

Тенденции в технологиях изготовления соединений деталей из полимерных материалов и соединений с их участием

Среди тех российских специалистов, кто занимается решением всего комплекса проблем производства изделий из полимерных материалов (ПМ), утверждается понимание того, что без совершенствования технологий соединения деталей из ПМ невозможно развитие производства изделий из ПМ. Принимая во внимание некоторое технологическое отставание в отечественной промышленности, автор попытался в печати (преимущественно зарубежной) обнаружить то, на что отечественным исследователям и практикам, обладающим высоким научно-техническим потенциалом, стоит обратить внимание и даже при ограниченных ресурсах добиться исправления технико-экономической ситуации, реализовав известные и, возможно, найдя новые технические решения при создании современных технологий. Не все технологии соединений в последние годы развивались одинаковым темпом. Представляется, что для читателей журнала наиболее интересным будет рассмотрение тенденций в технологиях изготовления сварных и клеевых соединений, которым в обзоре уделено наибольшее внимание.

Г. В. Комаров, д. т. н., МАИ (Национальный исследовательский университет)

1. Сварка.
2. Склеивание.
3. Механическое крепление.

1. Сварка

Новым достижениям в технологии сварки ПМ в журнале уделяется особое внимание. На протяжении вот уже 10 последних лет его читатели знакомятся с новинками в этой области на примере экспозиций ведущих зарубежных компаний – участниц крупных международных отраслевых выставок K и Fakuma. Последний обзор был посвящен итогам выставки Fakuma-2015 [1]. И, как показывает анализ публикаций, данная подотрасль индустрии ПМ не стоит на месте.

В настоящее время в области сварных соединений ПМ можно выделить следующие преобладающие тенденции:

- повышение производительности процесса сварки;
- создание целой линейки машин с новыми высокоскоростными приводами, автоматизированных и роботизированных установок для широкого круга размеров деталей – от мелких до крупных;
- уточнение параметров режимов сварки (при переходе на скоростные технологии и новые изделия);

- расширение представлений о работоспособности сварных соединений;

- распространение сварки на изготовление новых изделий, в частности, из гибридных материалов.

Ультразвуковая сварка

Казалось бы, в области УЗ сварки все уже изучено. Но, тем не менее, в работе [2] проводили исследование по уточнению механизма сварки ПМ, в частности, с использованием плоского концентратора энергии. В ней рассмотрены модель знакопеременного деформирования, передача теплоты, включая ее вязкоупругое генерирование, рассеяние энергии трения и образование сцепления (возникновение плотного контакта и его исчезновение) для кратковременной начальной фазы процесса. Данные по прогнозируемой рассеянной энергии хорошо согласуются с экспериментально замеренной подводимой энергией. Прогнозируемое образование сцепления подтверждает экспериментальное наблюдение, что сцепление начинается по углам контактной поверхности и распространяется по всей поверхности контакта. Численная модель была использована для исследования физического механиз-

ма процесса сварки. Подтвержден известный факт, что начальный механизм нагрева соответствует трению на межфазной границе. Вязкоупругое рассеяние энергии в блоке превалирует, когда межфазная зона нагревается до более высокой температуры. Энергия рассеяния резко возрастает, когда вся межфазная зона достигнет температуры стеклования.

Развитие технологии УЗ сварки передовыми западными фирмами приводит к созданию более совершенного, в частности, автоматизированного и роботизированного оборудования. Такую сварочную машину для изготовления очень сложного изделия, состоящего из нескольких деталей с множеством ребер, полостей, вкладышей и т.п. и входящего в моторную часть автомобиля, создала фирма Herrmann Ultrasonics (дочерняя фирма германской компании Herrmann Ultraschalltechnik). Машина снабжена несколькими волноводами и множеством инструментов [3].

Швейцарская фирма Rinco Ultrasonics перешла на выпуск УЗ сварочных машин ряда Dynamic 3000 с электрическим приводом, который позволяет увеличить число параметров управления процессом сварки, регулируя время, путь

перемещения инструмента, количество энергии и используя их комбинации (всего восемь) [4]. Независимо от этого процесс может состоять из 10 ступеней, что позволяет обеспечить более высокий уровень производства качества соединений. Ранее применявшийся пневмопривод характеризуется тем, что после осуществления каждого цикла сварки акустический узел возвращается в исходную позицию. При электрическом приводе положение акустического узла может свободно выбираться, благодаря чему сварочный цикл может частично сократиться.

