

Таблица 1 – Прочностные характеристики образцов

№ образца	Прилагаемые нагрузки	
	kN	МПа
№ 1 без бороздок	4,42	6,25
№ 2 с бороздками	3,33	4,71
	Предел прочности, МПа	Пластичность, %
№ 3	11,8	4,6

Исходя из полученных данных было выявлено, что механические свойства клеенных изделий сопоставима с прочностными характеристиками изделий получаемых методами порошковой металлургии, однако данный процесс требует дальнейшей оптимизации и разработке оптимальных технологических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ж.-Ж. Вильнав. Клеевые соединения. Перевод с французского Л.В. Синегубовой. — М.: Техносфера, 2007. — 385с.
2. Склеивание в машиностроении. Справочник в 2 томах. Т.1 / Д. А. Аронович [и др.]; Под общ. ред. Г. В. Малышевой. — М.: Наука и технологии, 2005. — 544с.
3. Г. Эпштейн. Склеивание металлов. Авторизованный перевод с английского канд. техн. наук Б.И. Паншина. Под общей редакцией А.Т. Туманова. М.: Государственное издательство оборонной промышленности. 1956. – 212 с.
4. Pocius A.V., Adhesion and Adhesive Technology, Hansen Gardner Publications, New York, 2nd ed. 2002.
5. Petit J.A., Vieillissement et durabilite des assemblages colles, Sessions de formation JADH, SFA-SFV, Paris, 2003.
6. ГОСТ 14760-69. Клеи. Метод определения прочности при отрыве. – М.: Издательство стандартов. 1970. – 6с.
7. ГОСТ 14759-69. Клеи. Метод определения прочности при сдвиге. – М.: Издательство стандартов. 1970. – 9с.
8. М.Л. Калиниченко, В.А. Калиниченко. Новые методы крепления пористых и компактных материалов. Сборник научных трудов X МНТК. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Минск: ФТИ. 16-18.09.2015. Кн. 1. С.72-79.
9. Калиниченко В.А., Калиниченко М.Л., Григорчик А.Н. Новые методы крепления пористых и компактных материалов на основе титана Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер 6. Тэхніка. – 2015. – № 1(198). – С.24–30.

УДК 621.88

Калиниченко М.Л., Александров В.М.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СКЛЕИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Белорусский национальный технический университет,

Минск, Беларусь

В работе рассмотрены общие вопросы и способы подготовки металлических элементов для соединения с помощью клеевой материалов. Рассмотрено, как геометрия поверхности, ее шероховатость и пористость склеиваемых элементов может повлиять на конечный результат. Показаны способы нанесения клеящих материалов, а также влияние температурных режимов на процесс склеивания, а так же целесообразность возможности использования приложения давления во время процесса склеивания. Приведена взаимосвязь толщины клеевого слоя и прочности получаемого соединения. Влияние вязкости клея на время отвержения и качество адгезии склеиваемых материалов. Описаны факторы снижающие качество клеевых соединений, а так же рассмотрен ряд аспектов контроля качества клеевых соединений, включая методы и аппаратную базу.

Введение. Прочность клеевого соединения зависит от прочности материала клеевой прослойки и склеиваемых элементов, от силы взаимодействия адгезива с поверхностью склеиваемых элементов и других факторов [1,2]. Адгезионная прочность существенно снижается при наличии на поверхности деталей загрязнений, которые препятствуют адгезионному взаимодействию [3].

После того как для определенного назначения выбраны клей, тип и размеры клеевого соединения, необходимо выбрать и применить соответствующие методы склеивания. Получение качественного прочного клеевого соединения, как и любого другого, в значительной мере зависит от принятого метода его изготовления. Ниже перечисляются наиболее важные факторы и операции, которые нужно учитывать и выполнять в процессе склеивания [4] в условиях машиностроительного комплекса рассмотрены также ОАО «МАЗ», так и в КБ Сухого РФ:

1. подготовка склеиваемых поверхностей;
2. подготовка клея к применению;
3. способ нанесения клея на склеиваемые поверхности;
4. количество наносимого клея;
5. подсушивание нанесенного клея перед сборкой и запрессовкой склеиваемых деталей;
6. условия отверждения клеевых швов (температура, удельное давление запрессовки, длительность выдержки);
7. зачистка клеевых соединений;
8. меры предосторожности при работе с клеями;
9. контроль качества склеивания.

