

УДК 678.02

Уменьшение энергозатрат автоклавного оборудования путем изменения технологии изготовления деталей из полимерных композиционных материалов

Бажеряну В.В, Волкова И.И.

Аннотация

Автоклавные установки, применяемые для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) конструкционного назначения являются оборудованием, потребляющим значительное количество энергии .

При изготовлении деталей из ПКМ монолитной конструкции в 2 перехода в целях сокращения энергозатрат было предложено при первом формовании уменьшить основную выдержку при давлении и температуре, что сократило время работы тэнов автоклава. Полная полимеризация клеевого связующего в заготовке детали происходит во время второго перехода формования. Также, было предложено изготовление деталей сотовой конструкции из клеевых препрегов за одно формование с автоклавной подформовкой при повышенной температуре взамен первого формования. Формование монолитной зоны сотовых деталей за один цикл формования устранило образование недопустимых дефектов: «расслоение» и «повышенное затухание УЗК сигнала».

Изменение технологии формования деталей ПКМ позволило снизить время изготовления, трудоемкость и энергозатраты по сравнению с ранее применяемым режимом в 2 перехода. Качество склейки деталей по данной усовершенствованной технологии, подтверждено результатами акустического контроля и механическими испытаниями.

Ключевые слова

полимерный композиционный материал, клеевой препрег, автоклавное формование, авиастроение, энергосбережение

В настоящее время наблюдается значительный рост использования в авиационной промышленности композиционных материалов. В конструкции изделий нового поколения Т-50 и Су-35С применяется большая номенклатура деталей из ПКМ.

Основная часть композиционных деталей конструкционного назначения (каркаса) изделий Т-50 и Су-35, изготавливается из клеевых препрегов.

Клеевые препреги представляют собой рулоны наполнителя с нанесенным слоем клеевого связующего. Клеевой препрег - это современный материал в виде полуфабриката, готового для изготовления деталей, в отличие от препрегов, изготавливаемых на ОАО «КнААПО» пропиткой.

На ОАО «КнААПО» в настоящее время применяются клеевые препреги марки КМКУ - на основе углеродной ленты и марки КМКС – на основе стеклоткани в зависимости от требований к детали. Например, силовые лонжероны изготавливаются из КМКУ, радиопрозрачные законцовки кия – из КМКС.

Детали из клеевых препрегов имеют большую себестоимость, которая складывается из стоимости материалов (основных и вспомогательных), средств технологического оснащения (приспособлений для выклейки и шаблонов), трудоемкости при ручной послойной выкладки и механической обработки, а также стоимостью затрат на применяемое оборудование (в том числе энергозатраты).

Детали из клеевых препрегов изготавливаются на ОАО «КнААПО» методом автоклавного формования. Автоклавное формование – это формообразование детали при повышенной температуре и давлении с выдержкой в течение определенного времени для полной полимеризации клеевого связующего.

На ОАО «КнААПО» применяются автоклавные установки фирмы «Шольц». Автоклавные установки являются оборудованием, потребляющим значительное количество энергии для создания высокой температуры.

При постоянно увеличивающихся объемах композиционного производства на ОАО «КнААПО» возрастает потребление электроэнергии оборудованием, что является серьезной причиной для актуальности вопроса о способах экономии энергии.

Энергосбережение и повышение энергоэффективности являются одними из наиболее животрепещущих проблем в настоящее время. Энергосбережение – приоритетное направление экономической политики ОАО «КнААПО», ориентированное на уменьшение издержек на выработку основной продукции и снижение нагрузки на производственные мощности. ОАО «КнААПО», как ведущая компания в авиастроении, заинтересована в

создании технологий энергосбережения, которые обеспечат более эффективное и экономичное расходование энергоресурсов, в том числе электроэнергии.

Для нахождения способа экономии электроэнергии при изготовлении деталей из ПКМ рассмотрим режимы формования деталей различной конструкции.

Детали с применением клеевых препрегов разделяются по конструкции: детали монолитной конструкции, состоящие только из слоев препрега (рис 1.) и детали трехслойной сотовой конструкции, состоящие из двух обшивок склеенных с сотовым наполнителем (рис 2.).

