



ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И РАЗРАБОТКА ПРИПОЕВ (Обзор)

А. Н. КОРНИЕНКО, канд. техн. наук, **А. М. ЖАДКЕВИЧ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы направления создания припоев, критерии их выбора с целью получения качественных однородных и разнородных соединений изделий для различных областей техники. Показано влияние на качество соединения физических свойств припоя, особенностей кристаллизации и других факторов, которые необходимо учитывать при разработке технологии пайки. Отмечены перспективные направления исследований в области пайки изделий ответственного назначения.

Ключевые слова: пайка, припой, качество соединений, разнородные материалы, дефекты конструкций, кристаллизация, наноматериалы

В течение многих веков основными конструкционными материалами оставались медь, железо и их сплавы, а основным источником нагрева для пайки — биотопливо. С XIX в. появляются более концентрированные источники нагрева — ацетилено-кислородное пламя и электрический дуговой разряд. Припои по температуре пайки начали подразделять на мягкие и твердые, причем в ряде изданий по терминологии в соответствии с температурным критерием называют и сам процесс пайки по-английски низкотемпературным (soldering) и высокотемпературным (brazing). К мягким припоям относят припои с температурой плавления ниже 450 °С, а с температурой плавления, равной или свыше 450 °С, — к твердым [1–3]. Мягкие припои, например, оловянно-свинцовые, имеют низкий предел прочности и, как правило, являются и легкоплавкими. Твердый припой обладает высоким пределом прочности. Однако эта классификация стала неприемлемой с появлением новых источников нагрева, новых конструкционных сплавов, изделий из них и собственно припоев. В течение XX в. пайка из вспомогательной технологии превратилась в наукоёмкую технологию изготовления ответственных инженерных конструкций из новых материалов-сплавов, керамики, композитов и других, отвечающих специальным требованиям: жаростойкости, коррозионной стойкости, способности выдерживать криогенные температуры и др. В ряде случаев пайка является единственной технологией, обеспечивающей эксплуатационную надежность изделия [4–9]. Недостаточно высокое качество соединения деталей и узлов в энергетике, авиации, ракетостроении и многих других отраслях техники может стать причиной разрушений с катастрофическими последствиями.

Известно, что существенное влияние на качество паяных соединений оказывают следующие факторы: способы пайки; припой, флюсы, активные и инертные газы, вакуум; режимы и циклы пайки; технологический уровень оснащённости процесса; конструкция, масса и материал изделия; подго-

товка к пайке и обработка после пайки [10–15]. На качество изделий новой техники, паяемых в вакууме, оказывают влияние вид припоев, особенности расплавления нанесенного покрытия и другие условия. Кроме температуры плавления, к важным характеристикам припоев относятся: 1) упругость паров компонентов, входящих в состав припоев; 2) изменение температуры припоя при частичном растворении в нем материалов соединяемых деталей; 3) температура пайки и время выдержки при определенной температуре; 4) механические характеристики припоев и др. [10–13, 16–19]. Однако в справочно-информационных материалах отсутствует обобщающая информация о способах улучшения качества паяных соединений, учитывающих упомянутые выше условия и факторы.

Целью настоящей работы является анализ публикаций по усовершенствованию техники пайки, выбору припоев в соответствии с требованием сохранения высокого качества соединения в процессе эксплуатации, уточнению критериев, характеризующих физико-химические свойства материалов, применяемых в соответствии со способом пайки.

Особое внимание к технике пайки и составу флюсов начинают уделять с 1930-х годов в связи с развитием радиотехники, электроники, авиа- и дирижаблестроения. Так, в радиотехнике появилась задача обеспечения надежных соединений медных и других металлических деталей (проводов, пластин и др.) с фольгированным гетинаксом, стеклотитом, стеклом. Естественно, вначале использовали давно известные припои или покрытия на основе олова, свинца, меди и серебра, а в качестве флюсов — канифоль. Во многих случаях заготовки покрывали оловом, медью, серебром или золотом гальваническим или другим способом. Эта же технология сохранилась и до настоящего времени, хотя известны и предложения о замене серебряного покрытия заготовок печатных плат на оловянно-свинцово-висмутовые [20, 21].