Обычно некоторые из указанных факторов бывают заранее обусловлены, поскольку выбор клея уже сделан. Это относится к вопросу импортзамещения и, или маркетинговой деятельности компаний имеющих аккредитацию ЕАС. Так как любой тип клея может быть в различных формах или видах, то в соответствии: с этим могут изменяться способы нанесения клея, подсушивания и условия отверждения. Что было выявлено при монтаже панелей на ОАО «МАЗ». Применение тех или иных методов нагрева и приложения давления при склеивании часто определяется размерами и конфигурацией детали, а также производственными возможностями.

Результаты исследования и их обсуждение. Чрезвычайно большую роль в обеспечении качественного клеевого соединения играют методы подготовки поверхностей металлов под склеивание. Если поверхность металла покрыта смазкой или загрязнена, то на этих участках контакт клея с металлом, смачивание и прилипание не могут иметь места; следовательно, соединение будет слабым и при напряжении разрушится по поверхности раздела клей–металл. Известно [4], что некоторые смазочные масла и жидкости, например, кремнийорганические, часто специально применяют в тех случаях, когда нежелательно проявление адгезии. Наилучшие прочностные свойства для большинства клеев практически достигаются тогда, когда толщина клеевого шва находится в пределах от 0,07 до 0,25 мм. Во многих случаях, однако, приемлемы соединения с клеевым швом толщиной от 0,01 до 0,75 мм. Норма нанесения клея зависит как от характера подгонки сопрягаемых поверхностей, так и от давления запрессовки, размеров склеиваемых участков и, разумеется, от консистенции клея и других его физико–химических свойств [4].

Клеи, которые отверждаются без выделения летучих компонентов (такие, как эпоксидные клеи), менее чувствительны к толщине клеевого шва, чем клеи, выделяющие в процессе отверждения жидкие и газообразные продукты. В меньшей степени положение о нечувствительности к толщине клеевого шва справедливо для клеев, выделяющих летучие компоненты в небольшом количестве и имеющих значительное содержание наполнителей. Такие клеи пригодны для склеивания плохо пригнанных деталей — для соединений с зазорами. Но во всех случаях, когда желательно получить от соединения оптимальные механические характеристики, клеевые швы не должны превышать по толщине 0,6 мм [4]. Если растворитель остается, в клеевом слое во время сборки склеиваемых частей и последующего отверждения, он часто может привести к образованию соединения с недостаточной прочностью. При разрушении таких деталей по склейке можно увидеть внутри клеевого шва маленькие углубления и поры, обязанные своим происхождением летучим составляющим клея. Эти полости являются местами концентраций внутренних напряжений, особенно если давление паров летучих компонентов, преимущественно растворителей, относительно высоко. Таким образом, перед сборкой детали желательно удалить из клеевого слоя большую часть растворителя [4]. При подготовке склеиваемых эле-

ментов геометрические характеристики склеиваемых элементов оказывают существенное влияние на прочность соединения.

При сдвиге элементов в клеевой прослойке вследствие различной толщины δ клеевого слоя (рис.1 [3]) возникают неравномерные относительные сдвиги, чтобы избежать этого, проводится подгонка склеиваемых элементов, что обеспечит снижение концентрации напряжений сдвига и повысит прочность клеевого соединения.

Для цилиндрических соединений необходимо обеспечить требуемые значения диаметров охватываемой и охватывающей деталей, чтобы обеспечить заданную толщину клеевого шва, также необходимо снимать заусенцы на кромках и контролировать размеры фасок на «заходных» поверхностях вала и отверстия [3].

