



Ресурсная прочность клеевых соединений

Г.Н. Финогенов

А.П. Петрова

Май 2005

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Клеи. Герметики. Технологии», № 11, 2005 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Ресурсная прочность клеевых соединений

Г.Н. Финогенов, А.П. Петрова

Всероссийский институт авиационных материалов

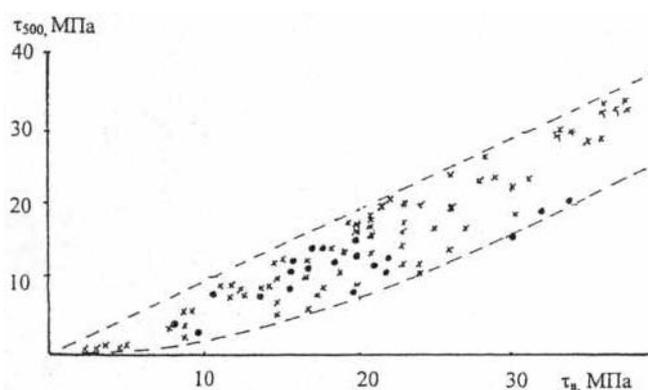
В статье показана возможность оценки ресурсной прочности клеевых соединений металлов и неметаллов с помощью показателей длительной прочности и деформационной жесткости.

Показателем ресурсной прочности (РП) клеевых соединений (КС), используемых в изделиях силовых конструкций машиностроения и авиатехники, может служить длительная прочность (ДП) – величина напряжения, которое выдерживает клей в КС длительно, не разрушаясь. Опыт показывает, что в КС металлов разрушение происходит или по границе раздела металл–клей (адгезионный характер разрушения) или по самому клею (когезионный). Величина показателя ДП и характер разрушения КС существенно зависят от химического состава клея, технологии склеивания, способа обработки поверхности склеиваемого материала. Факторы технологии склеивания влияют на ДП не менее, чем когезионная прочность самого клея.

Показатель ДП определяют по экспериментальной зависимости времени разрушения образцов КС от напряжения. В практике авиационной отрасли лабораторные испытания проводят по методу ОСТ 1-900–92, который гармонизирован с аналогичными стандартами ИСО и ASTM. При разработке новых клеев оценочным показателем ДП служит величина напряжения при сдвиге (τ) за время $t=500$ ч, т.е. критерий τ_{500} . База времени может быть иной, например, в соответствии с ТУ на клей и условиями работы для конкретного изделия. В этом случае среднее значение показателя ДП (τ_t) сопровождается величиной погрешности (ξ), определяемой по формуле: $\xi=f/\tau_t \cdot 100\%$, где f – коэффициент, зависящий от дисперсии, количества испытанных образцов,

принятого уровня доверия. В данной работе приводятся средние значения показателя ДП (τ_{500}) без величины погрешности.

Обработка результатов испытаний клеев более 80 наименований показала нелинейный вид и большую дисперсию корреляционной зависимости между средней величиной показателя ДП (τ_{500}) и пределом прочности клея (τ_b) в КС Д16АТ и 30ХГСА (см. рисунок). При одинаковом значении предела прочности при сдвиге показатель ДП клеев разных марок может отличаться на порядок величины. В большинстве случаев КС Д16АТ имеют более высокие значения ДП по сравнению с КС стали 30ХГСА.



Обработка результатов экспериментальных исследований клеевых соединений металлов: • – сталь 30ХГСА; × – сплав Д16АТ

Разброс средних значений ДП (τ_{500}) на клеях различной природы указывает на возможность модификации состава клея, технологии склеивания, обработки поверхности склеиваемого материала. Например, для клеев на основе эпоксидных смол и их модификаций полиамидом, каучуком, полисульфоном, резорцином, ацеталем, изоцианатом величина показателя ДП при 20°C может изменяться в пределах: для КС Д16АТ – от 1,2 МПа (алюмохромфосфатный клей ВК-21) до 35 МПа (клей ВК-51 модифицированный эпоксидный) и для 30ХГСА – от 3,8 МПа (элементоорганический клей ВК-15) до 19 МПа (эпоксидный клей ВКП-1). Для эпоксидных клеев в указанный диапазон прочности попадают те КС, в которых для обработки поверхности образцов Д16АТ перед склеиванием применяли зашкуривание, анодирование в серной или хромовой кислоте, травление, покрытие грунтом, введение добавок (маршаллит, оксид циркония,

оксид титана). Для обработки образцов стали 30ХГСА во всех случаях применяли опескоструивание. Следует отметить также, что в большинстве случаев применение клея в виде пленки дает более высокие значения показателя ДП по сравнению с применением жидкого клея в КС Д16АТ и 30ХГСА. В табл. 1 приведены максимальные значения показателя ДП среди клеев для типовых соединений металлов в изделиях авиационной техники.

Таблица 1.