С развитием электротехники, электроники повышались требования к качеству соединения и значительно расширялась номенклатура материалов и типов соединений, подлежащих пайке [22]. Так, с 1960-х годов широкое применение нашли изделия из корундовой керамики, к которым присоединяли детали из железоникелевых или новых для про-

мышленности материалов (ниобиевых и других сплавов). Для пайки керамики и керамики с металлом в припои необходимо вводить адгезионно-активные элементы (титан, цирконий, гафний). Так, для пайки керамики с никелевой втулкой применили присадку в виде медной и титановой фольг толщиной 0,1 и 0,05 мм. При температуре пайки 1020 °С в вакуумной электропечи при разрежении $2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. образовывался паяный шов следующего состава: сплав 80 % Cu и 20 % Ti. В этом случае припой обеспечивал примерное равенство коэффициентов термического расширения паяного шва и всех деталей при температуре эксплуатации 650 °С и одновременно необходимую прочность соединения [23]. Только для пайки деталей электровакуумных приборов в середине 1960-х годов предлагалось 590 составов припоев с температурой плавления 3...2996 °С [24]. Для соединений тех же материалов, не находящихся в откачанных полостях приборов, использовали еще несколько сотен составов припоев.

С 1950-х годов возросло внимание к надежности паяных соединений и исследованию причин разрушения паяных швов. В частности, специалистов привлекла традиционная и проверенная десятилетней эксплуатацией изделий из конструкционных сталей технология газовой пайки латунными припоями [25–27]. В результате разработан способ пайки с отмывкой перед сборкой, предварительным нанесением композитной пасты и ее оплавлением [28]. Установлено также влияние распределения компонентов припоя в зоне паяного соединения на герметичность соединения [29].

Эксплуатационные характеристики, коррозионная стойкость и долговечность соединений металл-припой-металл в значительной степени зависят от металлургического взаимодействия материалов, участвующих в процессе пайки [14, 29–31]. В частности, на качество соединения влияет химический, структурный и физический состав покрытий. Например, при переходе от золотого покрытия коваровых оснований корпусов микросхем на никелевые установлено, что прочность соединения максимальна только при определенной, ограниченной в узком диапазоне толщине покрытия (для никелевого покрытия — 12 мкм). При меньшей толщине наблюдается отрыв никелевого ободка от платы вследствие высокой пористости, при большей толщине разрыв происходит по стеклокерамике [13, 32].

Качество порошковых припоев в виде паст и суспензий одного и того же химического состава зависит от технологии приготовления порошков. Установлено, что текучесть порошка, полученного распылением расплава газом, заметно хуже, чем полученного центробежным распылением и механическим дроблением. Свойства металла шва, выполненного припоем с наполнителем из металлического порошка, зависят от формы, размеров и структуры, варьируя которые можно активно управлять процессом формирования соединения [33, 34].

Известно, что при длительном хранении припоев (или их компонентов) качество паяных соединений может отличаться от регламентируемых. В первую очередь это относится к порошкообраз-

ным припоям и пастам на их основе, в частности, на основе серебра ПСр-45 и др. теряют свои свойства и становятся непригодными для пайки при хранении на воздухе более 10 сут [35]. Вместе с тем имеются сведения, что соединения, паянные хранившимся более 20 сут припоем ПМФС6-0,15 с дисперсностью частиц 5...30 мкм, увеличили прочность почти на 25 % [36].

Для достижения удовлетворительного качества паяных соединений необходимо точное регулирование и поддержание технологических параметров в течение всего цикла пайки. Наиболее удачным примером решения этого вопроса можно считать метод оптимизации оборудования по последовательно применяемым критериям, при выборе установок для диффузионных способов пайки [16]. Однако и он требует уточнения и усовершенствования. В частности, при использовании высокохимически активных припоев, содержащих алюминий, титан, цирконий и др., необходимо ввести критерий, учитывающий необходимость быстрого достижения высокого вакуума и температуры свыше 1000 °С. Важным технологическим фактором качества является соблюдение условий сборки паяемых деталей. В изделиях, подверженных действию переменных механических и температурных нагрузок (теплообменные аппараты и др.), при относительно большом паяльном зазоре (при большой массе паяных швов) появляются концентраторы напряжений из-за разности коэффициентов температурного расширения [17]. Естественно, решить эту проблему можно путем подбора припоев по коэффициенту температурного расширения. Важными характеристиками способа использования припоев являются: схема подачи, расположение или нанесение припоя, форма припоя.

Так, для герметизации применимы пайка с предварительно установленной прокладкой, пайка с предварительным капиллярным лужением, с плакированием припоем деталей. При нагреве припой проникает в паяемый материал, вызывая деформацию поверхности твердого тела при смачивании и растекании расплава [37]. Это явление обусловлено действием неуравновешенных сил поверхностного натяжения по периметру припоя и, следовательно, кроме других факторов, зависит от состава припоя и характера межатомных связей на междолинных границах. В частности, в работе [18] отмечена необходимость комплексной оценки процессов смачивания, растекания и растворения. Последнему особое внимание уделено в работе [20].