Важной проблемой при УЗ сварке является согласование характеристик акустического узла и физико-механических свойств изделия. Для такого адаптивного, изучаемого теоретически и экспериментально согласования предложено использовать полидиметилсилоксановую мембрану [5].

Специалистов, работающих с многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ), может заинтересовать сообщение из Института технологии г. Рочестера (США) об использовании технологии УЗ сварки для соединения МУНТ. Соединению подвергали тонкие жгуты из меди и МУНТ диаметром 20 мкм по поверхности площадью 0,25 см², прикладываемая давление около 5 бар. Соединение меди и МУНТ разрушалось при напряжении более 300 кПа; соединение двух МУНТ оказалось менее прочным: оно разрушалось при 200 кПа. Благодаря химической обработке МУНТ тетрабромауратом калия KAuBr₄ электрическое сопротивление зоны контакта составило 4–5 МОм на один см². Эксперименты в целом показали, что УЗ сварка пригодна для обеспечения хорошего контакта электродов из МУНТ. К достоинствам метода отнесены щадящее воздействие на материалы, а также быстрота процесса соединения, которое точнее можно отнести не к сварке, а к приформовке.

Сварка трением

В последние годы возрос интерес к **сварке трением вращающимся стержнем** (СТВС), осуществляющим перемешивание свариваемых материалов в зоне шва. В разных странах проводятся исследования по оптими-

зации параметров процесса СТВС и конструкции инструмента, пытаются распространить метод на новые, ранее не свариваемые объекты. После исследований во Фраунхоферском институте IPT в Германии сделан вывод, что СТВС является надежным способом образования соединений в технологии изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [6].

Традиционные инструменты (стержни) обычно формируют разрез (канавку) на тыльной стороне свариваемых элементов. Поэтому появляется серьезная проблема, называемая «дефект корня шва» и служащая причиной низкой прочности соединения. В статье авторов из иранского Университета г. Урмиа [7] описано применение инструмента новой конструкции с двумя буртиками, контактирующими сверху и снизу поверхностей свариваемых элементов при СТВС листов из АБС-пластика. Новый, самореагирующий инструмент (self-reacting tool) позволяет успешно исключить образование обратного разреза свариваемых элементов. Кроме того, форма стержня (прямая и выпуклая), а также скорость вращения и скорость перемещения использовались в экспериментах в качестве регулируемых параметров при изучении их влияния на механические свойства соединения, в частности, на прочность при растяжении. В целом результаты исследования показали, что форма стержня оказывает очень большое влияние на указанную прочность.

СТВС исследователи из КНР применили для соединения разнородных термопластов – ПЭВП и АБС-пластика [8]. Они пришли к выводу, что традиционные инструменты не обеспечивают высокого качества соединений. Цель работы состояла в изучении влияния введения в зону СТВС различного количества МУНТ на морфологию и механические свойства соединений. Показано, что количество дефектов, таких как поры и трещины, может сокращаться, модифицирование зоны соединения МУНТ приводит к увеличению прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве и к снижению твердости зоны шва. При большом размере канавки, в которую вводятся МУНТ, могут возникнуть трещины.



Ориентация на клиента и технологические инновации для полной реализации возможностей взаимодействия вспомогательного и литейного оборудования на основе сетевых коммуникаций.



Компания Shini последовательно внедряет технологические инновации.

Удовлетворение технологических требований производителя изделий из пластмасс литьем под давлением является целью любого производителя оборудования. Однако не менее важно удовлетворить и другие требования. Оборудование Shini отвечает стандартам и обеспечивает клиентам точность, практичность и удобство в эксплуатации. Функция sLink на основе коммуникационного протокола TCP/RTU позволяет повысить уровень интуитивности при работе оператора с экраным графическим интерфейсом. Обмен данными с литейной машиной обеспечивает возможность централизованного контроля и повышает эффективность эксплуатации оборудования, оправдывая ожидания клиента.

