

Зайченко И. В., Бажеряну В. В., Соколова В. С.
I. V. Zaychenko, V. V. Bazheryanu, V. S. Sokolova

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ИЗДЕЛИЯ
И ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ**

**TECHNOLOGICAL CONTROL OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS PARTS
REPAIR AS PART OF THE PRODUCT AND ESTIMATION OF ENERGY COSTS**

Зайченко Илья Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

Mr. Ilya V. Zaichenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

Бажеряну Виктория Васильевна – студентка кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bazherianu@mail.ru.

Ms. Victoria V. Bazheryanu – Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bazherianu@mail.ru.

Соколова Вера Сергеевна – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sokolova.v.s@mail.ru.

Ms. Vera S. Sokolova – a Post-Graduate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sokolova.v.s@mail.ru.

Аннотация. В статье представлен анализ проблем, возникающих при проведении ремонта на производственном участке изготовления деталей из ПКМ филиала ПАО «Компания “Сухой” “КнААЗ им. Ю. А. Гагарина”». Обосновано внедрение автоматизированной системы управления электротехнологическими установками нагрева Hot Bonder. Приведено описание состава оборудования, данные временных и энергетических затрат при автоматизации технологического процесса ремонта деталей из ПКМ в составе изделия на производственном участке.

Summary. The article presents an analysis of the problems that arise during repairs at the production site to produce parts from PCM of Branch of PJSC Sukhoi Company, KoAAP named after Yuri Gagarin. The introduction of an automated control system for electrotechnological heating installations Hot Bonder is justified. A description of the composition of the equipment, data on time and energy consumption for the automation of the technological process of repairing parts from PCM as part of the product at the production site.

Ключевые слова: автоматизация, технология локального нагрева, энергоэффективность, полимерные композиционные материалы.

Key words: automation, local exposure technology, energy efficiency, polymer composite materials.

УДК 004.001.12/.18

В конструкции современных изделий авиационной техники применяется большое количество крупногабаритных деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе изготавливаемых по кооперации на других предприятиях. При сборке агрегатов происходят механические повреждения деталей и образуются дефекты, недопустимые в дальнейшей эксплуатации изделия [1; 3; 4; 5; 7].

Температура эксплуатации агрегатов с деталями из ПКМ, выходящими на теоретический контур (ТК) изделия, составляет не менее 150...175 °С. Поэтому проведение ремонта таких деталей клеями холодного отверждения недопустимо, т.к. рабочая температура клеев не выше 125 °С [6; 7; 8].

Проведение ремонта на производственном участке изготовления деталей из ПКМ филиала ПАО «Компания “Сухой” “КнААЗ им. Ю. А. Гагарина”» невозможно по следующим причинам:

- отсутствие формообразующей оснастки для изготовления деталей из ПКМ, полученных по кооперации;

- внутренний диаметр автоклава «Шольц», применяемого для автоклавного формования деталей, меньше габаритных размеров деталей из ПКМ, получаемых по кооперации;

- нет возможности демонтажа детали или агрегата из ПКМ с изделия.

Длительную работоспособность деталей из ПКМ, получивших механические повреждения, при температурных режимах 150...175 °С можно обеспечить только проведением ремонта горячим способом с применением локального нагревательного элемента, вакуумного насоса и материалов, применяемых для изготовления данных деталей [2; 9; 10].

Преимущества технологии локального ремонта деталей из ПКМ с применением портативной системы управления горячей склейкой:

- возможность проведения ремонта непосредственно на изделии;

- проведение локального нагрева не вызывает поводов деталей;

- обеспечение прочностных характеристик деталей из ПКМ после проведения локального ремонта методом горячей склейки заданным значениям за счёт использования при ремонте материалов, применяемых в данной конструкции деталей из ПКМ;

- снижение затрат на электроэнергию при склеивании без использования энергоёмкого оборудования автоклава «Шольц»;

- сокращение времени ремонта (не требуется время на разогрев материалоёмкой формообразующей оснастки и внутреннего объёма автоклава).