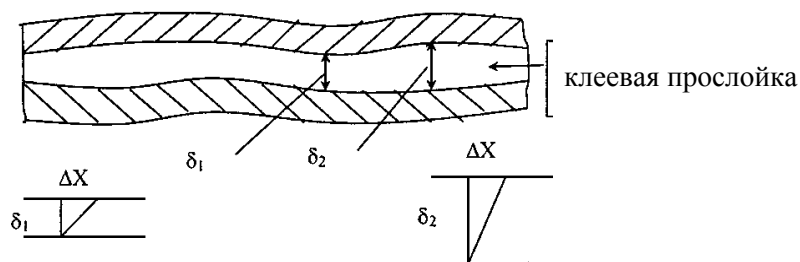


Рис. 1. Схема распределения деформации клеевой прослойки при волнистости склеиваемых поверхностей [3]

Особенно много брака при использовании клеев бывает из-за ненадлежащей подготовки поверхностей и поэтому эту операцию следует считать важнейшей [3].

Твердые поверхности загрязняются тем больше, чем они активнее. Это связано с тем, что поверхностный слой стремится к стабильному состоянию, которое не является оптимальным с точки зрения склеивания. Характеристика твердых поверхностей, т.е. абсолютное значение свободной поверхностной энергии, не имеет практического значения. Это связано с тем, что склеивание всегда выполняют в конкретных условиях, и именно эти условия во многом и определяют свойства подложек [5].

Основной задачей подготовки поверхностей подложек к склеиванию является получение «управляемого» состояния поверхности, которое обеспечивает наилучшим образом склеивание. Только в особых случаях (например, при склеивании инертных материалов типа полиолефинов или фторопластов) повышение свободной поверхностной энергии этих материалов может привести к повышению прочности клеевого соединения. Таким образом, при анализе свойств поверхности твердых тел возникают:

1. научные задачи, поскольку требуется на микроскопическом уровне провести оценку структуры и определить количество функциональных групп в поверхностных слоях;
2. технические задачи, поскольку требуется оценить свойства поверхности на макроуровне и определить значения шероховатости и пористости.

При этом необходимо добавить, что методики можно условно разделить на две группы: для первых используют микроскопические методы анализа, для вторых – спектроскопические [5]. Данными методами выявляются характеристики, такие как шероховатость поверхности.

Известно, что шероховатость приводит к увеличению адгезионной прочности, что связано с:

1. увеличением фактической площади склеивания;
2. меньшей скоростью распространения усталостных трещин;
3. большей диссипацией в процессе деформации фрагмента клеевого материала, находящегося непосредственно в микронеровностях [5].

При этом можно отметить и факторы, оказывающие отрицательное влияние:

1. из-за наличия на поверхности подложки различных загрязнений и паров воды полного растекания клея;
2. значительной усадкой клея в процессе отверждения;
3. недостаточной толщиной клеевого шва, что может быть связано с абсорбцией клея парами пограничного слоя подложки. В результате влияния неблагоприятные факторы будут при-

водить к: уменьшению адгезионной прочности, адгезии, так как все перечисленные выше неблагоприятные факторы приводят к ухудшению смачиваемости и растеканию клеевого материала по поверхности подложки; уменьшению когезионной прочности, что связано с возникновением трещин в клеевом материале и увеличением скорости их распространения; уменьшению долговечности клеевого соединения, которая зависит от адгезионной и когезионной прочности [5].

Определить, каким образом от сочетания благоприятных и неблагоприятных факторов будет зависеть прочность клеевого соединения, достаточно трудно, поскольку факторов много и влияние их противоречиво. Например, пористость. Некоторые компоненты, входящие в состав клеев, могут сорбироваться в поры, что приведет к уменьшению прочности. Кроме этого, в порах сорбируется влага, которая из них трудно удаляется, что также неблагоприятно сказывается на прочности. Большинство исследователей согласны с мнением, что влияние неблагоприятных факторов очень велико и необходимо снижать вероятность их возникновения [5].

При обработке поверхностей склеиваемых элементов решают следующие основные задачи: удаляют слабые поверхностные слои с субстрата; обеспечивают полный контакт между адгезивом и поверхностью субстрата; создают требуемый рельеф поверхности субстрата; повышают адгезионную способность поверхности субстрата; ускоряют процесс отверждения адгезива [5].

В настоящее время поверхность подготавливают различными способами, которые подразделяют на три группы: *физические* (механические способы зачистки поверхностей и все способы обезжиривания); *физико-химические* (электрохимические методы и способы, связанные с облучением поверхности); *химические* (травление) [3].