Согласно стандарту Украины ДСТУ 3761.4–98 припои определяют по их физическому состоянию до применения (многослойный, порошковый, композиционный, сформированный, трубчатый, паста и самофлюсующий). Такая классификация необходима прежде всего при разработке конструкции соединений и выборе способа нагрева, однако одним из основных критериев выбора припоя следует считать его металлургические и физико-химические свойства [38].

Одним из важнейших преимуществ пайки по сравнению со сваркой является более широкий



диапазон возможного соединения разнородных металлов и сплавов. При соответствующем выборе припоев, источника нагрева и техники пайки удастся избежать образования интерметаллидов. С середины XX в. с развитием химического и энергетического машиностроения, промышленной и атомной энергетики, ракетостроения возникла необходимость в изготовлении конструкций из титана, циркония и других материалов.

Для пайки соединений титановых и циркониевых сплавов в 1970-е годы предложены припой на основе циркония, легированного серебром, марганцем или оловом [39]. Опытные образцы припоев систем цирконий–никель или кобальт–медь, титан–медь–никель способны обеспечить более высокие эксплуатационные характеристики изделий, работающих при переменных температурах. Это достигается лучшим соответствием коэффициентов линейного расширения припоя и паяемых сплавов циркония и титана [40, 41]. Усилиями сотрудников Всесоюзного научно-исследовательского института авиационных материалов, МИФИ-Амето и других разработан ряд составов припоев для пайки титана и циркония на базе системы титан–цирконий–медь–никель, которые доминируют в настоящее время в промышленности [42]. Следует отметить, что при традиционной разработке составов припоев исходили из физико-химических, металлургических свойств соединяемых материалов. Тем не менее уже в середине XX в. в связи с необходимостью изготовления изделий из разнородных металлов, металлов и керамики возникла «механическая» проблема. Паяные соединения подвергаются дополнительным напряжениям и деформациям, причиной которых являются различные коэффициенты термического расширения и модулей упругости материалов. В начале 1970-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона рассмотрен механизм и разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния многослойных паяных полупроводниковых приборов при изменении температур окружающей среды и от нагрева в процессе эксплуатации [43]. Наиболее существенные проблемы по обеспечению прочности и геометрии узлов возникли при производстве крупногабаритных конструкций в ракетостроении, энергетическом машиностроении, судостроении. Вопросами напряженно-деформированного состояния и металлургической несовместимости соединений из разнородных материалов занимались специалисты Украинского государственного морского технического университета им. Адмирала С. О. Макарова (г. Николаев, Украина). Кроме программ моделирования расчета, ими предложены промежуточные прокладки с иными, чем у соединяемых материалов, свойствами [44]. Эта конструкция соединения предъявляет особые требования к припою. Учитывая, что объем производства и номенклатура изделий из разнородных материалов достаточно велики и в дальнейшем будут возрастать, логично предположить, чтобы характеристика припоев включала коэффициент теплового расширения и модуль упругости. Кроме того, решить эту проблему можно путем использования в качестве промежуточных

«деформирующихся» слоев высокопластичных серебряных, золотых, медных припоев, заполняющих широкий зазор.

Демпфирующая промежуточная прокладка, позволяющая увеличить прочность соединения керамического диска газовой турбины с металлическим валом, предложена в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича. Такая конструкция не только увеличивает площадь пайки, но и равномерно распределяет напряжения, возникающие в процессе пайки [45]. С целью обеспечения релаксации напряжений, возникающих в связи с различием коэффициентов термического расширения, при изготовлении твердосплавных элементов металлообрабатывающих инструментов, использовали припой системы медь–никель–марганец, имеющие достаточную пластичность [46].

Для снижения напряжений рекомендуется конструировать изделия с деталями, допускающими деформации в местах пайки, за счет утонения стенок, гофров и т. п. [23]. Однако использовать рекомендации, разработанные для мелких изделий радиоэлектронной техники, для крупногабаритных изделий часто неэкономично, и порой невозможно выполнить конструктивно.