Рис. 1 - Монолитная законцовка кия

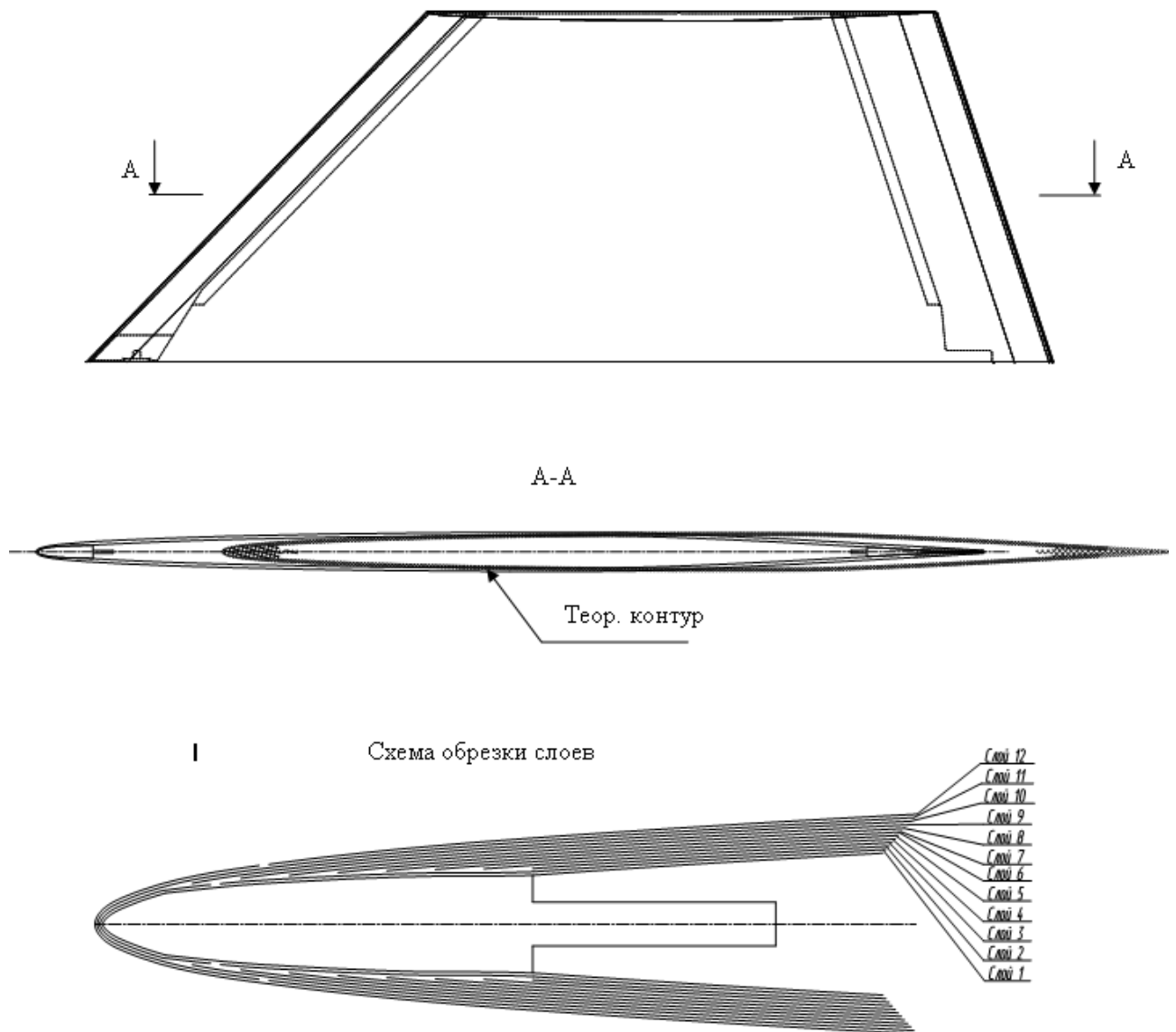
