

НАПРАВЛЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПОЛИМЕРНОГО СЛОЯ ПРИ СБОРКЕ ВАЛ-ВТУЛОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Игнатов А.В., Мозгин С.А.*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*mozgin.stas@gmail.com

В статье представлены результаты анализа свойств современных полимерных клеевых материалов на предмет их соответствия условиям эксплуатации вал-втулочных соединений, которые используются в автомобильной и сельскохозяйственной технике, редукторах. Представлен оригинальный метод сборки вал-втулочных клеевых соединений с направленным формированием комбинированной структурой клеевого слоя. Установлено, что прочность клеевых вал-втулочных соединений, собранных по разработанному методу, превышает прочность обычных клеевых вал-втулочных соединений в 1,2–2,5 раза.

Ключевые слова: полимерные клеевые материалы, направленное формирование, комбинированный полимерный слой, избыточно-вакуумметрическое давление, прочность.

DIRECTIONAL FORMATION OF COMBINED POLYMER LAYER DURING ASSEMBLY OF MACHINE PARTS SHAFT-BUSHING JOINTS

Ignatov A.V., Mozgin S.A.

N.E. Bauman Moscow State Technical University

The article presents the results of the properties analysis of modern polymer adhesive materials for their compliance with the operating conditions of shaft-bushing joints, which are used in automotive and agricultural machinery, gearboxes. A shaft-bushing joints assembly original method with directional formation of polymer layer combined structure is presented. The strength of the polymer shaft-bushing joints assembled according to the developed method exceeded the strength of conventional polymer shaft-bushing joints by 1.2–2.5 times.

Keywords: polymer shaft-bushing joints, directional formation, combined polymer layer, excess and vacuum pressure, strength.

Вал-втулочные соединения используются для посадки на вал зубчатых колес, шкивов, звездочек, ступиц, втулок [1–5]. Подобные соединения распространены в узлах автомобилей, сельскохозяйственных машин и редукторов. Предназначение данных соединений сводится к передаче крутящего момента. Примеры вал-втулочных соединений двигателей внутреннего сгорания представлены на *рис. 1*. Соединения должны сохранять работоспособность при воздействии крутящего момента, температурного воздействия и воздействия окружающей среды (масло, вода и влага). Анализ ряда вал-втулочных соединений автомобилей, сельскохозяйственных машин, редукторов позволил установить диапазон значений передаваемого крутящего момента – от 90 до 1500 Н·м.

Одним из основных эксплуатационных требований является работоспособность вал-втулочного соединения в интервале рабочих температур. В зависимости от типа двигателя, мощности, режима работы, системы охлаждения температура на головке поршня может составлять от 200 до 600 °С, на юбке поршня и коленчатом валу – от 80 до 150 °С, остальные детали двигателя имеют температуру 50 до 110 °С [6]. Нижний предел рабочего диапазона температур определяется категорией климатического исполнения по ГОСТ 15150. При эксплуатации в умеренном, а также в умеренном и холодном климате (категории У и УХЛ) температура окружающего воздуха должна быть не ниже –60 °С.