Отдельные узлы энергетических установок работают при высоких (свыше 1000°C) температурах, подвергаясь большим нагрузкам. Припой должны обеспечивать возможность изготовления паяных конструкций из компактных и пористых материалов и неметаллов с различными коэффициентами линейного расширения. Во многих случаях основой таких припоев служат сплавы системы никель–хром–бор–кремний. Иногда в качестве тугоплавких наполнителей используют молибден или вольфрам. Эти наиболее тугоплавкие в природе металлы играют роль модификаторов — центров кристаллизации, благодаря чему улучшается структура шва [47]. Для уменьшения образования хрупких фаз и снижения диффузии по границам зерен при высокотемпературной пайке никелевыми припоями этой системы, кроме введения в состав припоя благородных металлов, предлагается свести к минимуму паяемый зазор (не более 100 мкм) [48].

Следует отметить, что припой с большим количеством бора и кремния эрозионно-активны и не пригодны для пайки тонкостенных конструкций (сотовые, решетчатые панели, пластинчато-ребристые теплообменники и др.), которые во многом определяют развитие современной техники. Поэтому во Всесоюзном научно-исследовательском институте авиационных материалов, ИЭС им. Е. О. Патона, Техномаше и других организациях разработаны припой на основе никеля с малой эрозионной активностью для пайки нержавеющей сталей. Так, В. Ф. Хоруновым с сотрудниками предложен припой ПР-Н58Ф, который применяется в серийном производстве рулей ракет воздух–воздух [49–51].

Особенно высокие требования предъявляются к составам жаропрочных припоев, применяемых для изготовления деталей газотурбинных двигателей. Поскольку в топливе содержится сера, то в процессе сгорания изделие подвергается сульфидной коррозии, а основные элементы, используемые в ка-

честве депрессантов, снижают стойкость против этой коррозии [30]. В то же время припой на основе системы никель–хром–цирконий значительно расширяют возможности пайки жаропрочных никелевых сплавов, в том числе при дуговом нагреве [52–55].

В последние десятилетия в автомобилестроении, химической промышленности, промышленном и гражданском строительстве находят широкое применение листовая сталь и профильный прокат с антикоррозийным покрытием из цинка, как правило, толщиной менее 1 мм. При сварке конструкций из таких материалов защитное покрытие выгорает в зоне термического влияния вдоль шва на ширине нагрева, начиная с температуры испарения до температуры плавления цинка. Повторная гальванизация является дорогостоящим процессом, а использование низкотемпературных припоев, при которых можно было бы избежать испарения, не обеспечивает достаточной прочности. В фирме ESAB (Швеция) в качестве припоя предложено применять медную проволоку, поскольку медь легко образует с цинком сплавы — латунь — в любом соотношении. Причем пайку производят по схеме сварки МИГ, иногда с добавлением к аргону небольшого количества активного газа (кислорода). Медная присадочная проволока — электрод с добавкой кремния (3 %) и марганца (1 %) имеет температуру плавления 910... 1025 °С, а температура плавления цинка — 419 °С. Жидкий цинк остается на поверхности стали и растворяется в меди. Образуется латунь, которая и покрывает переходной участок между паяным швом и цинковым покрытием [56].

С середины 1960-х годов актуальность приобрела задача создания технологии строительства конструкций в космосе. Наиболее перспективным источником нагрева при сварке и пайке признан электронный луч, а материалом для конструкций — алюминиевые сплавы. При выборе припоя следовало учитывать то, что сплавы не должны содержать элементов с высокой упругостью паров из-за высокого космического вакуума. Температура солидуса припоя должна быть выше максимальной температуры солнечного нагрева конструкций в космосе (150 °С) [57]. Этим условиям отвечает, в частности, припой, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона В. Ф. Хоруновым, В. И. Швец, В. Ф. Лапчинским и др. [55].

Однако при изготовлении алюминиевых конструкций в таких сложных условиях, как космос, необходимо принимать во внимание, что химически активные флюсы для разрушения оксида алюминия уменьшают коррозионную стойкость изделия и оборудования. Вместо флюсов предложено предварительно наносить на соединяемые поверхности слой материалов, оксиды которых имеют низкую температуру диссоциации. Положительные результаты дали покрытия из никелевых, никель-медных, никель-оловянных слоев, нанесенных электролитическим способом. Разработана технология соединения элементов космических конструкций, отличающаяся тем, что припой в виде таблетки предварительно закладывают в па-

яемый узел таким образом, что при нагреве припой затекает в паяемый зазор [57].