Для локального ремонта крупногабаритных деталей из ПКМ и клееных металлических конструкций в составе изделия необходимо специальное переносное оборудование. Принципиальная технологическая схема оборудования для локального ремонта представлена на рис. 1.

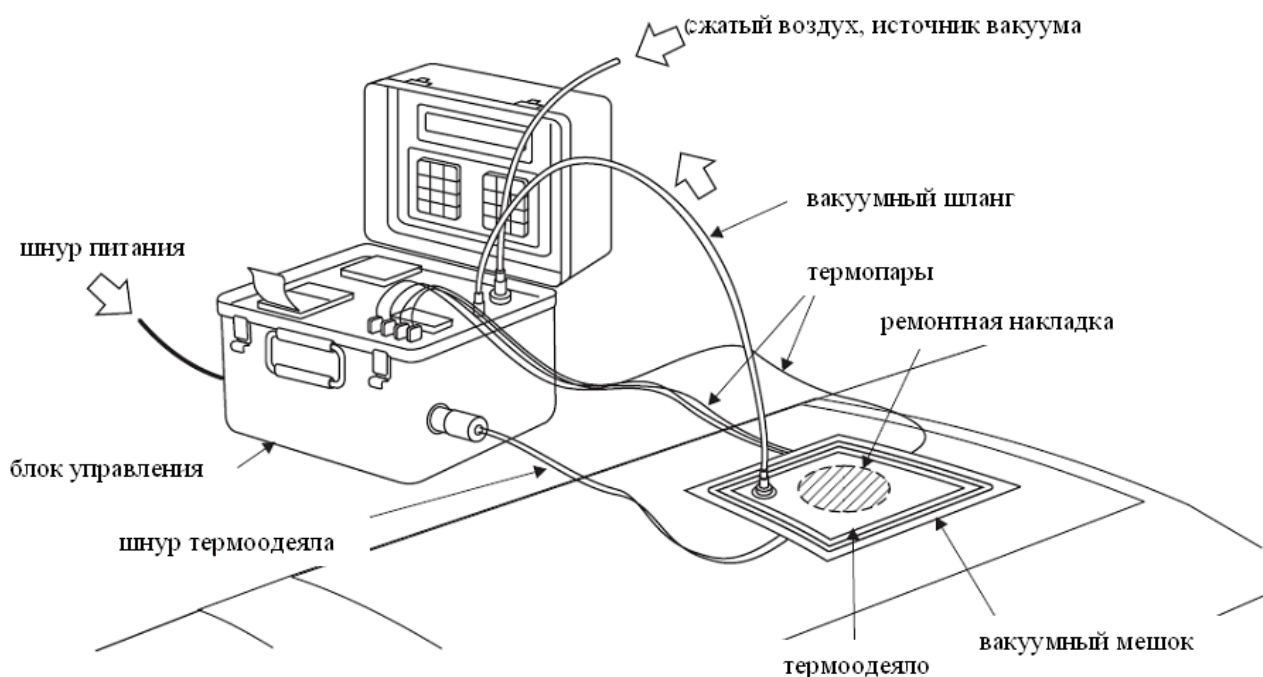


Рис. 1. Схема оборудования для локального ремонта

Производство установок для локального ремонта получило большое распространение и поддержку в связи с коммерческим успехом гражданских изделий компаний Boeing и Airbus, а также увеличением объёма деталей из ПКМ в изделиях военного назначения. Лидерами по производству подобных установок являются фирмы BriskHeat (США), Heatcon (США), WichTech (США) и Aeroform (Великобритания).