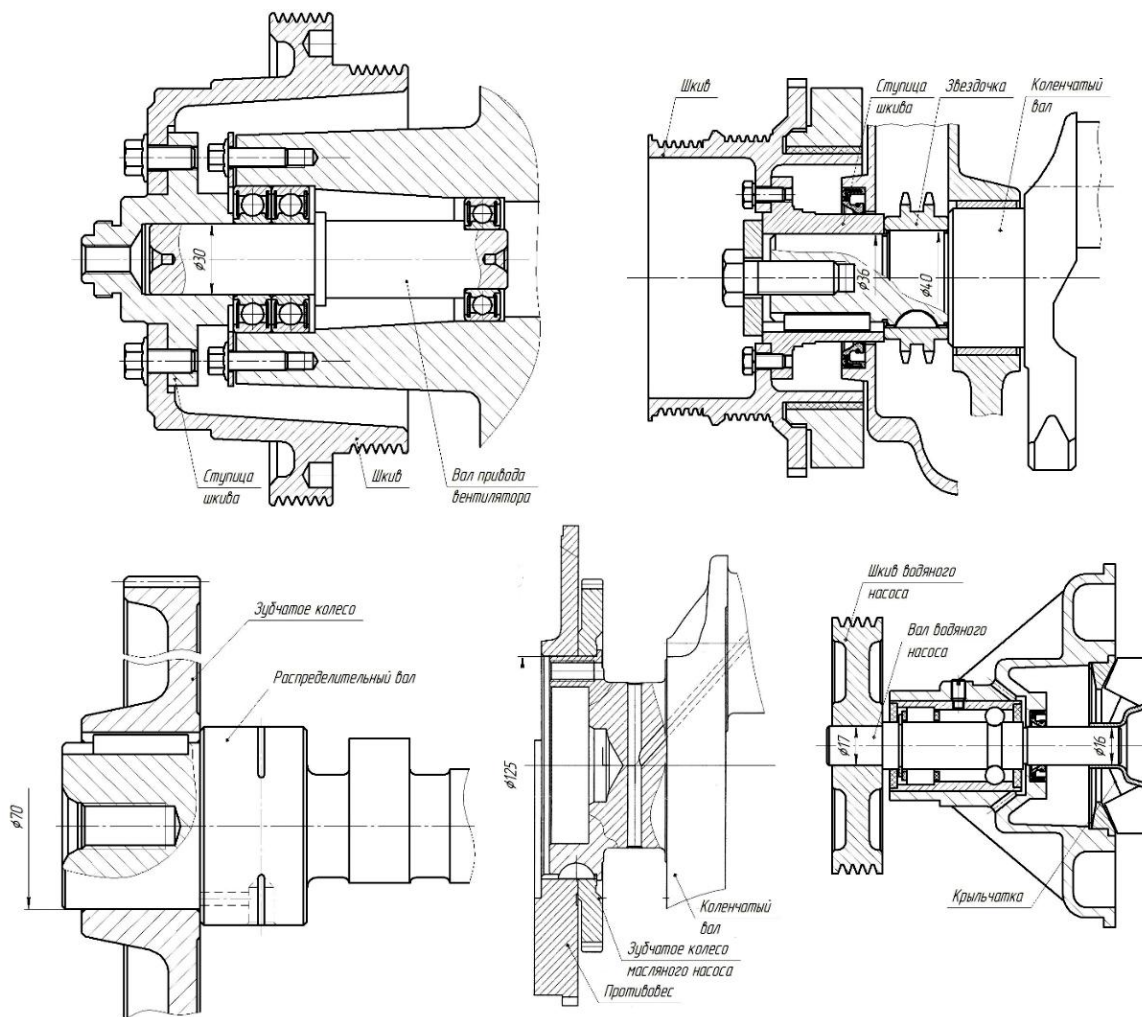


Рис. 1. Примеры вал-втулочных соединений автомобильных двигателей

Кроме силовых нагрузок, температуры и влаги на соединения в автомобилях, сельскохозяйственной технике и т.д. воздействует масло. Масло в двигателе внутреннего сгорания может прогреваться до 110 °С. По причине своей химической активности и температуры масло может оказывать негативное воздействие на материал деталей и элементов их соединения.

Для сборки валов и деталей типа «втулка» применяются соединения с натягом, шпоночные, шлицевые соединения, которые, как показывает практика, полностью соответствуют требуемым условиям эксплуатации. Однако технологические процессы изготовления деталей для сборки перечисленных соединений отличаются достаточно высокой трудоемкостью и себестоимостью. Это обусловлено высокими требованиями к точности и шероховатости сопрягаемых поверхностей, а также наличием дополнительных конструктивных элементов для создания соединений. Наравне с перечисленными видами соединений для сборки валов и деталей типа «втулка» также применяются клеевые соединения. Авторами рассмотрены свойства 190 полимерных клеевых составов производства компаний Loctite, Permabond, НИИ полимеров им. Каргина. В результате анализа клеевых составов определены граничные значения основных параметров для каждой химической основы, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры химических основ полимерных клеевых составов

№	Химическая основа / Параметры	Ед. изм.	Анаэробные	Эпоксидные	Акрилатные	Цианоакрилатные
1	Прочность на сдвиг	МПа	2,0–32,0	12–53	5–35	7–25
2	Мин. температура	°С	–196...–55	–200...–55	–60...0	–196...–30
3	Макс. температура	°С	100...230	80...200	80...200	80...250
4	Стойкость к моторному маслу	ч	100–5000	1000–5000	350–5000	100–5000

№	Химическая основа / Параметры	Ед. изм.	Анаэробные	Эпоксидные	Акрилатные	Цианоакрилатные
5	Стойкость к бензину	ч	100–5000	1000–5000	100–720	100–1000
6	Стойкость к воде/гликолю	ч	168–5000	1000–5000	100–1000	500–5000
7	Вязкость (средняя)	Па·с	0,012–500	7–1350	1–120	0,002–70
8	Зазор (радиальный)	мм	0,05–0,5	–	0,1–2	0,025–0,5
9	Число компонентов	–	1	1–2	1–2	1(редко 2)
10	Механизмы отверждения	–	ОК, А	С, Т, А	С, А, Т+ОК	В
11	Жизнеспособность	мин	4–60	2–165	1–60	0
12	Ручное отверждение	мин	3–120	13–480	1–40	0,07–5,0
13	Полное отверждение	часы	8–48	24	24	24

Примечание. Количество анаэробных составов – 66 шт., эпоксидных – 41 шт., акрилатных – 27 шт., цианоакрилатных – 67 шт., ОК – отсутствие кислорода, А – активатор, С – смешивание, Т – температура, В – влажность.