Составы припоев для низкоуглеродистых сталей, применявшиеся с древнейших времен, в значительных усовершенствованиях не нуждались, так же, как и припой для низколегированных сталей. Корректировка обусловлена появлением новых источников нагрева и техники пайки: индукционного, дугового, электронно-лучевого нагрева, пайки в вакууме, аргоне и др. В серийном производстве нашли применение самофлюсующие припои. При пайке легированных сталей возникают проблемы с выпадением карбидов по границам зерен, и расплавленные припои могут проникать по границам зерен, особенно под действием напряжений. При выборе припоя, кроме обычных критериев, учитываются условия предварительной и последующей термообработки. При пайке до закалки необходимы тугоплавкие припои; при пайке высокоуглеродистых сталей — температура нагрева должна быть ниже температуры закалки или достаточной для одновременной закалки [22].

В процессе эксплуатации паяных изделий возможно выделение газов из соединений. Это в некоторых случаях может привести к ухудшению эксплуатационных свойств изделия. Один из способов предотвращения отрицательного эффекта предложен фирмой Green-one Tec., изготавливающей поглотители солнечных коллекторов из медных трубок, которые припаиваются к теплопроводным пластинам с нанесенным покрытием. При нагреве свыше 234 °С (при отсутствии циркуляции теплоносителя) из припоя интенсивно выделяются газы, разрушающие антиотражающее покрытие. Фирма совместила во времени пайку и ультразвуковую сварку, что обеспечило выделение газов и паров из припоя и паст в процессе изготовления [58].

Во многих изделиях паяные соединения должны обеспечивать герметичность. Пригодность материалов для пайки плоских корпусов интегральных микросхем изделий электронной промышленности проверяется по косвенным характеристикам — механической прочности и герметичности. Однако при пайке позолоченных корпусов прочность швов системы золото–олово–свинец резко падает в результате термического старения, что объясняется образованием хрупких интерметаллидных фаз. Поэтому в последнее время значительное внимание уделяется физическому металловедению паяных соединений устройств микроэлектроники, в частности, изучению процессов на границе раздела «припой–основной металл» и формированию интерметаллидов на этой границе [59]. Задача экономики драгоценных металлов, поставленная в конце 1970-х годов, решалась одновременно с проблемой механической прочности и герметичности пайки никелированных корпусов. В результате разработана самофлюсующая паста на основе оловянно-свинцового припоя, образующая с никелем незначительное количество интерметаллидов [59].

Количество припоя, введенного в паяльный зазор, во многих случаях влияет на качество одних и тех же паяных соединений, выполняемых по одинаковой технологии [60].



В конце XX в. возросло внимание к наноматериалам — поликристаллическим материалам с размерами кристаллитов 5... 10 нм. В перспективе они могут быть использованы в качестве высокопрочного конструкционного материала. В Московском инженерно-физическом институте проведены сравнительные исследования свойств соединений меди, стали, титана, бериллиевой бронзы, паяных припоями с различными структурами, и установлено влияние на структуры и свойства паяных соединений. Одним из способов получения аморфных наноматериалов является сверхбыстрая кристаллизация. Пайка с использованием лент аморфного припоя малой толщины (около 20 мкм) обеспечила высокое качество соединений конструкций для атомных реакторов [61]. Серебряные припои из частиц наноразмеров (диаметр в пределах 10...30 нм), предложенные фирмой Robert Bosh GmbH, позволяют снизить температуру процесса пайки [62].

В последнее время проблемами эксплуатационной надежности паяных соединений занимаются научно-исследовательские и конструкторские организации таких отраслей, как ракетостроение и энергетика. В НПО «Энергомаш» В. П. Семеновым разработана модель механизма разрушений биметаллических конструкций (сплав ЭП 202 и сталь ВНС16) при высокотемпературной пайке и установлено, что трещины зарождаются в результате растягивающих напряжений в материалах при потере деформационной способности под воздействием расплава припоя. Причем в локальных объемах напряжения могут превышать предел прочности паяемых материалов. В поверхностном слое зоны соединения наблюдается твердорастворное легирование, искажение кристаллической решетки, дислокация и скопление водорода [63]. Задача о развитии трещины в паяном однородном материале, в котором изменяется концентрация легирующих элементов, внедряющихся из припоя в прилегающий к месту пайки слой, решалась применительно к сверхтвердым материалам [64].

Выводы

1. В течение длительного времени основными критериями для выбора припоев был температурный интервал плавления и ряд других физических характеристик: смачиваемость паяемых материалов, прочность и пр.

2. С середины XX в. номенклатура конструкционных материалов для производства изделий ответственного назначения расширяется, в связи с чем разрабатывается значительное количество припоев для качественного соединения разнородных металлов, керметов, керамики, химически активных, тугоплавких металлов и др.