Физические методы обработки целесообразно применять в единичном и мелкосерийном производстве, а также в тех случаях, когда конструкция деталей (например, габаритные размеры, опасность коррозии прецизионных пар, близость окрашенных поверхностей и т. д.) не позволяет использовать химические реагенты [3].

Типовая технология подготовки поверхности при использовании *физических способов* обработки состоит из следующих операций:

1. обезжиривание с последующей сушкой;
2. механическая очистка (струйная обработка кварцевым песком или абразивным шлифзерном или дробеструйная обработка или гидropескоструйная обработка или зачистка шлифовальной шкуркой);
3. очистка пылесосом или обдувка сжатым воздухом;
4. обезжиривание с последующей сушкой [3].

Если на поверхности металла уже нанесено гальваническое покрытие, то механическую очистку не проводят, а ограничиваются только операцией обезжиривания. Такой техпроцесс подготовки поверхности используют для сталей, титановых, бериллиевых, некоторых алюминиевых сплавов, вольфрама, молибдена и других материалов, в том числе и неметаллов [3].

Физико-химические способы обработки поверхности наиболее широко используют при подготовке под склеивание поверхности деталей из инертных полимеров, таких как полиэтилен, полипропилен, политетрафторэтилен и другие и при склеивании деталей специального назначения из алюминиевых сплавов [3].

Типовая технология при использовании физико-химических способов обработки состоит из следующих операций:

1. обезжиривание с последующей сушкой;
2. обработка поверхности субстрата одним из физико-химических способов [3].

При подготовке поверхности металлов используют следующие физико-химические способы: электроискровое легирование, плазменное напыление, обработка пучком электронов, аппретами, адгезионно-активными грунтовками, химическое осаждение и др. При подготовке поверхности неметаллов используют такие физико-химические способы, как обработка пламенем, тлеющим разрядом, коронным разрядом, создание на поверхности изделий из пластмасс металлической пленки, электрическое воздействие и др. С экономической точки зрения физико-химические способы относятся к наиболее дорогостоящим, однако, именно они позволяют существенно повышать значения адгезионной прочности.

К *химическим способам* относится травление. Вариантов составов для травления, пожалуй, не меньше, чем предприятий, их использующих. Наиболее широко эти способы реализуют

при подготовке поверхностей алюминиевых, вольфрамовых, титановых, медных и молибденовых сплавов.

Типовой технологический процесс при использовании химических способов подготовки поверхностей состоит из следующих основных операций:

1. обезжиривание (чаще всего в водных моющих растворах) с последующей сушкой;
2. выдержка в водном растворе кислот, реже щелочей;
3. промывка холодной водой до нейтральной реакции и сушка чистым сжатым воздухом или в сушильной шкафу [3].

Физико-химические и химические способы подготовки поверхности изменяют молекулярную структуру поверхности склеиваемых деталей и ее механические свойства, например, при *подготовке поверхности изделий из титана и его сплавов*. К сплавам титана большинство клеящих материалов имеют пониженную адгезию. Для повышения адгезионной способности клеев к поверхности изделий из титана и его сплавов проводят оксидирование в растворах 1 %-ной серной кислоты, или 8 %-ной щавелевой кислоты, или 10 %-ной сульфосалициловой кислоты в смеси с 0,5 %-ной серной при температуре 10...20 °С в течение 10...40 мин при плотности тока 0,5...2 А/дм [3].

Немаловажную роль играет подготовка клеящих и уплотнительных материалов, которые, в большинстве случаев, перед нанесением на склеиваемые поверхности должны быть соответствующим образом подготовлены. Как известно [3], многие клеящие и уплотнительные материалы представляют собой многокомпонентные составы, и возникает проблема перемешивания материалов для получения гомогенных составов (уменьшение градиента концентрации). При этом цель перемешивания – обеспечить такое состояние перемешиваемой смеси, когда в элементарно малых объемах проб, отобранных из различных точек пространства системы, концентрация ингредиентов будет соответствовать концентрации последних в системе в целом. Современные клеи, для избежания данной операции, производятся в градуированных тубах. Связующей операцией является нанесение клеящих материалов. Правильно выбранный способ нанесения адгезива позволяет распределить материал в виде равномерного клеевого слоя заданной толщины. Это требование может быть обеспечено разными способами, выбор которых определяется такими факторами, как физические свойства клея, форма и размеры склеиваемых поверхностей, тип, производство и т. д. [5].

