

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Сафаров Анатолий Эдуардович <sup>(1)</sup>, Тищенко Владимир Витальевич <sup>(2)</sup>, Копылов Александр Сергеевич <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup>Студент 5 курса,  
кафедры «Технологии машиностроения»,  
Московский государственный технический университета имени Н.Э. Баумана,  
<sup>(2, 3)</sup>Ученики 11 класса, Средней общеобразовательной школы №29, г. Балашиха

Научный руководитель: Игнатов А.В.,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения»

### **Введение.**

В настоящее время в машиностроение активно применяются высокопроизводительные процессы сборки с использованием адгезивных технологий. Клеевые соединения используются в машинах, работающих в различных климатических условиях. Они выдерживают знакопеременные статические и динамические нагрузки, хорошо зарекомендовали себя при работе в агрессивных средах и условиях повышенных температур.

Качество клеевого соединения во многом зависит от выбранного адгезива и уровня проработки технологического процесса сборки.

Опыт применения клеев позволил выработать общий технологический процесс сборки клеевых соединений. Независимо от сочетаний склеиваемых материалов и применяемого клея выделяют шесть основных этапов этого процесса:

- 1) Подготовка поверхностей под склеивание;
- 2) Выбор и приготовление клея;
- 3) Нанесение клея;
- 4) Монтаж соединения;
- 5) Отверждение клея;
- 6) Контроль качества склеивания.

Нанесение клея зависит от его состояния (жидкий, твердый, порошкообразный и др.) и осуществляется самыми различными методами.

При выборе метода нанесения клея необходимо учитывать габаритные размеры склеиваемых поверхностей, тип и общую оснащенность производства, производительность оборудования, состояние и свойства клея, вид получаемого соединения.

При ручном нанесении клея используют различные валики, шпатели, кисти, тампоны, форсунки и т.д. Пленочные клеи нарезают ножницами, порошкообразные просеивают через сито.

При механизации и автоматизации работ используют различные дозаторы, снабженные соплом, или распылительные системы. Применяют электростатическое нанесение. Для термопластичных клеев используют термопистолеты, установки индукционного нагрева. В последнее время производители клеев упаковывают жидкие однокомпонентные клеи в удобную эластичную тару, снабженную соплом для нанесения клея.

При нанесении клея выдерживают сплошность и толщину клеевого слоя, равномерность нанесения по всей траектории, так как от этого зависит прочность соединения. Учитывается количество смазываемых клеем поверхностей. Основным критерием при нанесении клея считают толщину клеевого слоя. Для каждого клея рекомендуется оптимальная толщина, которую можно изменить введением различных наполнителей.

Автоматизация нанесения клеев применяется в случаях: требования высокой производительности; применения опасных для здоровья человека клеев или их компонентов; требования высокого качества клеевого соединения, которое нельзя обеспечить ручным нанесением. При автоматизированном нанесении значительно улучшается внешний вид соединения, обеспечивается экономичный расход клеев. Разрабатывая автоматизированные технологические процессы сборки клеевых соединений, технологи и конструкторы устройств, для нанесения клея, стремятся добиться его безотходного использования. Механизмы автоматизированного нанесения клеев обычно выполняют следующие функции: дозирование подачи клея; смешение компонентов клея в требуемых пропорциях в случае применения многокомпонентных клеев; нанесение клея с требуемыми параметрами клеевого шва (толщина клеевого шва, равномерность нанесения, площадь нанесения и т.п.); транспортировка в зону сборки.

### **Постановка задачи.**

Нанесение высоковязких клеев в автоматизированном режиме является трудоемким процессом, из-за этого от него часто отказываются в производстве. Высоковязкие клеи склонны к образованию пробок в системе транспортирования к месту сборки, и требуют более коротких траекторий перемещения, при этом трубопровод должен исключать резкие изгибы. Механизмы, используемые для создания требуемого давления подачи, как правило, мощные, а следовательно более дорогие. Для нанесения клеев высокой вязкости применяют устройства с повышенной жесткостью конструкции, так как при перекачивании этих клеев возникают большие силы инерции, препятствующие передвижению порций клея к месту сборки. Конструкции устройства усиливают жесткими рамами и используют силовые узлы большей мощности, вследствие чего устройства для нанесения высоковязких клеев имеют большие габариты по сравнению с устройствами для нанесения низковязких клеев.

Компоновка устройств, для нанесения клеев, зависит от числа компонентов клея, его агрегатного состояния и вида (термопластичный или терморезактивный), степени ответственности соединения, безопасности и уровня автоматизации.

Предлагаемая работа посвящена вопросу автоматизация процесса нанесения клеевых композиций высокой вязкости в машиностроении. Исследования включает в себя проработку возможности снижения вязкости клеев при помощи изменения температуры адгезива и проверку влияния нагрева на качество соединения, а именно его прочность и скорость отвержения.

### **Постановка эксперимента.**

#### ***Эксперимент №1.***

При выполнении данного эксперимента необходимо ответить на вопрос: как повлияет повышение температуры эпоксидной смолы ЭД-20 на ее вязкость.