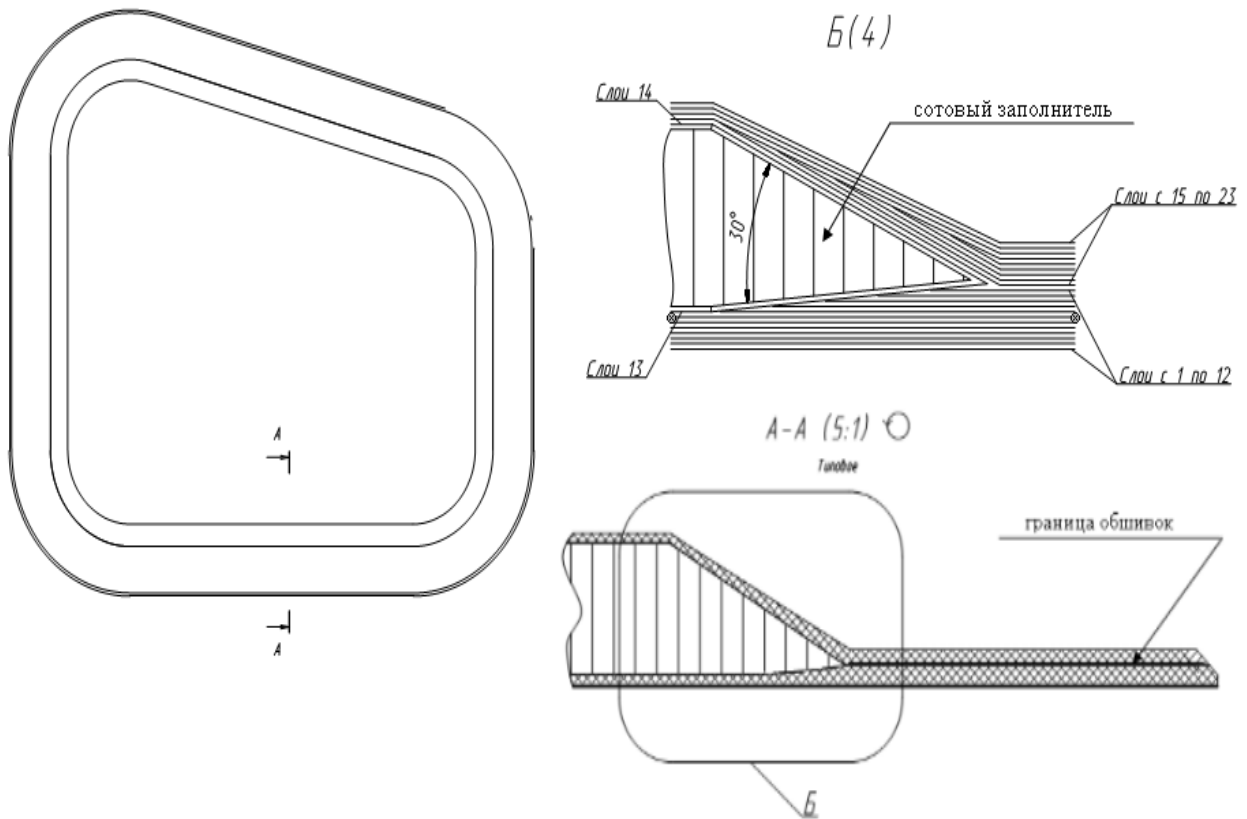


