



Влияние типа наполнителя на оптимальные режимы отверждения толстостенных ПКМ

О.С. Дмитриев

В.Н. Кириллов
кандидат технических наук

А.В. Зуев
кандидат технических наук

А.А. Черепахина

Август 2011

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – 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 в 30-ти научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4-х 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 Международных салонов 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 Е.Н.Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Клеи. Герметики. Технологии», №11, 2011 г.

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

Влияние типа наполнителя на оптимальные режимы отверждения толстостенных ПКМ

О.С. Дмитриев¹, В.Н. Кириллов², А.В. Зуев², А.А. Черепахина¹

¹ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

²ФГУП «ВИАМ», г. Москва

Исследована зависимость рассчитанных режимов отверждения толстостенных изделий из композитов от типа наполнителя. Выполнены численные расчеты, проведен анализ и показана необходимость коррекции температурно-временного режима отверждения, предназначенного для изготовления тонкостенных материалов с различными наполнителями, при изготовлении более толстых пластин из этих материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, режим отверждения термореактивных композитов, теплофизические и кинетические характеристики полимерных композитов, толстостенные изделия из полимерных композитов

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных, стеклянных, органических наполнителей в силу своих преимуществ перед металлическими сплавами находят широкое применение в различных отраслях техники, в том числе в конструкциях современных летательных аппаратов [1, 2].

В частности, высокомодульные композиционные материалы на основе углеродных наполнителей наряду с уникальными прочностными характеристиками обладают высоким сопротивлением усталости, меньшей чувствительностью к концентрациям напряжений, низкой скоростью распространения трещин, что обеспечивает повышенную долговечность конструкций из этих материалов. Поэтому в перспективных летательных аппаратах из высокомодульных углепластиков изготавливают крыло и хвостовое оперение, гондолы двигателей и др. При этом детали сильно

нагруженных крупногабаритных конструкций элементов крыла, фюзеляжа и деталей центроплана могут достигать толщины 40 мм и более [1, 2].

Композиты, наполненные стеклянными волокнами, обладают хорошими прочностными и электроизоляционными свойствами. Благодаря малым значениям диэлектрической проницаемости и фактора потерь при прохождении через материал высокочастотных электромагнитных колебаний, а также стабильности этих характеристик в эксплуатационных условиях, ПКМ этого класса широко используют при изготовлении антенных обтекателей самолетов [1, 3].

К особенностям органопластиков как конструкционных материалов относятся: высокая удельная прочность и жесткость при растяжении, высокая вязкость при разрушении, низкая скорость роста усталостных трещин, способность к длительному накоплению повреждений без образования критической трещины, низкая чувствительность к концентраторам напряжений, высокие демпфирующие свойства. Сочетание этих свойств определяет многоцелевое назначение этого класса ПКМ [1].

Помимо авиации толстостенные конструкции из ПКМ применяют также в судостроении [2, 3], при изготовлении строительной арматуры [4], железнодорожного и высоковольтного оборудования [5], в химической промышленности при производстве химических и коррозионностойких труб, скрубберов, резервуаров, баллонов, емкостей и др. [1, 2].

Процесс отверждения изделий из терморезистивных композитов, как правило, сопровождается экзотермической реакцией. При неоптимальном температурно-временном режиме отверждения это приводит к существенному перегреву внутренних слоев материала, деструкции связующего, накоплению внутренних напряжений, вызывающих снижение прочностных свойств материала. Устранить указанные недостатки и тем самым повысить качественные показатели и физико-механические характеристики изделий из ПКМ можно путем задания оптимального температурно-временного режима на

поверхности изделия. Особенно эта задача актуальна при изготовлении крупногабаритных толстостенных изделий из ПКМ.

Основные характеристики ПКМ, прежде всего, определяются режимами отверждения, свойствами и соотношением исходных компонентов (полимерного связующего и армирующего наполнителя), взаимодействием их на границе раздела и свойствами межфазных слоев, степенью их активности по отношению к компонентам связующих, микро- и макроструктурой армирующих наполнителей [6]. Различие поверхностных свойств наполнителей и компонентов связующих, а также возможность вступления функциональных групп наполнителей (в особенности полимерных волокон) во взаимодействие со связующим приводят к избирательной сорбции волокнами компонентов связующих в процессе отверждения, что в значительной мере изменяет кинетические параметры отверждения связующего [6, 7].

Наполнитель оказывает существенное влияние и на теплофизические свойства композитных материалов и сильно зависит от структурной организации композиционного материала [8]. На теплофизические свойства композитов оказывает влияние также давление прессования и наличие летучих продуктов [6, 8].

Таким образом, свойства ПКМ и кинетика процесса отверждения существенным образом зависят от типа наполнителя, и необходимо исследовать влияние наполнителя ПКМ на рассчитанные оптимальные режимы отверждения толстостенных изделий.

Для исследований были выбраны полимерные композиционные материалы на основе модифицированного эпоксидного связующего, армированного углеродным, стеклянным и органическим наполнителями.

В качестве базового был взят режим, рекомендованный для отверждения исследуемых нами композиционных материалов с различными типами наполнителя. Режим состоит из двух ступеней: первая ступень – подъем температуры со скоростью 1–3 К/мин до 90°C, выдержка при 90°C и вакууме 0,7–9 атм в течение 30–40 мин; вторая ступень – подача давления 2 атм,

подъем температуры до 125°C и выдержка при (125±5)°C в течение 2,5–3 ч. Этот режим, в основном, применяют как регламентный для изготовления изделий толщиной 2–5 мм из указанных ПКМ.

