрушались при испытании на сдвиг при максимальной нагрузке 3 кН. Трансмиссионная электронная микроскопия показала, что сталь 304 и ПЭТ соединяются друг с другом на атомном или молекулярном уровне через пленку оксида хрома на поверхности стали. Рентгеновская фотоэлектронная микроскопия и масс-спектропия вторичных ионов показали на возможность химических связей между углеводородами и металлом через атом кислорода. На основе данных структурных исследований можно говорить еще об одном подтверждении химической сварки с помощью лазерного излучения, на которую было обращено внимание в предыдущей публикации автора [1]. Надежность соединений подтвердилась тем, что их прочность при сдвиге на уровне 3 кН сохра-

нилась после циклического нагрева. Они показали превосходную герметичность после испытания на гелиевом течеискателе. В результате установлено, что применение лазерного излучения позволяет создавать высококачественное соединение стали и ПЭТ с образованием наноструктурированных связей посредством пленки оксида, обладающее высокой надежностью для практического использования.

Изменение объекта и предмета исследования в другой работе ученых из КНР по соединению с помощью волоконного лазера сильно различающихся по свойствам материалов – углепластика на основе полифениленсульфида и КСС [23] – указывает на расширение интереса к рассматриваемой технологии и вместе с тем на ее перспективность. Опять же, при строгом подходе, по всем признакам данное соединение, основанное на плавлении матрицы в УП, должно быть отнесено к полученному приформовкой. Но этот факт не снижает значимость публикации для специалистов. В экспериментах была обнаружена высокая прочность соединения при сдвиге и изучена микроструктура на границе раздела в соединении. Предметом цифрового метода исследования в работе явилась зависимость тепловых процессов от параметров процесса соединения. В итоге была создана математическая модель лазерного соединения УП с КСС. Образование воздушных пузырьков в зоне соединения объяснено возможной деформацией матрицы УП.

### 3. Лазерная сварка

Лазерная сварка не потеряла своей актуальности и значимости при выполнении также соединения однородных ПМ. Более того, продолжение исследований в этой области способствует углублению представлений об особенностях данного метода сварки и позволяет целенаправленно оптимизировать параметры процесса.

В работе [24] китайские исследователи представили результаты оптимизации процесса лазерной сварки просвечиванием образцов

из поликарбоната; эксперимент выполняли с введением углерода между соединяемыми поверхностями и без него (рис. 2). Моделировали влияние на максимальные показатели растягивающей нагрузки соединения параметров процесса – мощности лазерного излучения, скорости сварки, усилия прижима и продолжительности охлаждения. Для проверки адекватности модели в виде уравнения регрессии использовали метод дисперсионного анализа ANOVA. Результаты исследования показали хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

В другой работе, впервые с середины 1990-х гг., когда лазерная сварка получила известность, интернациональная группа исследователей обратилась к изучению факторов подготовки деталей из ПМ к этой сварке [25]. Специфика метода сварки просвечиванием заключается в бесконтактности процесса нагрева и в том, что нагрев ПМ и образование соединения происходят параллельно. При этом одна из соединяемых деталей должна обладать высокой прозрачностью по отношению к излучению и присоединяться к другой детали, обладающей высокой способностью поглощать лазерное излучение (см. рис. 2). Обе детали перед началом сварки приводятся в заданное положение и под давлением прижимаются друг к другу. Излучение от диодного лазера, проходя сквозь прозрачную деталь, не вызывает ее нагрева. Вто-

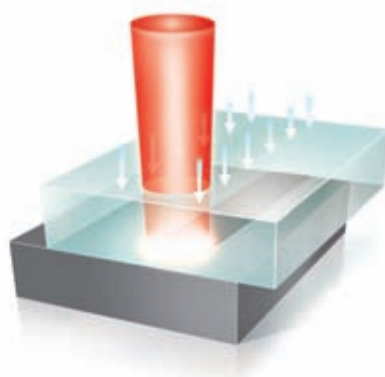


Рис. 2. Схема лазерной сварки ПМ просвечиванием: верхняя деталь прозрачна для лазерного излучения, а нижняя непрозрачна и нагревается, поглощая энергию лазерного излучения (фото: LPKF)

рая деталь полностью поглощает лазерное излучение в поверхностном слое и превращает его в тепло, благодаря которой поверхностный слой этой детали, примыкающий к месту соединения, плавится. В результате теплопередачи за счет теплопроводности затем происходит пластицирование прозрачной детали в зоне соединения. Расширение расплава и возникшее в результате этого внутреннее давление, а также приложенное внешнее давление приводят к образованию соединения, основанного на замыкании связи веществом деталей. К достоинствам такого метода соединения относятся:

- отсутствие образования частиц материала в зоне шва, возникающих при других методах сварки;
- возможность изготовления почти незаметного шва при сварке оптически непрозрачных деталей;
- обусловленная локальностью нагрева пригодность для выполнения швов непосредственно вблизи чувствительных к тепловому воздействию элементов электроники;
- меньшее термическое коробление деталей по сравнению с другими методами сварки.