Сопоставляя полученные данные с требованиями эксплуатации вал-втулочных соединений, которые были приведены выше, можно сделать вывод о том, что современные полимерные клеевые составы полностью отвечают данным требованиям эксплуатации. Полимерные клеящие вещества образуют прочные соединения металлических деталей, которые способны выдерживать длительное воздействие крутящего момента, высоких и низких температур, а также агрессивных сред [6]. При этом отсутствие механического зацепления между сопрягаемыми поверхностями деталей не требует обеспечения высокой точности и шероховатости сопрягаемых поверхностей деталей, а также дополнительных конструктивных элементов детали [4]. Кроме упрощения конструкции деталей соединений, применение клеевых составов способствует снижению и более равномерному распределению механических напряжений в соединении, обеспечению герметичности соединения, гашению шума и вибраций, отсутствию коррозии [4, 7].

При сборке машин к технологическому процессу предъявляются требования, среди которых присутствует надежность и стабильность получения эксплуатационных характеристик. В случае клеевых соединений это особенно актуально т.к. скрепляющим элементом является первоначально жидкая среда, которая должна быть равномерно распределена в зазоре соединения в заданном количестве для обеспечения проектной прочности и стойкости соединения к внешним воздействиям. Анализ рекомендаций и специальных методов сборки показывает, что в настоящее время данная задача не является полностью решенной. При ручной сборке с нанесением клеевого состава на поверхности деталей с помощью кисти или аналогичного инструмента объем клеевого состава не регулируется, его распределение сначала на поверхности, а потом и в зазоре в большей мере определяется таким случайным фактором как ориентация деталей с нанесенным клеевым составом относительно вектора силы тяжести. Кроме того, возникают подтеки, которые свидетельствуют о вероятном недостатке клеевого состава в зазоре или его явном перерасходе. При применении автоматизированных средств дозирования и распределения клеевого состава равномерность и количество клеевого состава на поверхностях деталей существенно стабилизируется. Однако нельзя достоверно определить, каким образом клеевой состав распределяется внутри зазора, а также повлиять на процесс распределения, направив течение клеевого состава в незаполненные объемы кольцевого зазора. С учетом перечисленных обстоятельств, нельзя гарантировать стабильность и надежность процесса сборки клеевых соединений, а также конечные показатели их качества. Также необходимо отметить, что продолжительная выдержка соединения на рабочем месте после сборки, которая требуется для отверждения клеевого состава, существенно увеличивает трудоёмкость сборки изделия.

Задача, связанная с обеспечением направленного течения жидкости для создания прочного конструкционного соединения деталей машин, является весьма нетипичной т.к. в машиностроении для создания конструкционных соединений используются твердотельные конструктивные элементы. Поэтому для эффективного решения проблем клеевой сборки требуется принципиально иной подход. Известно, что для управления течением жидкостей используется разность давления в замкнутом объеме. При наличии разности давления можно обеспечить заполнение вязкой жидкостью зазора практически любой величины, исключить образование пустот. Исходя из этого, авторами предложено применить данные факторы при формировании качественного полимерного слоя в зазоре между собираемыми деталями и разработать оригинальный технологический метод сборки клеевых вал-втулочных соединений [8].

Для заполнения зазора в цилиндрическом соединении под воздействием разницы давлений необходимо обеспечить замкнутость объема кольцевого зазора. В случае вал-втулочного соединения для обеспечения замкнутости объема необходимо перекрыть кольцевой зазор по торцам охватывающей детали. Также необходимо обеспечить соосность собираемых деталей для обеспечения равномерного за-

полнения зазора клеевым составом. С учетом этого, прежде всего, предлагается формировать комбинированный клеевой слой, который будет состоять из двух клеевых швов – технологического и конструкционного. Эскиз соединений с комбинированной структурой полимерного слоя представлен на рис. 2.

