

УДК 678.067.9:678.049

ЦЕЛЕВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭПОКСИУГЛЕПЛАСТИКОВ КАК МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ПОДХОД К СНИЖЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ОТВЕРСТИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Насонов Ф.А.^{1*}, Гаврилов Г.А.^{1**}, Бабайцев А.В.^{2***}, Назырова О.Р.^{2****}

¹ Филиал «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого»,
ул. Поликарпова, 23А, Москва, 125284, Россия

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

* e-mail: nasonovf2006@mail.ru

** e-mail: gg1986@mail.ru

*** e-mail: ar77eny@gmail.com

**** e-mail: norton_07@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.01.2019

Обозначена актуальность изыскания путей снижения приобретения конструкционными полимерными композиционными материалами, как материалами с ярко выраженной анизотропией свойств, первичной дефектности в результате разных видов механической обработки, в частности при образовании крепежных отверстий в углепластиках на основе эпоксидных матриц. Опробован подход управляемого влияния на приспособленность к механической обработке эпоксидных углепластиков антифрикционного модификатора стеарата цинка (СЦ). Приведены результаты измерений интегральных характеристик температур при механической обработке экспериментальных матричных и композитных образцов, проанализированы результаты измерений качества отверстий по критерию шероховатости.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, эпоксидная матрица, эпоксидный углепластик, технологические свойства, ИК-термография, профилометрия.

Введение

Материаловедческий подход к управлению физико-механическими свойствами полимерных матриц требует оценки влияния модифицирующих добавок, в том числе нанометрической размерности [1–13], на технологические [2–3, 6–8,

10] и основные эксплуатационные свойства композиций [1, 3–5, 9, 11–13]. Технологические свойства непосредственно влияют на выбор и назначение основных и второстепенных параметров технологического процесса, обеспечивают достижение оптимальных технико-экономических по-

казателей технологического процесса. Влияние на основные эксплуатационные свойства определяет возможность обеспечения заданных характеристик материала в изделии на стадии эксплуатации. Предварительно были проведены работы (вискозиметрия, термоаналитические методы) по исследованию и сопоставлению важнейших технологических свойств исходной эпоксидной композиции и модифицированной технологической добавкой стеарата цинка (СЦ). Создана кинетическая модель процесса отверждения, проведено опытное изготовление образцов из наполненных углеродным длинноволокнистым наполнителем пластиков (пропитка под давлением, автоклавное формование), проведены их неразрушающий контроль и испытания стандартных образцов для измерения механических свойств. Методом ИК-термографии, совмещенным с функцией записи через заданные промежутки времени, проведены измерения тепловых эффектов процессов механической обработки различным инструментом, установлена зависимость от концентрации модификатора. Методом профилометрии проведена оценка уровня дефектности, наносимой механической обработкой по критерию шероховатости внутренней поверхности крепежных отверстий. Спрогнозированы значения температур для процессов образования отверстий при увеличении толщин монолитов, и проведена оценка эффективности материаловедческого подхода в данном случае.

Объекты, методы и результаты исследований

Важнейшим свойством связующего и армирующих наполнителей в полимерных композитных материалах (ПКМ) является их совместимость – способность связующего смачивать поверхность наполнителя и обеспечивать высокую адгезионную прочность сцепления наполнителя с матрицей. Смачивающую способность связующих оценивали по значениям краевых углов смачивания, определяемых по параметрам малых капель, нанесенных на модельную стеклянную подложку (методика ПМ 596.482). Метод основан на определении геометрических размеров капли и требует только линейных измерений на снимках.

Для оценки влияния СЦ как антиадгезионной добавки на смачивающую способность связующего были определены углы смачивания композицией, содержащей различное количество СЦ (0; 0,5; 5,0 %), модельной стеклянной подложки в виде пластины.

Результаты измерений краевого угла смачивания трех композиций для оценки смачивающей способности приведены в табл. 1.

Измерения проводились при 20 °С для образцов композиции с одинаковой термической историей. После совмещения компонентов на образцы смесей накладывалось ультразвуковое (УЗ) воздействие в ванне мощностью 50 Вт в течение 15 мин для улучшения условий распределения модификатора.

Из результатов видно, что степень модифицирования СЦ практически не влияет на смачивающую способность и находится в пределах, близких к пределам погрешности измерений.

Оценивалась условная вязкость модифицированных связующих по вискозиметру ВЗ-241 в соответствии с ГОСТ 748-82 с диаметром фильеры 4 мм.

На рис. 1 представлена зависимость условной вязкости связующего от степени модифицирования. Измерения проводились при температуре переработки ($T = 60$ °С). При нормальной температуре вязкость смолы марки ЭД-20 не подлежит измерению данным методом. Проводилось три измерения для каждой концентрации.

Особый интерес представляло исследование вклада СЦ в процесс отверждения связующего. Во-первых, СЦ, как поверхностно-активное вещество, может повлиять на показатель температуры стеклования отвержденного связующего и пластика на его основе, что при прочих равных условиях может повлиять на теплостойкость композита. Во-вторых, конечной целью кинетических расчетов при исследовании процессов отверждения является прогнозирование изменения степени завершенности реакции (степени превращения) от температуры, времени и скорости нагрева. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии

Таблица 1

Результаты измерений краевого угла смачивания

Серия измерений	Образцы композиции	Концентрация модификатора, %	Краевой угол смачивания
1	1с	0	15°40'
2	3с	0,5	15 ° 40'
3	5с	5,0	15 ° 00'

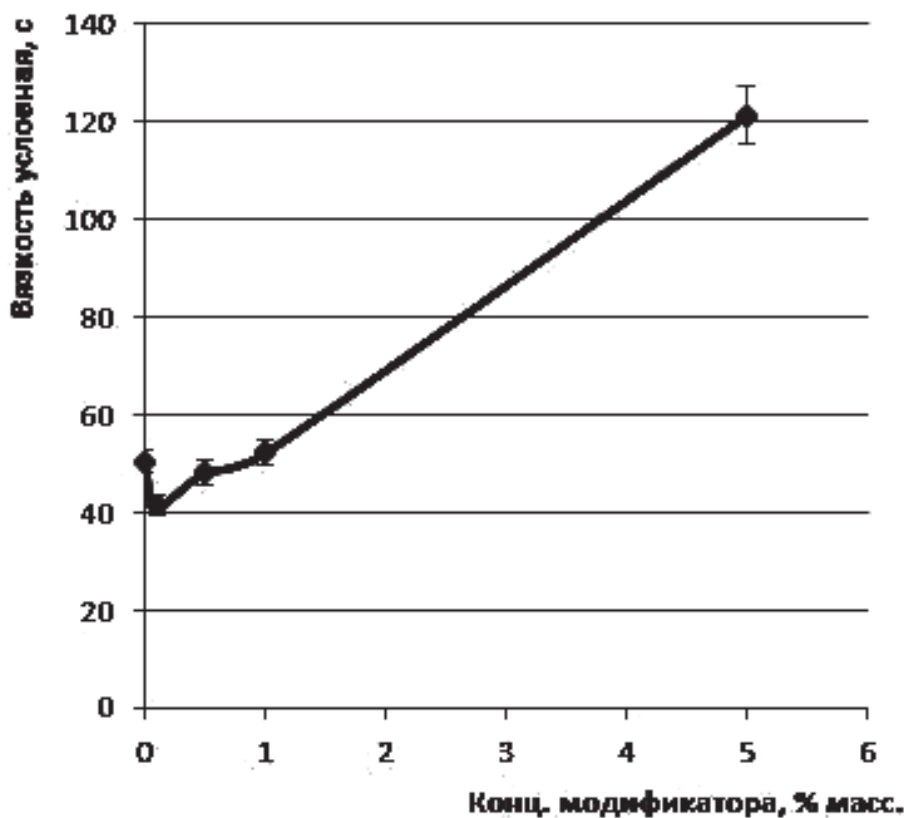


Рис. 1. Зависимость условной вязкости связующего от степени модифицирования

(ДСК) позволяет проводить такие исследования практически независимо от вида и содержания модификаторов и наполнителей. По кривым ДСК реакции отверждения полимерного материала можно определить температуру начала и конца процесса, температуру максимальной скорости реакции, тепловой эффект реакции и другие параметры. Эти данные дают возможность сравнительно быстро подобрать оптимальную температуру отверждения. Важными параметрами являются также кинетические характеристики и время отверждения при заданной температуре до заданной степени конверсии. Знание температур фазовых переходов имеет большое прикладное значение, в том числе и при модифицировании связующих и полимерных композитов на их основе — это позволяет определить оптимальные режимы переработки и отверждения [14–15]. Моделирование процесса отверждения и определение степени превращения образцов композиций (связующих) осуществляли с помощью компьютерной программы Kinetics 3 фирмы «Netzsch» [16]. Программа позволяет, используя итерационный метод, выбрать из предлагаемого программой набора наиболее подходящий тип реакции и, применив основное кинетическое уравнение Аррениуса