По сравнению с УЗ-сваркой и сваркой вибротрением на детали не передаются никакие колебания, что важно при сборке изделий электроники. К недостаткам рассматриваемого метода относится то, что соединяемые детали должны иметь различные оптические свойства и создавать при сварке по возможности плотный без зазоров контакт. Это обусловлено тем, что одна из соединяемых деталей должна быть прозрачна для лазерного излучения. Рассматривая оптические свойства полиамида, отмечено, что введение в его состав сажи придает ему способность поглощать лазерное излучение. Чтобы свариваемые детали оптически выглядели приблизительно одинаково, рекомендовано с целью окрашивания прозрачного для лазерного излучения материала использовать краситель вместо пигмента.

Австрийская фирма K.D. Feddersen (г. Вена) в партнерстве с фирмой Akro-Plastic (Гер-

мания) выпускает широкую гамму окрашенных полимерных композиций, среди которых находится, в частности, подвергнутая исследованию композиция марки Akromid A3 GF 40 1 LT schwarz (5709) на основе ПА 66, усиленная 40% масс. стекловолокна. Сделан вывод, что наряду с выбором композиции для свариваемых лазером деталей важным является измерение прозрачности деталей по отношению к лазерному излучению в зависимости от параметров процесса формования. Фирма Akro-Plastic для измерения прозрачности применила прибор TMG 3 производства фирмы LKPF Laser & Electronics, работающий при излучении длины волны 980 нм (рис. 3 и фото 5).

Методику измерения прозрачности разрабатывали непосредственно в процессе выполнения исследования с использованием замеров в 5 точках у 5 пластин размерами 60×60×2 мм с полирован-

ной поверхностью, которые после литья хранились перед измерениями в течение 24 ч в пакетах из ПЭ. Было установлено, что изменение толщины материала, введение другого пигмента или нарушение соотношения матрица/наполнитель могут негативно повлиять на процесс сварки. Представитель фирмы Akro-Plastic, участвовавший в проведении исследования, советует при недостаточном уровне прочности сварного шва обратить внимание на режим процесса литья под давлением. Если степень абсорбции излучения соединяемой деталью изменяется, то это указывает на неотработанность процесса изготовления детали на предварительном этапе. При оценке влияющих факторов были проверены основные параметры процесса: температура стенки формы (от 50 до 130 °С) и скорость впрыска (30 см<sup>3</sup>/с и 80 см<sup>3</sup>/с) и в итоге сделано заключение об изменении свариваемости литьевых деталей. Причину этого авторы работы [25] видят во влиянии этих параметров режима литья на кристалличность поверхностных слоев деталей и локальное содержание в них стеклянных волокон, что, в свою очередь, влияет на абсорбирующую способность материала.

Красители, которые применяются для прозрачных материалов, делают их также более термически чувствительными по сравнению с материалами с классическим сажевым пигментом. Этот вывод был сделан из данных зависимости прозрачности материала Akromid A3 GF 40 1 LT schwarz (5709) от продолжительности выдержки в материальном цилиндре узла плаستيляции литьевой машины.

Хотя **лазерная резка** – давно известный процесс, но и в настоящее время она является многообещающей альтернативой традиционным методам резки углепластиков (УП). Поскольку она основана на термическом воздействии, то при отклонении параметров процесса от оптимальных может произойти повреждение как матрицы, так и волокон УП. Для тех, кто начал приобщаться к производству изделий из УП, автор посчитал необходимым обратить внимание на одну из новейших публикаций по лазерной резке в специализированном журнале [26]. Предметом исследования явилась протяженность эффективной зоны термического влияния при лазерной резке листового УП толщиной 1 мм пульсирующим Nd:YAG лазером мощностью 150 Вт, которая зависит при выбранном лазере от параметров процесса. Анализировали зону резания и влияние энергии и частоты импульса, продолжительности импульса, скорости резания и величины перекрытия на геометрию зоны резания и эффективную зону термического влияния. Эксперименты показали, что выбранный лазер позволяет резать листы из УП со скоростью до 10,8 мм/с. Однако необходим точный выбор параметров процесса, чтобы определить максимальную скорость резания и узкую эффективную зону термического влияния.