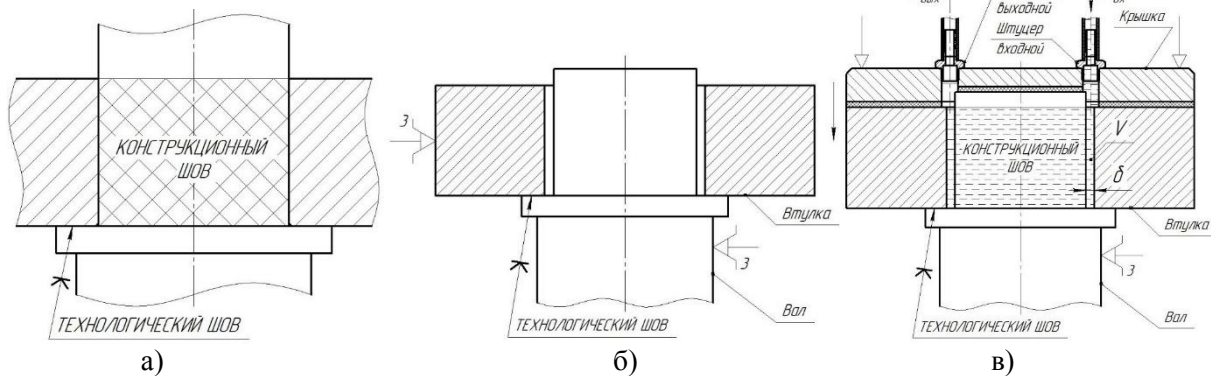


Рис. 2. а) Вал-втулочное соединение с комбинированной структурой полимерного слоя; б) формирование технологического полимерного шва; в) формирование конструкционного полимерного шва ($P_{вх}$, $P_{вых}$ – давление на входном и выходном отверстиях, V – вязкость полимерного состава, d – диаметральный зазор в соединении)

С учетом этого в рамках одного соединения применяется выполнение клеевого слоя в два этапа (см. рис. 2). Первый этап обеспечивает ускоренное отверждение узкой полоски клея, которая будет являться технологическим швом. Технологический шов обеспечивает создание герметичного пояса у одного из торцов охватывающей детали. Кроме того, технологический шов фиксирует детали относительно друг друга. По этой причине главным требованием, которое предъявляется к формированию технологического клеевого шва является минимальное время отверждения. В результате формируется цилиндрическое соединение с зазором, объем которого ограничен с одного торца технологическим швом.

Дальнейшая сборка соединения осуществляется на втором этапе, в процессе которого формируется конструкционный шов. На конструкционном шве лежит задача по обеспечению эксплуатационных характеристик соединения. Формирование конструкционного полимерного шва осуществляется при подаче клеящего вещества в кольцевой зазор при избыточно-вакуумметрическом давлении. Для его отверждения нет необходимости обеспечивать дополнительную выдержку соединения на сборочной позиции, так как неподвижность деталей относительно друг друга осуществляется с помощью технологического шва. Окончательное отверждение конструкционного шва в данном случае осуществляется в процессе транспортировки изделия или его хранения вне рабочего места.

Наличие двух швов в клеевом соединении позволяет распределить функции слоя между двумя клеевыми составами, и тем самым сократить количество требований к каждому из них. Заполнение кольцевого зазора под направленным воздействием избыточно-вакуумметрического давления исключает требования к конструкционному клеевому составу, связанные с соотношением его вязкости и величины зазора. Предварительная фиксация деталей технологическим швом не требует от конструкционного клеевого состава какого-либо определенного времени отверждения. Таким образом, выбор конструкционного клеевого состава можно осуществлять исходя только из его прочности и стоимости, что способствует повышению качества соединения и существенно упрощает процесс выбора. Выбор технологического клеевого состава можно осуществлять исходя только из критериев минимизации времени ручного отверждения и денежных затрат.

На кафедре «Технологии машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана проведено теоретическое и экспериментальное исследование разработанного метода сборки вал-втулочных соединений с применением полимерных клеящих веществ. На первом этапе экспериментального исследования была определена скорость заполнения кольцевого зазора жидкостью в зависимости от величины давления, зазора и вязкости [8]. В процессе второго этапа установлено влияние направленного формирования клеевого конструкционного слоя на прочность соединений. В данной статье представлены результаты выполнения второго этапа исследований.