Определение режима отверждения толстостенных изделий из композитов является сложной задачей, сопряженной со значительными трудностями, связанными с отсутствием теории, описывающей полный процесс отверждения материала. Используемые методы термического анализа [9] имеют ряд недостатков: высокая трудоемкость и длительность проведения опытов; необходимость использования образцов небольшого размера, при исследовании которых не учитывается масштабный фактор; реологические характеристики полимерного связующего; давление прессования и др. Получаемые при использовании этих методов результаты приемлемы только для определения режимов отверждения тонкостенных изделий (2–5 мм), характеризующихся равномерным отверждением по толщине. Они не соответствуют процессам, протекающим при отверждении толстостенных (свыше 10 мм) изделий из ПКМ [10, 11], в которых процесс отверждения определяется скоростью отвода тепла теплопроводностью в оснастку.

Наиболее полно проблема выбора режимов отверждения толстостенных изделий может быть решена путем комплексного применения методов оптимизации с использованием математической модели термокинетического процесса отверждения и определения параметров математической модели. Этот метод заключается в постановке и решении задачи минимизации некоторого критерия оптимальности [12–14]. С его помощью можно определить режимы отверждения изделий из ПКМ любых геометрических размеров и форм.

При изготовлении крупногабаритных толстостенных изделий из полимерных композиционных материалов в настоящее время широко применяют метод автоклавного вакуумного формования на формообразующей оснастке в технологическом пакете [1, 2]. Форма изделий, производимых методом вакуумного формования, может быть как плоская, так и иметь небольшую кривизну. Поэтому изделия, отверждаемые по автоклавной

вакуумной технологии, можно рассматривать как неограниченные пластины и использовать одномерную математическую модель процесса, хотя нет никаких препятствий для использования более сложной модели.

Для решения оптимизационной задачи использовали математическую модель процесса автоклавного вакуумного формования ПКМ, представляющую собой систему дифференциальных уравнений тепломассопереноса, кинетики отверждения, течения (выдавливания) связующего, уплотнения материала в процессе формования и реологических уравнений состояния [12–16]. Основными параметрами математической модели процесса отверждения являются характеристики материала как в отвержденном состоянии ($C_{от}$, $\lambda_{от}$), так и в неотвержденном ($C_{но}$, $\lambda_{но}$), а также в процессе отверждения. К ним относятся: теплофизические характеристики материала, т.е. объемная теплоемкость $C(T, \beta, \gamma)$, теплопроводность $\lambda(T, \beta, \gamma)$ в зависимости от температуры T , степени отверждения β и содержания связующего γ ; мощность тепловыделений $W(t)$; полный тепловой эффект $Q_{п}$; кинетические характеристики, т.е. энергия активации процесса отверждения $E(\beta)$, кинетическая функция $\varphi(\beta)$, включающая в себя скорость и порядок химической реакции, а при необходимости и реологические характеристики, т.е. энергия активации вязкого течения E_{μ} и эффективная вязкость связующего $\tilde{\mu}(\beta)$ при отверждении. Все вышеупомянутые характеристики исследуемых композитов и другие параметры математической модели [15, 16] определяли с использованием информационно-измерительной системы (ИИС) исследования процесса отверждения композитов [17–19]. В результате обработки экспериментальных данных получены теплофизические характеристики $C_{от}(T)$, $\lambda_{от}(T)$, $C_{но}(T)$, $\lambda_{но}(T)$, $C(T, \beta, \gamma_{и})$, $\lambda(T, \beta, \gamma_{и})$, мощность тепловыделений $W(t)$, полный тепловой эффект $Q_{п}$ и кинетические параметры процесса отверждения $E(\beta)$, $\varphi(\beta)$, соответствующие коэффициенту содержания связующего в исследуемом препреге $\gamma_{и}$, значения которых рассчитаны по температурным полям нагрева и отверждения образцов и показаны в работах [13, 14, 17–19].

Для сравнения влияния типа наполнителя в табл. 1 и 2 показаны теплофизические характеристики отвержденных ПКМ и кинетические параметры процесса отверждения исследованных композитов. Так, например, углеродный наполнитель имеет более высокую, почти в 2 раза, теплопроводность по сравнению со стеклянным и органическим. За счет различной теплопроводности наполнителя изменяется количество тепла экзотермической реакции отверждения полимерного связующего, уходящего при формовании в технологическую оснастку, что при достаточной толщине материала может в значительной мере нивелировать температурные градиенты, возникающие внутри композита в процессе его отверждения, влияя, тем самым, на температурно-временной режим отверждения. Различие теплоемкости также весьма значительно, особенно в области температур протекания реакции отверждения, и достигает 1,5–2 раз, что также влияет на динамику теплопереноса внутри материала, в особенности толстостенного, и вносит коррективы в оптимальный режим отверждения.

Таблица 1.