$k = k_0 e^{-Ea/RT}$, рассчитать значения кинетических параметров, необходимых для построения кинетической модели реакции. Построенная модель, сохраненная в отдельном файле данных соответствующего формата, используется в дальнейшем программой Kinetics 3 в режиме «Прогнозирование» для определения степени превращения связующего в каждый момент заданного температурно-временного цикла [16].

Степень превращения связующего по конечному продукту реакции определяли в автоматическом режиме при выполнении программы расчета по кривым ДСК неотвержденных образцов как изменение площадей пиков тепловыделения в зависимости от текущего изменения температуры и скорости нагрева.

Для исследования термоаналитическими методами отвержденных композиций с различным содержанием модификатора были изготовлены матричные образцы. После совмещения смолы ЭД-20 с заданными количествами СЦ (перечень композиций приведен в таблице) на композицию накладывалось УЗ-излучение в УЗ-ванне для улучшения условий распределения модификатора в композиции. В качестве формообразующей была применена металлическая сборная форма-оснаст-

ка, специально изготовленная для образцов габаритами $(120 \pm 0,5) \times (80 \pm 0,5) \times (4 \pm 0,5)$ мм.

После совмещения компонентов композиции с заданным количеством отвердителя ПЭПА (10 % масс.) композиция заливалась в форму-оснастку и помещалась в термошкаф для отверждения по одинаковому для всех композиций типовому «горячему» режиму: 1 час при 60°C .

Оценку кинетических параметров реакции отверждения композиций проводили стандартными термоаналитическими методами: на дифференциальном сканирующем калориметре DSC-1 швейцарской фирмы «МЕТТЛЕР ТОЛЕДО» в неизотермических условиях при нагревании со скоростями: 5, 10 и $20^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Установлены кинетические параметры реакции отверждения связующих с разной степенью модифицирования. Выявлено, что добавка является химически инертной и качественно не влияет на прохождение химической реакции отверждения. Созданная кинетическая модель, полученная после серии измерений теплового эффекта при разных скоростях нагрева (5; 10; $20^\circ\text{C}/\text{мин}$), позволяет назначать оптимальные температурно-временные параметры технологического процесса переработки с учетом прогнозирования полноты отверждения.

На рис. 2 и 3 представлены температурно-временные зависимости для немодифицированного

варианта связующего и модифицированного 1% масс. СЦ для заданных степеней отверждения, которые прогнозирует соответствующая кинетическая модель.

Исходя из анализа представленных кинетических моделей выявлено незначительное влияние модифицирования целевым модификатором на кинетику реакции отверждения связующего. Например, найдено, что с ростом содержания СЦ от 0 до 1 % масс. прогнозируемое время отверждения при типовом режиме отверждения (60°C) до одинаковой степени отверждения $\sim 0,50$ увеличивается на 2–3 мин. При степенях отверждения, близких к 0,9, «отставание» модифицированной композиции уменьшается при типовом режиме отверждения. Таким образом, в рассмотренном случае СЦ является слабоингибирующей добавкой, незначительно замедляющей ход реакции отверждения, но при проектировании технологического процесса переработки модифицированных данной добавкой материалов необходимо корректировать технологические параметры, что с заданной степенью точности позволяет созданная модель. При концентрациях, больших 2–3 % масс., выявлено более активное влияние модификации на кинетику отверждения.

Было опробовано совмещение модифицированных связующих с сухим наполнителем и формирование экспериментальных панелей с учетом

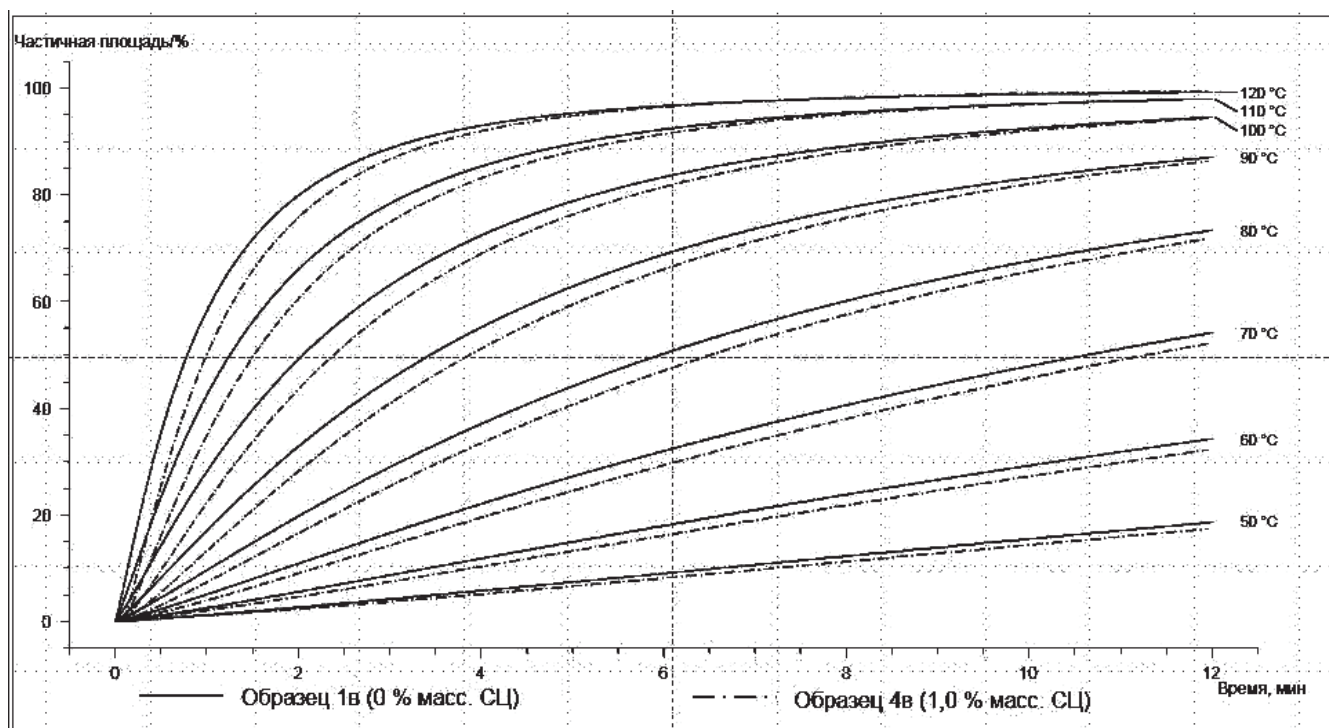


Рис. 2. Графическое представление кинетических моделей реакции отверждения немодифицированного (1в – сплошная линия) и модифицированного 1-% масс. СЦ (4в – штрихпунктирная линия) связующих