В ходе исследования был проведен эксперимент, где в качестве испытуемого адгезива была выбрана смола эпоксидно-диановая неотвержденная марки ЭД - 20 , производства ФКП «Завод им. Я.М. Свердлова», г. Дзержинск, ТУ 2385-090-07510508-2008. Эпоксидная смола — синтетическая смола, продукт поликонденсации эпихлоргидрина с фенолами. Смола эпоксидная стойка к действию галогенов, кислот, щелочей, обладают высокой адгезией к металлам.

Таблица 1. Качественные показатели эпоксидной смолы ЭД-20.

Наименование показателя	Норма по ГОСТ	
	Высший сорт	Первый сорт
Внешний вид эпоксидной смолы ЭД-20	Высоковязкая прозрачная без видимых механических включений и следов воды	
Массовая доля эпоксидных групп, %	19,9-22,0	19,9-22,0
Массовая доля иона хлора, %, не более	0,003	0,006
Массовая доля омыляемого хлора, %, не более	0,5	0,9
Массовая доля гидроксильных групп, %, не более	1,7	-
Массовая доля летучих веществ, %, не более	0,5	0,9

На основе эпоксидных смол производятся различные материалы, которые в дальнейшем могут применяться в различных областях промышленности.

Для проведения эксперимента была проведена подготовка, которая включала в себя изготовление экспериментальных емкостей диаметром 65 мм. с отверстиями заданного диаметра 3мм - 10мм. с шагом 1мм., сделанными на координатно-расточном станке, с равномерно зачищенными краями, во избежание различной шероховатости. Диаметр отверстия экспериментальной емкости ассоциировался с диаметром трубопровода по транспортировке высоковязкого клея к рабочей позиции сборки. Высота столба клея 55мм.,

В процессе выполнения эксперимента смола ЭД-20 равномерно разогревалась до определенной температуры 20°C - 60°C с шагом 10°C.

С помощью секундомеру засекалось время истечения клея в лабораторную мензурку до объема 25 мл. В результате выполнения этого исследования были получены данные, которые сведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние температуры клеевого композита на скорость истечения через отверстия различного диаметра.

		Температура нагрева клеевого композита, °С.					
		20	30	40	50	60	
Диаметр отверстия, через которое происходит истечение клеевого композита, мм.	3	Опыт №1	1024,6	374,6	95,5	57,2	18,2
		Опыт №2	1075,7	339,2	97,2	54	15,2
		Опыт №3	1035,7	341,9	99,8	44	19,5
		Среднее значение	1045,3	351,9	97,5	51,73	17,63
	4	Опыт №1	231,7	130	50,8	18,5	6,7
		Опыт №2	248,3	162	43,9	17,4	7,4
		Опыт №3	252,2	150,7	53,5	18,1	7,4
		Среднее значение	244,07	147,57	49,4	18	7,167
	5	Опыт №1	185,1	79,9	18,5	7,9	6
		Опыт №2	198,1	66,4	17,3	8,9	6,1
		Опыт №3	202,1	80,5	21,9	9	5,6
		Среднее значение	195,1	75,6	19,23	8,6	5,9
	6	Опыт №1	74,9	32,8	10	4	3
		Опыт №2	82,7	30,2	10,7	4,7	3,2
		Опыт №3	82,7	29,8	10,9	5	2,7
		Среднее значение	80,1	30,93	10,53	4,57	2,97
	7	Опыт №1	55,6	19,7	7,3	2,2	2
		Опыт №2	58,3	18,7	6,6	2,7	2,1
		Опыт №3	62,7	17,9	7,3	2,4	2
		Среднее значение	58,87	18,77	7,07	2,43	2,03
8	Опыт №1	43,7	14,9	5,2	1,8	1,2	
	Опыт №2	40,3	14,1	5,6	1,6	1,3	
	Опыт №3	44,1	14	5,6	1,7	1,4	
	Среднее значение	42,7	14,3	5,47	1,7	1,3	
9	Опыт №1	25,4	8	3,1	1,1	0,6	
	Опыт №2	25,2	8,3	3,4	1,3	0,7	
	Опыт №3	25,6	7,9	3,2	1,3	0,9	
	Среднее значение	25,4	8,07	3,23	1,23	0,73	
10	Опыт №1	23,1	5,6	2	0,8	0,6	
	Опыт №2	23,3	5,1	1,7	0,9	0,7	
	Опыт №3	23,6	5,5	1,9	1	0,6	
	Среднее значение	23,3	5,4	1,87	0,9	0,63	

На основании табл. 2 был построен график (рис. 1) и увеличено (рис. 2).