Впервые технология ремонта с применением локального нагрева была опробована на образце детали по следующей технологии:

1. Вырезают внутреннюю обшивку панели и сотовый наполнитель (СЗ) до наружной обшивки панели диаметром 60 мм.
2. Устанавливают накладку из стеклоткани Т-10 на клею холодного отверждения без наполнителя.
3. Устанавливают в отверстие вставку СЗ с нанесённым по торцам плёночным клеем.
4. Поверх сот выкладывают фторопластовую плёнку, затем устанавливают цулагу.
5. Производят выдержку клея при температуре 18...35 °С под грузом в течение 24 ч.
6. Производят неразрушающий контроль образца со стороны внутренней обшивки на расслоения и непрочности. Дефекты не должны быть обнаружены.
7. Изготавливают накладку из углепластика толщиной, равной толщине ремонтируемой обшивки.
8. На углепластиковую накладку выкладывают клеевой препрег. Нагрев клеевого препрега при выкладке производят феном ($t = 60...80$ °С).
9. Затем накладку устанавливают на СЗ.

Сборку технологического пакета производят по следующей схеме: фторопластовая плёнка; накладка для распределения температуры из алюминиевой фольги толщиной 0,5 мм размером 250×300 мм; локальный нагревательный элемент «термоодеяло», изготовленное из пропитанной герметиком ВИКСИНТ стеклоткани; дренаж из 3...4 слоёв стеклоткани Т-10; вакуумный мешок из плёнки полиамидной, 2 слоя стекломата марки АТМ.

Температуру контролируют потенциометром «Диск-250». Регулирование температуры производят вручную при помощи ЛАТРа по тарировочному графику зависимости напряжения от времени. Склеивание производят под вакуумом от автоклава «Шольц» не менее 0,7 кгс/см² по следующему режиму: нагрев до (175±5) °С 1,5 ч (скорость нагрева 2 °С/мин), выдержка при температуре (175±5) °С 3 ч; затем постепенное охлаждение за счёт уменьшения напряжения в течение 1,5 ч до 75 °С (скорость охлаждения 2 °С/мин), снятие вакуума и отключение термоодеяла.

После ремонта расслоения и непрочности при неразрушающем контроле не обнаружено. При контроле геометрии панели в свободном состоянии без приложения усилия на болванке для выклейки после ремонта коробления не выявлены. Предел прочности на отрыв сотового наполнителя в зоне ремонта составил 38 кгс/см², что соответствует НД и КД. По вышеуказанной технологии согласно рекомендациям успешно выполнен ремонт панели СЧФ самолёта.

По результатам опробования сделаны следующие выводы. Данное устройство для локального ремонта обеспечивает скорость нагрева не более 2 °С/мин в соответствии с НД, позволяет производить выдержку при температуре с погрешностью не более 5 °С. Градиент температур по толщине детали составляет не более 2 °С. В связи с низкой теплопроводностью детали ПКМ имеют малую инерционность при нагреве, поэтому при проведении ремонта с применением локального нагрева необходимо применять теплоизоляционные материалы, ремонт производить в помещении, исключая перепады температур и сквозняки.

В результате анализа зарубежного оборудования для проведения локального ремонта деталей из ПКМ был выбран прибор горячей склейки АСR-3 Hot Bonder фирмы Briskheat. Было произведено опробование оборудования АСR-3 Hot Bonder. Состав прибора АСR-3 Hot Bonder однозонный: чемодан с ручками и колёсами для транспортировки; USB флэш-устройство, 2 вакуумных шланга; 10 термопар J-типа; 2 вакуумных штуцера; 1 шнур питания (3 м), 1 шнур для нагревателя (3 м), 5 стандартных соединительных адаптера термопар; 4 рулона чековой ленты для принтера и 4 картриджа для принтера; 3 силиконовых термоодеяла различного размера.