Simple Solution



К новому методу соединения, которое по механизму процесса нужно считать приформовкой, а не сваркой, как считают сами авторы из Университета г. Осака (Япония) [9], относится **соединение**, также выполняемое **трением**, но внахлестку протяженным швом разнородных материалов – металла и ПМ, в частности, алюминиевого сплава АА6061 и ПА 6 (рис. 1). Почти тем же коллективом авторов исследовали непосредственное присоединение углепластика (20% масс. углеродных волокон) на основе ПА 6 к алюминиевому сплаву А5052 при использовании трения в зоне нахлестки по несколько доработанной технологии [10]. Характеристики соединения оценивали, исследуя влияние подготовки поверхности металла и скорости соединения. Соединение осуществляли, размещая между поверхностями слой из оксида магния. Измельчение в результате трения поверхностного слоя сплава А5052 приводило к образованию гидроксида алюминия и повышению прочности соединения при сдвиге. Прочность при сдвиге возрастала с повышением скорости соединения от 100 до 1600 мм/мин, а затем снижалась.

В работе германских авторов из Института исследования материалов в Центре Helmholtz-Zentrum Geesthacht [11] изучали **точечное соединение трением внахлестку** алюминиевого сплава АА2024 с углепластиком на основе полифениленсульфида по технологии, разработанной в указанном центре. Соединение выполняли составным инструментом, имеющим прижимную втулку. Процесс соединения состоял из трех этапов. На 1-ом этапе происходило плавление металла под влиянием трения втулки инструмента.

На 2-ом этапе стержень, охватываемый втулкой, вдавливался в размягченный металл для формирования монолитной точки. На 3-ем этапе инструмент возвращался в исходное положение, после чего формировалось соединение под давлением со стороны охватывающего инструмент прижима. Продолжительность соединения составляла 4,0–6,8 с. Металл во время осадки расплава слегка внедряется в поверхность ПКМ. Установлено, что на прочность при сдвиге влияет подготовка поверхности металла. Струйная обработка песком привела к повышению шероховатости поверхности металла и прочности соединения. Для чистого алюминия прочность при сдвиге составила 27 МПа. Дополнительно установили, что образцы из плакированного дюралюминия показали многообещающие механические характеристики (прочность при сдвиге возросла до 43 МПа).

Тенденция разработки соединений приформовкой (вовсе не сваркой, как считают авторы публикаций) разнородных материалов характерна и для области ПМ, в частности соединений термопластов с отвержденными реактопластами. При этом приходится порой решать специфические задачи, когда соединяемые ПМ сильно отличаются по теплофизическим свойствам. В данном случае слабым звеном в соединении может быть не термопласт, а отвержденный реактопласт. Одним из главных ограничений при выполнении приформовки является термическое разложение терморезактивной матрицы во время плавления термопластичной матрицы КМ. Решение проблемы заключается в сокращении продолжительности нагрева при формировании соединения. Указанного сокращения в

работе [12], в которой использовали углепластик на основе полиэфирэфиркетона (температура плавления $T_{\text{пл}} = 340^{\circ}\text{C}$) и углепластик на основе эпоксидной матрицы (температура стеклования $T_c = 157^{\circ}\text{C}$) добились, применяя резистивный или индукционный нагрев и ультразвук.

Высокочастотная сварка

Многим может представляться, что в технологии высокочастотной (ВЧ) сварки чего-то нового трудно ожидать. Но, тем не менее, появляются новые технические решения. Так, ВЧ сварку полипропилена (ПП), наполненного дисперсными стеклянными волокнами, японские специалисты осуществили с использованием присадочного материала на основе термопласта, наполненного оксидом цинка, оксидом титана или карбидом кремния [13]. Такое наполнение присадочного материала приводило к повышению его тангенса угла диэлектрических потерь и придавало ему способность нагреваться в ВЧ поле. Даже небольшое количество частиц оксида цинка (до 10% масс.) ускоряло нагрев и способствовало повышению прочности нахлесточного сварного соединения при сдвиге.

Значительно раньше авторов работы [13] ВЧ сварку ПП осуществили китайские исследователи, наполнив полимер многостенными углеродными нанотрубками [14]. Степень наполнения ПП наночастицами, достаточная для микроволнового нагрева присадочного материала между слоями ненаполненного ПП, составляет 4 % масс.