Теплофизические характеристики трех типов ПКМ

T, °C	Стеклопластик		Органопластик		Углепластик	
	$C_{от}$, кДж/м ³ ·К	$\lambda_{от}$, Вт/м·К	$C_{от}$, кДж/м ³ ·К	$\lambda_{от}$, Вт/м·К	$C_{от}$, кДж/м ³ ·К	$\lambda_{от}$, Вт/м·К
25	1290	0,223	1710	0,150	1550	0,424
50	1390	0,231	1930	0,172	1630	0,430
75	1470	0,243	2170	0,193	1770	0,434
100	1530	0,258	2270	0,204	1930	0,438
125	1570	0,264	2430	0,212	2120	0,442
150	1580	0,269	2510	0,219	2280	0,449

Таблица 2.

Кинетические параметры процесса отверждения трех типов ПКМ

β	Стеклопластик		Органопластик		Углепластик	
	$E(\beta)$, кДж/моль	$\ln\{\varphi(\beta)\}$, [1/с]	$E(\beta)$, кДж/моль	$\ln\{\varphi(\beta)\}$, [1/с]	$E(\beta)$, кДж/моль	$\ln\{\varphi(\beta)\}$, [1/с]
0	47,3	6,21	82,6	17,2	83,2	9,42
0,2	50,1	7,63	87,4	19,3	88,3	10,4
0,5	49,4	6,22	82,8	18,3	84,1	9,32
0,7	46,2	5,13	82,5	17,3	83,1	7,85
1,0	40,8	2,76	82,1	8,97	79,6	3,38

Кинетические параметры процесса отверждения $E(\beta)$ и $\varphi(\beta)$, вычисленные по мощности тепловыделений $W(t)$ также существенно изменяются от типа наполнителя, что подтверждает результаты исследований, приведенные в работах [6, 7]. Кинетическая функция $\varphi(\beta)$, включающая в себя скорость и порядок химической реакции, по сравнению со стеклопластиком увеличивается на несколько порядков при введении в эпоксидное связующее органического наполнителя и значительно увеличивается при введении углеродного волокна. Энергии активации $E(\beta)$ для различных типов наполнителей также различны.

Полученные характеристики и параметры композитов явились информационной основой для компьютерного моделирования различных ситуаций в процессе отверждения и расчета оптимальных режимов отверждения изделий из ПКМ любой толщины [12–14]. Программное обеспечение ИИС позволяет рассчитываемые температурно-конверсионные поля представлять в виде графиков и 3D поверхностей, тем самым, как бы «заглядывать внутрь» материала при его изготовлении, анализировать неравномерность отверждения, быстро оценить преимущества и недостатки используемого режима отверждения для данного материала и выбрать правильную стратегию оптимизации режима.

Для выбранных материалов были выполнены численные исследования и проведен анализ использования существующего единого регламентного режима отверждения, предназначенного для производства пластин толщиной 2–5 мм из стеклопластика, органопластика и углепластика, оценена его пригодность для изготовления более толстых пластин из этих ПКМ, например, толщиной 30 мм, а также сделаны расчеты оптимальных режимов отверждения. На первом этапе были рассчитаны температурно-конверсионные поля при отверждении пластин из стеклопластика, органопластика и углепластика толщиной 2 мм. Профиль температуры регламентного режима $T(t)$ и кинетика отверждения $\beta(t)$ для сравнения приведены на рис. 1. Расчеты полей показывают, что процесс отверждения в

органопластике по сравнению со стеклопластиком идет более интенсивно и проходит быстро за счет повышения скорости реакции отверждения эпоксидного связующего органическим наполнителем и, соответственно, больших значений кинетической функции. В углепластике за счет высокой энергии активации и меньшей скорости реакции процесс отверждения начинается также интенсивно, но значительно замедляется после гель-точки. К окончанию регламентного режима стеклопластик и органопластик практически достигают конечной степени отверждения $\beta \approx 1$, а для углепластика требуется более длительная (на 2,5 ч больше) выдержка при 125°C для достижения конечной степени отверждения. Гель-точка для всех трех материалов наступает в области перехода ко второй ступени. Таким образом, единый регламентный режим является приемлемым для отверждения всех трех материалов толщиной до 5 мм с коррекцией длительности второй ступени для углепластика.

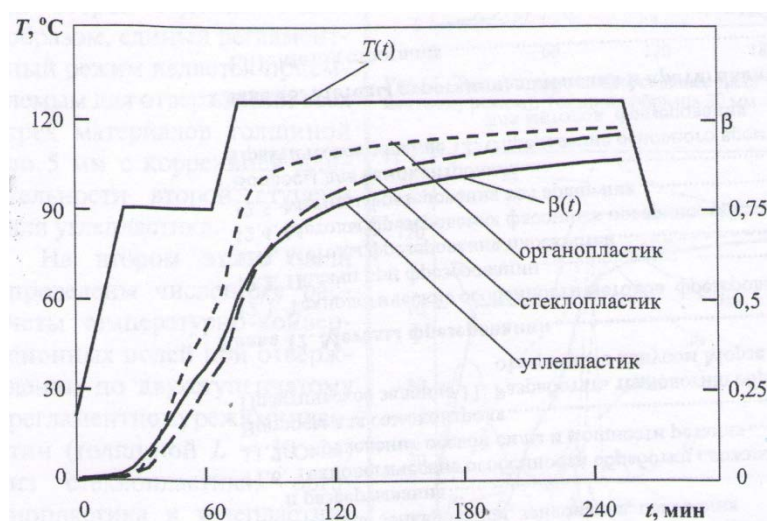


Рисунок 1. Кинетика отверждения трех типов ПКМ по регламентному режиму.
Толщина образцов 2 мм