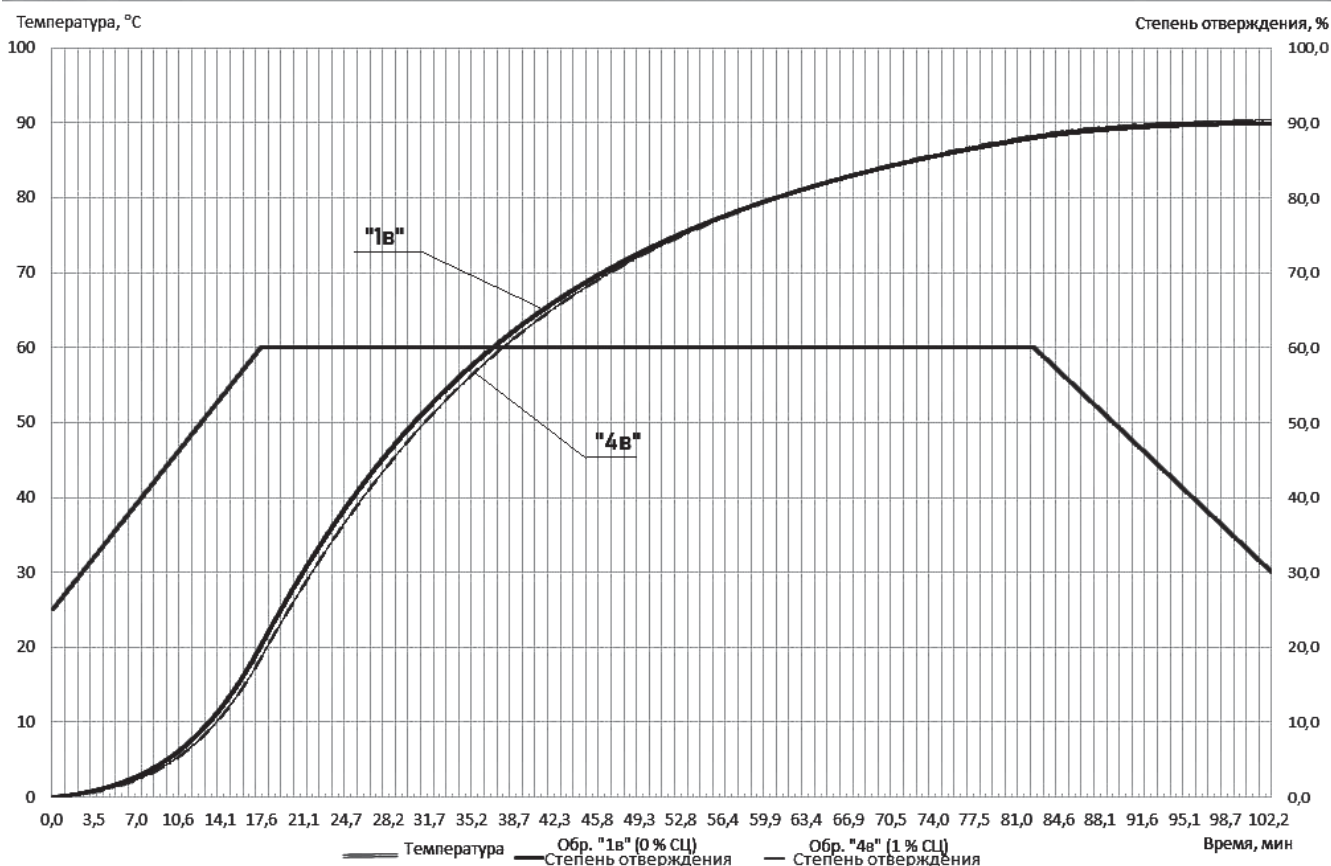


Рис. 3. Графическое представление прогнозируемых изменений степени превращения немодифицированной (сплошная линия) и модифицированной (штрихпунктирная линия) в условиях, заданных параметрами базовых режимов отверждения

корректировок режимов по времени. Был реализован жидкофазный метод совмещения под давлением – пропитка под давлением с последующим автоклавным формованием.

При совмещении связующих с пакетом сухих наполнителей разница в условных вязкостях не была заметна и не создавала проблем технологического плана. Композиции с относительно пониженной вязкостью не требовали специальных мер по их удержанию в пределах пакета-заготовки перед пропиткой, а композиции с повышенным уровнем условной вязкости в пределах времени переработки $\tau_{\text{перераб}}$ были распределены по поверхности оснастки перед совмещением.

На подготовленную соответствующим образом формообразующую оснастку (плоскую плиту) наносился слой связующего в количестве, соответствующем 45 % масс. от теоретического состава композита. Собранные в соответствии со схемами армирования пакеты-заготовки из сухого наполнителя выкладывались на слой связующего на оснастке. Был собран типовой технологический пакет с применением в том числе дренажных сло-

ев, обеспечивающих равномерную откачку воздуха и отвод излишков связующего, и проведена вакуумная пропитка с последующим автоклавным формованием по режиму:

скорость нагрева по отстающей термопаре – не более 2 °/мин – до

$$T_{\text{пропитки}} = T_{\text{формования}} - 60 \text{ } ^\circ\text{C};$$

разрежение $p_{\text{вак}} = p_{\text{пропитки}}$ – не менее 0,85 атм (разрежение под вакуумным чехлом в течение всего периода пропитки – формования);

давление $p_{\text{раб.тела}} = 5,5...6,0$ атм (давление подается при достижении температуры 60 °C по отстающей термопаре, установленной в технологический пакет);

охлаждение до температуры не менее 30 °C со скоростью не более 2 °/мин.

$\tau_{\text{пропитки при нагреве}} = (21 \pm 5)$ мин при скорости подъема температуры не более 2 °/мин;

$\tau_{\text{выдержки}} = (60+5)$ мин соответствует режиму отверждения смолы холодного отверждения типа ЭД-20;

$\tau_{\text{охлаждения}} = (21 \pm 5)$ мин при скорости снижения температуры не более $2^\circ/\text{мин}$.

Итого время переработки и формования

$$\tau_{\text{пропитки при нагреве}} = \tau_{\text{выдержки}} + \tau_{\text{охлаждения}} = (102 \pm 15) \text{ мин.}$$

Основные параметры технологического процесса пропитки и формования панелей записаны средствами объективного контроля.

Полученный диапазон вязкостей является допустимым и достаточным для пропитки сухого наполнителя типа углеродных лент для опробованных толщин, количеств монослоев и схем укладки, что подтвердили визуальный контроль образцов после пропитки и формования и исследование акустическими неразрушающими методами. Опытные монолитные панели с габаритами 300×300 мм собраны из 10 слоев сухого наполнителя с теоретической толщиной монослоя $0,14$ мм, укладка 0° , средняя толщина образца составила $1,5$ мм. Монолитные панели из 10 слоев с укладкой $0^\circ/90^\circ$ с габаритами 120×120 мм – также подтверждены качественная пропитка всеми вариантами связующих и отсутствие дефектов, выявляемых акустическими неразрушающими методами. Дефектоскопия была проведена акустическим импедансным методом с помощью дефектоскопа

ДАМИ-С08 с преобразователем типа ПАДИ-8 в соответствии с ПИ 1.2.171-81.

Для оценки влияния модифицирования матриц и пластиков на их основе с учетом механических свойства были изготовлены и испытаны стандартные образцы: на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг.

Механические испытания проводились при температуре 20°C , количество образцов для каждого исполнения – не менее 6. Результаты приводятся в табл. 2.

Показано, что модифицирование эпоксидной матрицы и конструкционного углепластика на ее основе, полученного методом пропитки под давлением с последующим вакуум-автоклавным формованием в диапазоне концентраций $0-5,0\%$, не снижает прочностных показателей при растяжении и сжатии. Наблюдается снижение прочности при межслоевом сдвиге к 5% . Для нагружений на растяжение и сжатие наблюдаются максимумы показателей при $0,5$ и $0,1-0,3\%$ соответственно.

Для сравнительного анализа тепловых эффектов при механической обработке для образования отверстий был использован метод теплового неразрушающего контроля в режиме реального времени механической обработки образцов.