Краткое техническое описание прибора: универсальное вводимое напряжение 100...130 В или 200...240 В, цветной touch-screen экран 214 мм, специальное ПО для управления. Встроенное оборудование: электрический вакуумный насос ВЕНТУРИ. Сила тока не более 30 А на нагревательную зону. Сохранение информации о ремонтном процессе и USB-порт для использования флэш-устройства. Сохранение до 30 ремонтных программ. Система имеет высокий уровень защиты и пароль. Максимальная температура 232 °С, регистрирующая программа, звуковой и видимый сигналы тревоги и оповещения. Возможность подключения дополнительного источника вакуума, например, от автоклава «Шольц» или сжатого воздуха от пневмосистемы цеха. Схема и технология ремонта с использованием прибора ACR-3 Hot Bonder аналогична вышеописанной. Для установки СЗ и приклейки накладки из углепластика использовали высокотемпературный плёночный клей для автоклавных процессов. Приклеивание СЗ и накладки производили за одно формование. Результаты испытаний соответствуют ТД и НД.

На основании опробования можно сделать следующие выводы:

1. Технология ремонта деталей из ПКМ с применением локального нагрева под вакуумом обеспечивает отверждение плёночного клея и качество склеивания с сотовым наполнителем и накладкой из углепластика с требуемой по КД прочностью. Необходимо изготавливать накладку, соответствующую по толщине ремонтируемой обшивке.

2. Устройство для локального ремонта обеспечивает скорость нагрева не более 2 °С/мин в соответствии с НД, позволяет производить выдержку при температуре с погрешностью 2,67 °С. Градиент температур по толщине детали составляет не более 2...3 °С (при установившемся режиме).

В настоящее время указанный прибор рекомендован разработчиком для ремонта деталей из ПКМ и приобретён в двухзонной комплектации с расширенным количеством термоодеял различного размера и удлинёнными (до 10 м) вакуумными шлангами, термopарами, шнурами питания и подключения, что позволяет выносить прибор на значительное расстояние от зоны ремонта и обеспечивает взрыво- и электробезопасность при ремонте с ЛВЖ и материалами непосредственно на изделии. Прибор успешно применяют при ремонте деталей как на производственном участке изготовления деталей из ПКМ, так и в цехах окончательной сборки. Прибор аттестован на предприятии, проведено обучение и аттестация исполнителей, разработан ТП по ремонту деталей из ПКМ.

В настоящее время проведены отработка и анализ опыта технологии ремонта с применением прибора на деталях и агрегатах в составе изделия в цехах АСП. Технология ремонта уточнена в части использования вспомогательных материалов, оптимального расположения термопар и нагревательного элемента. На основе опыта ремонта и статистики площадей повреждения подобраны и приобретены соответствующие по форме и площади термоодеяла.

Проведено опробование формования образцов пластика на основе клеевых препрегов КМКУ и КМКС под давлением и без избыточного давления с последующими сравнительными механическими и акустическими испытаниями образцов. Давление формования представлено в табл. 1.

Таблица 1

Давление формования

Параметр	Автоклавное формование		Вакуумное формование	
	Соты	Монолит	Соты	Монолит
Давление, атм	2+0,25	5+0,5	0,8...0,9	0,8...0,9

Режим формования образцов:

- создать вакуум не менее 0,8 кгс/см²;
- поднять температуру до (125±5) °С со скоростью не более 2 °С/мин;
- выдержать при температуре (125±5) °С в течение (60+5) мин;
- поднять давление до требуемой величины, при достижении давления 1 кгс/см² отключить вакуумный насос, соединить вакуумный мешок с атмосферой;
- поднять температуру до (180±5) °С со скоростью не более 2 °С/мин;

- выдержать при температуре $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение $(5 \pm 0,5)$ ч;
- охладить под давлением до температуры не более 40°C со скоростью не более $1^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Схемы выкладки выбраны типовыми для монолитных и сотовых конструкций на основе клеевых препрегов КМКС и КМКУ, изготавливаемых на предприятии.

Неразрушающий акустический контроль образцов проводили по соответствующим для данных конструкций методикам ВИАМ и НИАТ импедансным и эхо-теневым методом. При акустическом контроле расслоения, непрочности и зоны затухания сигнала не обнаружены. Образцы соответствуют расчётной требуемой толщине.