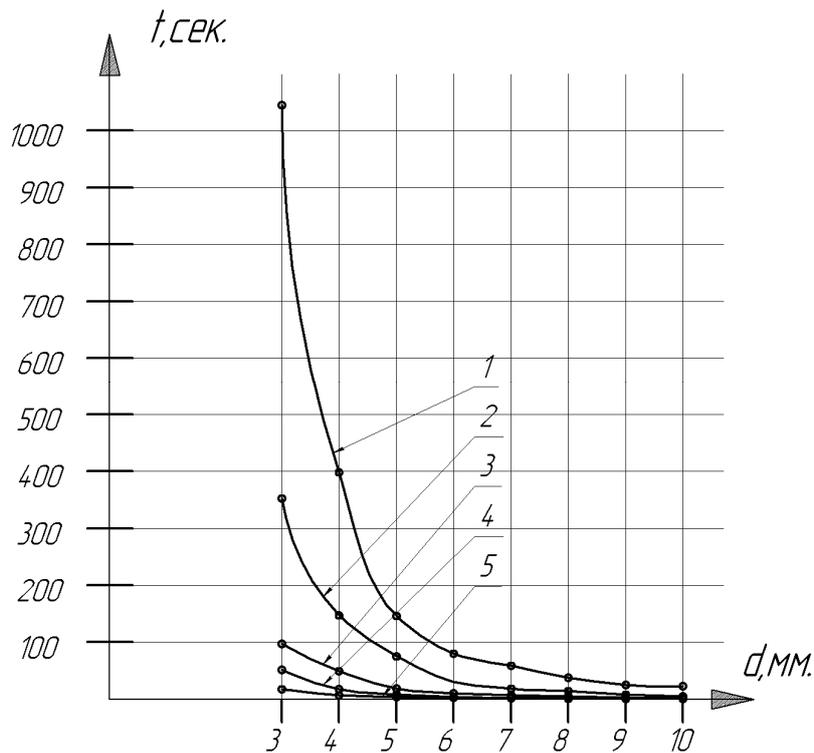


Рис. 1. График зависимости времени истечения клеевого композита  $t(\text{сек.})$  от температуры  $T(^{\circ}\text{C})$  для различных диаметров  $d(\text{мм.})$  отверстий:  
 1 – экспериментальные значения для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 2 – экспериментальные значения для  $30^{\circ}\text{C}$ ;  
 3 – экспериментальные значения для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 4 – экспериментальные значения для  $50^{\circ}\text{C}$ ;  
 5 – экспериментальные значения для  $60^{\circ}\text{C}$ .

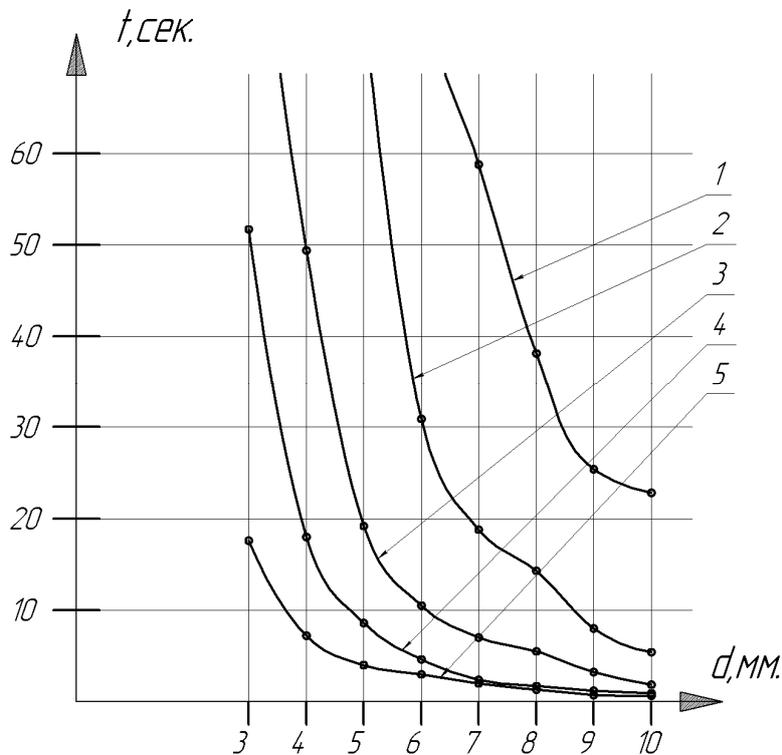


Рис.2. График зависимости времени истечения клеевого композита  $t(\text{сек.})$  от температуры  $T(^{\circ}\text{C})$  для различных диаметров  $d(\text{мм.})$  отверстий, увеличенный:  
 1 – экспериментальные значения для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 2 – экспериментальные значения для  $30^{\circ}\text{C}$ ;  
 3 – экспериментальные значения для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 4 – экспериментальные значения для  $50^{\circ}\text{C}$ ;  
 5 – экспериментальные значения для  $60^{\circ}\text{C}$ .

Далее проводился регрессионный анализ полученных графиков в среде программы “Advanced Grapher” и были получены точные и адекватные (на всем участке исследования) математические модели данного процесса (рис. 3) и увеличено (рис. 4). Что дало возможность получить формулу описывающую данный физический процесс.