Рис. 2 - Сотовая крышка люка



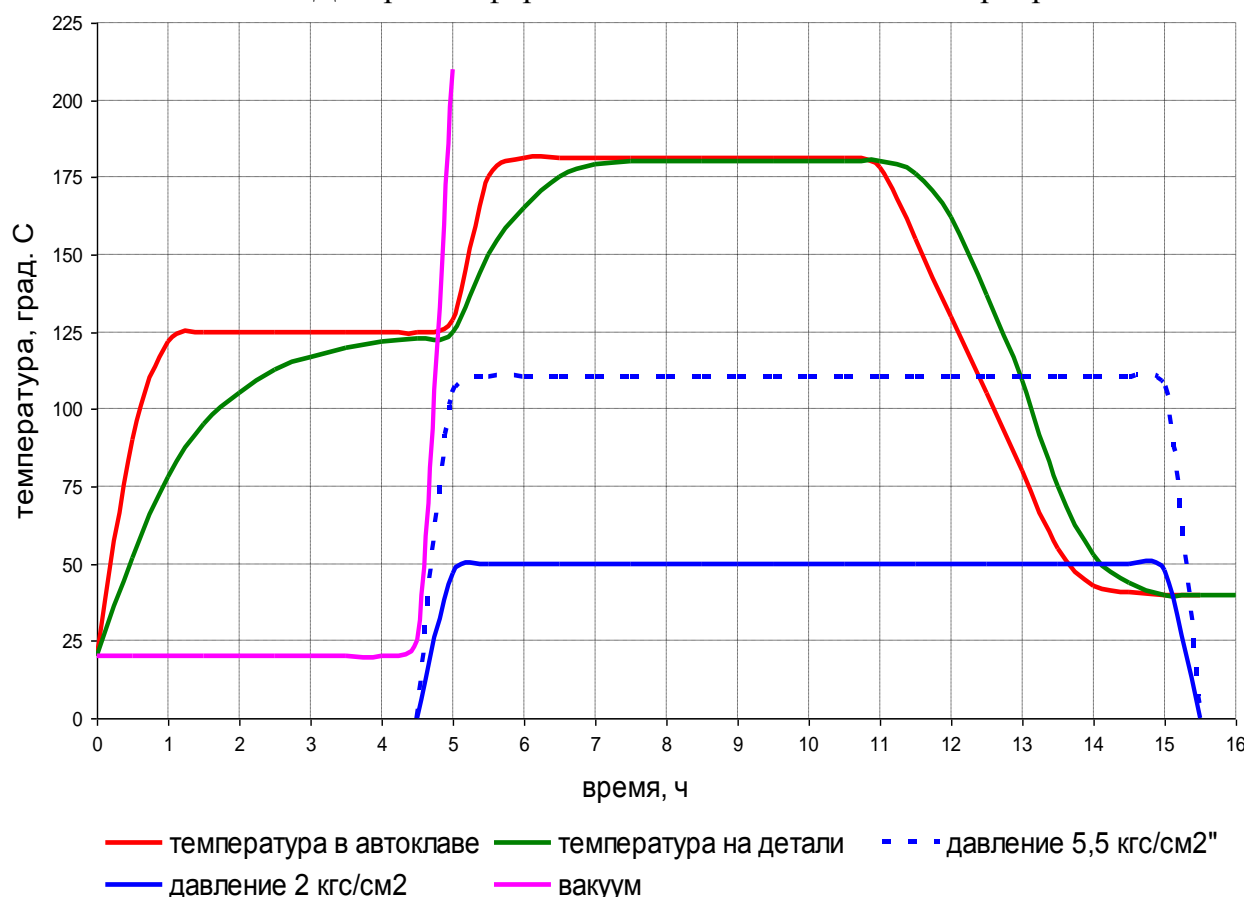
Режимы формования деталей из клеевых препрегов монолитной и трехслойной конструкции одинаковы по температурно-временным параметрам формования и отличаются величиной избыточного давления формования: $(5,5 \pm 0,5)$ кгс/см² - для монолитных деталей, $(2 \pm 0,25)$ кгс/см² - для сотовых деталей. Полная полимеризация клеевого связующего используемых в настоящее время клеевых препрегов происходит при формовании деталей по следующему режиму:

- создание вакуума не менее $0,8$ кгс/см²,
- подъем температуры до (125 ± 5) °С со скоростью не более 2 °С/мин,
- выдержка при температуре (125 ± 5) °С в течение (60 ± 5) мин,
- подача давления $(2 \pm 0,25)$ кгс/мм² или $(5,5 \pm 0,5)$ кгс/мм², отключение вакуума,
- подъем температуры до (180 ± 5) °С со скоростью не более 2 °С/мин,
- основная выдержка при температуре (180 ± 5) °С в течение $(5,0 \pm 0,5)$ часов,
- охлаждение под давлением до температуры не более 40 °С со скоростью не более 1 °С, сброс давления.

Диаграмма формования по данному режиму приведена на рис.3.

Контроль температурного режима при формовании ведется по термопаре, установленной в техническом припуске формируемой детали. Как видно из диаграммы (рис. 3) нагрев воздуха происходит значительно быстрее (красная линия на диаграмме), чем нагрев детали (зеленая линия на диаграмме).