Равномерность нанесенного слоя зависит от вязкости клея и навыков оператора. Этот способ используют при нанесении клеев, имеющих вязкость по ВЗ–1 не выше 10 с и не образующих при нанесении нитевидные хлопья. Недостатком данного способа является вредное воздействие на организм человека аэрозоля, образующегося при распылении клеев, и поэтому рабочие места должны быть оборудованы соответствующей вентиляционной системой. Недостатком данного способа являются большие потери клея, которые могут составлять 50 % [3]. Поэтому в настоящее время применяются системы автоматической подачи или 3–D протипицирование.

Применяют также способы нанесения клея *по трафарету* или с помощью «штемпеля». Их используют при необходимости обеспечить нанесение на определенные участки поверхности или по заданному рисунку. Такую технологию широко используют в автомобилестроении при нанесении герметизирующих материалов, например на поддон картера [3].

Нанесение из расплава применяют при использовании клеев-расплавов. Подогретый до температуры текучести клей наносят на склеиваемую поверхность или валиком, или же с помощью сопловых головок. В ремонтном производстве используют клеи-расплавы, изготовленные в виде длинных карандашей, и разогревают не их, а поверхности, подлежащие склеиванию. Клей же расплавляется при контакте с разогретой поверхностью. При таком способе нанесения температура нагрева поверхности субстрата всегда выше, чем температура текучести клея-расплава [3].

Как правило, клей наносят на обе склеиваемые поверхности. Однако из этого правила есть исключения: все быстроотверждаемые клеящие материалы, например цианакрилатные. Анаэробные клеи также наносят только на одну из сопрягаемых поверхностей. Одностороннее нанесение клея осуществляют при склеивании фольги и некоторых других пленочных материалов, склеивание которых проводят в пакетах при высоком давлении.

В целях лучшего растекания вязких клеев, например эпоксидных, допускается наносить их на предварительно нагретые до 50...70 °С поверхности. Это позволяет улучшить растекание клея и уменьшить количество воздушных включений в клеевом шве. Многокомпонентные

клеящие и уплотнительные материалы должны наноситься на склеиваемые поверхности в пределах времени их жизнеспособности [3].

После нанесения клеящих материалов необходимо зафиксировать склеиваемые детали в определенном положении, чтобы не допустить их смещения в период формирования клеевой прослойки. Фиксация осуществляется за счет приложения нагрузки к внешней поверхности склеиваемого элемента. Необходимо обеспечить равномерное распределение нагрузки по поверхности, так как локальное ее приложение может привести к перекосу элементов и формированию переменной толщины клеевой прослойки, что снижает прочность клеевого соединения [3].

В единичном и мелкосерийном производстве для создания давления используют струбицины. В мелкосерийном производстве используют специальные пружинные приспособления, где усилие передается через эластичные прокладки, что позволяет создавать равномерное давление по всей площади. В серийном и массовом производстве используют вакуумные приспособления или автоклавы. Удельное давление зависит от вязкости клеящего материала; точности изготовления склеиваемых поверхностей; жесткости склеиваемого изделия [3].

При склеивании тонкостенных крупногабаритных деталей сложной геометрической формы создать равномерное давление по всему периметру клеевого шва не всегда технологически возможно. В этом случае требуется использовать клеевые материалы, применение которых не требует высоких давлений. Чем выше давление при склеивании, тем, как правило, сложнее и дороже оснастка, используемая при монтаже клеевого соединения.

Превращение клея (герметика) в клеевую (герметизирующую) прослойку происходит в результате:

- улетучивания растворителя из раствора клея;
- улетучивания из эмульсии;
- улетучивания растворителя с одновременной полимеризацией или поликонденсацией растворенного вещества (эти процессы могут протекать при воздействии кислорода, тепла, воды или катализатора);
- улетучивания растворителя до полимеризации или поликонденсации растворенного вещества или одновременно с ней с отверждением отвердителем;
- использования реакционноспособного растворителя в качестве одного из ингредиентов клея;
- отверждения олигомеров отвердителями;
- затвердевания расплавленного твердого или порошкообразного клея при его охлаждении [3].