Показатель длительной прочности при сдвиге (τ_{500})
клеевых соединений металлов

Склеиваемый материал	Обработка образцов	Марка клея	Химическая природа клея	Температура испытаний, °С	τ_{500} , МПа
Д16АТ 30ХГСА	Грунт ЭП-0235 Опескоструивание	ВК-51	Эпоксикаучуковый (пленочный)	20	35
		ВКП-1	Эпоксиполиамидный		19
Д16АТ 30ХГСА	Анодирование Опескоструивание	ВК-31	Эпоксикаучуковый	80	20
		ВК-3	Фенолакаучуковый		7
Д16АТ 30ХГСА	Анодирование Опескоструивание	ВК-44	Эпоксидный	200	6,4
		ВК-18	Фенолокремнийорганический		5,2
30ХГСА	Опескоструивание	ВК-20	Поликарборановый	300	3,7
30ХГСА	»	ВК-47	Кремнийорганический	400	1,2
30ХГСА	»	ВК-49	Фенолокремнийорганический	500	0,7

При температурах до 200°С КС на Д16АТ имеют преимущество перед КС стали 30ХГСА. Об этом свидетельствуют контрольные испытания на клеях разного химического состава. Однако в диапазоне 300–1000°С преимущество КС 30ХГСА бесспорно. Вопрос в том, какой ресурс прочности имеют КС 30ХГСА при таких высоких температурах. Так, при 1000°С не более 100 ч ресурс прочности сохраняет только кремнийорганический клей ВК-15 с асбестом в качестве наполнителя.

Показатели ДП при сдвиге КС неметаллов, в качестве примера, представлены в табл. 2. Из данных таблицы следует, что чем однороднее склеиваемые материалы (например, стеклотекстолит и стеклотекстолит), тем выше показатель ДП. Хуже ведут себя разнородные соединения неметаллов (органик и стеклотекстолит или термопласт и органик) или сочетания стали и стеклотекстолита. Для повышения прочности склеивания разнородных

неметаллов требуются особые приемы технологии обработки поверхностей материалов.

Таблица 2.

Показатель длительной прочности при сдвиге (τ_{500})
клеевых соединений неметаллов

Склеиваемые материалы	Марка клея	Химическая природа клея	Температура испытаний, °С	τ_{500} , МПа
Стеклотекстолит ЭДТ-10П + Стеклотекстолит ЭДТ-10П	ВК-50	Фенолокаучуковый	20	11,2
Стеклотекстолит ВПС + Органит-7т			80	5,6
			20	7,0
Органит-7т + ПАП-6 (капрон-фенилон)			80	3,6
			20	4,5
Стеклотекстолит СП-6 + Стеклотекстолит СП-6			СП-6А	Полиимидный (с асбестом)
Стеклотекстолит ВФТ + Стеклотекстолит ВФТ	УП-63-1Д	Эпоксидный	20	5,5
			60	4,9
Стеклопластик + Сталь 30ХГСА	УП-637Б	Резорциновый	20	14,5
			60	10,0
			20	6,0
			60	0,8

Примечание. Все образцы материалов предварительно зашкуривали.

Деформативная жесткость, в ряде случаев, также может служить показателем РП клеевых соединений. Однако в элементах силовых конструкций этот показатель редко используют по той причине, что разрушение КС может наступить раньше, чем разовьются безопасные (или заданные) деформации в клеевом слое. Это происходит из-за ничтожно малой клеевой массы в КС. Например, типичная толщина клеевого слоя (h_k) в КС металлов не более 0,1 мм. Кроме того, в силовых конструкциях действуют относительно большие эксплуатационные нагрузки, препятствующие развитию деформации ползучести клея и разрушающие его.

Другое дело, когда клей работает в деталях приборов, где нагрузки в ряде случаев ничтожно малы, а фактор времени работы деталей превалирует в расчетах их рабочего ресурса. Здесь важно, по-видимому, иметь представление о жесткости КС, которая может характеризоваться модулем жесткости при ползучести, определяемым по формуле: $G = \tau h_k / \delta_t$, где δ_t – деформация КС за время t . Исследования показали, что эта величина зависит не только от деформации КС во времени, но и от равномерности толщины

слоя клея по площади склеивания. В табл. 3 дан расчет модуля жесткости КС по данным замеров деформации образцов Д16АТ, соединенных клеем ВК-36, при нормальной температуре. Из данных табл. 3 следует, что расчетная жесткость КС при средней толщине клеевого слоя в образцах ~0,11 мм при выдержке образцов под напряжением 10 МПа в течение 1000 ч может снижаться почти в два раза. Обращают на себя внимание относительно высокие значения ползучести клея при сдвиге (γ), рассчитанной по формуле: $\gamma = \delta_t / h_k \cdot 100\%$. Данные табл. 3 получены при испытаниях образцов КС по методу РТМ 12015–81 (ВИАМ).

Таблица 3.

Жесткость соединений образцов сплава Д16АТ,
выполненных клеем ВК-36

t, ч	τ , МПа	$\delta_t \cdot 10^3$, мм	γ , %	G, МПа, при толщине клеевого шва, мм		
				0,13*	0,09**	0,11***
1	10	5,5	4,2	236	163	200
10		6,4	4,9	203	140	177
100		7,2	5,5	180	125	152
1000		9,2	7,1	141	70	119

* Толщина клеевого шва на конце нахлестки.

** Толщина клеевого шва в середине нахлестки.

*** Толщина клеевого шва средняя.