Рис. 3 - Диаграмма формования деталей из клеевых препрегов



Монолитные детали сложной геометрической формы, например как представленная законцовка кия (рис. 1), изготавливаются за 2 перехода (2 цикла формования): выкладка первого пакета слоев (№№ 1-11 на рис. 1) - автоклавное формование - первый переход; выкладка облицовочного слоя (№ 12 на рис. 1) - автоклавное формование – второй переход. Изготовление за 2 перехода применяется для исключения внешневидовых дефектов и дефектов в виде непроформовок.

Все детали трехслойной конструкции также изготавливаются за 2 перехода: выкладка наружной (нижней) обшивки (слои № 1-13 рис. 2), установка сотового заполнителя – автоклавное формование – первый переход; механическая обработка сотового заполнителя,

выкладка внутренней (верхней) обшивки (слои № 14-23 рис.2) - автоклавное формование – второй переход. Изготовление деталей в 2 перехода применяется для фиксации сотового наполнителя на наружной обшивке на первом переходе, для возможности его последующей механической обработки по контуру: выполнения скоса (угол 30° рис 2).

Например, рассмотрим номенклатуру деталей из клеевых препрегов изделия Т-50, изготавливаемых на ОАО «КнААПО» автоклавным формованием. Общее количество деталей составляет 243 позиции: 45 деталей - сотовой и 198 - монолитной конструкции. Из них изготавливаются за 2 перехода около 80 позиций. Полная загрузка автоклава в среднем составляет 3 детали. То есть для изготовления всех деталей из клеевых препрегов изделия Т-50 требуется не менее $160 (243/3 + 80)$ энергозатратных циклов формования.

Средняя мощность тэнов при работе автоклавных установок по вышеуказанному режиму составляет 435 кВт. Как видно из диаграммы (рис.3) таны автоклава работают 11 часов до начала охлаждения при каждом цикле формования.

В целях снижения энергозатрат при изготовлении деталей из клеевых препрегов был предложен способ сокращения времени основного режима формования.

При изготовлении деталей монолитной конструкции за 2 перехода на первом переходе формования сокращена основная выдержка при температуре $(180 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ с 5 до 3 часов. Полная полимеризация (отверждение) клеевого связующего в заготовке детали, изготовленной на первом переходе, происходит во время второго перехода формования с выдержкой в течение 5 часов при температуре $(180 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.

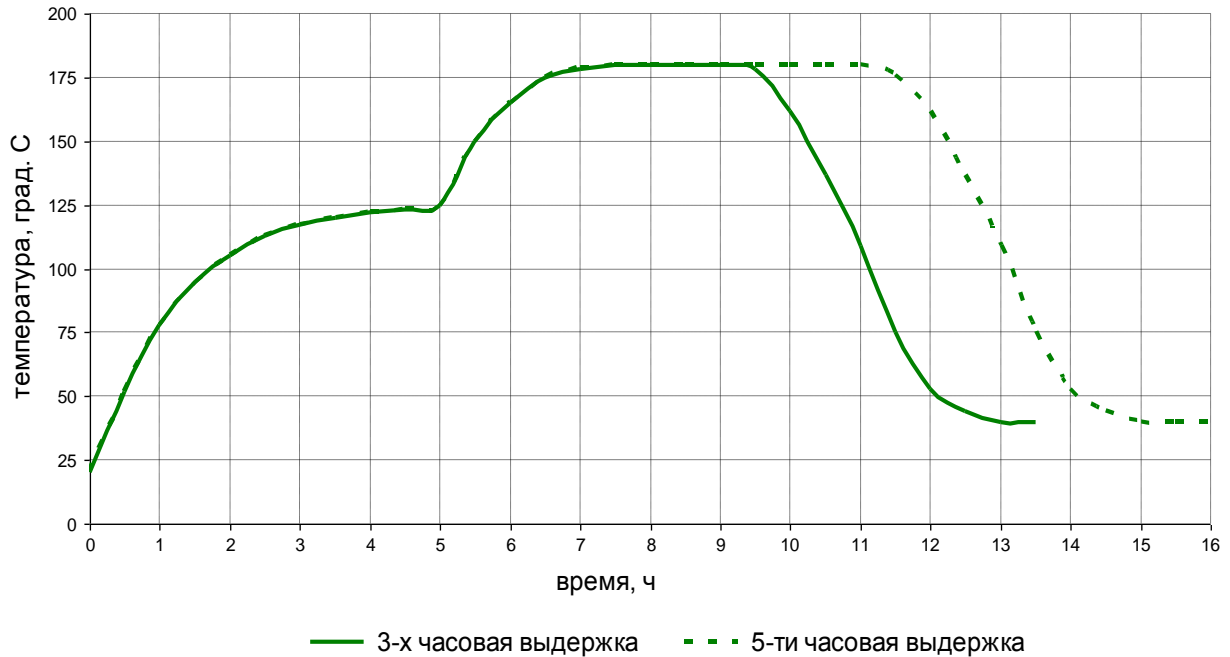
Для деталей трехслойной конструкции режим формования в части выдержки при температуре $(180 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ был сокращен с 5 до 3 часов аналогично деталям монолитной конструкции.