Полезную информацию сварщикам ПМ можно получить из публикаций о лазерном спекании полимерных порошков, например, специалистов из ВИАМ и ООО «Химпродукт» [27]. Они исследовали применительно к 3D-печати возможность изготовления монолитных деталей лазерным спеканием порошка на основе наполненного SiO<sub>2</sub> полиамида 12. Размер частиц порошка от 20 до 100 мкм и с насыпной плотностью 0,4 г/см<sup>3</sup>.

#### 4. Соединение трением с перемешиванием

Большим разнообразием тем исследований отличаются работы зарубежных авторов по соединению разнородных и однородных материалов сваркой трени-



Рис. 3. Прибор TMG 3 позволяет в течение нескольких секунд оценить светопропускание свариваемых полимерных деталей как в автономном режиме, так и при интегрировании в состав сварочных систем (источник: LKPF)

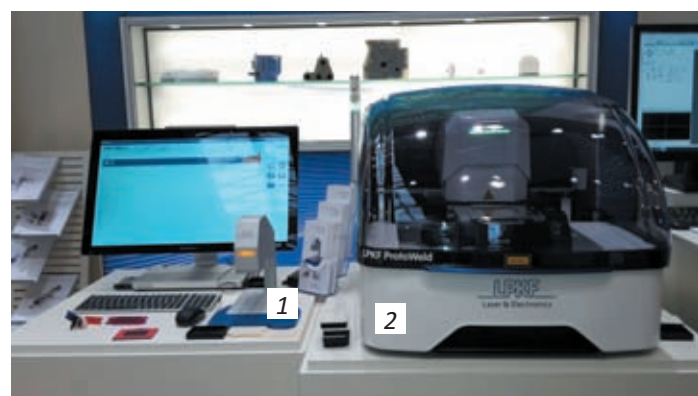


Фото 5. Прибор TMG 3 с монитором для вывода результатов измерений (1) и установка для лазерной сварки настольного типа (2) на стенде LKPF во время выставки Fakuma

ем с перемешиванием (friction stir welding). Зачастую они оказываются не менее эффективными, чем лазерные соединения.

Авторы работы [28], анализируя способы соединения разнородных материалов, ставили задачу изготовления конструкций из нескольких материалов с оптимальными свойствами с точки зрения требований снижения массы и стоимости. Однако изготовление эффективного соединения материалов с сильным различием термических свойств, микроструктуры и деформационного поведения представляет большую проблему при использовании обычных методов соединения и (или) крепления. Это особенно сказывается на производственных расходах. На основе анализа обнаруженных сведений о том, что благодаря специфическому механизму процесса, заключающемуся в макросмешении материалов в зоне шва, сделали вывод о возможности эффективной «сварки» трением с перемешиванием при соединении ПМ с металлами, обеспечивая устойчивость шва в соединениях многих, даже сильно различающихся материалов.

Дальнейшее развитие метода идет в сторону его распространения на новый круг материалов, как разнородных, так и однородных, а также на его модифицирование.

Известный из публикаций российских исследователей метод повышения прочности сварного соединения ПМ локальным созданием полимерного КМ в зоне шва был использован японскими специалистами при сварке с перемешиванием встык образцов листового термопласта [29]. В экспериментах с листовым ПВХ, имеющим направляющие отверстия различного диаметра, они во время сварки вводили частицы SiC в указанные отверстия, исследовали процесс соединения и его влияние на прочность места соединения. В случае использования образцов, наполненных частицами SiC, при направляющем отверстии диаметром 8 мм частицы SiC могли быть равномерно диспергированы в зоне сварки. В образцах с направляющими отверстиями диаметром 5 и 2 мм дисперсию частиц SiC внутри зоны свар-

ки не наблюдали. Значительный локальный рост механической прочности наблюдали у кромки отверстия и внутри зоны сварки соответственно у образца с направляющим отверстием диаметром 8 мм. Ширина зоны сварки возрастает с ростом диаметра направляющего отверстия. Установлено повышение прочности соединения при образовании КМ в зоне сварки, причем прочность возрастает с увеличением диаметра направляющего отверстия. Предполагают, что изменение диаметра направляющего отверстия ведет к изменению площади зоны контакта между сварочным инструментом и частицами SiC и таким образом к изменению ширины зоны сварки, а благодаря этому и прочности соединения.