Пример зависимости растворителя в слое клея от времени представлен на рис. 2 [3]. Период времени открытой выдержки $t_{max} - t_{min}$, где t_{min} – минимальное время сушки; t_{max} – максимальное время сушки. При t_{max} слой клея превращается в эластичную или твердую пленку и не обладает липкостью.

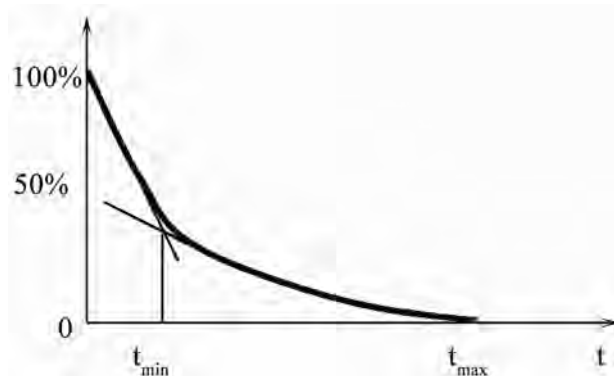


Рис. 2. Зависимость количества растворителя в слое клея от времени

Формирование свойств клеевой прослойки путем отверждения олигомера происходит по другому принципу. Пример изменения прочности при склеивании стальных деталей с использованием эпоксидного олигомера и аминного связующего приведен на рис. 3 [3]. Участок ($t_0 - t_{cm}$) характеризует период времени, в течение которого проводят смешивание компонентов. Участок 2 определяет продолжительность времени, в течение которого необходимо нанести слой клея и провести монтаж соединения. Время t_j определяет момент времени, после которого клей не мо-

жет быть использован. В момент времени t_0 осуществлено совмещение олигомера с необходимым количеством отвердителя и начато перемешивание компонентов, т.е. период времени, в течение которого адгезионный материал может быть нанесен на соединительные элементы.

Далее вязкость композиции постепенно нарастает в результате роста линейных (разветвленных) молекул, а в момент $t_{схв}$ начинается образование поперечных связей между молекулами (фактически это момент гелеобразования) [3].

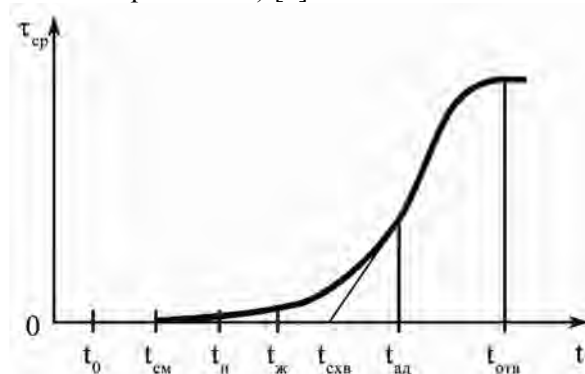


Рис.3. Характерные моменты времени, при которых происходит изменение прочности клеевого соединения
 t_0 – момент совмещения олигомера и отвердителя; $t_{см}$ – время окончательного перемешивания;
 $t_н$ – момент нанесения клея на поверхность субстрата; $t_ж$ – время жизнеспособности;
 $t_{схв}$ – момент схватывания; $t_д$ – время частичного отверждения клеевого материала, при котором происходит адгезионное разрушение; $t_{отв}$ – время отверждения

Для клеев горячего отверждения регламентируется время и температура отверждения. Скорость подъема температуры зависит от габаритных размеров склеиваемых элементов и их теплопроводности и устанавливается в процессе отработки технологического процесса [3]. Окончательная характеристика клеевого соединения основывается на контроле готовых изделий. Предварительному контролю необходимо подвергать все материалы, применяемые при склеивании, а также температурно-влажностные условия в производственных помещениях, в том числе и условия хранения компонентов клеящих материалов.