На втором этапе были проведены численные расчеты температурно-конверсионных полей при отверждении по двухступенчатому регламентному режиму пластин (толщиной $L=30$ мм) из стеклопластика, органопластика и углепластика со связующим на основе модифицированной эпоксидной смолы. Температурно-конверсионные поля, т.е. графики температуры на поверхностях пластины T_0 и в середине $T_{L/2}$ степени отверждения β_0 и $\beta_{L/2}$,

мощности тепловыделений W_0 и $W_{L/2}$, максимального по толщине модуля градиента температуры G_{max} в процессе отверждения композиционных материалов с различными наполнителями представлены на рис. 2–4.

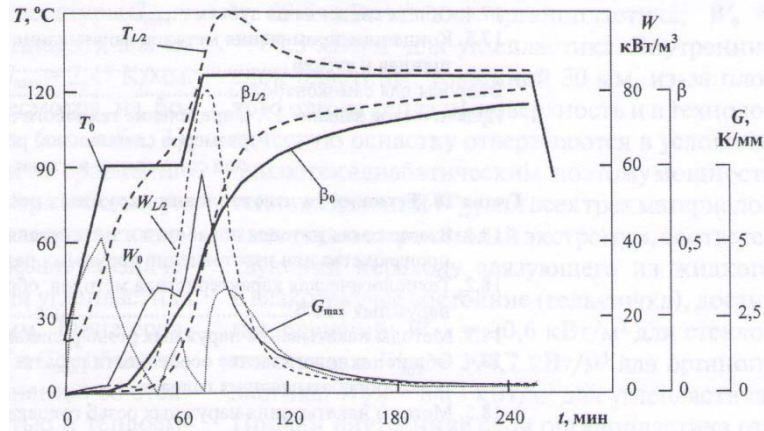


Рисунок 2. Температурно-конверсионные поля стеклопластика, отвержденного по регламентному режиму. Толщина образца 30 мм

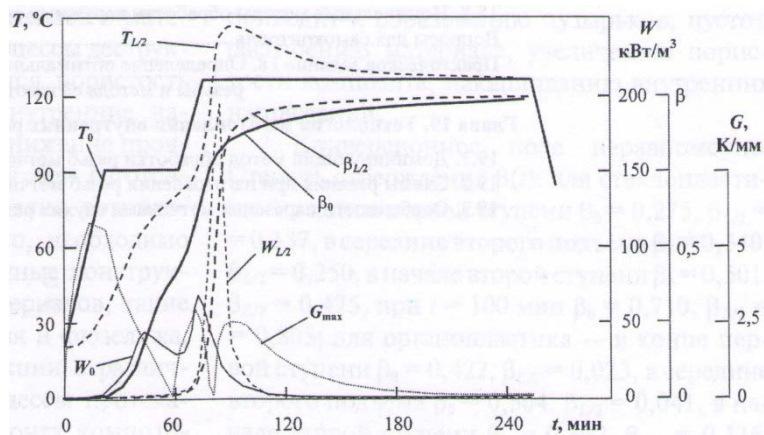


Рисунок 3. Температурно-конверсионные поля органопластика, отвержденного по регламентному режиму. Толщина образца 30 мм

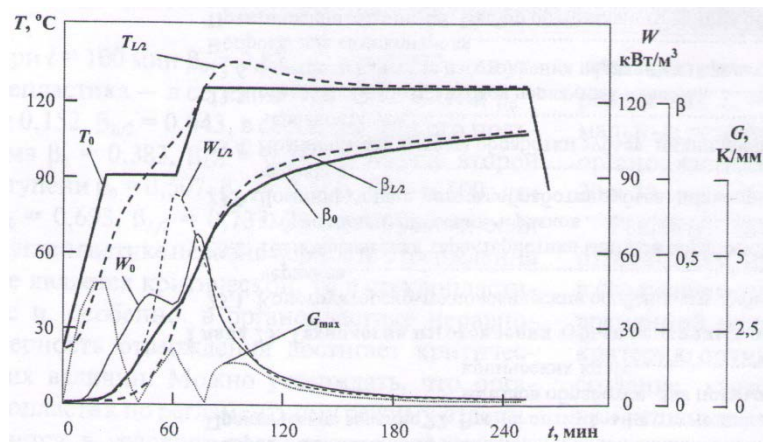


Рисунок 4. Температурно-конверсионные поля углепластика, отвержденного по регламентному режиму. Толщина образца 30 мм

На основе анализа проведенных численных расчетов температурно-конверсионных полей можно сделать следующие выводы.