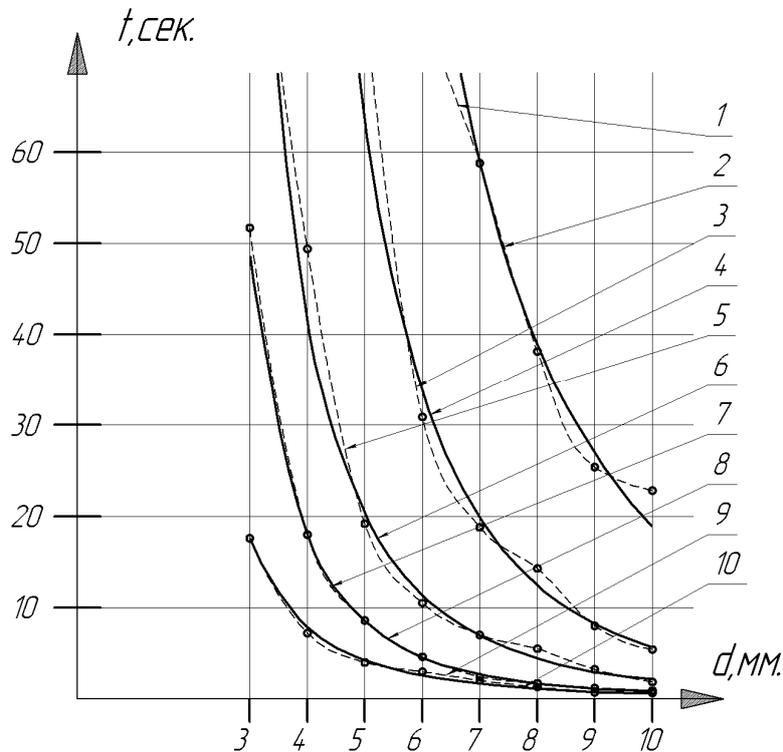


Рис. 3. Математическая модель, выражающая зависимости времени  $t(\text{сек.})$  истечения клеевого композита от температуры  $T(^{\circ}\text{C})$  для различных диаметров  $d(\text{мм.})$  отверстий, в сравнение с экспериментальными данными: Экспериментальные значения: 1 – для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 3 – для  $30^{\circ}\text{C}$ ; 5 – для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 7 – для  $50^{\circ}\text{C}$ ; 9 – для  $60^{\circ}\text{C}$ . Математическая модель по индивидуальной формуле: 2 - для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 4 - для  $30^{\circ}\text{C}$ ; 6 - для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 8 - для  $50^{\circ}\text{C}$ ; 10 - для  $60^{\circ}\text{C}$ .

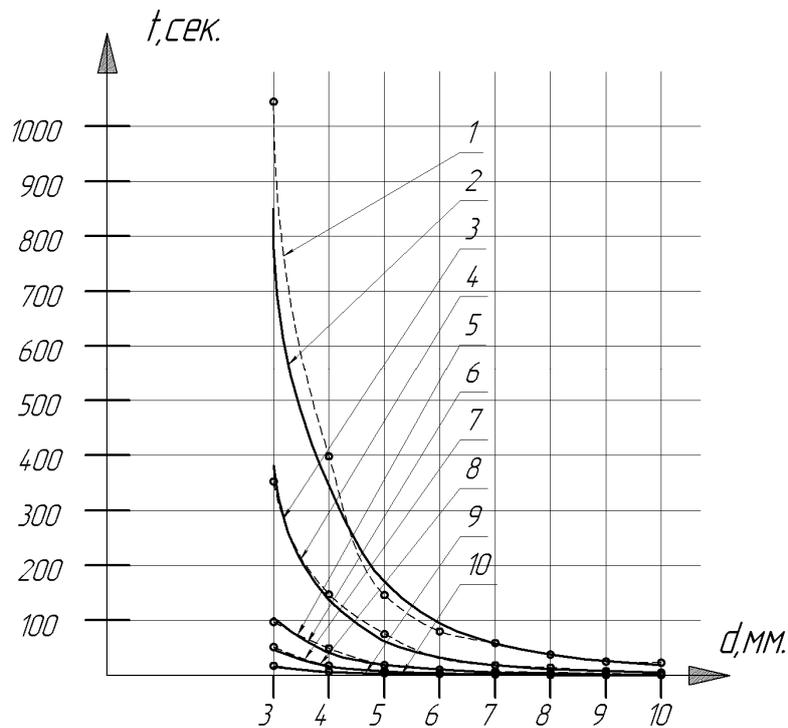


Рис. 4. Математическая модель по индивидуальной формуле, выражающая зависимости времени  $t$ (сек.) истечения клевого композита от температуры  $T(^{\circ}C)$  для различных диаметров  $d$ (мм.) отверстий, в сравнение с экспериментальными данными: Экспериментальные значения: 1 – для 20 $^{\circ}C$ ; 3 – для 30 $^{\circ}C$ ; 5 – для 40 $^{\circ}C$ ; 7 – для 50 $^{\circ}C$ ; 9 – для 60 $^{\circ}C$ . Математическая модель по индивидуальной формуле: 2 - для 20 $^{\circ}C$ ; 4 - для 30 $^{\circ}C$ ; 6 - для 40 $^{\circ}C$ ; 8 - для 50 $^{\circ}C$ ; 10 - для 60 $^{\circ}C$ .