Инфракрасная сварка

К созданию сварочного оборудования по новому принципу приступили фирмы, специализирующиеся в других методах сварки ПМ. Так, фирма Frimo после нескольких анонсов на выставках, в том числе на выставке Fakuma-2015, отдельных экспонатов, начала предлагать всю серию JoinLine-IR из 6 машин для инфракрасной (ИК) сварки деталей широкого спектра размеров – от мелких типа воздушных вентилях, различных трубопроводов, емкостей или узлов моторного отсека автомобилей до деталей интерьера типа вещевого ящика [15]. Модульное исполнение недо-

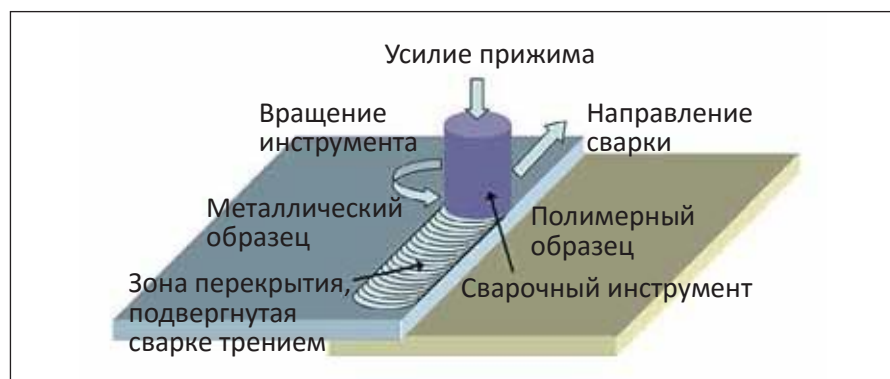


Рис. 1. Схема соединения образцов металла и ПМ с применением трения [9]

рогих машин по программе единой платформы позволяет осуществлять их поставки за короткие сроки после заказа и обеспечивает потребителя одинаковыми запасными частями. Машины характеризуются высокой точностью работы, воспроизводимостью режимов сварки, энергоэффективностью и высокоскоростными бесшумными приводами, снабженными линейными моторами. Наряду с инновационной системой быстрой смены фиксаторов деталей машин серии JoinLine IR отличаются также другими новинками. Поскольку детали, изготовленные методом экструзии с раздувом и предназначенные для систем подачи газа и жидкостей, имеют более широкие допуски, чем детали, изготовленные литьем под давлением, в конструкциях машин введена система выравнивания допусков. Для сплошного документирования машины ряда JoinLine IR могут быть снабжены экстремально малогабаритными ИК камерами нового типа, позволяющими контролировать распределение температуры соединяемых деталей. Для ускорения выбора сварочной машины фирма оказывает клиентам безвозмездную помощь по оценке способности ПМ не только свариваться, но и соединяться заклепками.

Лазерная сварка

Новые машины появляются также в области лазерной сварки. Например, фирма Rofin (Германия) предлагает рабочее место сварщика MPS, включающее в себя диодный лазер фирмы Dilas и систему управления с программным обеспечением [16]. Оборудование поставляется в виде комплектной системы «под ключ» или готового к встраиванию пакета, состоящего из лазера, зажимного устройства и системы управления. Устройство разрабатывается с учетом требований заказчика и приводится в действие пневматикой или сервоприводом.

Роликовая лазерная сварка просвечиванием текстиля встык с накладкой шириной до 8 мм реализована на машине, снабженной прозрачным роликом, пропускающим лазерный луч, и роликом из черного силикона, осуществляющих перемещение свариваемого материала со скоростью до 12 м/мин [17]. Машина создана в результате совместной

работы швейцарских фирм Emra, Leister и Schips в рамках одного исследовательского проекта.

Одновременно в области лазерной сварки решаются задачи по распространению метода на новые объекты, в частности, из материалов с низкой абсорбирующей способностью по отношению к лазерному излучению. Для лазерной сварки текстиля светлых тонов с целью повышения уровня поглощения излучения ближней части ИК спектра институтами Hohenstein и DWI Leibniz (Германия) разработаны локально вводимые абсорберы, которые не вызывают изменения цвета материала [18].

