

УДК 667.621.262.2:629.7.018.4

А.В. Гриневич, А.П. Петрова

СОЕДИНЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЗКАМ

Исследуется проблема соединения разнородных материалов для конструкций, подверженных импульсным нагрузкам. Установлено, что традиционный подход к выбору высокопрочного клея не обеспечивает работоспособность соединения. Предложен вариант реализации соединения на основе склеивающего слоя с высокой деформационной способностью. Экспериментально подтверждено, что при импульсных нагрузках поведение конструкций определяется упругопластическими характеристиками склеиваемых материалов.

Ключевые слова: клеи, импульсные нагрузки, деформативность.

The problem of joining of heterogeneous materials used in constructions subjected to pulse loadings is studied. It was stated that a conventional approach to a selection of high-strength adhesive does not ensure the required level of workability of adhered joints. A joining technique based on application of adhering layer with a high deformation capacity is offered. It was verified experimentally that a behavior of structures under pulse loading depends on the elasto-plastic properties of materials subjected to joining.

Key words: adhesive, pulse loading, deformability.

В практике эксплуатации изделий возможны случаи воздействия на конструкции импульсных нагрузок. Импульсное нагружение возникает при соударении самолета с птицей, падении тяжелого предмета на конструкцию, попадании пули в бронезащиту или, например, в космосе, при взаимодействии с метеоритом. Импульсное нагружение характеризуется практически мгновенным нарастанием нагрузки, которое существенно отличается от условий статического нагружения при испытаниях клеевых соединений на растяжение или сжатие.

Степень повреждения при импульсном нагружении определяется величиной нагрузки и характером ее нарастания. Повреждаемость склеенной конструкции возникает не только при непосредственном импульсе, но и после его воздействия, поскольку возникает волна разгрузки, при которой на клеевое соединение действуют усилия отрыва.

Особенно критично при воздействии импульсных нагрузок поведение клеевых соединений разнородных материалов, поскольку к напряжениям, возникающим при воздействии ударной волны, в процессе эксплуатации добавляются напряжения, связанные с различием температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) склеенных материалов [1].

Для оценки работоспособности клея в системе из разнородных материалов, которая подвержена действию импульсной нагрузки, использовалась конструкция из керамики на основе карбида кремния, соединяемого с алюминиевым сплавом. Импульсное нагружение осуществлялось стальным индентором со стороны керамических элементов при скорости соударения ~750 м/с.

Поскольку при соударении возникают значительные напряжения отрыва, то для склеивания представлялось целесообразным применение

наиболее высокопрочного эпоксидного пленочного клея, обеспечивающего надежное соединение керамики и алюминиевого сплава [2, 3]. Для соединения карбида кремния и алюминиевого сплава использовался эпоксидный пленочный высокопрочный клей ВК-51.

Свойства соединения на основе клея ВК-51, полученного при склеивании листов из алюминиевого сплава Д16-АТ, приведены в табл. 1.

Для оценки эксплуатационной работоспособности клеевых композиций при соединении разнородных материалов необходимо учитывать температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР), значения которых приводятся в табл. 2.

Применение высокопрочного клея ВК-51 не дало положительного результата, поскольку волна разгрузки привела к отслаиванию керамики от алюминиевого сплава. На рис. 1 приведен характер отслаивания керамики из карбида кремния от алюминиевой подложки после воздействия на клеевое соединение данной конструкции высокоскоростным ($v=754$ м/с) стальным индентором.

Попытки применения опытных клеев с более высокими адгезионными и прочностными характеристиками также не дали положительных результатов. Деформационная волна разгрузки не только неизбежно приводила к разрушению клеевого соединения, но и к расколу самой керамики. Насколько велика упругая отдача можно судить по разрушению керамической пластины, находящейся вне зоны соударения с индентором. Разрушение соседней керамической пластины от волны разгрузки иллюстрируется рис. 2.

Решение проблемы получения работоспособного соединения керамики и алюминиевого сплава найдено не в направлении повышения прочности склеивания, а путем повышения деформаци-

Таблица 1

Свойства клеевых соединений и пленок из клея ВК-51 и герметика У-2-28

| Склеиваемый материал | Предел прочности при сдвиге, МПа, при температуре испытаний, °С | | | Прочность при отслаивании, кН/м | Относительное удлинение отвержденной пленки, % |
|----------------------|---|------|-----|---------------------------------|--|
| | 20 | 80 | 300 | | |
| ВК-51 | 35,3 | 27,4 | – | 0,5–0,6 | 6 |
| У-2-28 | 1,8 | – | 0,4 | 1,5 | 275 |

Таблица 2

Температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР)

| Материал | ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|----------------------|-----------------------------------|
| Д16-АТ | 24,7 (20–300°С) |
| Органит 7Т | 5,1 (20–150°С) |
| Карбид кремния (SiC) | 5,68 (20–300°С) |



Рис. 1. Характер разрушения при отслаивании пластины из карбида кремния от алюминиевого сплава



Рис. 2. Разрушение керамической пластины вне зоны импульсного нагружения



Рис. 3. Фрагменты разрушенного керамического элемента после импульсного нагружения



Рис. 4. Характер разрушения конструкции из карбида кремния и Органита ВКО-2ТБ

онной способности клеевого слоя. В качестве модельного материала соединения был выбран герметик У-2-28, удлинение отвержденной пленки которого составляло не менее 275% [4]. Склеивание герметиком У-2-28 проводилось с применением подслоя П-11 [5]. Свойства клеевых соединений и пленок из герметика У-2-28 представлены в табл. 1. Сопоставление герметика У-2-28 с клеем ВК-51 показывает, что при более низкой прочности при сдвиге (почти в 20 раз) герметик У-2-28 превосходит высокопрочный клей по деформативности более чем в 45 раз. Высокая деформационная способность герметика позволила демпфировать волну разгрузки, что обеспечило работоспособность клеевого соединения. При данном решении удалось избежать отслаивания керамики от металла. На рис. 3 представлен характер неизбежного хрупкого разрушения керамики, но при этом фрагменты разрушенной керамики частично остаются приклеенными к алюминиевому сплаву. Однако из-за высокого упругого последствия алюминиевой составляющей и больших пластических деформаций крайне сложно избежать раскола керамических пластин, даже находящихся вне локальной зоны приложения импульсной нагрузки.