3. Многочисленными исследованиями установлено, что количество дефектов, влияющих на характеристики прочности, герметичности и коррозионной стойкости паяных соединений, зависит от ряда факторов (различия физических свойств, особенностей кристаллизации, и др.), которые необходимо учитывать при разработке составов материалов и технологии пайки.

4. Наиболее перспективные направления повышения качества пайки соединений связаны с исключением из состава припоев веществ, образующих интерметаллиды с основным материалом, разработкой припоев, содержащих модификаторы и наночастицы, конструированием паяемых деталей, узлов и изделий с учетом возможной компенсации деформаций и снижения напряжений и др.

1. Алов А. А., Долгов Ю. С., Попов А. С. К вопросу о природе процессов сварки и пайки // Свароч. пр-во. — 1956. — № 12. — С. 18–25.
2. Лакедемонский А. В., Хрятин В. Е. Паяние и припой. — М.: Металлургиздат, 1958. — 240 с.
3. Куликов Ф. В., Лехциер И. Р. Твердая пайка. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 185 с.
4. Хренов К. К. Сварка, резка и пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1970. — 408 с.
5. Петрушин И. Е., Лоцманов С. Н., Николаев Г. А. Пайка металлов. — М.: Металлургия, 1973. — 230 с.
6. Словарь-справочник по сварке / Под ред. К. К. Хренова. — Киев: Наук. думка, 1974. — 195 с.
7. Справочник по пайке / Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрушина, В. П. Фролова. — М.: Машиностроение, 1975. — 407 с.
8. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1977. — 388 с.
9. Хорунов В. Ф. Пайка: достижения и перспективы // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 51–53.
10. Россошинский А. А. Некоторые предпосылки к теории образования паяных соединений // Новые достижения в области пайки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — С. 3–13.
11. Проектирование технологии пайки металлических изделий / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко, И. Г. Нагапетян и др. — М.: Металлургия, 1982. — 392 с.
12. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Информационная модель проектирования технологии пайки // Современные методы пайки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. — С. 12–19.
13. Берзина А. И., Лапишов Ю. К. Влияние технологических условий пайки на надежность паяных швов никелированных корпусов микросхем // Современные методы пайки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона. — 1982. — С. 105–108.
14. Берзина А. И., Лапишов Ю. К. Влияние фосфора и кобальта в никелевых покрытиях плоских корпусов микросхем на качество ультразвуковой сварки и герметизации пайкой // Автомат. сварка. — 1983. — № 6. — С. 64–66.
15. Влияние конструктивных параметров на долговечность при теплосменах паяных соединений электронных компонентов / В. И. Махненко, Н. И. Пивторак, А. А. Грачев, Т. В. Сагайдачная // Там же. — 1991. — № 8. — С. 30–34.
16. Котельников Д. И. Оптимизация оборудования для диффузионных способов пайки и сварки // Современные методы пайки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. — С. 126–134.
17. Беляев В. Н. Надежность паяных соединений труб с трубными решетками, выполненных высокотемпературной пайкой // Автомат. сварка. — 1983. — № 10. — С. 59–61.
18. Квасницкий В. В. Некоторые вопросы взаимодействия жидкой и твердой фаз при пайке жаропрочных никелевых сплавов // Зб. наук. праць УДМТУ. — 1999. — № 4. — С. 109–114.
19. Майко Г. Г. Пайка и припои / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1968. — 323 с.
20. Хлытов В. В., Боксер Э. Л., Пастухов Б. А. Равновесие на периметре при смачивании твердой поверхности расплавами // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 1976. — № 1. — С. 39–42.
21. Улучшение паяемости печатных плат путем оплавления гальванического покрытия лучистой энергией кварцевых галогенных ламп накаливания / Г. Д. Никифоров, М. И. Опарин, С. А. Федоров и др. // Свароч. пр-во. — 1976. — № 10. — С. 42–43.
22. Кривошей В. В., Бельцев А. Н. Пайка и сварка в производстве радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1974. — 240 с.
23. Костина Л. А., Частиков С. М., Юдин В. М. Пайка ниобиевого сплава с корундовой керамикой // Свароч. пр-во. — 1976. — № 10. — С. 43–44.