Основными причинами неудовлетворительного качества клеевого шва являются:

- непрочный, причины которого могут быть самые различные, например некачественная подготовка поверхности, перекосы склеиваемых деталей при монтаже, избыточное и (или) неравномерное давление на клеевой шов;
- дефектный (например, пористый) клеевой шов, что может иметь место в результате неполного удаления растворителя, неправильного перемешивания, в результате которого в клей попадает большое количество воздушных пузырьков и т. д.;
- неоднородный клеевой шов, который возникает в результате и неравномерного нанесения слоя клея, и (или) неравномерного давления при склеивании;
- низкие значения адгезионной прочности клеевого соединения, причины которого также очень различны: это и некачественная подготовка поверхности, нарушение технологии отверждения, миграция в клеевой шов пластификаторов из эластичных полимерных субстратов [3, 6].

К самым распространенным дефектам относится неправильный выбор для данных субстратов способа подготовки поверхности.

Контроль качества склеивания чаще всего осуществляют визуально по сплошности и толщине выдавленного из клеевого шва слоя адгезива. Для контроля качества могут быть использованы дефектоскопы, импульсные ультразвуковые эхо-дефектоскопы, однако их применение эффективно только при массовом и крупносерийном производстве.

Вывод: Для получения надежного клеевого соединения необходимо для каждого конкретного соединения разработать технологию склеивания, которая состоит из следующих основных операций: подготовка склеиваемых элементов; обработка поверхности склеиваемых элементов; приготовление клея; нанесение клея; монтаж соединения; отверждение клея; контроль качества склеивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Л. Калиниченко, В.А. Калиниченко. Новые методы крепления пористых и компактных материалов. Сборник научных трудов X МНТК. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Минск: ФТИ. 16–18.09.2015. Кн. 1. С.72–79.
2. Калиниченко В.А., Калиниченко М.Л., Григорчик А.Н. Новые методы крепления пористых и компактных материалов на основе титана *Вестник ГрДУ імя Янкі Купалы*. Сер 6. Тэхніка. – 2015. – № 1(198). – С.24–30.
3. Склеивание в машиностроении. Справочник в 2 томах. Т.1 / Д. А. Аронович, В. П. Варламов, В. А. Войтович и др.; Под общ. ред. Г. В. Малышевой. — М.: Наука и технологии, 2005. — 544с.
4. Г. Эпштейн. Склеивание металлов. Авторизованный перевод с английского канд. техн. наук Б.И. Паншина. Под общей редакцией А.Т. Туманова. М.: Государственное издательство оборонной промышленности. 1956. – 212 с.
5. Ж.–Ж. Вильнав. Клеевые соединения. Перевод с французского Л.В. Синегубовой. — М.: Техносфера, 2007. — 385с.
6. М.Л. Калиниченко, В.А. Калиниченко. Сборник научных трудов X МНТК. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Минск: ФТИ. 16–18.09.2015. Кн. 2. С. 196–199.

УДК 621.002

Кане М.М.

ПРЕДПОСЫЛКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В статье показаны условия использования методов корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа для моделирования технологических процессов, при которых достигается требуемая точность модели и надежная оценка ее адекватности. Обоснована необходимость этих условий, приведены методы проверки их соблюдения.

Задачи исследования

Для моделирования различных случайных процессов, в том числе процессов механической обработки деталей машин, широко используются такие статистические методы, как корреляционно-регрессионный и дисперсионный анализ. При этом качество модели во многом зависит от качества экспериментальных данных, положенных в ее основу. Поэтому ряд авторов указывают на необходимость предварительного анализа экспериментальных данных [1, 2, 3].

Основные результаты

Анализ указанных методов моделирования и распространенных методов оценки адекватности и достоверности полученных результатов показывает, что их эффективное применение возможно при соблюдении следующих требований к экспериментальным данным:

1. зависимые и независимые переменные являются случайными величинами с нормальным законом распределения*;
2. дисперсия зависимой переменной y не зависит от абсолютных значений y – остается постоянной или однородной при различных наблюдениях y ;
3. значения независимых переменных x_1, x_2, \dots, x_m измеряются с пренебрежимо малыми ошибками по сравнению с ошибкой измерения y ;
4. переменные x_1, x_2, \dots, x_m линейно независимы;
5. процесс формирования y является стационарным и эргодическим;

* Независимые переменные могут быть и неслучайными величинами, в частности, в активных экспериментах.