Лазерная сварка не осталась в стороне при апробировании ее на предмет применимости для образования соединения таких разнородных материалов как термопластичный углепластик и сталь [19]. Авторы исследования из КНР, естественно, не могли не представлять, что одними из основных проблем сварки при нагреве металла до плавления, а углепластика до плавления матрицы будут деструкция полимерного субстрата и образование в этом случае в шве дефектов в виде ослабляющих соединения пор в углепластике. Установили два типа пор. Первый тип находится вблизи границы раздела фаз между углепластиком и сталью в центральной зоне расплава при тепловой нагрузке более 77,8 Дж/мм³. Образование пор связывали с выделением газообразных продуктов пиролиза углепластика. Второй тип пор образовывался при всех условиях сварки. Они располагались далеко от границы раздела фаз, формировались на стадии затвердевания материалов и были обусловлены усадкой расплавленного углепластика во время затвердевания. Несложно предположить, что о перспективах такой лазерной сварки можно сказать только после всестороннего изучения свойств сварных соединений и сопоставления с возможностью сварки другими методами, в частности, трением вращающимся стержнем.

Сварка закладным нагревателем

Поскольку сварка закладным нагревателем (СЗН) применяется преимущественно при строительстве работающих под внутренним дав-

2016 Booth No: 13034 Agent Wanted



Тайваньская фирма «Янн Банг» производит оборудование для переработки каучуков и пластмасс

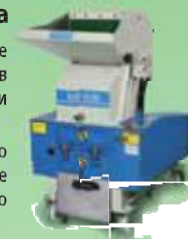
Автоматический вакуумзагрузчик



- Большая мощность в сочетании со всасывающими бункерами различного типа имеет преимущества и облегчает работу при подаче материала на большие расстояния.
- Имеется патент Тайваня

Мощная дробилка

- Измельчение большинства видов отходов пластмасс и резин
- Простота технического обслуживания и наличие защитных устройств по китайскому патенту



YANN BANG

YANN BANG ELECTRICAL MACHINERY CO., LTD.
TEL: 886-4-22710000 FAX: 886-4-22711988



www.yannbang.com
yb@yannbang.com

лением газопроводов, специалисты озабочены долговечностью сварных соединений. Исследования СЗН трубопроводов из ПЭ 100 показали, что в местах перехода от муфты к трубе возникают трещины [20]. Предложено эти дефекты исключать путем введения сварочного фактора, равного 0,4, при статическом расчете соединения. Компенсация сварочного фактора возможна при использовании в качестве материала муфты ПЭ марки PE 100 RC.

К новинкам в области СЗН можно отнести сообщение об управлении этим методом. Традиционно процессом СЗН управляют, регулируя продолжительность нагрева. В работе [21] предложено контролировать указанный процесс по перемещению свариваемых поверхностей во время процессов нагрева и собственно сварки. Отмечается чувствительность перемещения к параметрам процесса и возможность таким образом обнаруживать дефекты в виде раковин и мест «холодной сварки». Экспериментальная проверка метода осуществлена на образцах из армированного стеклотканью полиэфиримида, сваренных с помощью металлической сетки.

Из российских исследований в области сварки ПМ обратили на себя внимание работы школы Института проблем нефти и газа СО РАН по сварке при естественно низких температурах. На основе моделирования теплового процесса там разработан способ сварки нагретым инструментом труб из ПЭ встык и из ПП вращающихся труб при температурах ниже -15°C без использования укрытий [22, 23].

В целом, относящиеся к сварке ПМ публикации в последнее время по многообразию рассматриваемых проблем уступают работам по склеиванию. Но склеивание вовсе не заменяет сварку, как иногда звучит в некоторых статьях на западе, а дополняет ее.