1. Перепады температуры по толщине $T_0 - T_{L/2} = \Delta T$, т.е. перегревы внутренних слоев из-за экзотермического эффекта и, соответственно, большие градиенты температуры G имеют место во всех трех материалах и наступают во время второй ступени. Для стеклопластика перепад составляет $\Delta T = 25,1$ К, а максимальный модуль градиента температуры $G_{\max} = 2,89$ К/мм. Для органопластика эти значения составляют $\Delta T = 21,3$ К и $G_{\max} = 2,47$ К/мм. Это объясняется тем, что, несмотря на более низкую теплопроводность (см. табл. 1), при $120-150^\circ\text{C}$ органопластик по сравнению со стеклопластиком имеет в 1,8 раза большую теплоемкость, которая не позволяет экзотермической реакции достичь больших значений перепада температуры. Для углепластика $\Delta T = 12,4$ К и $G_{\max} = 1,46$ К/мм. Такие сравнительно низкие значения ΔT и G_{\max} объясняются более высокими по сравнению со стеклопластиком теплопроводностью и теплоемкостью.

При таких перепадах температуры по толщине и перегреве внутренних слоев в материале начинают протекать процессы деструкции связующего, увеличивается пористость композита, накапливаются внутренние напряжения. Все это вызывает снижение прочностных свойств материала, а при изготовлении крупногабаритных изделий возникает их коробление. Кроме того, необходимо учитывать, что крупногабаритные конструкции из композиционных материалов, такие как элементы крыла, оперения и фюзеляжа, представляют собой конструкции с различной толщиной, поэтому процессы протекания полимеризации в этих зонах композита значительно отличаются. В этом случае режим формования должен выбираться таким образом, чтобы получить необходимые прочностные характеристики в наиболее толстой напряженной зоне конструкции.

2. Мощность тепловыделений $W(t)$ на поверхности пластины W_0 соответствует профилю температурно-временного режима, т.е. имеет спад в конце первой ступени и резко повышается при переходе ко второй ступени,

достигая значений: $W_0=58,2$ кВт/м³ для стеклопластика; $W_0=69,5$ кВт/м³ для органоластика; $W_0=68,3$ кВт/м³ для углеластика. Внутренние слои пластины, толщиной 30 мм, из-за плохого оттока тепла на поверхность и в технологическую оснастку отверждаются в условиях, близких к адиабатическим, поэтому мощность тепловыделений W_{L2} для всех трех материалов имеет ярко выраженный экстремум, соответствующий переходу связующего из жидкого в вязкотекучее состояние (гель-точка), достигая значений: $W_{L2}=80,6$ кВт/м³ для стеклоластика; а $W_{L2}=194,7$ кВт/м³ для органоластика; $W_{L2}=84,3$ кВт/м³ для углеластика. Причем внутренние слои органоластика отверждаются в условиях, близких к тепловому взрыву, практически в течение 20 мин. Это приводит к образованию пузырьков, пустот, расслоению материала, увеличению пористости композита, накапливанию внутренних напряжений.

3. Конверсионное поле неравномерно. Степень отверждения $\beta(t)$: для стеклоластика – в конце первой ступени $\beta_0=0,275$, $\beta_{L2}=0,137$, в середине второго подъема $\beta_0=0,340$, $\beta_{L2}=0,250$, в начале второй ступени $\beta_0=0,501$, $\beta_{L2}=0,475$, при $t=100$ мин $\beta_0=0,710$, $\beta_{L2}=0,805$; для органоластика – в конце первой ступени $\beta_0=0,422$, $\beta_{L2}=0,023$, в середине второго подъема $\beta_0=0,504$, $\beta_{L2}=0,041$, в начале второй ступени $\beta_0=0,692$, $\beta_{L2}=0,116$, при $t=100$ мин $\beta_0=0,872$, $\beta_{L2}=0,930$; для углеластика – в середине первой ступени $\beta_0=0,152$, $\beta_{L2}=0,043$, в середине второго подъема $\beta_0=0,383$, $\beta_{L2}=0,387$, в начале второй ступени $\beta_0=0,507$, $\beta_{L2}=0,511$, при $t=100$ мин $\beta_0=0,693$, $\beta_{L2}=0,737$. Таким образом, если в углеластике неравномерность отверждения не является критической, то в стеклоластике и, особенно, в органоластике неравномерность отверждения достигает критических величин. Можно утверждать, что органоластик по регламентному режиму отверждается в условиях распространения фронта экзотермической реакции. Такой режим является одним из наиболее нежелательных, поскольку создает наиболее благоприятные условия для формирования внутренних напряжений.

Полученные результаты наглядно показывают, что регламентный температурно-временной режим отверждения, разработанный для тонких

пластин, не может быть использован при отверждении изделий толщиной более 5 мм. В этих случаях для получения качественных изделий необходима существенная коррекция регламентного режима или расчет нового режима отверждения для каждого материала в отдельности.

На третьем этапе исследований с помощью ИИС выполнены расчеты оптимальных режимов отверждения плоских изделий толщиной 10, 20 и 30 мм из стеклопластика, органопластика и углепластика. Температурно-конверсионные поля рассчитанных оптимальных режимов отверждения трех типов композитов толщиной 30 мм представлены на рис. 5–7. Для сравнения на рис. 8–10 представлены существующий регламентный режим для $L=5$ мм и рассчитанные оптимальные режимы изделий из стеклопластика, органопластика и углепластика толщиной 10, 20 и 30 мм.