На механическую обработку образцов в виде пластин с номинальными габаритами из матричных образцов, полученных методом заливки без

Таблица 2

Результаты механических статических испытаний с разной степенью модифицирования

Концентрация модификатора, % масс.	Прочность при растяжении σ_1^+ , МПа	Прочность при сжатии σ_1^- , МПа	Прочность при межслоевом сдвиге τ_{13} , МПа
	ГОСТ 25.601-80	ГОСТ 25.602.80	ОСТ 190199-75
	мин.-макс.	мин.-макс.	мин.-макс.
	ср.знач.	ср.знач.	ср.знач.
0	780-1224	330-401	23,7-27,5
	959	375	25,7
0,1	1042-1120	453-627	-
	1081	554	
0,3	889-1356	353-471	27,1-31,8
	1043	428	29,3
0,5	1110-1412	375-476	-
	1326	414	
1,0	1014-1351	374-525	30,6-33,1
	1174	460	31,6
5,0	928-1376	347-430	17,9-22,3
	1196	376	20,4

давления, и отформованных образцов из углепластика была написана управляющая программа обрабатывающего центра с числовым программным управлением (ЧПУ) для образования сквозных отверстий с заданными режимами резания (скорость $N = 1000$ об/мин, подача $S = 30$ мм/мин). Режим резания был назначен в соответствии с рекомендациями руководящих технических материалов по механической обработке монолитных эпоксидных углепластиков и являлся постоянной величиной. Образование отверстий производилось тремя типами специализированного инструмента: сверло из быстрорежущей стали, фреза торцевая трубчатого типа с алмазным среднезернистым напылением, фреза торцевая из быстрорежущей стали шпоночная трехзаходная. Воздушное принудительное охлаждение и подача смазывающих охлаждающих жидкостей были отключены.

Реализация температурных измерений при механической обработке материалов представляет собой сложную инженерную задачу, что обусловлено рядом причин. Основными из них являются малые размеры площадок, на которых протекают тепловые процессы; неравномерное распределение температуры по глубине и вдоль поверхностей контактирующих тел; весьма краткий период существования и случайный во времени и пространстве характер появления единичных тепловых источников [17–19]. В данном исследовании применен прямой метод бесконтактного измерения температуры — ИК-термография [17, 18]. Для снятия тепловых эффектов при механической обработке использован инфракрасный тепловизор с функцией записи модели FlirThermaCAM. Тепловизор был установлен напротив раскрытых дверей обрабатывающего центра по осевой линии

механической обработки на стационарном штативе на удалении 1000 ± 50 мм от зоны механической обработки.

Линия визирования «видоискатель — объектив — накерненная метка на образце» была расположена под углом $30 \pm 5^\circ$ (рис. 4). Метки на образцах были нанесены предварительно в соответствии с управляющей программой на глубину 0,5 мм. Процесс образования каждого ряда отверстий выполнялся последовательно, с выдержкой на воздухе инструмента, заготовки и с их очисткой. Пример моментного снимка тепловой картины приведен на рис. 5. После сверления первого отверстия в ряду инструмент не выдерживался до начальной температуры. До момента пуска сверления запускалась запись тепловой картины с частотой съемки 1 с^{-1} .

На рис. 6 представлены в графическом виде зависимости температурных максимумов от степени модифицирования и вида инструмента для матричных и углепластиковых образцов.

Наименьшее тепловыделение для матричных образцов зафиксировано в интервалах 0,1–0,3 % масс. в зависимости от типа применяемого инструмента. Для углепластиковых образцов на основе модифицированных матриц пики наименьшего тепловыделения смещаются в диапазон 0,2–0,5 %. Снижение максимумов температур в этих диапазонах объясняется антифрикционными свойствами модификатора СЦ; снижаются коэффициент и силы трения. Дальнейшее повышение концентрации модификатора приводит к восстановлению или даже превышению тепловых эффектов относительно исходных немодифицированных матриц и углепластиков (0 % СЦ), что предположительно можно объяснить снижением эффективности

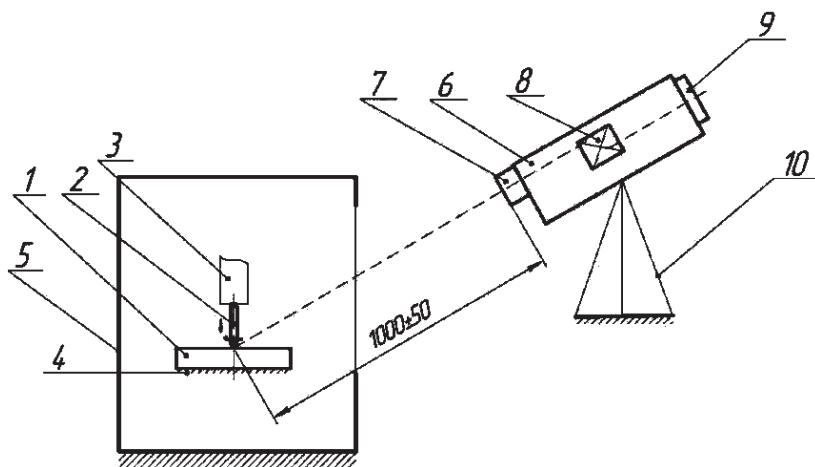


Рис. 4. Схема взаимного расположения обрабатывающего центра — образца — тепловизора: 1 — образец; 2 — рабочий режущий инструмент; 3 — зажимной патрон; 4 — рабочий стол центра; 5 — обрабатывающий центр с ЧПУ; 6 — тепловизор; 7 — объектив; 8 — оптико-цифровой преобразователь; 9 — видоискатель; 10 — опора

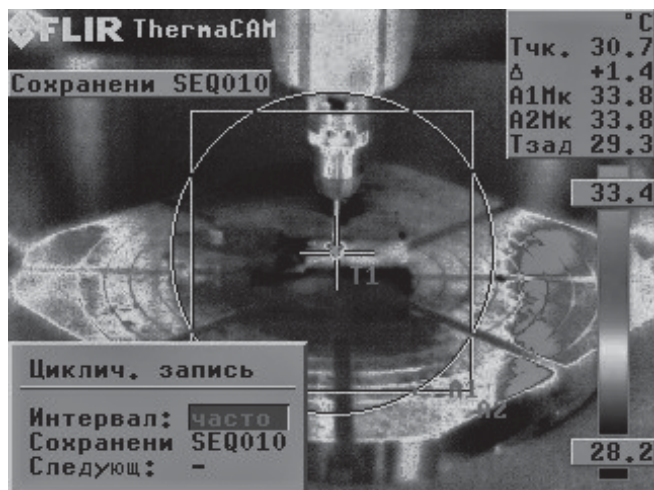


Рис. 5. Пример моментного снимка тепловой картины процесса образования отверстия методом механической обработки: $T_{зад}$ – значение начальной температуры; $T_{чк}$ – моментное значение температуры в зоне механической обработки (под перекрестьем); Δ – разница значений $T_{чк}$ и $T_{зад}$

резания при пониженных коэффициентах трения. Смещение пиков вправо и некоторое их «уширение» для углепластиковых образцов, вероятно, связано с теплофизическими свойствами напол-

нителя, которые изменяют условия теплоотвода из зоны контакта трущихся тел (деталь и обрабатывающий инструмент). На практике представляет интерес именно углепластик, как композиционное сочетание матрицы и углеродного наполнителя, который по результатам данных исследований имеет более выгодные значения тепловых параметров процессов механической обработки. При определенных концентрациях для каждого типа матрицы введение модификатора может служить основой для улучшения условий механической обработки, ее интенсификации и снижения количества наносимых ею микрповреждений. Данное обстоятельство будет влиять на качество отверстий, на их точность и качество (в том числе благодаря снижению термических усадок).

Образцы после образования отверстий с помощью механической обработки исследовались на предмет приобретенных дефектов. Методы контроля (дефектоскопии) применялись в порядке увеличения чувствительности и разрешающей способности: акустическая томография, рентгенография, компьютерная рентгеновская томография, профилометрия.