Литература

1. Комаров Г. В., Гончаренко В. А. Сварочные технологии и оборудование на выставке FAKUMA-2015// Полимерные материалы. 2016. № 1. С. 18–26.
2. Levy A., Le Corre S., Fernandes V. I. Modeling of the heating phenomena in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors// J. Mater. Process. Technol. 2014. V. 214, No. 7. P. 1361–1371.
3. Tönsmeier P. Horns of plenty plastics welding systems are being enhanced with a cornucopia of automation and other options// Plast. Eng. 2014. V. 70, No. 2. P. 6–8, 10, 12.
4. Ultra schallschweißen auf erhöhtem Qualitätsniveau// Österreichische Kunststoffzeitschrift. 2015. Nr. 9/10. S. 284–285.
5. Zhao B., Qi H., Xu D. Parallelism adjustment between welding head and sample in ultrasonic nanowelding// J. of Experimental Nanoscience. 2014. V. 9, No. 6. P. 570–574.
6. Das Schweißen von faserverstärkten Kunststoffen// Holz. 2014. Nr. 6. S. 30.
7. Pirizadeh M., Azdast T., Ahmadi S. R., Shshavan S. M., Bagheri A. Friction stir welding of thermoplastics using a newly designed tool// Materials and Design. 2014. V. 54. P. 342–347.
8. Gao J., Li Ch., Shilpakar U., Shen Y. Improvements of mechanical properties in dissimilar joints of HDPE and ABS via carbon nanotubes during friction stir welding process// Materials and Design. 2015. V. 86. P. 289–296.
9. Liu F. C., Liao J., Nakata K. Joining of metal to plastic using friction lap welding// Materials and Design. 2014. V. 54. P. 236–244.
10. Nagatsuka K., Yoshida Sh., Tsuchiya A., Nakata K. Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastics to an aluminum alloy using friction lap joining// Composites. B. 2015. V. 73. P. 82–88.
11. Goushegir S. M., dos Santos J. F., Amancio-Filho S. T. Friction spot joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylenesulfide) composite single lap joints: Microstructure and mechanical performance// Materials and Design. 2014. V. 54. P. 196–206.
12. Villegas I. F., Rubio P. V. On avoiding thermal degradation during welding of high-performance thermoplastic composites to thermoset composites// Composites. 2015. V. 77. P. 172–180.
13. Masaru S., Hiroyuki O., Masahiro S., Yu S. et al. High frequency welding of glass-fibre-reinforced polypropylene with a thermoplastic adhesive layer: Effects of ceramic type and longterm exposure on lapshear strength// Int. J. Adhes. and Adhes. 2015. V. 59. P. 7–13.
14. Wu T., Pan Y., Liu E., Li L. Carbon nanotube/polypropylene composite particles for microwave welding// J. Appl. Polym. Sci. 2012. V. 126(2). P. 283–289.
15. Innovationen beim IR-Schweißen// Österreichische Kunststoffzeitschrift. 2015. Nr. 1/2. S. 38–39; Kunststoffe fest und energieeffizient schweißen// Produktion Magazin. 2014. Nr. 5. S. 35.
16. Neue Lösungen für das Kunststoffschweißen mit Laser// Werkst. Fertigung. 2015. Nr. 5. S. 59.
17. Lehmeier F. K., Nader M., Camenzind M., Haag A. Laserschweißmaschine zum Endlosschweißen textiler Lamine// Technische Textilien. 2014. Nr. 2. S. 80–82.
18. Hohenstein Verbesserung der Nahtqualität beim Laserschweißen// Melland Textilber. 2014. Bd. 95, Nr. 2. S. 61.
19. Xianghu T., Jing Zh., Jiguo Sh., Shanglu Y., Jialie R. Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining CFRP and steel// Composites. B. 2015. V. 70. P. 35–43.
20. Hessel J., Nonhoff G., Vojnic D. Langzeitverhalten von Heizwendelschweißverbindungen an Druckrohrleitungen aus Polyethylen// 3 R. 2015. Nr. 9. S. 32–36.
21. Shi H., Villegas I. F., Bensee H. E. N. A displacement-detection based approach for process monitoring and processing window definition of resistance welding of thermoplastic composites// Composites. A. 2015. V. 74. P. 1–9.
22. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Сварка полиэтиленовых труб встык нагретым инструментом при низких температурах// Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13, № 2. С. 126–139.
23. Старостин Н. П., Аммосова О. А., Ботвин Г. В. Тепловой процесс сварки полипропиленовых труб вращающихся при низких температурах// Сварка и диагностика. 2015. № 6. С. 57–61.

(Продолжение следует)

Trends in Joining Technology of Parts Made of Plastics and Joints with Them

G. V. Komarov

Based on the analysis of literature data given in the periodical press, identifies current trends in joining technology of parts made of plastics and joints with them. The survey has consistently considered scientific and practical results of work in the field of welding, adhesive and mechanical joining.

(To be continued)