24. *Гладков А. С., Подвизина О. П., Чернов О. В.* Пайка деталей электровакуумных приборов. — М.: Энергия, 1967. — 288 с.
25. *Шаширо А. Е., Груздов В. В., Томилина И. Н.* Влияние микровыделений железа на характер разрушения латунных паяных швов // Автомат. сварка. — 1980. — № 5. — С. 34–38.
26. *Tulecote R. F.* The mechanical properties of copper brazed joints // Welding J. — 1946. — № 4. — P. 242–246.
27. *Haworth J. V., Hume-Rothery W.* The effect of four transition metals on the α/β brass type of equilibrium // Phil. Mag. — 1952. — № 340. — P. 613–629.
28. *Гржимальский Л. А., Ильевский И. И.* Технология и оборудование пайки. — М.: Машиностроение, 1979. — 240 с.
29. *Соединения листовых композиционных материалов разностороннего армирования с алюминиевой матрицей* // В. Ф. Хорунов, И. С. Дыхно, В. С. Кучук-Яценко и др. // Автомат. сварка. — 1981. — № 6. — С. 62–64, 69.
30. *Разработка жаропрочных припоев, работающих в условиях сульфидных коррозий* // В. Ф. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, Г. Ф. Мьяльница // Там же. — 1987. — № 5. — С. 66–69.
31. *Фрумлин Е. И., Базильский С. В., Белецкий В. А.* Выбор припоя и технологии пайки термоплит // Там же. — 1988. — № 1. — С. 71–72.
32. *Влияние* толщины никелевого покрытия плоских корпусов микросхем на качество сварных и паяных соединений // А. И. Берзина, П. К. Марценюк, Ю. К. Лапшов, Ю. Д. Деркач // Там же. — 1983. — № 2. — С. 66–67, 71.
33. *Качество* порошковых припоев, полученных различными способами // Д. А. Дудко, В. Ф. Хорунов, Ю. Б. Малевский и др. // Там же. — 1980. — № 9. — С. 60–61.
34. *Радзиевский В. Н., Гаршинов Ю. Ф., Ткаченко Г. Г.* Влияние диспергирования наполнителя из железного порошка медным припоем на свойства металла паяного шва // Там же. — 1997. — № 8. — С. 18–22.
35. *Адгезия* расплавов и пайка материалов // Под ред. Ю. В. Найдича. — Киев: Наук. думка, 1977. — 106 с.
36. *Влияние* длительности хранения порошкообразного припоя ПМФС6-0.15 на прочность паяных соединений // С. В. Лашко, А. А. Россошинский, О. П. Бондарчук, А. Н. Писарев // Автомат. сварка. — 1980. — № 2. — С. 73–74.
37. *Берзина А. И., Дорофеева Э. Н., Полякова В. М.* Сборка и герметизация пайкой никелированных корпусов микросхем // Там же. — 1987. — № 6. — С. 46–48.
38. *Жадкевич А. М.* Развитие техники пайки, классификация и определение процессов пайки // 36. науч. праць Нац. ун-ту кораблебудування. — 2004. — № 6. — С. 33–42.
39. *Beal R. E., Saperstein Z. P.* Development of brazing filler metals for zircalloy // Welding J. — 1971. — № 7. — P. 275s–291s.
40. *Долгов Ю. С., Никифорова З. В.* Пайка новых конструктивных материалов. — М.: Машиностроение, 1980. — 39 с.
41. *Чуларис А. А., Михайлова М. М., Дербаремдигер Л. А.* Исследование процесса образования соединения циркониевого сплава с титановым при пайке в вакууме // Автомат. сварка. — 1991. — № 11. — С. 29–32.
42. *Северюков О. Н., Федотов В. Т., Яйкин А. П.* Новые аморфные припои для пайки титана и его сплавов // Мат. междунар. науч.-техн. конф. «Пайка-2000». — Тольятти, ТПИ, 2002. — 77 с.
43. *Скопенко А. И., Махиенко В. И., Пивторак Н. И.* Упругопластические деформации в многослойных паяных соединениях полупроводниковых приборов при циклических теплосменах // Автомат. сварка. — 1974. — № 3. — С. 33–36.
44. *Ермолаев Г. В., Лабарткава А. В.* Применение ЭВМ для решения задач механики паяных узлов // 36. науч. праць УДМТУ. — 1990. — № 6. — С. 55–64.
45. *Москаленко С. А., Костюк Б. Д., Найдич Ю. В.* Паяное соединение керамического диска (нитрида кремния) с металлическим валом // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2002. — № 35. — С. 103–105.
46. *Опыт* серийной пайки твердосплавного инструмента в вакуумных печах // Г. П. Волк, Т. В. Коноваленко, А. А. Михайлов, Ю. В. Найдич // Там же. — 2002. — № 35. — С. 127–128.