Углепластиковые образцы с отверстиями подвергались контролю с помощью акустической

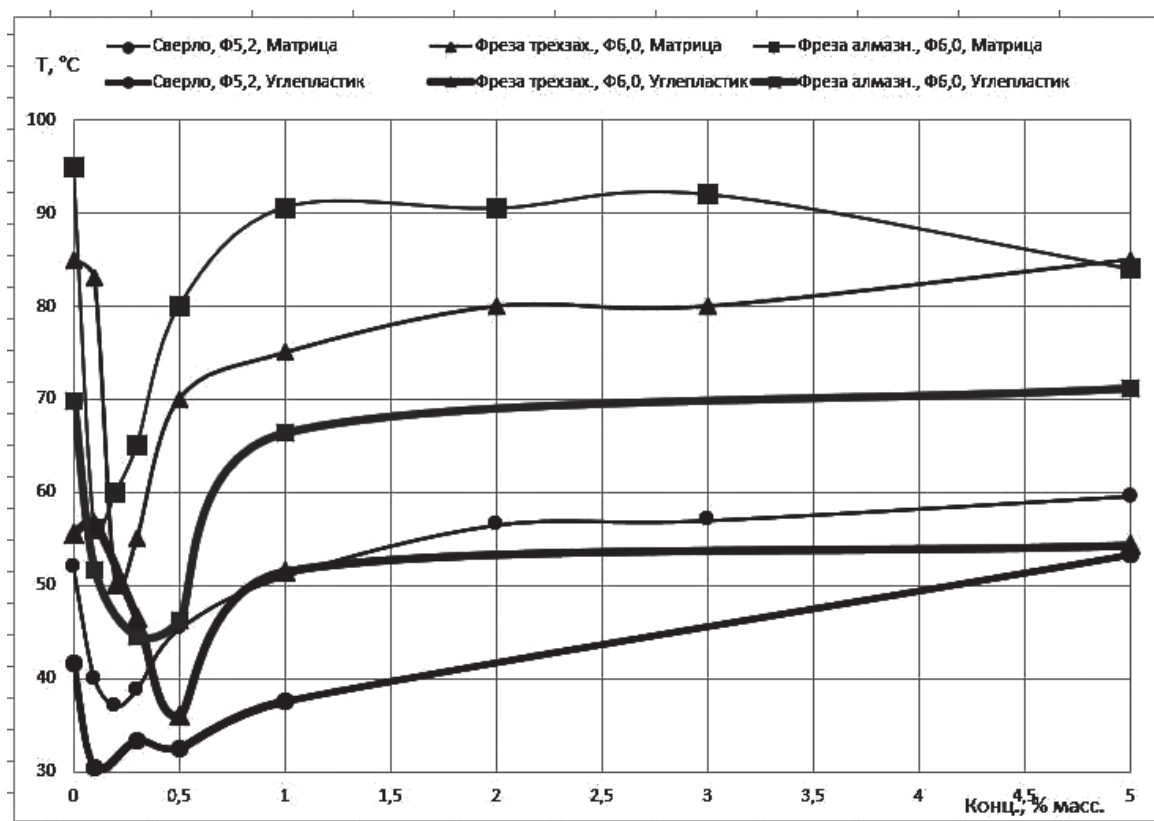


Рис. 6. Графическое представление усредненных (по трем точкам) зависимостей температурного максимума процесса образования отверстий в матричных и углепластиковых образцах. Линии для углепластиков имеют удвоенную толщину начертания

томографии. Был использован акустический томограф-дефектоскоп с фазированными решетками A1550 IntroVisor. Изменений состояния зоны на контурах сквозных отверстий данное оборудование не выявило.

Производилась съемка углепластиковых образцов с помощью рентгеновского метода на установке Gen.Electric, «Egescosontr.», с подобранными параметрами работы для оптимальной контрастности рентгенограмм:

напряжение $U = 45$, кВ;

ток $I = 2$, А;

время выдержки $t = 45$, с;

фокусное расстояние $F = 735$, мм.

Дефектов структуры величиной более 0,5 мм не обнаружено, дефектов контуров отверстий не выявлено (рис. 7).

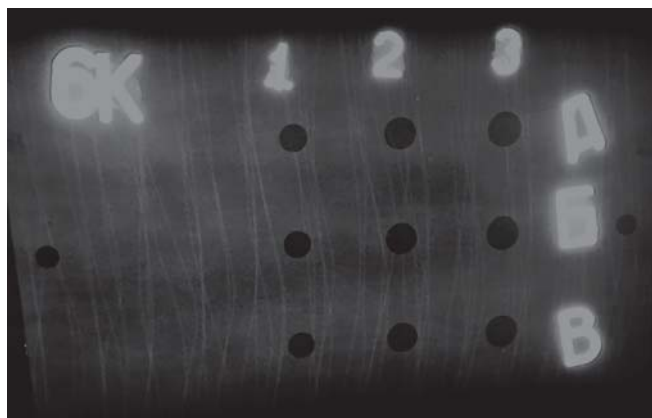


Рис. 7. Фрагмент рентгенограммы образца «бк»

Изготовленные образцы с отверстиями были исследованы профилометрическим методом. Для этого матричные образцы были рассечены поперек отверстий по диаметру. В соответствии со стандартом измерен параметр шероховатости образующей внутреннего контура отверстия. Общий вид хода измерений показан на рис. 8.

В табл. 3 приведены результаты измерений шероховатости внутреннего контура отверстий в ис-



Рис. 8. Общий вид хода измерения шероховатости методом профилометрии

следуемых матричных образцах, данные представлены по отверстиям «А» — первый проход.

На рис. 9 представлены данные в графическом виде.

По результатам измерений (не менее пяти измерений на каждую точку) можно наблюдать, что с добавлением модификатора в количестве 0,1 % масс. происходит снижение параметра шероховатости (сплошная линия) и снижение разброса показателя (пунктир); по мере дальнейшего увеличения содержания модификатора наблюдается тенденция к замедленному росту шероховатости с увеличением разброса показателей. Данные зависимости в целом следуют тенденциям и хорошо согласуются с результатами измерений температурных показателей.

Полагая, что коэффициент трения снижается по мере повышения концентрации антифрикционного модификатора, и учитывая, что температуры резания, равно как и количества выделяющегося тепла, снижаются для матричных образцов при повышении концентрации модификатора до 0,3 % в среднем для разных инструментов и при повышении концентрации для углепластиковых образцов до 0,5 % в среднем для разных инстру-

Таблица 3

Результаты измерений шероховатости поверхности отверстий в матричных образцах

Концентрация модификатора, %	Шероховатость Ra, мкм	Ср.кв.др.откл. σ , мкм	Размах вариации, мкм	Коэфф. вариации, %
0	1,726±0,045	0,048	0,111	2,77
0,1	1,330±0,028	0,043	0,086	3,33
0,3	1,338±0,026	0,030	0,072	2,22
2,0	1,463±0,058	0,069	0,168	4,69
5,0	1,543±0,089	0,103	0,249	6,60