Решение проблемы разрушения хрупких керамических пластин при создании конструкции из разнородных материалов, подверженной импульсным нагрузкам, возможно как благодаря использованию высокодеформативного склеивающего слоя с вариацией его толщины, так и при переходе на конструкцию с другими упругопластическими характеристиками. Поскольку невозможно повысить прочность клея до уровня, обеспечивающего сохранение соединения при импульсной волне разгрузки, то естественным и логичным решением данной задачи является возможность погасить данную волну самим композиционным материалом, имеющим сложную структуру [6–9]. При переходе от металлической составляющей к полимерному композиционному материалу существенно уменьшается упругая отдача и остаточная пластическая деформация конструкционной составляющей для клеевого соединения разнородных материалов.

Импульсные испытания клеевого соединения, выполненного с применением клея ВК-51, в слоистой конструкции, состоящей из пластин карбида кремния и полимерного композиционного материала – Органита 7Т, основу которого составляет эпоксидная матрица, упрочненная арамидными волокнами, выявили его низкую работоспособность. Как и в случае склеивания керамики с металлом, использование высокопрочного клея при

импульсном нагружении привело к отслаиванию керамики от Органита 7Т.

Решение проблемы работоспособности при импульсных нагрузках сложной конструкции из карбида кремния с полимерным композиционным материалом было реализовано переходом с клея ВК-51 на герметик У-2-28 и использованием Органита ВКО-2ТБ, в котором высокопрочные арамидные волокна связаны относительно эластичной матрицей. Дополнительная гетерогенизация материала по толщине привела практически к ликвидации волны разгрузки, и определяющей характеристикой стало сопротивление отрывным нагрузкам при прямом нагружении [10].

На рис. 4 проиллюстрирована высокая работоспособность композиции с использованием герметика У-2-28 и Органита ВКО-2ТБ. Две пластины из карбида кремния в детали, подвергнутой пяти импульсным нагружениям стальным индентором по соседствующим элементам, не отслоились от подложки и не были разрушены.

В ряде случаев, когда применение полимерного композиционного материала с высокими демпфирующими характеристиками невозможно, для обеспечения работоспособности детали при импульсных нагрузках целесообразно использовать полиуретановые клеи [11]. Полиуретановые клеи позволяют решить проблему живучести слоистой композиции из разнородных материалов в условиях импульсного нагружения при обеспечении определенной толщины склеивающего слоя. Следует учитывать, что возможность относительного перемещения склеиваемых материалов обусловлена не только деформационными характеристиками склеивающего слоя, но и его толщиной. Этот фактор определяет также соединение материалов, имеющих разные ТКЛР. При этом у клея должна быть хорошая адгезия к склеиваемым поверхностям для реализации когезионного разрушения по клею.

Исследование импульсных возмущений полезно и при проектировании полимерных композиционных материалов [12]. Повышение прочности полимерных композиционных материалов достигается, в том числе, путем повышения прочности и, как следствие, жесткости матрицы. При этом снижается живучесть полимерных композиционных материалов, характеризуемая расслоением углепластика при незначительных ударах. Для определенных конструкций, работающих на растяжение, проблема живучести, т. е. сопротивление импульсным нагрузкам, могла быть снята применением более деформативной клеевой матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гейнрих Н.И., Мельников В.Н. Склеивание материалов с разными коэффициентами линейного разрушения //Клеи. Герметики. Технологии. 2007. №3. С. 29–33.
2. Баурова Н.И. Имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния клеевого соединения //Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №8. С. 28–31.
3. Баурова Н.И. Модели долговечности клеевого материала с применением аппарата теории катастроф //Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №10. С. 20–23.
4. Петрова А.П., Донской А.А. Клеящие материалы. Герметики. СПб: НПО «Профессионал» 2008. 589 с.
5. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Применение адгезионных грунтов и систем модификации поверхности при склеивании //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №9. С. 4–7.
6. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н., Чибиркин В.В., Елисеев В.В., Мартыненко В.А., Мускатиньев В.Г., Эмих Л.А., Вдовин С.М., Нищев К.Н. Свойства и применение высоконаполненного металломатричного композиционного материала Al–SiC //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №3–1. С. 56–59.
7. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенко Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 373–380.
8. Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Севастьянов В.Г., Гращенко Д.В., Кузнецов Н.Т., Каблов Е.Н. Функционально градиентный композиционный материал SiC/(ZrO₂–HfO₂–Y₂O₃), полученный с применением золь-гель метода //Композиты и наноструктуры. 2011. Т. 4. С. 52–64.
9. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из ММК Al–SiC в силовой электронике и преобразовательной технике //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 20–22.
10. Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актюировании материала //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 20–22.
11. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 328–335.
12. Гриневич А.В., Петрова А.П. Склеивание разнородных материалов в изделиях, подверженных импульсным нагрузкам //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №11. С. 19–21.