Для сборки валов и втулок с применением полимерных клеевых составов был разработан экспериментальный стенд [8]. Номинальный диаметр сопряжения собираемых валов и втулок равнялся $\varnothing 36$ мм, длина сопряжения – 41 мм. В процессе проведения эксперимента варьировались следующие параметры: разница давлений – в пределах 0,02–0,2 МПа, диаметральный зазор в соединении вала и втулки – в пределах 0,1–0,5 мм с шагом 0,1 мм, вязкость полимерного клеевого состава – 600 мПа·с (Efele 124) и 2000 мПа·с (Efele 126). При сборке по традиционному методу нанесение клеевого состава на вал осуществлялась непосредственно из упаковки, которая представляла собой емкость с коническим «носиком». Для равномерного распределения кле-

вого состава по поверхности вала и втулки использовалась кисть. Каждое из собранных соединений после сборки выдерживалось не менее 24 часов. Всего было собрано и испытано 90 соединений. Испытание на прочность осуществлялось на экспериментальном стенде, который представляет собой гидравлический пресс с дополнительной установкой цифрового датчика давления и компьютера. Испытание представляло собой аксиальный сдвиг вала относительно втулки. В процессе разрушения соединения на компьютере формировался график изменения давления в гидроцилиндре прессы во времени. По графику устанавливалась величина давления в момент начала перемещения вала относительно втулки, которая пересчитывалась в удельную прочность соединения на сдвиг. Примеры данных графиков приведены на рис. 3. В табл. 2 представлены результаты испытаний клеевых цилиндрических соединений для различных клеевых составов, собранных с направленным формированием клеевого слоя и без него.

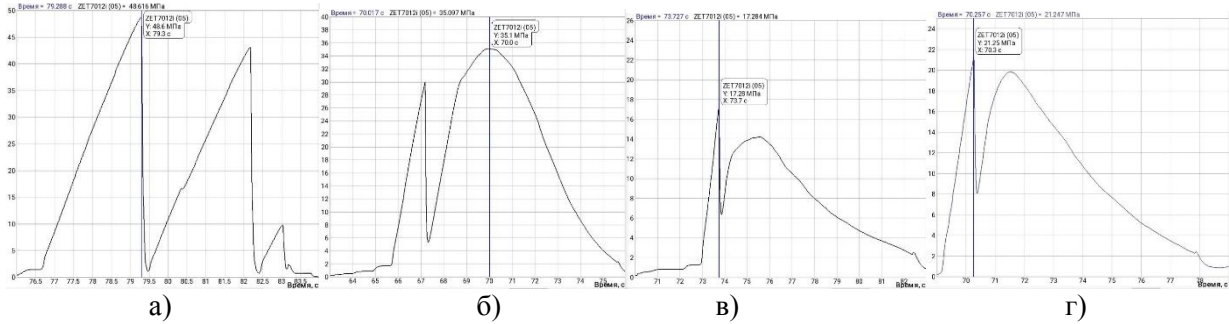


Рис. 3. Примеры графиков разрушения соединений с направленным формированием клеевого слоя: с зазором 0,1 мм для клея Efele 124 (а) и Efele 126 (б); с зазором 0,4 мм для клея Efele 124 (в) и Efele 126 (г)

Таблица 2

Прочность на сдвиг клеевых цилиндрических соединений

δ , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Клей анаэробный Efele 124 (вязкость $\nu = 600 - 1500 \text{ мм}^2/\text{сек}$)					
$P_{\text{ВХ}}/P_{\text{ВЫХ}}$, МПа	0,15/0	0,05/0	0,03/0	0,02/0	0,02/0
$\sigma_{\text{СДВ}}$, МПа	23,7	21,1	16,5	20,6	14,3
$P_{\text{ВХ}}/P_{\text{ВЫХ}}$, МПа	0,09/-0,06	0,03/-0,02	0,02/-0,01	0,01/-0,01	0,01/-0,01
$\sigma_{\text{СДВ}}$, МПа	25,4	27,0	17,4	25,4	14,7
$P_{\text{ВХ}}/P_{\text{ВЫХ}}$, МПа	0,16/-0,08	0,09/-0,06	0,06/-0,04	0,04/-0,03	0,03/-0,02
$\sigma_{\text{СДВ}}$, МПа	24,4	18,1	20,0	21,8	14,1
Клей анаэробный Efele 126 (вязкость $\nu = 1500 - 5000 \text{ мм}^2/\text{сек}$)					
$P_{\text{ВХ}}/P_{\text{ВЫХ}}$, МПа	0,2/0	0,15/0	0,07/0	0,05/0	0,03/0
$\sigma_{\text{СДВ}}$, МПа	17,7	16,4	16,8	17,5	15,4

Для удобства сравнения результатов испытаний на рис. 4, представлены диаграммы прочности клеевых соединений для двух методов сборки. Прочность клеевых цилиндрических соединений, собранных с направленным формированием клеевого слоя, превышает прочность обычных клеевых цилиндрических соединений по средним значениям в 1,2...2,5 раза в зависимости от зазора (рис. 5).