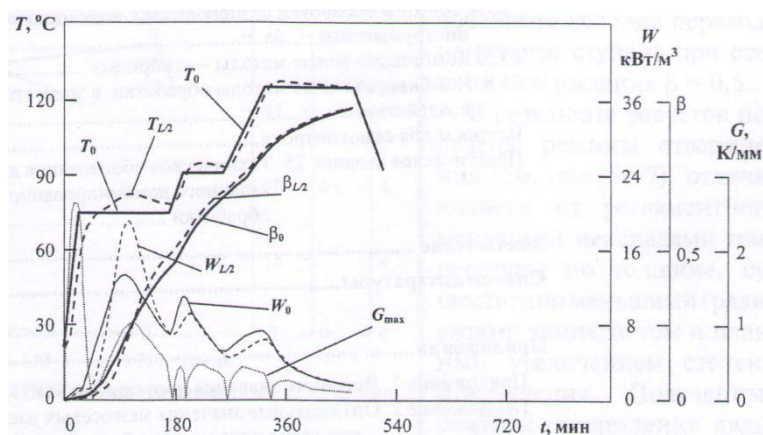


Рисунок 5. Оптимальный режим отверждения стеклопластика толщиной 30 мм.
 $t_k=460$ мин

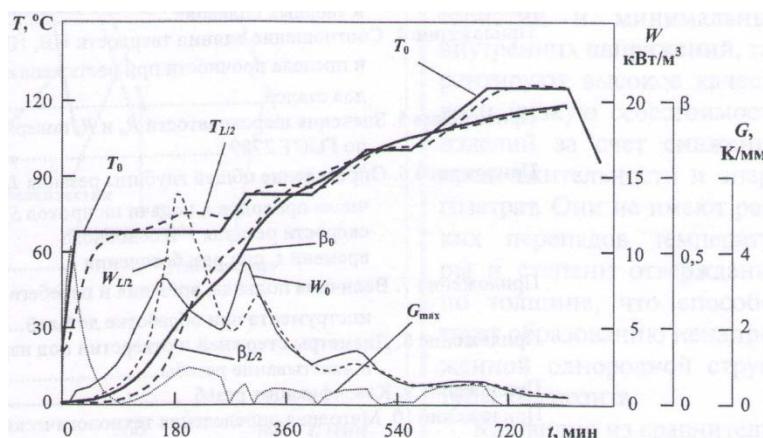


Рисунок 6. Оптимальный режим отверждения органопластика толщиной 30 мм.
 $t_k=820$ мин

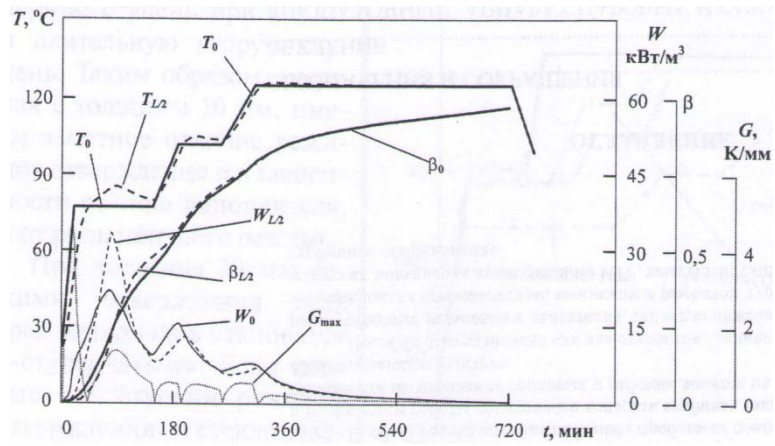


Рисунок 7. Оптимальный режим отверждения углепластика толщиной 30 мм.