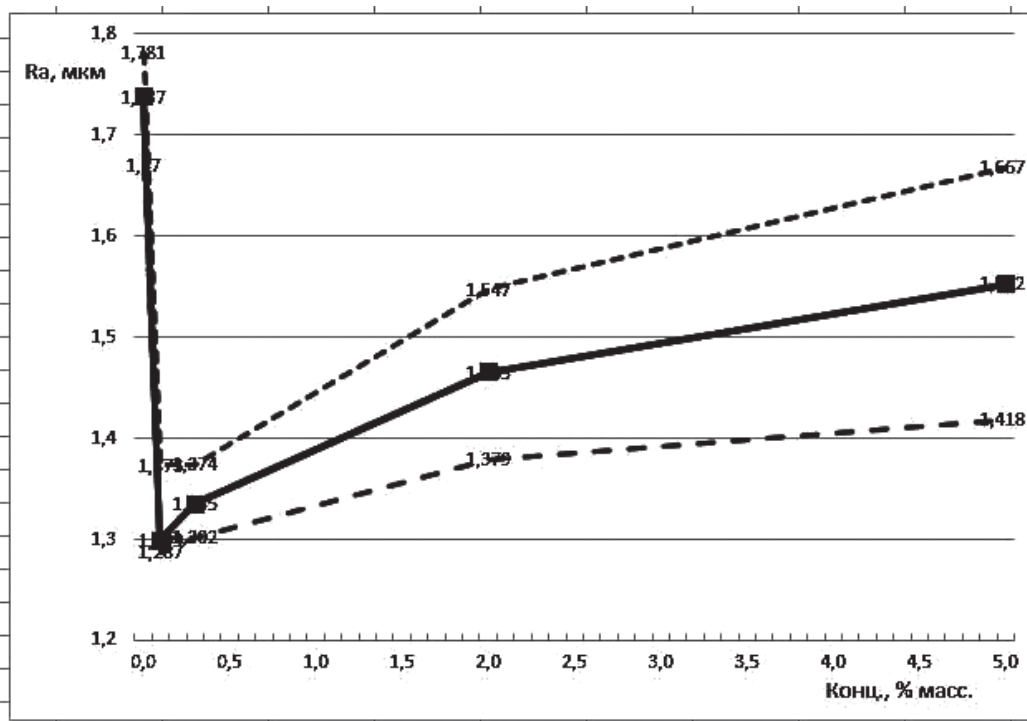


Рис. 9. Зависимость значения шероховатости (сплошная линия) и разброса показателя (пунктирная линия) от концентрации модификатора

ментов, можно считать, что эти зависимости после достижения перегиба меняют свой характер. При дальнейшем снижении коэффициента трения (так как повышается концентрация модификатора) происходит достаточно монотонное нарастание количества выделяющегося тепла и температур при резании. Это может быть объяснено снижением эффективности механического резания при достижении определенного коэффициента трения и дальнейшем его увеличении. Причем это критическое значение коэффициента разное для разных типов инструмента, а также для типов исследуемых материалов, образцы матриц, наполненные углеродным наполнителем (углепластик), имеют смещенное в сторону увеличения значение, при котором начинается смена механизма (перегиб на зависимостях).

С учетом полученных зависимостей по температурам (их можно назвать «кажущимися», так как выше говорилось об интегральности и обобщенности измеренных температур), которыми сопровождается процесс образования отверстий различными типами инструмента, с некоторыми допущениями можно спрогнозировать, каких значений будут достигать температуры при получении отверстий в монолитных деталях больших толщин углепластиков на основе эпоксидных матриц (рис. 10).

При определенных условиях температуры достигают температур теплостойкости пластиков, в

локальных зонах превышаются температуры стеклования, в элементарных объемах возможна активизация процессов термодеструкции, непосредственно влияющих на структуру и свойства композитов как конструкционных и функциональных материалов. Это обуславливает повышение вероятности зарождения микродефектов из-за местной потери свойств материала.

С другой стороны, если обрабатываемый материал и инструмент в процессе механической обработки имеют значительный нагрев, то повышена вероятность возникновения термических напряжений и напряжений, возникающих вследствие термических усадок при остывании, что не только влияет на качество и классность получаемых отверстий, но при определенных условиях может создать предпосылки для возникновения недопустимых критических отклонений. Кроме того, повышенный нагрев отрицательно влияет на износостойкость и ресурс дорогостоящего специализированного инструмента. Необходимо понимать также, что реальные локальные температуры резания, значения которых зафиксировать элементарными методами не представляется возможным, могут быть значительно выше.

Известной особенностью ПКМ являются высокие упругие свойства [20]. В частности, силы резания при обработке ПКМ в 10–20 раз ниже, чем при аналогичной обработке металлов, а упругие характеристики выше, поэтому их точность

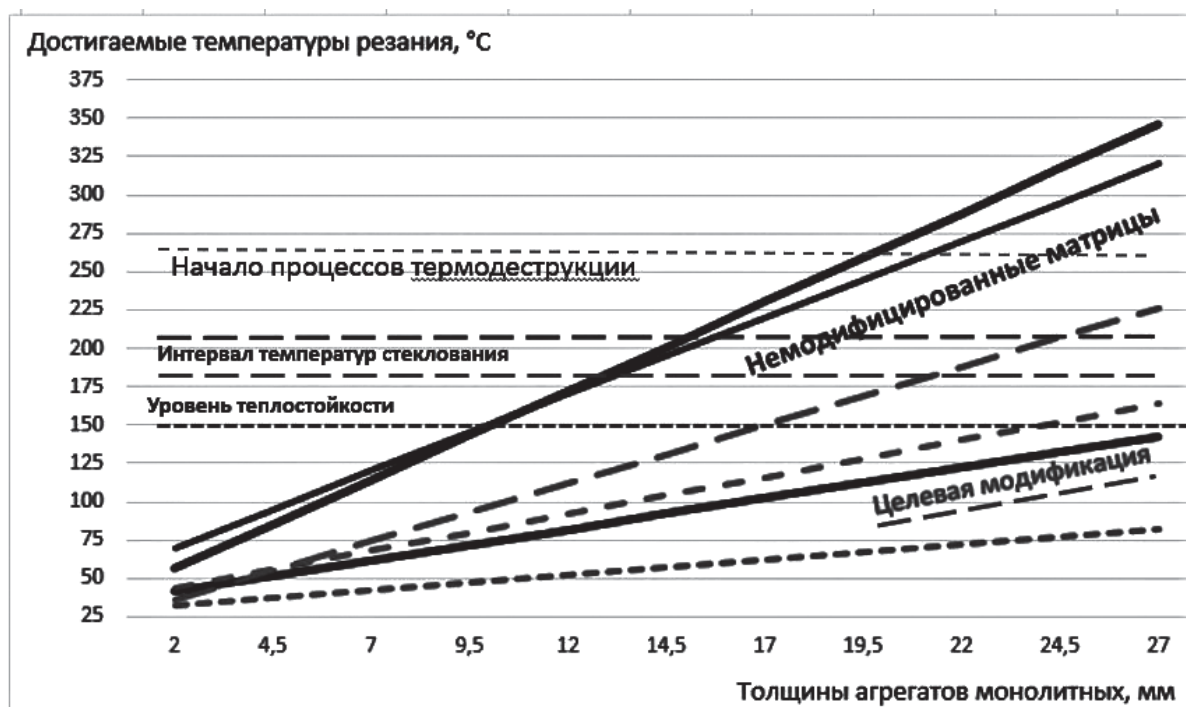


Рис. 10. Прогнозирование достигаемых температур резания монолитных деталей из углепластиков на основе немодифицированных (показаны сплошными линиями) и модифицированных (показаны пунктирными линиями) матриц

обработки в меньшей мере определяется упругими деформациями системы станок – приспособление – инструмент. На точность изделий из ПКМ при их обработке резанием влияют упругие деформации самих деталей. Также определяющее значение вносит фактор анизотропии термоупругих свойств (различием коэффициентов теплового расширения в различных направлениях), поэтому вполне объяснимо, что данный фактор может вносить значительные разбросы в точностях и качествах отверстий в разных направлениях для анизотропных многослойных структур, особенно при значительном нагреве рабочего инструмента (сверла, фрезы, развертки или зенкера), что подтверждает целесообразность снижения максимумов температур нагрева зоны резания.

Специфические особенности полимерной матрицы и ее низкая теплопроводность отрицательно влияют на условия работы режущего инструмента и результат механической обработки, приводят к увеличению площади контакта и сил трения между задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки [20]. Имеет место износ по задней поверхности режущего инструмента также вследствие упругого восстановления материала (реакции) после прохождения режущего клина. Также в [20] отмечается влияние неоднородности слоистых пластиков вследствие

периодического изменения твердости при чередовании матрицы и волокна, при этом инструмент получает микроудары, что ускоряет износ и усталостное разрушение инструмента. Износ инструмента, в свою очередь, непосредственно влияет на точность обрабатываемых поверхностей, на соответствие эффективных (реальных) параметров технологического процесса заданным во времени.