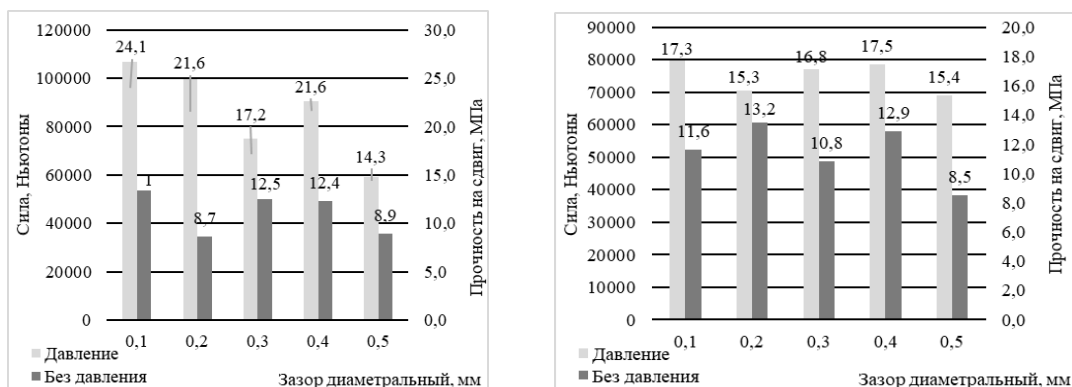


Рис. 4. Прочность на сдвиг клеевых вал-втулочных соединений, собранных различными методами (клеевые составы Efele 124 (слева) и Efele 126 (справа))

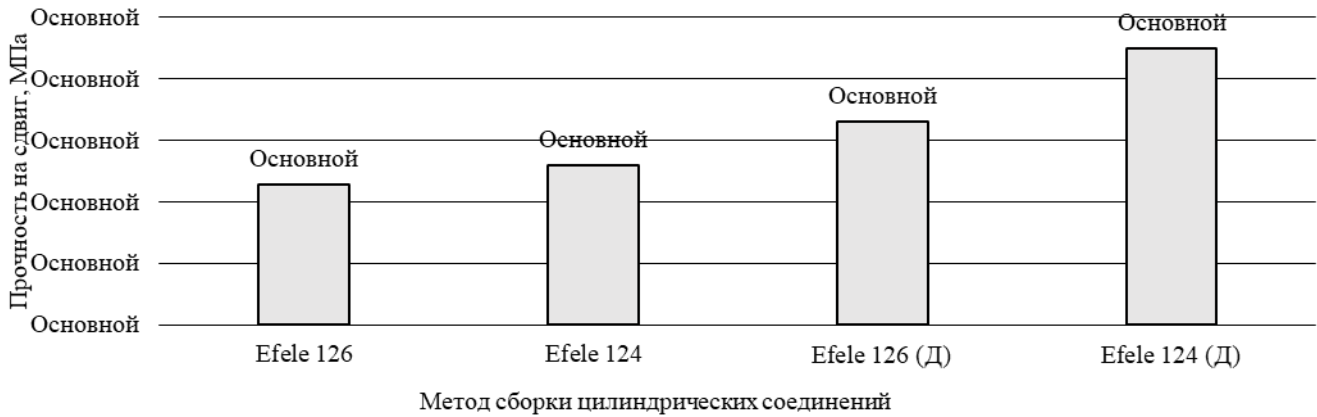


Рис. 5. Прочность на сдвиг вал-втулочных соединений, собранных различными методами с применением полимерных клеевых составов

В процессе сборки соединений по предлагаемому методу наблюдалось существенное повышение удобства сборки, полностью исключены подтеки клеевого состава. В процессе сборки соединений по традиционному методу наблюдалось непредусмотренное самопроизвольное течение клеевого состава по поверхностям вала и втулки, образовывались подтеки. На рис. 6 представлены фотографии полимерного слоя, полученного при его направленном формировании непосредственно внутри кольцевого зазора. Можно сказать, что при направленном формировании появляется возможность обеспечить форму отвердевшего слоя в виде бездефектной «полимерной втулки», что по сути является целевой формой отвердевшего полимера в случае вал-втулочного соединения.