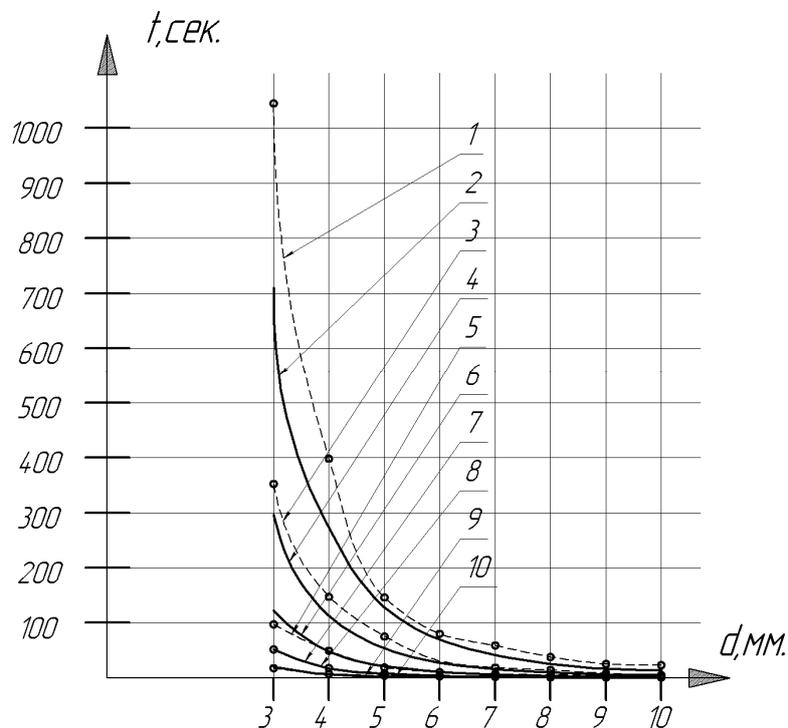


Рис. 5. Математическая модель по общей формуле, выражающая зависимости времени  $t$ (сек.) истечения клевого композита от температуры  $T(^{\circ}C)$  для различных диаметров  $d$ (мм.) отверстий, в сравнение с экспериментальными данными: Экспериментальные значения: 1 – для 20 $^{\circ}C$ ; 3 – для 30 $^{\circ}C$ ; 5 – для 40 $^{\circ}C$ ; 7 – для 50 $^{\circ}C$ ; 9 – для 60 $^{\circ}C$ . Математическая модель по общей формуле: 2 - для 20 $^{\circ}C$ ; 4 - для 30 $^{\circ}C$ ; 6 - для 40 $^{\circ}C$ ; 8 - для 50 $^{\circ}C$ ; 10 - для 60 $^{\circ}C$ .

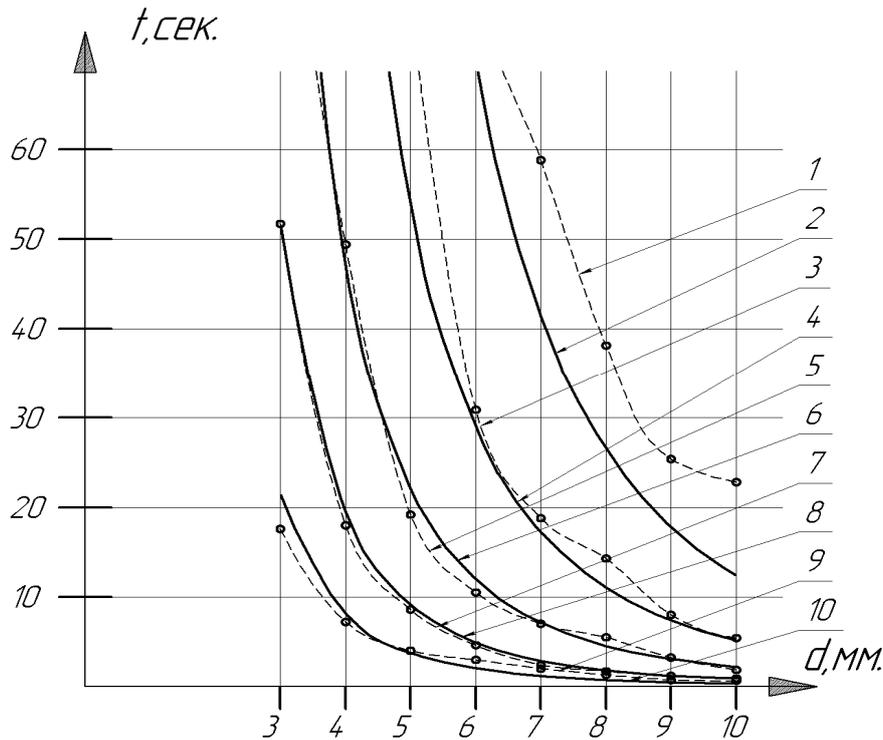


Рис. 6. Математическая модель по общей формуле, выражающая зависимости времени  $t(\text{сек.})$  истечения клевого композита от температуры  $T(^{\circ}\text{C})$  для различных диаметров  $d(\text{мм.})$  отверстий, в сравнение с экспериментальными данными: Экспериментальные значения: 1 - для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 3 - для  $30^{\circ}\text{C}$ ; 5 - для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 7 - для  $50^{\circ}\text{C}$ ; 9 - для  $60^{\circ}\text{C}$ . Математическая модель по общей формуле: 2 - для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 4 - для  $30^{\circ}\text{C}$ ; 6 - для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 8 - для  $50^{\circ}\text{C}$ ; 10 - для  $60^{\circ}\text{C}$ .

Погрешность индивидуальной модели не превышает 15%, для общей 30%, что дает возможность использовать ее в расчетах. Она может быть описана уравнением следующего вида:

Индивидуальная мат. модель

$$t_{20^{\circ}\text{C}} = 26860 \cdot d^{-3.14}$$

$$t_{30^{\circ}\text{C}} = 17875 \cdot d^{-3.5}$$

$$t_{40^{\circ}\text{C}} = 3640 \cdot d^{-3.22}$$

$$t_{50^{\circ}\text{C}} = 2030 \cdot d^{-3.4}$$

$$t_{60^{\circ}\text{C}} = 345 \cdot d^{-2.17}$$

Общая мат. Модель

$$t = e^{\frac{-3.5 \cdot T + 480 - 134 \cdot \ln(d)}{40}}$$

где  $d$  - диаметр трубопровода, мм.;  $T$  - температура, при которой клеевой композит течет по трубопроводу,  $^{\circ}\text{C}$ .