Состояние поверхностного слоя играет очень важную роль в обеспечении высоких эксплуатационных показателей изделий. Поверхностный слой сильно влияет на многие эксплуатационные характеристики изделий: прочность, износ, диэлектрические показатели, влагопоглощение и др. Механическая обработка существенно изменяет свойства поверхностного слоя, а следовательно, и эксплуатационные показатели [19]. При механической обработке происходит изменение состояния поверхностного слоя (в частности, шероховатости), перерезание армирующих волокон. К тому же повышение шероховатости ведет к увеличению влагопоглощения, что также чаще является усложняющим фактором (например, снижение температуры стеклования, а следовательно, теплостойкости).

При механической обработке ПКМ всегда имеет место деструкция полимерного связующего (и термодеструкция, и механодеструкция). Чем

больше превышение температуры резания в зоне механической обработки, тем данный фактор более усиливается. В результате этих процессов образуется деструктированно-диспергированный слой, который ухудшает конструкционные и функциональные характеристики изделий из ПКМ. С эффективным применением целевого модифицирования, обеспечивающего более выгодные условия механической обработки, возможно максимально уменьшить величину этого слоя.

Выводы

Опробовано применение материаловедческого подхода к решению проблемы нанесения повреждений ПКМ на основе эпоксидных матриц при образовании отверстий методами механической обработки. Оценено влияние введения модификатора с этой целью в диапазоне от 0,1 до 5,0 % масс. на основные технологические свойства композиции, определяющие ее приспособленность к переработке в изделия (такие, как вязкость, смазывающая способность связующего и др.), влияние на кинетические параметры процессов отверждения (для возможности прогнозирования с помощью кинетической модели отверждения степени законченности процессов отверждения при соответствующих концентрациях модификатора и возможности варьирования и назначения оптимальных параметров технологического процесса формования деталей), выявлено отсутствие химического взаимодействия композиции с модификатором.

Оценено влияние модифицирования на основные механические свойства (установлено отсутствие ухудшения свойств в диапазоне 0,1 – 1,0 % модификатора); неразрушающими акустическими методами проведен неразрушающий контроль, показывающий оптимальный уровень качества изготовленных образцов.

Для оценки эффекта влияния целевого модифицирования непосредственно на изменение условий механической обработки образцов, содержащих образованные с помощью механической обработки отверстия, были изготовлены образцы и проведено измерение показателей температуры механической обработки в зоне входа режущего инструмента в заготовку. Показано, что при измерении этого параметра как интегральной характеристики наблюдается снижение температур (температурных максимумов) при содержании модификатора 0,1–0,3 % масс. в матричных образцах (в зависимости от применяемого типа инструмента) и при содержании 0,2–0,5 % масс. в уг-

лепластиковых образцах (в зависимости от применяемого инструмента). Показано, что при дальнейшем увеличении концентрации происходит монотонное повышение температур, что можно связать с изменением условий резания при дальнейшем понижении коэффициента трения в паре «инструмент-заготовка» и изменением теплофизических свойств обрабатываемого материала. Проведенные измерения шероховатостей внутренних поверхностей отверстий и их результаты хорошо сходятся с результатами измерений температур. Значения шероховатости поверхностей, а также разброс данного показателя имеют тенденцию к повышению с повышением температур, зафиксированных во время механической обработки. Так, среднее значение шероховатости в отверстиях матричных (ненаполненных) образцов снижается в абсолютном выражении на $0,438 \pm 0,073$ мкм и имеет тенденцию к повторному повышению на концентрациях свыше 2,0 %. Разброс вариации этих показателей также следует данным зависимостям. Оценка методом компьютерной томографии показала повышение стабильности структуры материала на краю контура отверстия после механической обработки для углепластиков, модифицированных СЦ в интервале 0,1–2 % масс. Спрогнозировано возможное повышение температур резания конструкционных эпоксидных углепластиков монолитного типа при увеличении толщин и повышение эффективности влияния на эти показатели при применении целевого модифицирования.

Библиографический список

1. *Покровский А.М., Чермошенцева А.С.* Экспериментальное исследование влияния нанодобавок на свойства композиционных материалов с межслойными дефектами // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 212–221.
2. *Бычков А.Н., Фетисов Г.П., Кыдралиева К.А., Соколов Е.А., Джардималиева Г.И.* Нанокomпозиционные материалы на основе металлосодержащих наночастиц и термопластичных полимерных матриц: получение и свойства // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 209–222.
3. *Чжо А.Л., Артемьев А.В., Рабинский Л.Н., Афанасьев А.В., Семенов Н.А., Соляев Ю.О.* Идентификация свойств монослоя в углепластике с наномодифицированной матрицей // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 197–208.
4. *Гуняева А.Г.* Наномодифицированные препреги эпоксидных углепластиков // XXXVIII Гагаринские чтения: Сборник трудов Международной молодежной научной конференции: В 8 т. (Москва,

- 10-14 апреля 2012). М.: Изд-во МАТИ, 2012. Т.1. С. 28-29.
5. *Кондрашов С.В., Гуняева А.Г., Шашкеев К.А., Баринов Д.Я., Солдатов М.А., Шевченко В.Г., Музафаров А.М.* Электропроводящие гибридные полимерные композиционные материалы на основе нековалентно функционализированных углеродных нанотрубок // Труды ВИАМ. 2016. № 2 (38). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-10-10
 6. *Дубкова В.И., Судник Л.В., Петушков Д.В., Нисс В.С.* Исследование влияния нанокристаллического моногидроксида алюминия на структуру и свойства эпоксидной композиции // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции / Под общ. ред. О.Н. Комиссара. — Обнинск: ОНПП «Технология», 2013. С. 166-168.
 7. *Долгова М.И.* Возможности модифицирования термоустойчивых матриц нанонаполнителями // XL Гагаринские чтения: сборник трудов Международной молодежной научной конференции: В 9 т. (Москва, 7 -11 апреля 2014). М.: Изд-во МАТИ, 2014. Т.1. С. 45-46.
 8. *Долгова М.И., Станкой М.А., Мийченко И.П., Бухаров С.В.* Влияния ферритовых модификаторов на образование сетчатой матрицы АПМ // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции. — Обнинск: ОНПП «Технология», 2013. С. 124-125.
 9. *Насонов Ф.А.* Новые возможности и проблемы на пути применения нанотехнологий и наномодифицированных материалов при производстве изделий авиационной техники // Наноматериалы и нанотехнологии — проблемы и перспективы: Сборник трудов VI Международной научной конференции для молодых ученых (Саратов, 15–16 мая 2017). — Саратов: СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2017. С. 81–84.
 10. *Tasis D., Tagmatarchis N., Bianco A., Prato M.* Chemistry of carbon nanotubes // Chemical Reviews. 2006. Vol. 106. No. 3, pp. 1105-1136. DOI: 10.1021/cr050569o
 11. *Ковтун В.А., Пасовец В.Н., Плескачевский Ю.М., Миховски М., Йорданов М.* Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе порошковых дисперсных систем медь-углеродные нанотрубки // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2011. Т. 55. № 1. С. 91-95.
 12. *Валевин Е.О.* Модифицирование полиамида-6 силикатными наночастицами типа монтмориллонит и свойства полученного нанокompозита // Молодежь и будущее авиации и космонавтики — 2011: Сборник аннотаций III Международного межотраслевого молодежного научно-технического форума. СПб.: Принт-салон, 2011. С. 207-208.
 13. *Ковтун В.А., Пасовец В.Н., Харламов А.И.* Триботехнические характеристики композиционных материалов на основе порошковой системы медь — углеродные нанотрубки // Трение и износ. 2008. Т. 29. № 5. С. 459-464.
 14. *Насонов Ф.А.* Исследование влияния модифицирования матриц эпоксиуглепластиков на повреждаемость при образовании отверстий методами механической обработки // Гагаринские чтения — 2017: Тезисы докладов XLII Международной молодежной научной конференции (Москва, 5 -19 апреля 2017). — М.: МАИ, 2017. С. 401–402.
 15. *Насонов Ф.А., Бухаров С.В.* Материаловедческие и технологические подходы к решению проблем микроповреждаемости углепластиков при образовании отверстий методами механической обработки // Новые технологии: Материалы XIV Всероссийской конференции, посвященной 70-летию ГРЦ им. академика В.П. Макеева (10-12 октября 2017 года в г. Миасс). — М.: РАН, 2017. Т 1. С. 110–118.
 16. *Насонов Ф.А., Алексахин В.М., Мельников Д.А., Бухаров С.В.* Исследование влияния модифицирования эпоксидной матрицы и углепластика на ее основе стеаратом цинка на основные технологические свойства композиции // Вопросы материаловедения. 2018. № 3(95). С. 146-156.
 17. *Ersoy A., Buyuksagic S., Atici U.* Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks // Wear. 2005. Vol. 258. No. 9, pp. 1422-1436. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.060
 18. *Богданович П.Н., Ткачук Д.В., Белов В.М.* Методы регистрации температуры при трении и механической обработке твердых тел // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 4. С. 444–456.
 19. *Верезуб Н.В., Хавин А.П., Гетманов А.А., Тарасюк А.П.* Механическая обработка волокнистых полимерных композитов. — Харьков: Изд-во ХНАДУ (ХАДИ), 2001. — 180 с.
 20. *Головкин Г.С.* Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов. — М.: Химия, КолосС, 2007. — 399 с.