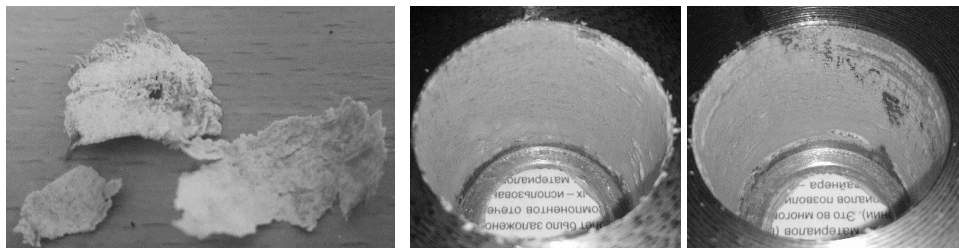


Рис. 6. Внешний вид полимерного клеевого слоя после разрушения соединения, собранных по предлагаемому методу

На рис. 7 и 8 приведены развертки ряда поверхностей валов после испытаний, сформированные вручную из фрагментов фотографий. Распределение остатков клеевого состава по отверстию втулки отражено на эскизе развертке как результат визуального анализа отверстия втулки. Также на эскизе наложена развертка поверхности вала. В результате сформирован эскиз с разверткой поверхностей вала и втулки после испытаний.

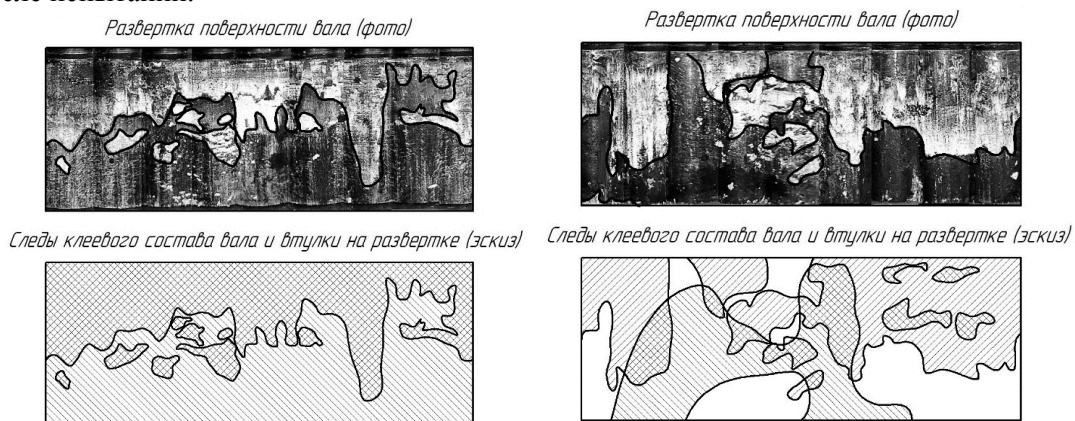


Рис. 7. Развертки клеевых соединений (Efele 124, слева – сборка с направленным формированием, справа – ручная сборка)

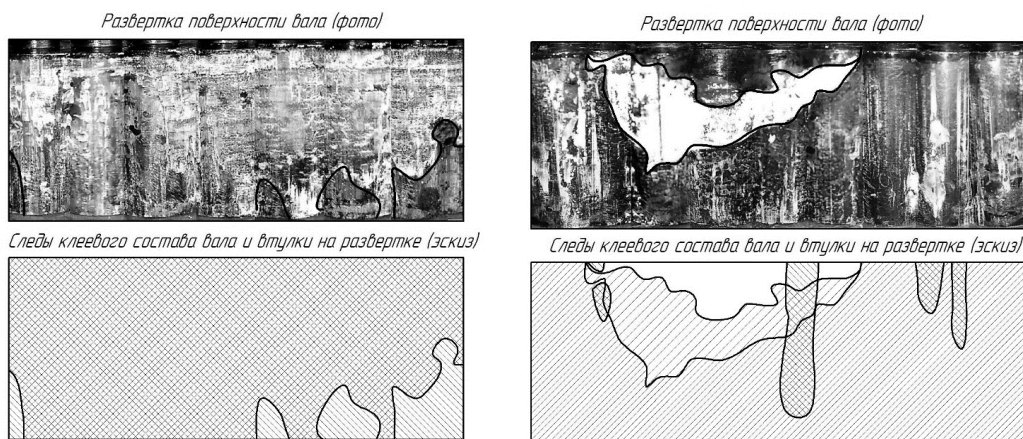


Рис. 8. Развертки клеевых соединений (клей Efele 126, слева – сборка с направленным формированием, справа – ручная сборка)

По данным разверткам условно можно судить о качестве клеевого слоя, полученного в процессе сборки соединений. Условность вызвана относительным перемещением деталей в процессе разрушения и сдвигом фрагментов клеевого слоя со своих исходных мест на поверхностях деталей. В результате при сдвиге часть фрагментов клеевого слоя остается на исходных местах, часть фрагментов выходит из зазора или занимают новое место на поверхности. Кроме того, при перемещении фрагменты могут оставить след на поверхности, который затрудняет определение первоначальных мест поверхностей, на которых находился клеевой состав. Забегая вперед, можно отметить, что указанные особенности в большей мере касаются клеевых соединений, собранных без направленного формирования клеевого слоя т.к. у них наблюдался адгезионный характер разрушения, что приводило к большей степени отделения клеевого слоя от поверхностей и их перемещению.