По результатам акустических и механических испытаний образцов, а также после технологической отработки ремонта непосредственно на изделии можно сделать выводы, что технология ремонта деталей ПКМ с применением портативной системы управления:

- обеспечивает требуемые согласно КД прочностные характеристики деталей из ПКМ после проведения локального ремонта;
- позволяет использовать при ремонте материалы, применяемые в данной конструкции деталей или с температурой эксплуатации, соответствующей температуре эксплуатации данных деталей;
- позволяет проводить «горячий» ремонт непосредственно на изделии;
- не вызывает поворотов и короблений ремонтируемой детали или агрегата после ремонта;
- позволяет устанавливать и формовать накладки из клеевых препрегов КМКУ и КМКС под вакуумом при требуемой температуре непосредственно в зоне ремонта без предварительного формования в автоклаве под давлением;
- позволяет снизить затраты на электроэнергию при склеивании без использования энергозатратного оборудования: автоклава «Шольц» и вакуумных термопечей.

Средняя мощность теней при работе автоклавных установок по режиму на рис. 2 составляет 435 кВт. Как видно из диаграммы (см. рис. 2), тени автоклава работают 11 ч до начала охлаждения при каждом цикле формования.

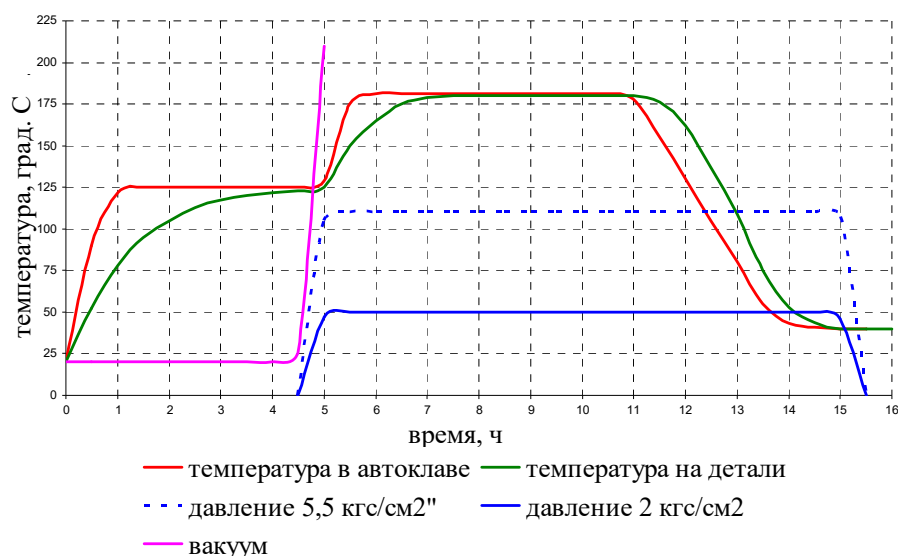


Рис. 2. Диаграмма формования деталей из клеевых препрегов

Из диаграммы на рис. 3 видно, что время работы термоодеяла Hot Bonder составляет 6...7 ч вместо 11 ч нагрева теней в автоклаве.

Анализ обработанных результатов измерений, приведённых на рис. 2 и 3, позволяет утверждать, что ремонт деталей без использования энергозатратного оборудования (автоклава «Шольц» и вакуумных термопечей) позволяет сократить время основного режима формования и снизить энергозатраты при ремонте.

При изготовлении деталей сокращена основная выдержка при температуре (180 ± 5) °С с 5 до 3 ч. Кроме того, при использовании локального нагрева не требуется разогревать рабочее пространство автоклава или термопечи, таким образом, сокращается время нагрева детали и расход электроэнергии.