47. *Порошковые жаропрочные припои для изготовления паяных узлов энергетических установок* // Л. С. Кривуша, М. М. Сухомлин, Г. М. Воробьев и др. // Автомат. сварка. — 1987. — № 5. — С. 65–66.
48. *Lugsheider E., Janssen H., Humms H.* Nickel-base brazing solders- potential and challenges // Welding and Cutt. — 2003. — № 4. — S. 189–191.
49. *А. с. № 1244861 СССР.* Припой для пайки нержавеющей сталей и никелевых сплавов // В. Ф. Хорунов, И. А. Владимирская, М. М. Дыхно. — Заявл. 27.02.85. Не публ.
50. *Хорунов В. Ф., Кужель А. В., Супрун О. Д.* Технология изготовления и работоспособность паяных пластинчатых теплообменников // Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Проблемы технологии сварки теплоустойчивых и жаропрочных высоколегированных сталей и сплавов», 24–26 сент., г. Николаев. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 73–74.
51. *Хорунов В. Ф., Владимирская И. А.* Новый порошковый припой на никель-марганцевой основе // Там же. — С. 128.
52. *Arc brazing of heat resistant nickel alloys* // V. F. Khorunov, S. V. Maksymova, I. V. Zvolinskyi, M. S. Samokhin // IBSC-2000 «Advanced brazing and soldering technologies». Intern. brazing and soldering conf. proc. 2–5 April, 2000, Albuquerque, New Mexico. AWS, ASM International, 2000. — P. 6–9.
53. *The use of Ni-base brazing filler metals containing Zr and Hf widens capability of superalloys brazing* // Ibid. — P. 494–498.
54. *Хорунов В. Ф.* Некоторые вопросы эрозии жидким припоем паяемого металла // Сб. науч. тр. «Прогрессивные методы в пайке». — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — С. 9–18.
55. *А. с. № 1606295, МКИ В 23 К 35/26.* Припой для пайки никеля // В. Ф. Хорунов, В. И. Швеиц, В. Ф. Лапчинский и др. — Оpubl.15.11.90, Бюл. № 42.
56. *Роде Х., Катик И., Пасчолд Р.* Импульсная дуговая пайка в среде защитных газов ЭСАБ листов с защитным покрытием // Svetsaren (Сварщик). — 2000. — № 3. — С. 21–24.
57. *Технология* низкотемпературной вакуумной пайки узлов решетчатых фирменных конструкций из алюминиевых сплавов // Ф. В. Хорунов, В. Ф. Лапчинский, В. И. Швеиц, В. Ф. Шулым // Автомат. сварка. — 1992. — № 2. — С. 52–53.
58. *Epp Bärbel.* Löter-Treffen unter Ausschluss der Öffentlichkeit // Sonne Wind und Wärme. — 2002. — № 6. — S. 60–61.
59. *Электронно-зондовые* исследования паяных соединений корпусов интегральных микросхем // Г. И. Баталин, А. И. Берзина, В. В. Папиженко и др. // Автомат. сварка. — 1982. — № 4. — С. 38–43.
60. *Прочность* соединения сплава ХН60ВТ, паяного высокотемпературными припоями // О. С. Киселев, Б. Л. Груздев, В. Г. Думанский, Л. С. Пыбина // Там же. — № 5. — С. 58–59, 63.
61. *Мамедова Т. Т., Плющев А. Н.* Исследование возможности использования быстрозакаленных дистанционирующих решеток // Сб. науч. тр. научной сессии МИФИ-2002. — Т. 9. Молекулярно-селективные и нелинейные явления и процессы. Ультрадисперсные (нано-) материалы. — М.: Изд-во МИФИ, 2002. — С. 70–71.
62. *Pat. Germany 10056732 O MPK² В 23 К 35/24.* Lote und Verfahren zu ihrer Herstellung // W. Gruenwald, E. Urban. — Заявл. 15.11.2000; Оpubl. 23.05.2002.
63. *Семенов В. Н.* Модель механизма разрушения материалов при пайке конструкции // Технолог. машиностроения. — 2000. — № 5. — С. 18–22.
64. *Рост* трещины вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия // Ю. П. Стафаков, И. Л. Побаль, А. Г. Князева, А. И. Гордиенко // Физ. мезомеханика. — 2002. — № 1. — С. 81–88.

Trends in the development of brazing alloys, criteria of their selection to produce the quality similar and dissimilar joints of products for different fields of engineering have been analyzed. Effect of physical properties of the brazing alloy, specifics of crystallization and other factors, which should be taken into account in the development of brazing technologies, on the joint quality is shown. Challenging investigations in the field of brazing of critical products are outlined.

Поступила в редакцию 01.02.2005