TARGET MODIFICATION OF CONSTRUCTIONAL EPOXY-CARBON PLASTICS AS A MATERIALS SCIENCE APPROACH TO THE EFFECT OF MECHANICAL JOINTS ORIFICES ON BEARING CAPACITY

Nasonov F.A.^{1*}, Gavrilov G.A.^{1**}, Babaitsev A.V.^{2***}, Nazyrova O.R.^{2****}

¹ Sukhoi Company,

23B, Polikarpov str., p/b 604, Moscow, 125284, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University),

MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

* e-mail: nasonovf2006@mail.ru

** e-mail: gg1986@mail.ru

*** e-mail: ar77eny@gmail.com

**** e-mail: norton_07@mail.ru

Abstract

The materials science approach to polymer matrices physic-mechanical properties management requires the assessment of modifying additives impact on technological and main operational properties of compositions. Works on studying and intercomparing the main technological properties of the initial epoxy composition and the one modified by technological Zinc Stearate (ZC) technological addition were conducted by viscosimetry and thermo-analytic methods. The developed kinetic model of the compositions hardening process revealed the trifling impact of the composition modification on the hardening process. Pilot samples from the plastics filled with carbon long-fibered fillers (impregnating under pressure and autoclave molding) were fabricated, and their non-destructive control and standard samples testing were performed for mechanical properties measuring.

Estimation by the computer tomography method revealed the stability augmentation of material structure along the edge of the orifice contour after machining for carbon plastics modified by ZC within the interval of 0.1–2% of mass. Thermal effects measuring of machining processes with various tools were performed by IR-thermography method combined with recording function at the specified intervals. The dependence of thermal effects from the modifier concentration was established. The article demonstrates that while this parameter measuring as an integral characteristic, temperatures reduction (temperatures maximums) is observed at the modifier content in matrix samples of 0.1–0.3% by weight, and at the content of 0.2–0.5% by weight in the carbon plastic samples (depending on the applied tool).

Keywords: polymer composite material, epoxy matrix, epoxy-carbon plastic, technological properties, IR-thermography, profilometry.

References

1. Pokrovskii A.M., Chermoshentseva A.S. Experimental study of nano-additives effect on properties of composite materials with interlayer defects. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 212–221.
2. Bychkov A.N., Fetisov G.P., Kydraliev K.A., Sokolov E.A., Dzhardimalieva G.I. Nanocomposite materials based on metallic nanoparticles and thermoplastic polymer matrices: production and properties. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 209–222.
3. Kyaw A.L., Artem'ev A.V., Rabinskii L.N., Afanas'ev A.V., Semenov N.A., Solyaev Yu.O. Monolayer properties identification in carbon composite with nano-modified matrix. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 197–208.
4. Gunyaeva A.G. *Materialy Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "XXXVIII Gagarinskie chteniya"* (Moscow, 10 - 14 April 2012), Moscow, MATI, 2012, vol. 1, pp. 28–29.
5. Kondrashov S.V., Gunyaeva A.G., Shashkeev K.A., Barinov D.Ya., Soldatov M.A., Shevchenko V.G., Muzafarov A.M. *Trudy VIAM*, 2016, no. 2 (38). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-10-10
6. Dubkova V.I., Sudnik L.V., Petushkov D.V., Niss V.S. *Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Konstruktsii i tekhnologii polucheniya izdelii iz nemetallicheskih materialov"*, Obninsk, ONPP "Tekhnologiya", 2013, pp. 166–168.
7. Dolgova M.I. *Materialy Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii "XL Gagarinskie chteniya"* (Moscow, 7–11 April 2014), Moscow, MATI, 2014, vol. 1, pp. 45–46.
8. Dolgova M.I., Stankoi M.A., Miichenko I.P., Bukharov S.V. *Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Konstruktsii i tekhnologii"*

- polucheniya izdelii iz nemetallicheskich materialov*”, Obninsk, ONPP “Tekhnologiya”, 2013, pp. 124-125.
9. Nasonov F.A. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii dlya molodykh uchenykh “Nanomaterialy i nanotekhnologii - problemy i perspektivy” (Saratov, 15–16 May 2017)*. Saratov, SGTU im. Yu.A. Gagarina, 2017, pp. 81–84.
 10. Tasis D., Tagmatarchis N., Bianco A., Prato M. Chemistry of carbon nanotubes. *Chemical Reviews*, 2006, vol. 106, no. 3, pp. 1105-1136. DOI: 10.1021/cr050569o
 11. Kovtun V.A., Pasovets V.N., Pleskachevskii Yu.M., Mikhovski M., Iordanov M. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi*, 2011, vol. 55, no. 1, pp. 91-95.
 12. Valevin E.O. *Molodezh’ i budushchee aviatsii i kosmonavтики. Sbornik statei*, Moscow, MAI, 2011, pp. 207-208.
 13. Kovtun V.A., Pasovets V.N., Kharlamov A.I. *Trenie i iznos*, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 459-464.
 14. Nasonov F.A. *Materialy XLII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii “Gagarinskie chteniya - 2017” (Moscow, 5 -19 April 2017)*, Moscow, MAI, 2017, pp. 401–402.
 15. Nasonov F.A., Bukharov S.V. *Materialy XIV Vserossiiskoi konferentsii “Novye tekhnologii” (10-12 October 2017, Miass)*, Moscow, RAN, 2017, vol. 1, pp. 110–118.
 16. Nasonov F.A., Aleksashin V.M., Mel’nikov D.A., Bukharov S.V. *Voprosy materialovedeniya*, 2018, no. 3(95), pp. 146-156.
 17. Ersoy A., Buyuksagic S., Atici U. Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks. *Wear*, 2005, vol. 258, no. 9, pp. 1422-1436. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.060
 18. Bogdanovich P.N., Tkachuk D.V., Belov V.M. *Trenie i iznos*, 2006, vol. 27, no. 4, pp. 444–456.
 19. Verezub N.V., Khavin A.P., Getmanov A.A., Tarasyuk A.P. *Mekhanicheskaya obrabotka voloknistykh polimernykh kompozitov* (Mechanical treatment of fibrous polymer composites), Kharkov, KhNADU (KhADI), 2001, 180 p.
 20. Golovkin G.S. *Proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya izdelii iz polimernykh materialov* (Designing technological processes of products manufacturing from polymeric materials), Moscow, Khimiya, KolosS, 2007, 399 p.

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*
Художественное оформление *В.И. Володиной, И.В. Романовой*
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 10.06.2019. Подписано в печать 10.09.2019.
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 28,36. Уч.-изд. л. 30,50. Тираж 150 экз. Заказ 1035/719.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993