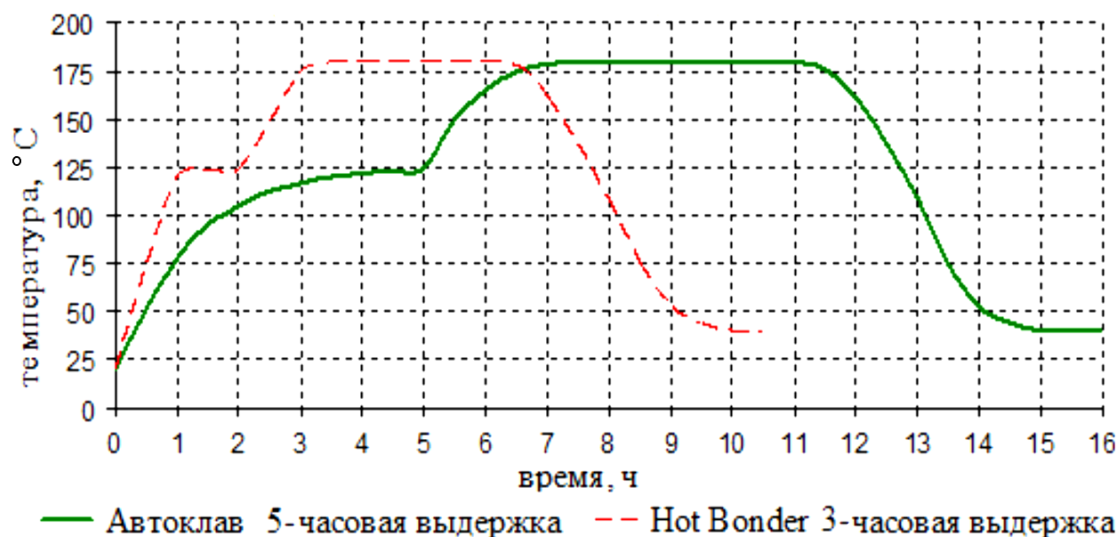


Рис. 3. Диаграммы формирования выдержки при давлении в автоклаве и при помощи Hot Bonder

Также при использовании Hot Bonder по сравнению с полным режимом формирования в автоклаве сокращаются затраты на работу вакуумного насоса за счёт использования небольшого встроенного электронасоса, кроме того сокращается время работы вентилятора, который постоянно работает в течение всего цикла в автоклаве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полимерные композиционные материалы / С. Л. Баженов, А. А. Берлин, А. А. Кульков, В. Г. Ошмян. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 352 с.
2. Баурова, Н. И. Диагностирование и ремонт машин с применением полимерных материалов: моногр. / Н. И. Баурова. – М.: ТехПолиграфЦентр, 2008. – 280 с.
3. Баурова, Н. И. Особенности проектирования и применения композитных материалов и изделий из них в машиностроительной отрасли [Электронный ресурс] / Н. И. Баурова. – URL: <http://academyoftech.ru/courses/proektirovanie-i-primenenie-kompozitov-v-mashinostroitelnoy-otrasli>.
4. Гращенков, Д. В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов / Д. В. Гращенков, Л. В. Чурсова // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 231-242.
5. Применение композиционных материалов на основе клеевых препрегов в машиностроении / Л. А. Дементьева, Н. Ф. Лукина, А. П. Петрова, К. Е. Куцевич // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 8. – С. 11-17.
6. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением / М. И. Душин, А. В. Хрульков, Р. Р. Мухаметов, Л. В. Чурсова // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 1. – С. 18-26.
7. Зорин, В. А. Опыт применения композиционных материалов в изделиях авиационной и ракетно-космической техники / В. А. Зорин // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – № 4. – С. 44-59.
8. Зорин, В. А. Моделирование свойств ремонтных материалов при длительном воздействии эксплуатационных факторов / В. А. Зорин, Н. И. Баурова // Механизация строительства. – 2012. – № 1. – С. 15-17.
9. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и технологическая безопасность. В 2 ч. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса / Н. А. Махутов; под ред. К. В. Фролова, В. В. Москвичева. – Новосибирск: Наука, 2005. – 493 с.
10. Ривин, Г. Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: учеб. пособие / Г. Л. Ривин. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 75 с.