$t_k=720$ мин

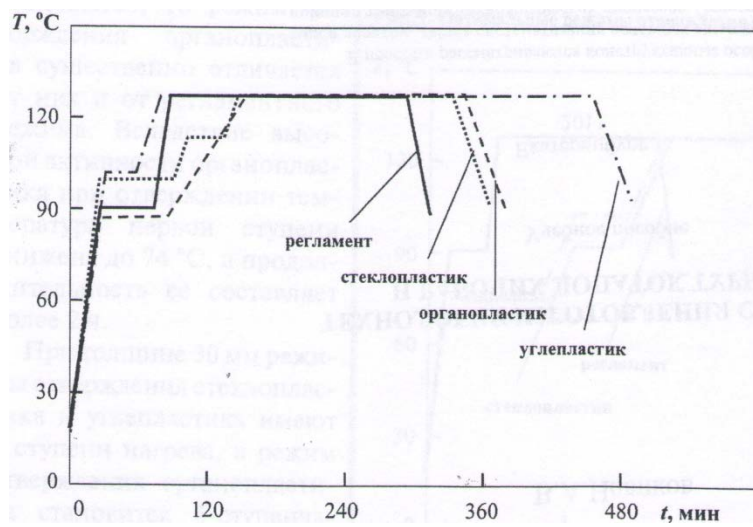


Рисунок 8. Оптимальные режимы отверждения плоских изделий из ПКМ толщиной 10 мм

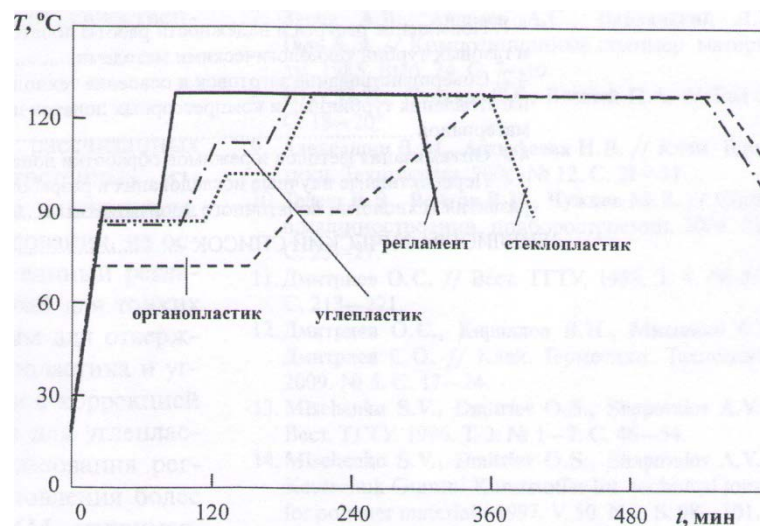


Рисунок 9. Оптимальные режимы отверждения плоских изделий из ПКМ толщиной 20 мм

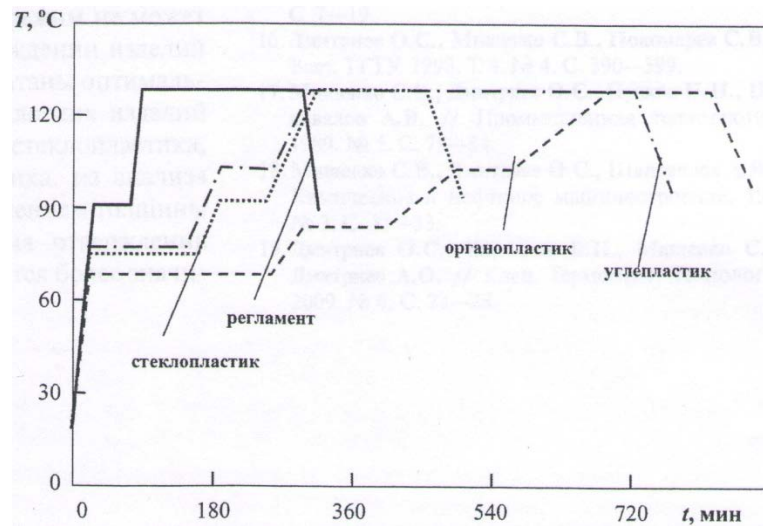


Рисунок 10. Оптимальные режимы отверждения плоских изделий из ПКМ толщиной 30 мм

Решение задачи оптимизации процесса отверждения изделий из ПКМ заключается в следующем: требуется найти температурно-временной режим, доставляющий минимум критерию оптимальности и обеспечивающий создание качественного готового изделия при решении уравнений математической модели, а также ограничений в виде неравенств, налагаемых на процесс [12, 14].

К ограничениям относятся: максимально допустимая температура T_{\max} внутри материала изделия, выше которой в связующем начинают протекать побочные нежелательные реакции, связанные с деструкцией связующего; максимально допустимая разность температур по толщине изделия $\Delta\bar{T}_{\max}$, не вызывающая неоднородности процесса отверждения материала; максимально допустимый температурный градиент при отверждении \bar{G}_{\max} , не вызывающий накопления внутренних напряжений в материале.

Расчеты оптимальных режимов отверждения выполнены со следующими ограничениями: при первом линейном подъеме температуры допустимый по толщине температурный градиент ($\bar{G}_{\max}=5$ К/мм; на первой ступени нагрева $\bar{G}_{\max}=1$ К/мм и допустимый перегрев внутренних слоев $\Delta\bar{T}_{\max}=8$ К; на второй, третьей и четвертой ступенях нагрева и переходе между ними допустимый по толщине градиент температуры ($\bar{G}_{\max}=0,4$ К/мм и допустимый перегрев внутренних слоев $\Delta\bar{T}_{\max}=5$ К (см. рис. 5–7).

Увеличенный градиент температуры на первой ступени нагрева вызван соображениями уменьшения времени первой выдержки, так как степень отверждения здесь не достигла момента гелеобразования и неравномерность температурно-конверсионного поля не влияет на накопление внутренних напряжений. Кроме того, при расчете режимов добавлено условие перехода на вторую ступень при степени отверждения $\beta=0,5$.

В результате расчетов получены режимы отверждения (см. рис. 5–7), отличающиеся от регламентного меньшими перепадами температуры по толщине, существенно меньшими градиентами температуры и плавным увеличением степени отверждения. Полученные режимы отверждения являются оптимальными с точки зрения прочностных характеристик и минимальных внутренних напряжений, гарантируют высокое качество и низкую себестоимость изделий за счет снижения продолжительности и энергозатрат. Они не имеют резких перепадов температуры и степени отверждения о толщине, что способствует образованию ненапряженной однородной структуры композита.

Как видно из сравнительных по типу наполнителя графиков (рис. 8–10), при толщине 10 мм режим отверждения стеклопластика имеет 3 ступени нагрева, а режимы отверждения органопластика и углепластика – 2 ступени. Время окончания процесса для стеклопластика и органопластика составляет соответственно 330 и 342 мин, т.е. является практически одинаковым, несмотря на существенное различие в кинетике отверждения. Это объясняется тем, что режим отверждения органопластика имеет первую ступень при 87°C , а режим отверждения стеклопластика – при 98°C . Режим отверждения углепластика имеет короткую первую ступень при 101°C и длительную вторую ступень. Таким образом, начиная с толщины 10 мм, имеем заметное отличие режимов отверждения и в зависимости от типа наполнителя, и от регламентного режима.