Сокращение цикла формования деталей из клеевых препрегов приведено на рис. 4., на котором представлены температурно-временные диаграммы. Из диаграммы видно, что время работы тэнов автоклава сокращается с 11 до 9 часов.

При изготовлении деталей трехслойной конструкции изделия Т-50, изготавливаемых за 2 перехода, имелась проблема по качеству монолитной зоны детали.

Для определения качества склеивания детали из ПКМ согласно техническим требованиям конструкторской документации применяются неразрушающие акустические методы контроля. Для монолитной зоны сотовых деталей изделия Т-50 применяется ультразвуковой метод контроля (УЗК) для выявления зон расслоений между слоями материала детали. Площади расслоений более 3 см^2 являются критическим дефектом для детали, так как они приводят к снижению прочности детали.

Рис. 4 - Диаграммы формования при 3-х и 5-ти часовой выдержке при давлении



При проведении УЗК монолитной зоны сотовых деталей изделия Т-50 помимо расслоений выявлялись зоны непрохождения акустического сигнала в результате его затухания. При затухании акустического сигнала данные зоны детали становятся непригодными для неразрушающего контроля. По результатам исследовательских работ ОАО «ОКБ Сухого» и ФГУП «ВИАМ» данные зоны классифицируются как зоны повышенной пористости ПКМ. В зонах повышенного затухания сигнала наблюдается снижение прочностных характеристик на (5-7) % по сравнению с качественными зонами детали, что является отклонением.

Специалистами ОАО «КнААПО» были исследованы причины возникновения зон расслоений и повышенного затухания акустического сигнала на деталях сотовой конструкции изделия Т-50. При исследовании было выявлено, что причиной выявления при акустическом контроле дефекта «затухание сигнала» является формирование монолитной зоны сотовых деталей за 2 перехода. Граница перехода от наружной к внутренней обшивке детали через слой клеевого препрега КМКС и является границей затухания сигнала при акустическом контроле.

Предположительной причиной затухания сигнала на границе обшивок является избыток клеевого связующего, образующийся на отформованной наружной обшивке при втором переходе формования внутренней обшивки.

В связи с этим возникла необходимость формования детали сотовой конструкции (слоев №№ 1-23 рис.4) за один переход.

Сложностью изготовления сотовых деталей за одно автоклавное формование является необходимость фиксации сотового заполнителя к наружной обшивке для обеспечения выполнения скоса сотового заполнителя по периметру.

Фиксация сотового заполнителя к наружной обшивке согласно нормативной документации ОАО «ОКБ Сухого» вакуумной подформовкой при температуре 80°C оказалась неэффективной. Поэтому была произведена отработка технологии фиксации сотового заполнителя на наружной обшивке автоклавной подформовкой. По согласованию с «ОКБ Сухого» был успешно опробован и внедрен следующий режим автоклавной подформовки сотового заполнителя к наружной обшивке:

- нагрев под вакуумом до $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$,
- подача давления $(2\pm 0,25)$ кгс/мм², отключение вакуума,
- выдержка при температуре $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа;
- охлаждение под давлением, сброс давления.