Как модифицирование сварки трением с перемешиванием вращающимся стержнем можно рассмотреть применение инструмента новой конструкции. Инструменты, обеспечивающие дополнительный нагрев ПМ, были использованы для получения более качественной поверхности сварного шва, уменьшения числа дефектов и снижения потерь материала во время сварки образцов из полипропилена [30]. Эффективность конструкции инструмента оценивали по результатам испытаний образцов сварных соединений на прочность при растяжении. Предложенная конструкция инструмента с подогревом повышает прочность сварного соединения при растяжении и таким образом пригодна для изготовления сварных швов с большей пластичностью, чем швы, изготовленные инструментом без дополнительного нагрева. Достижимый эффект объяснен более полным нагревом ПМ, исключающим образование пустот в зоне шва.

Прямое соединение разнородных материалов трением можно осуществлять и без перемешивания в макрообъеме. В статье автора [1] была сделана ссылка на публикацию японских исследователей. В уже цитируемой выше работе [21] авторы сделали шаг вперед в развитии метода, выполнив точечное нахлесточное соединение, названное гибридным, новой пары: алюминиевого спла-

ва AA2024-T3 и УП на основе полифениленсульфида (ПФС) с применением трения в плоскости соединяемых поверхностей. Соединение осуществляли с применением дополнительной прослойки из пленки ПФС толщиной 100 или 500 мкм. По этому признаку оно должно быть отнесено к клеевому. Прочность при сдвиге соединения с помощью пленки толщиной 100 мкм была выше ( $2093 \pm 180$  Н), чем у соединения с помощью пленки толщиной 500 мкм ( $708 \pm 69$  Н). Обнаружили, что площадь разрушения в первом случае ( $53 \pm 2$  мм<sup>2</sup>) превышала эту площадь у соединения с применением пленки толщиной 500 мкм. Из-за низкой теплопроводности ПФС более тонкая пленка полнее размягчается в процессе нагрева трением и лучше смачивает поверхности соединяемых деталей. Микроструктурный анализ показал, что металлическая деталь не изменяет своей структуры, а использование более тонкой прокладки способствует прохождению взаимной диффузии цепей ПФС между прокладкой и ПФС-матрицей УП. Таким образом, возникает прочное сцепление между деталями.

Данные об эффективности сварки трением с перемешиванием подвинули, видимо, японских специалистов в сторону изучения новой технологии сварки с перемешиванием, но уже другим методом, а именно нагретым инструментом [31]. При сварке этим методом ПМ размягчается инструментом, нагреваемым в результате протекания по нему электрического тока, и сплавляется при перемешивании вращающимся инструментом. Соединению подвергали листовую поликарбонат толщиной 3 мм. В экспериментах за ходом процесса наблюдали *in situ* с помощью кинокамеры, замеряя температуру, а также наблюдая за внешним видом поверхностей и поперечным сечением зоны соединения и осуществляя испытания соединений при растяжении. В результате этих экспериментов установлено, что происходит интенсивное плавление и размягчение ПМ вокруг сварочного инструмента. Для формирования надежных соединений с приемлемыми характеристиками должен

быть обеспечен достаточный нагрев при определенной скорости сварки и величине электрического тока, протекающего по инструменту. Установлено, что соединения, изготовленные при правильно выбранных условиях, имеют те же самые свойства, что и основной материал, и что параметрами процесса сварки являются скорость вращения инструмента, скорость сварки и сила тока. Результаты исследования указывают на пригодность метода, который можно отнести к числу комбинированных, для соединения различных ПМ.

Задачи снижения массы конструкций из гибридных материалов решаются при использовании не только сварки, но и других методов соединения, о возможностях которых квалифицированный сварщик ПМ, желающий развивать отечественную технологическую базу, должен бы знать. В литературе появляются сообщения о методах соединения, в которых можно обнаружить элементы процессов, близких к сварке. К таким методам, по мнению автора, можно отнести клепку трением Al-сплава 6056 Т6 и полиамида 6 [32], которую рассматривают как инновационную технологию. Процесс основан на генерировании теплоты трения между соединяемыми элементами, в результате которого происходит пластическое деформирование конца металлической заклепки со стороны полимерной детали. В работе оценивали техническую возможность соединения Al-сплава и ПМ, фокусируя внимание на влиянии скорости вращения заклепки и на механических характеристиках соединения. Максимальная температура возрастала с  $291 \pm 6^\circ\text{C}$  при частоте вращения  $n = 10\,000$  1/мин до  $375 \pm 6^\circ\text{C}$  при  $n = 15\,000$  1/мин. Использование более высокого значения  $n$  вело к пластическому деформированию конца заклепки в процессе трения. Это вызывало образование механически более прочных соединений, так как металлическая заклепка сильнее закреплялась в полимерной детали. Прочность соединения при растяжении составляла 85 % прочности при растяжении заклепки. Поэтому сделан вывод, что метод клеп-