При толщине 20 мм режимы отверждения всех трех материалов становятся 3-ступенчатыми. Если первые две ступени режимов отверждения

стеклопластика и углепластика мало отличаются, то режим отверждения органопластика существенно отличается от них и от регламентного режима. Вследствие высокой активности органопластика при отверждении температура первой ступени снижена до 74°C, а продолжительность ее составляет более 2 ч.

При толщине 30 мм режимы отверждения стеклопластика и углепластика имеют 3 ступени нагрева, а режим отверждения органопластика становится 4-ступенчатым. Это связано со стремлением оптимизационного алгоритма интенсифицировать процесс отверждения при удовлетворении ограничениям. Первые две ступени режимов отверждения стеклопластика и углепластика также мало отличаются, а режим отверждения органопластика отличается от них существенно. Значительно увеличивается и продолжительность процесса отверждения: если для стеклопластика это увеличение по сравнению с регламентным режимом составляет в 1,8 раза, то для органопластика и углепластика – почти в 3 раза.

Таким образом, с увеличением толщины изделия зависимость режима отверждения от типа наполнителя становится более значительной. Продолжительность процесса отверждения для всех трех типов ПКМ с увеличением толщины также значительно увеличивается, а температуры первой и последующих изотермических выдержек заметно понижаются, при этом внутренние тепловыделения на первых стадиях процесса отверждения также снижаются, что особенно заметно на примере органопластика. Это уменьшает неоднородность температурного и конверсионного полей до заданных уровней \bar{G}_{\max} и $\Delta\bar{T}_{\max}$ и приводит к повышению качественных показателей изделий.

Выводы

Исследована зависимость рассчитанных режимов отверждения толстостенных изделий из композитов от типа наполнителя. Выполнены численные исследования, на основе которых выявлено, что единый

регламентный режим, разработанный для тонких пластин, является приемлемым для отверждения стеклопластика, органопластика и углепластика толщиной до 5 мм с коррекцией длительности второй ступени для углепластика. Проведен анализ использования регламентного режима для изготовления более толстых пластин из этих ПКМ, например, толщиной 30 мм, в результате которого установлено, что регламентный режим не может быть использован при отверждении изделий толщиной более 5 мм. Рассчитаны оптимальные режимы отверждения плоских изделий толщиной 10, 20 и 30 мм из стеклопластика, органопластика и углепластика, из анализа которых следует, что с увеличением толщины изделия зависимость режима отверждения от типа наполнителя становится более значительной.

Список литературы:

1. Кербер М.Л., Виноградова В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / Под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
2. Композиционные материалы, технология и автоматизация производства изделий / Под ред. К.В. Фролова, А.Г. Братухина, О.С. Сироткина и др. М.: Истина и жизнь, 1997. 547 с.
3. Симонов Д.В., Огоньков В.Г., Афошина Е.В. // Пласт. массы. 2009. № 8. С. 22–29.
4. ТУ 6-48-00204961-35-96. Стержни стеклопластиковые цилиндрические однонаправленные.
5. ТУ 2296-009-20994511-03. Стержни стеклопластиковые для полимерных изоляторов.
6. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991. 260 с.
7. Зарин А.В., Андреев А.С., Вайханский Л.Э., Галь А.Э. // Композиционные полимер. материалы. 1985. Вып. 24. С. 7–10.
8. Шут Н.И., Сичкарь Т.Г., Возный П.А. // Там же. С. 18–20.
9. Алексагин В.М., Антюфеева Н.В. // Клеи. Герметики. Технологии 2005. № 12. С. 28–31.
10. Телеш В.В., Войтов В.Н., Чужков М.В. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 6. С. 23–27.
11. Дмитриев О.С. // Вест. ТГТУ. 1998. Т. 4. № 2–3. С. 213–221.

12. Дмитриев О.С., Кириллов В.Н., Мищенко С.В., Дмитриев С.О. // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №5. С. 17–24.
13. Mischenko S.V., Dmitriev O.S., Shapovalov A.V. // Вест. ТГТУ. 1996. Т. 2. № 1–2. С. 46–54.
14. Mischenko S.V., Dmitriev O.S., Shapovalov A.V. // Kautschuk Gummi Kunststoffe: Int. technical journal for polymer materials. 1997. V. 50. N 2. S. 98–101.
15. Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Шаповалов А.В., Кириллов В.Н. // Вест. ТГТУ. 2001. Т. 7. № 1. С. 7–19.
16. Дмитриев О.С., Мищенко С.В., Пономарев С.В. // Вест. ТГТУ. 1998. Т. 4. № 4 С. 390–399.
17. Мищенко С.В., Дмитриев О.С., Пучков Н.П., Шаповалов А.В. // Промышленная теплотехника. 1989. №5. С. 79–84.
18. Мищенко С.В., Дмитриев О.С., Шаповалов А.В. // Химическое и нефтяное машиностроение. 1993. № 3. С. 31–33.
19. Дмитриев О.С., Кириллов В.Н., Мищенко С.В., Дмитриев А.О. // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 6. С. 22–28.