Наглядно сокращение цикла формования деталей сотовой конструкции на первом переходе приведено на температурно-временной диаграмме на рис. 5.

При температуре подформовки $(100+5)^{\circ}\text{C}$ за счет увеличения вязкости клеевого связующего (клеевой матрицы) в препреге под давлением происходит подформовка нижней обшивки детали и образование клеевых связей (фуг) с сотовым заполнителем, достаточных для выполнения механической обработки скосов по периметру сотового заполнителя. Далее, после выкладки внутренней обшивки производится окончательное формование (отверждение) детали.

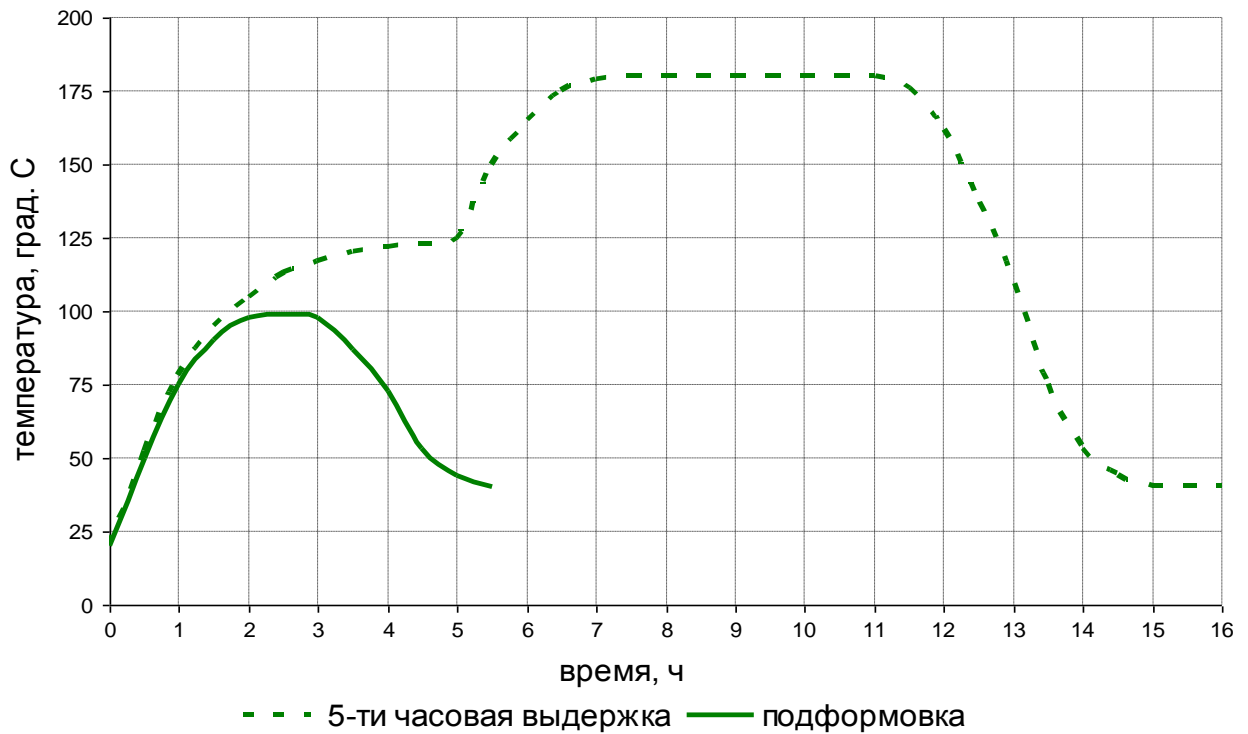
Формование монолитной зоны сотовых деталей за один цикл формования впоследствии устранило выявление таких недопустимых дефектов как «расслоение» и «повышенное затухание УЗК сигнала». Качество склейки деталей, изготовленных на ОАО «КНААПО» по данной усовершенствованной технологии, подтверждено результатами акустического контроля.

Из диаграммы (рис.5) видно работа тэнов автоклава сокращается с 11 до 3 часов, при этом энергозатраты для нагрева детали до 100°C при подформовке значительно меньше, чем для нагрева до 180°C при полном формовании.