### Эксперимент №2.

При выполнении эксперимента необходимо ответить на вопрос: как меняется качество клевого соединения, если будет применена нагретая клеевая композиция.

Для проведения эксперимента выполнена подготовительная работа, были изготовлены экспериментальные образцы в количестве 32-ух штук из полосы сталь-3 ГОСТ 503-81, размером 55x25x4 мм. Полоса была нарезана ножовкой на мерные заготовки, затем торцы заготовок были обработаны на вертикально-фрезерном станке 6P13. Рабочие плоскости заготовок обработаны на плоскошлифовальном станке 3Б70В. Шероховатость образцов в представлена в табл.3. Измерение шероховатости производилось на профилографе - профилометре А-3, модель 201, по шкале  $R_a$  в микрометрах.

Таблица 3. Данные о шероховатости образцов предназначенных для склеивания.

№ пов.	Шерох. по 1 точке, Ra мкм	Шерох. по 2 точке, Ra мкм	Шерох. по 3 точке, Ra мкм	Средняя шерох. по 3 точкам, Ra мкм
1	2	3	4	5
1	0,18	0,175	0,145	0,167
2	0,23	0,17	0,23	0,21
3	0,225	0,2	0,105	0,177
4	0,12	0,14	0,12	0,127
5	0,11	0,19	0,1	0,133
6	0,26	0,25	0,245	0,252
7	0,22	0,215	0,185	0,207
8	0,32	0,13	0,125	0,192
9	0,17	0,28	0,12	0,19
10	0,07	0,1	0,11	0,093
11	0,14	0,25	0,27	0,22
12	0,175	0,17	0,12	0,155
13	0,175	0,25	0,22	0,215
14	0,05	0,13	0,075	0,085
15	0,27	0,245	0,13	0,215
16	0,195	0,175	0,115	0,162
17	0,165	0,13	0,145	0,147
18	0,175	0,24	0,13	0,182
19	0,1	0,095	0,175	0,123
20	0,21	0,315	0,18	0,235
21	0,26	0,14	0,19	0,197
22	0,195	0,13	0,155	0,16
23	0,225	0,13	0,248	0,201
24	0,215	0,1	0,11	0,142
25	0,238	0,21	0,13	0,193
26	0,22	0,17	0,065	0,152
27	0,28	0,28	0,21	0,257
28	0,045	0,185	0,245	0,158
29	0,1	0,1	0,05	0,083
30	0,125	0,148	0,261	0,178
31	0,05	0,17	0,1	0,107
32	0,09	0,15	0,155	0,132
33	0,09	0,125	0,19	0,135
34	0,205	0,23	0,162	0,199
35	0,075	0,125	0,13	0,11
36	0,175	0,165	0,36	0,233
37	0,12	0,195	0,1	0,138
38	0,305	0,18	0,1	0,195
39	0,13	0,13	0,215	0,158
40	0,18	0,07	0,12	0,123

Таблица 3. Продолжение.

1	2	3	4	5
41	0,185	0,275	0,17	0,21
42	0,205	0,205	0,15	0,187
43	0,21	0,12	0,1	0,143
44	0,17	0,165	0,05	0,128
45	0,3	0,25	0,18	0,243
46	0,205	0,2	0,21	0,205
47	0,12	0,13	0,08	0,11
48	0,085	0,09	0,1	0,092
49	0,21	0,175	0,155	0,18
50	0,205	0,145	0,125	0,158
51	0,15	0,16	0,21	0,173
52	0,24	0,23	0,255	0,242
53	0,17	0,275	0,135	0,193
54	0,155	0,225	0,21	0,197
55	0,18	0,1	0,26	0,18
56	0,18	0,32	0,32	0,273
57	0,195	0,225	0,225	0,215
58	0,17	0,23	0,14	0,18
59	0,235	0,195	0,135	0,188
60	0,265	0,175	0,06	0,167
61	0,135	0,16	0,2	0,165
62	0,25	0,22	0,215	0,228
63	0,105	0,075	0,315	0,165
64	0,12	0,135	0,21	0,155

Далее подготавливался эпоксидный клей, приготовленный из эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя «ПЭПА» (полиэтилен - полиамид), в пропорции 1/10, с тщательным перемешиванием до равномерной консистенции.

Затем было выполнено обезжиривание поверхности при помощи Уайт Спирита «ТУ 0251-001-71162433-2009» методом протирки, после чего на одну из поверхностей наносился клей.

После производилось сопряжение образцов внахлест так, что бы площадь контакта составляла 30x25 мм. Контактное давление на клеевой слой обеспечивалось равномерно благодаря металлическими скрепками.

Образцы, склеенные эпоксидной смолой, при разной температуре 20 °С-60 °С с шагом 20 °С, выдерживались в течение определенных промежутков времени 2, 4, 6, 16.5 часов.