Прежде всего при анализе разверток с совмещенными поверхностями вала и втулки можно отметить, что так или иначе вся площадь соединений, собранных по предлагаемому методу, была покрыта клеевым составом. Клеевой состав наблюдался либо на валу, либо на втулке, либо на валу и втулке. При традиционной сборке наблюдались большие площади соединения, на которых не было следов клея ни на валу, ни на втулке. Вероятно, это является одной из причин пониженной прочности данных соединений по сравнению с соединениями, собранными по предлагаемому методу. Также на данных деталях четко прослеживаются следы хаотичного распространения клеевого состава внутри зазора при сборке в виде характерных для жидкости линий течения. На некоторых деталях можно наблюдать неравномерность клеевого состава в разных местах по толщине. Эти места разделяются упомянутыми линиями течения. Также можно отметить, что на выбранных соединениях общее покрытие поверхностей валов и втулки клеем, в целом, сопоставимо. Однако прочность соединений, собранных по предлагаемому методу, в два раза больше. С наибольшей долей вероятности это обусловлено характером разрушения соединений. Нахождение клеевого слоя на поверхностях вала и втулки свидетельствует о когезионном характере разрушения, то есть разрушение произошло по клеевому слою. Когезионный характер разрушения клеевых соединений свидетельствует о хорошем качестве сборки. Когезионный (или смешанный) характер разрушения наблюдался на всех соединениях, собранных по предлагаемому методу. На соединениях, собранных традиционным методом, в большей степени наблюдался адгезионный характер разрушения, при котором клеевой состав остается только на одной из двух поверхностей. Это свидетельствует о формировании недостаточно прочной адгезионной связи клея и поверхности. Прочность соединения в этом случае обусловлена не прочностью клея, а прочностью данной связи, которая оказывается слабой.

В результате можно сделать вывод, что разработан оригинальный метод сборки вал-втулочных соединений с применением полимерных клеевых составов, который обладает следующими преимуществами: соединение не требует выдержки после сборки; существенно снижены требования к выбору клеевого состава; управление течением клеевого состава осуществляется непосредственно в зазоре; сборка соединения может быть легко автоматизирована. Это достигается за счет применения комбинированной структуры и направленного формирования полимерного слоя при воздействии избыточно-вакуумметрического давления. Следующей задачей по исследованию возможностей метода является определение критической величины давления с точки зрения заполнения впадин шероховатости склеиваемых поверхностей, что будет способствовать образованию более прочного механического зацепления между полимером и поверхностями.

Библиография

1. Ignatov A.V., Mozgin S.A., Belikov M.A., Korenkov N.Y. Improving the quality of adhesive joints in helicopter assemblies using directional formation of the adhesive layer combined structure // AIP Conference Proceedings. 2019. P. 2318.
2. Евстифеева Е.А. Технологическое обеспечение прочностных характеристик соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами: дисс. ... канд. техн. наук. Пенза, 2009. 169 с.
3. Малышева Г.В., Верещагин В.А. Клеи для конвейерной сборки автотранспортных средств // Автомобильная промышленность. 2001. № 8. С. 29–31.
4. Склеивание в машиностроении. Справочник в 2 т. Т. 1 / Д.А. Аронович, В.П. Варламов, В.А. Войтович и др.; под общ. ред. Г.В. Малышевой. М.: Наука и технологии, 2005. 544 с.
5. Холодкова А.Г., Басинюк В.П., Мардосевич Е.И. Клеевые соединения в зубчатых передачах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 4. С. 11–17.
6. Игнатов А.В., Островский Ю.А., Мозгин С.А. Автоматизация выбора анаэробной композиции при сборке изделий в дизельном двигателестроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 10. С. 442–450.
7. Ignatov A.V., Tagiltsev S.V., Namazova A.I. Reducing Vibration of Boring Bar // AIP Conference Proceedings. 2019. P. 2171.
8. Игнатов А.В., Мозгин С.А. Сборка клеевых цилиндрических соединений в условиях поточного производства // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции. Самара: СамГТУ, 2021. С. 63–67.