Кроме этого, при автоклавной подформовке по сравнению с полным режимом формования сокращается время работы вакуумного насоса с 4,5 до 2 часов до подачи

давления и время работы вентилятора с 15,5 до 5,5 часов, который работает в течение всего цикла (рис. 5).

Рис. 5 - Диаграммы формования с 5-ти часовой выдержкой и часовой подформовкой при давлении



При изготовлении изделия Т-50 из 243 позиций деталей из клеевых препрегов изготавливать по сокращенным циклам формования возможно 38 позиций монолитных деталей и 43 позиции сотовых деталей.

Рассмотрев сокращение режимов формования деталей из клеевых препрегов можно произвести расчет экономического эффекта от сокращения потребляемой электрической энергии.

$$\mathcal{E}_1 = N \cdot (T_1 - T_2) \cdot K \cdot V_1 \cdot C \quad (1),$$

где: \mathcal{E}_1 – экономический эффект при сокращении режима формования монолитных деталей, руб.

N – мощность автоклавной установки, 435 кВт,

T_1 – время работы тэнов при полном режиме, 11 ч.,

T_2 – время работы тэнов при сокращенном режиме, 9 ч.,

T_3 – время работы тэнов при подформовке, 3 ч.,

K - коэффициент, учитывающий неполную загрузку мощности оборудования при формовании, 0,4,

V_1 – количество циклов формования для монолитных деталей, 10.

V_2 – количество циклов формования для сотовых деталей, 12.

C - стоимость 1 кВтч, 2,15 руб.

$$\mathcal{E}_1 = 435 \cdot (11 - 9) \cdot 0.4 \cdot 10 \cdot 2.15 = 7482 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E}_2 = H \cdot (T_1 - T_3) \cdot K \cdot V_2 \cdot C \quad (2),$$

где \mathcal{E}_2 – экономический эффект при замене режима формования сотовых деталей на подформовку, руб.

$$\mathcal{E}_2 = 435 \cdot (11 - 3) \cdot 0.4 \cdot 12 \cdot 2.15 = 35913 \text{ руб.}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 43395 \text{ руб.} \quad (3)$$

где \mathcal{E} – общий экономический эффект, руб.

Итак, общий экономический эффект при сокращении режимов формования деталей из клеевых препрегов на одно изделие Т-50 составит 43395 рублей. В данном расчете не учитывалось сокращение потребляемой электроэнергии от сокращения времени работы вакуумного насоса и вентилятора при автоклавной подформовке, снижение трудоемкости и времени изготовления деталей, а также экономия вспомогательных материалов.

Вывод

Изменение режима и сокращение времени формования монолитных деталей из клеевых препрегов позволило сократить потребляемую электроэнергию при автоклавном формовании.

Замена полного цикла первого перехода формования деталей сотовой конструкции из клеевых препрегов на автоклавную подформовку позволила сократить потребляемую электроэнергию при автоклавном формовании, а также улучшить качество склейки деталей, подтверждаемое акустическим контролем.

Изменение режима формования деталей из клеевых препрегов позволит снизить трудоемкости и времени изготовления деталей, экономить дорогостоящие вспомогательные материалы.

Данная усовершенствованная технология изготовления деталей монолитной и сотовой конструкции из клеевых препрегов, направленная на энергосбережение, бережливое производство и улучшение качества деталей, внедрена в производстве на ОАО «КнААПО» на изделиях Т-50 и Су-35.

Технология изготовления деталей из ПКМ с сокращенными режимами формования может применяться для изготовления деталей других изделий авиационной техники, в конструкции которых применяются клеевые препреги. Таким образом, для экономии ресурсов целесообразно унифицировать номенклатуру применяемых материалов для изготовления деталей ПКМ.

Сведения об авторах

Бажеряну Виктория Васильевна – инженер-технолог бюро неметаллических материалов отдела главного металлурга ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А.Гагарина», г. Комсомольск-на-Амуре, Хабаровский край, Россия ;

E-mail: bazheryanu@mail.ru.

Волкова Ирина Игоревна – инженер-технолог бюро неметаллических материалов отдела главного металлурга ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А.Гагарина», г. Комсомольск-на-Амуре, Хабаровский край, Россия