Фото 6. Проведение эксперимента по сварке труб при минусовых температурах окружающей среды (источник: ИПНГ СО РАН)

ки трением пригоден для соединения Al-сплава 6056 Т6 и ПА 6 и что скорость вращения непосредственно влияет на прочность соединения при растяжении. Анализируя результаты исследования, можно дополнительно предположить, что разогрев головки заклепки способен привести к образованию прочной адгезионной связи металлической головки и поверхности ПА 6.

## 5. Сварка нагретым инструментом

Из российских работ в области сварки ПМ в последние годы обратила на себя внимание целая серия систематических публикаций якутских исследователей по изучению свариваемости при низких температурах окружающего воздуха. В основном в них шла речь о сварке встык или внахлест полимерных труб нагретым инструментом, например, труб из ПЭ или труб из ПП без использования укрытий (фото 6).

Основная часть исследований, выполненных на высоком научном уровне с использованием моделирования, касалась разработки режимов нагрева, позволяющих нивелировать влияние пониженных температур. В результате исследований в Якутске, в Институте проблем нефти и газа (ИПНГ) СО РАН, создана отечественная школа сварщиков ПМ при низких температурах. Суть разработанных способов сварки заключается в использовании предварительного подогрева труб до температуры размягчения ПЭ с помощью дополнительного инструмента и охлаждения сварного соединения в теплоизоляционной камере [33]. Многочисленные испытания сварных соединений по-

казали, что они по своим характеристикам находятся на уровне со сварными соединениями, изготовленными при допустимых температурах окружающего воздуха, а надмолекулярная структура зоны шва идентична структуре шва, изготовленного с использованием стандартного режима сварки. Результаты этих исследований действительно продвигают применение ПМ в новые объекты промышленности и строительства, имеют большое народно-хозяйственное значение в связи с освоением районов Арктики и должны привлечь внимание зарубежных специалистов.

Из последних работ ученых из ИПНГ СО РАН можно отметить исследования сварки закладным нагревателем труб из ПЭ с помощью электромолота при температурах воздуха ниже нормативных. Используемая математическая модель процесса учитывала теплоту фазового перехода в интервале температур [34]. Показано, что в зоне термического влияния можно обеспечить при низких температурах такое же изменение температурного поля, что и при допустимых температурах воздуха. В работе [35] эффективность рассматриваемой сварки показана на основе результатов испытания сварных соединений при расслаивании.

При терморезисторной сварке закладным нагревателем в нормальных условиях окружающей среды традиционно фактором, с помощью которого делают попытки управлять и контролировать процесс, была его продолжительность. Вместе с тем появилось сообщение [36], что процесс можно контролировать по перемещению деталей во время нагрева и сварки. Объектом исследования служил стеклопластик на основе полиэфиримида. В качестве нагревательного элемента использовали металлическую сетку. Параметры сварки контролировали с помощью лазерного сенсора и оценивали влияние параметров сварки на кривую перемещения свариваемых поверхностей. Полученные кривые предложены как параметр автоматизированного контроля процесса сварки. Показано, что с помощью таких кривых перемещения мож-

но обнаружить дефекты в виде раковин и мест «холодной сварки».

Несмотря на то, что сварка нагретым инструментом встык хорошо изучена и, казалось бы, не имеет темных пятен, проведение ее исследований на новом уровне с использованием численного моделирования позволяет сделать некоторые уточнения, расширяющие представления о ходе процесса.