Далее образцы подвергались разрушению при нагрузке на сдвиг. Величина нагрузки, при которой происходило разрушение, фиксировалась индикатором-динамометром. Нагрузка задавалась резьбовым прессом вручную.

Данные полученные при выполнении эксперимента представлены в таблице 4. Некоторые значения являются явно недостоверными и не учитывались в дальнейшем, в таблице они выделены жирным шрифтом.

Таблица 4. Зависимость прочности клеевого соединения от длительности выдержки и температуры наносимого композита.

			Температура нагрева клеевого композита, °С		
			20	40	60
Время выдержки клеевого соединения, часов.	2	Опыт № 1	-	-	26
		Опыт № 2	-	-	28,70
		Опыт № 3	-	-	
		Среднее значение	0	0	27,35
	4	Опыт № 1	38,4	53,1	162,3
		Опыт № 2	43,8	55,6	135,4
		Опыт № 3	51,8	59,5	154,85
		Среднее значение	44,67	56,07	150,85
	6	Опыт № 1	201,5	556,8	787,2
		Опыт № 2	284,1	577,2	431,4
		Опыт № 3	354,5	570,9	<b>243,2</b>
		Среднее значение	420,05	568,3	609,3
	16,5	Опыт № 1	579,8	710,5	1171,2
		Опыт № 2	681	741,1	1159,7
		Опыт № 3	<b>1006</b>	748,9	<b>444,2</b>
		Среднее значение	630,4	733,5	1165,45

По полученным значениям был построен график, наглядно отображающий результат проделанной работы (рис. 7).

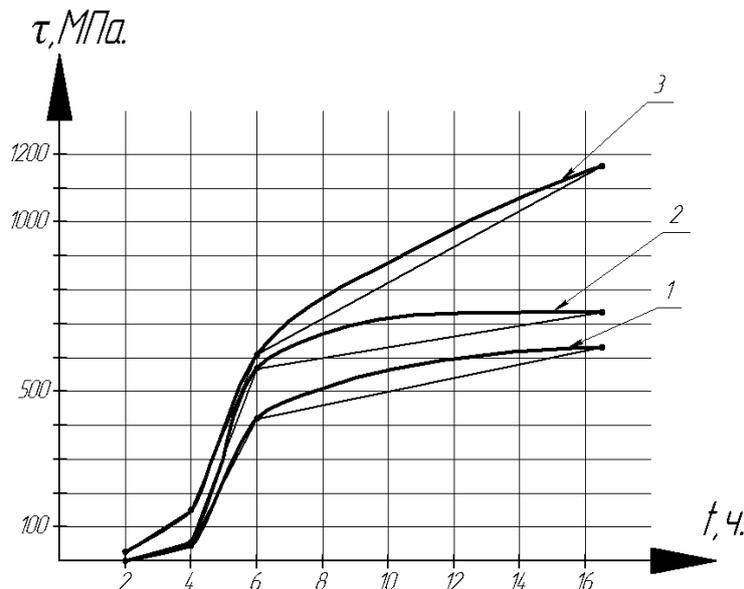


Рис. 7. График зависимости предельного напряжения  $\tau$  (МПа.) на срез нахлесточного клеевого соединения от длительности выдержки  $t$  (ч.) и температуры  $T$  (°C) наносимого композита:

- 1 – экспериментальные значения для 20 °С; 2 - экспериментальные значения для 40 °С;  
3 - экспериментальные значения для 60 °С.

На конечном этапе проводился регрессионный анализ полученных графиков в среде программы “Advanced Grapher” и были получены точные и адекватные (при  $t > 4$ ч.) математические модели данного процесса (рис. 8).

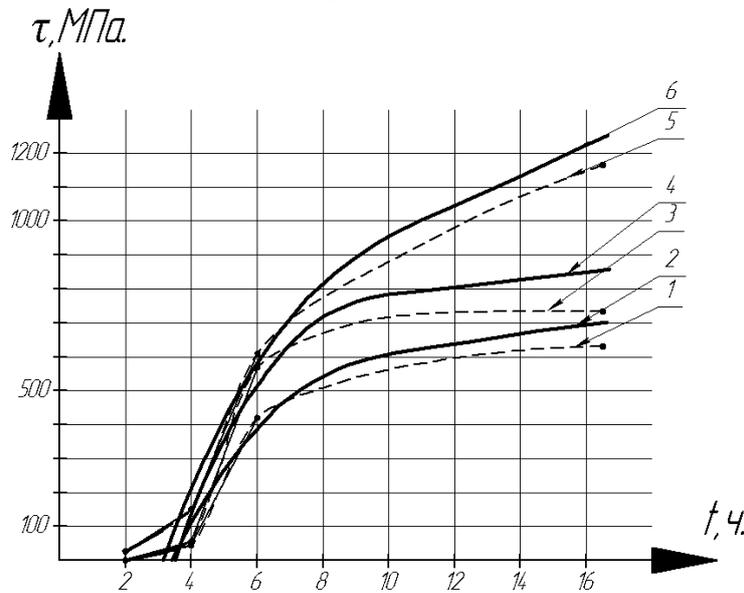


Рис. 8. Математическая модель, выражающая зависимости предельного напряжения  $\tau$ (МПа.) на срез нахлесточного клеевого соединения от длительности выдержки  $t$ (ч.) и температуры  $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) наносимого композита: Экспериментальные значения:

1 – для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 3 – для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 5 – для  $60^{\circ}\text{C}$ . Математическая модель по общей формуле: 2 - для  $20^{\circ}\text{C}$ ; 4 - для  $40^{\circ}\text{C}$ ; 6 - для  $60^{\circ}\text{C}$ ;

Погрешность индивидуальной модели не превышает 15% а, для общей 20%, что дает возможность использовать ее в расчетах. Она может быть описана уравнением следующего вида:

Индивидуальная мат. модель	Общая мат. Модель
$\tau_{20^{\circ}\text{C}} = 0.88 \cdot t^3 - 32.96 \cdot t^2 + 409.43 \cdot t - 1093.85$	$\tau = (-0.0011 \cdot T^2 + 0.09 \cdot T - 0.4$
$\tau_{40^{\circ}\text{C}} = 1.36 \cdot t^3 - 50.1 \cdot t^2 + 598.8 \cdot t - 1592.4$	$-(-0.0391 \cdot T^2 + 3.19 \cdot T - 15.2)$
$\tau_{60^{\circ}\text{C}} = 0.98 \cdot t^3 - 36.1 \cdot t^2 + 476.96 \cdot t - 1204$	$+(-0.39 \cdot T^2 + 32.9 \cdot T - 91.15) \cdot$
	$-(-1.1 \cdot T^2 + 91.45 \cdot T - 291.65)$

где  $t$  – время выдержки клеевого соединения, ч.;  $T$  – температура наносимого композита,  $^{\circ}\text{C}$ .

#### Выводы:

В результате проведенного исследования, были получены зависимости, анализируя которые, можно сделать следующие важные выводы:

1. Доказана возможность применения высоковязких клеев при автоматизации сборки клеевых соединений, используя нагрев клеевой композиции до обеспечения вязкости требуемой для беспрепятственной транспортировки к сборочной позиции при обеспечении требуемого качества сборки, используя нагрев клеевой композиции.

2. Прослеживается четкая зависимость скорости течения вязкого клея (или времени течения) от температуры его нагрева. При этом, чем выше температура нагрева, тем выше скорость истечения. Например, для отверстия диаметром 3 мм скорость при изменении температуры клея от  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  увеличивается почти в

30 раз, достигая значений скорости течения низковязких клеев, хорошо поддающихся автоматизации.

3. Наглядно продемонстрировано, как сглаживаются исследуемые характеристики при повышении температуры клея. Данная особенность позволяет сделать вывод, что диаметр транспортной системы начинает играть вторичную роль, без значительного ущерба к скорости перемещения клея к месту сборки. Это позволит делать более компактную и экономичную сборочную оснастку.

2. Независимо от температуры нагрева клея выявлена явная зависимость прочности клеевого соединения от времени отверждения. Как видно из графика при времени отверждения до 4 часов прочностные характеристики у образцов сравнимы, независимо от температуры нагрева клеевой композиции.

3. Существенное влияние на прочностные характеристики соединения оказывает температура наносимого клеевого состава. Важно отметить, что существенное влияние на прочностные характеристики температура нагрева начинает оказывать спустя 10 часов выдержки. Так для эпоксидного клея на основе смолы ЭД-20 после 16 часов выдержки прочность на сдвиг увеличилась почти в 2 раза, при температуре наносимого клея  $+60^{\circ}\text{C}$  по сравнению с температурой  $+20^{\circ}\text{C}$ .

4. Проведенные исследования показали необходимость учитывать граничные условия применения предлагаемого метода. Так, например, для эпоксидных клеев это температура в  $+60^{\circ}\text{C}$ . Превышение температуры вызывает деструкцию клеевой композиции, из-за выкипания составляющих. Перегретый клей после отверждения становится повышенно хрупким, и резко теряет физико-механические характеристики, например пластичность, прочность и др.

5. Выведены математические модели физических процессов, которые обладают достаточной точностью и адекватностью, что позволяет проводить предварительные инженерные расчеты.

Проведенное исследование открыло новые возможности на пути автоматизации технологических процессов сборки. Расширило гамму клеевых композиций, привлекаемых для реализации поточного сборочного производства. При этом важно отметить, что результаты исследования позволяют снизить капиталовложения при создании новой техники, направленной на повышение уровня автоматизации технологических процессов сборки. Вызвано это тем, что теперь нет необходимости заботиться о повышенной жесткости таких конструкций, что приводит к материалоемкости. Появилась возможность применять облегченные материалы, не требующие сложных технологических процессов обработки. Улучшение проходимости клея по транспортной системе позволит упростить систему слежения за этим процессом, что также уменьшает требуемые капиталовложения. Все перечисленные положительные особенности позволяют говорить о высокой вероятности снижения себестоимости выпускаемой продукции, в которой используются клеевые соединения. Применение автоматизации технологических процессов сборки положительно сказывается на качестве изделия и производительности. Таким образом, проведенная работа наглядно показала свою актуальность и востребованность. Особенно ценно в ней то, что все выводы подтверждены экспериментально.

#### Литература.

1. *Игнатов А.В.* применение клеев при сборке изделий в машиностроении: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 43с., ил.
2. *Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.* Расчеты на прочность деталей машин Справочник - М: Машиностроение, 1993г. - 640с.