Все более сложные эксперименты по изучению сварки полиэтиленовых труб нагретым инструментом стали выполнять китайские специалисты, используя многофакторный анализ. Для соединения труб из ПЭВП технология сварки является основным методом, обеспечивающим изготовление трубопроводов, работоспособных при высоком давлении с сохранением герметичности соединения. Распределение температуры в процессе сварки оказывает большое влияние на качество сварного соединения. В работе [37] исследовали распределение температуры в зоне сварного соединения с разработкой одномерной нестационарной модели передачи теплоты, полей напряжений в процессе сварки и сравнивали результаты моделирования с экспериментальными данными. Результаты исследования показали, что максимум температуры трубы достигается не в конце нагрева, а после 300 с, что указывает на изменение латентной фазы нагрева в процессе создания давления сварки. Причем в течение этого периода осевое напряжение в стенке трубы постепенно изменяется с напряжения растяжения на напряжение сжатия.

## 6. Другие разработки

Заслуживает внимания отечественных сварщиков ПМ сообщение из Германии о применении нового метода контроля при сварке ПМ [38]. В рамках двухгодичного исследовательского проекта IGF 17091N в Южно-Немецком центре пластмасс (SKZ, г. Вюрцбург) изучали возможность использования пассивной термографии для надежного, быстрого и экономичного контроля качества стыковых швов, изготовленных сваркой на-

гретым инструментом, а также других швов. Исследовали следующие термопласты: ПЭ, ПММА, POM, ПВХ, ПП, сплав ПК/АБС-пластик, ПА-СВ 25 (ПА, наполненный 25 % стеклянных волокон). Кроме сварки нагретым инструментом, использовали УЗ-, ИК- и сварку вибротрением. Результаты отражены в отчете AM432 на интернет-сайте SKZ ([www.skz.de](http://www.skz.de)). Установлена корреляция результатов контроля с прочностью сварных швов. При этом использовали простые нахлесточные образцы. При УЗ-сварке в ближнем поле можно было оценивать не только поведение при охлаждении, но и фазу нагрева. Кроме того, можно было оценивать отклонения в геометрии сварочного напыла, зону контакта инструмента и верхней детали, влияние содержания влаги в деталях, например, из ПА-СВ 25 на процесс нагрева.

В предыдущей нашей статье о новых достижениях в области сварки ПМ [1] сообщалось о разработке в Институте сварки Великобритании индукционной сварки для соединения УП. Итальянские исследователи своей работой поспособствовали распространению этой сварки на схему непрерывного ее осуществления [39]. Непрерывная индукционная сварка КМ на основе термопластичной матрицы требует точного моделирования распределения температуры в слоях материала, зависящего от параметров электромагнитного поля. В работе рассмотрены трехмерные нестационарные конечно-элементные тепловые модели с целью изучения феномена теплопроводности, плавления и кристаллизации в зоне сварного шва в процессе непрерывной индукционной сварки листового УП на основе одной из наиболее эффективных термопластичных матриц – полиэфирэфиркетона. Авторами решены многосторонние физические проблемы, связанные со взаимодействием электромагнитного поля с термопластичным КМ и передачей теплоты в процессе плавления матрицы и ее кристаллизации. Модель способна отражать непрерывный процесс вдоль на-

правления сварки с постоянной скоростью. Результаты компьютеризованного расчета температуры хорошо согласуются с экспериментальными замерами и были использованы для выбора параметров процесса: скорости перемещения катушки индуктора и силы тока. Данные об оценке возможностей метода получены в экспериментах по испытанию нахлесточных соединений при сдвиге и определению морфологии на границе раздела фаз и характера разрушения соединения.

Автор не мог не обратить внимания на публикацию [40] о химической сварке не полностью отвержденных реактопластов, поскольку находился у истоков зарождения этого метода сварки. Авторам статьи [40], по всей вероятности, должны быть известны основные публикации о химической сварке, в том числе и о ее распространении на другие классы ПМ. Однако необходимость вспомнить об этом методе применительно к не полностью отвержденным реактопластам осталась в этой статье не раскрытой.

В завершение обзора можно сделать основной вывод о том, что сварка ПМ в целом развивается, причем в основном усилиями зарубежных фирм и организаций. Можно было бы автору сослаться еще на ряд отечественных публикаций, но обнаружить в них элементы новизны не удалось. И еще следует добавить, что читателю трудно полнее воспользоваться опубликованной информацией, если в статьях нет анализа состояния вопроса. Часто это говорит о слабой информированности авторов.

*Список литературных источников приведен на сайте <http://www.polymerbranch.com/> в конце размещенной на нем данной статьи.*

## **Some Tendencies in Plastics Welding** (Continued from PM No. 9, 2018)

**G. V. Komarov**

*Some new solutions in the field of polymer materials welding for the last year are discussed. Articles published in a number of foreign and domestic magazines were sources of information. ■*