

МЕТОДИКА СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

На сегодняшний день композитные конструкции получили широкое применение в аэрокосмической, транспортной и некоторых других отраслях. Объемы применения композитов (КМ) в современной гражданской авиации достигает порядка 50 %, а в военной – до 70 %. Однако в других отраслях объемная доля КМ не столь впечатляющая, как в аэрокосмической индустрии. Невысокие объемы применения композитов в автомобилестроении, железнодорожном и морском транспорте, а также в энергетике и строительстве [1, 2] связаны с рядом существующих особенностей КМ и одними из основных сдерживающих факторов внедрения композитов являются, прежде всего, технологический и экономический. Высокие производственные затраты процессов изготовления приводят к тому, что замена металлических конструкций на композитные становится экономически необоснованным, таким образом, возникает задача снижения затрат в производстве.

Проведенный анализ существующих методик снижения затрат позволяет выделить две большие группы: прямые и косвенные. К прямым методикам относят те, которые непосредственно приводят к уменьшению энергоемкости производства за счет сокращения времени, снижения температуры, давления и т.п. К косвенным методикам, относят те, которые направлены на повышение качества конструкции, снижения уровня дефектов и т.п.

На сегодняшний день, как правило, наиболее энергоемким этапом изготовления КМ является процесс формования [3]. Данный процесс достаточно продолжителен во времени, а также из-за повышенных требований, которые могут предъявляться к объектам, требует дополнительных затрат, связанных с повышенными температурами и давлением.

Можно выделить четыре основных направления (рис. 1), которые бы позволили снизить затраты на этапе формования, а именно:

- применение новых матричных материалов, не требующих повышенных температур и давления процесса формования, однако по своим физико-механическим характеристикам (ФМХ) не уступающие существующим материалам;
- разработка и применение новых уточненных алгоритмов проектирования, позволяющих проводить оптимизацию конструкции;
- замена энергоемких методов формования;
- рационализация параметров формования конструкции (температура, время, давление, скорость изменения температуры).



Рисунок 1 – Методы снижения производственных затрат

Первые два направления относятся к перспективным методам, и внедрение в производство будет напрямую связано с успехами в соответствующих областях знаний. Хотя следует отметить, что в ряде направлений, таких, как железнодорожный транспорт и автомобилестроение, применение новых матричных материалов на основе термопластичных смол является наиболее перспективным.

Замена энергоемких методов формования возможна только для крупных серийных предприятий, которые могут отказаться от существующих методов формования, например автоклавного, в пользу, например, пропитки под давлением или под вакуумом. Однако этот путь сопряжен с дополнительными затратами на переоснащение производства, а также переобучением и/или переподготовкой рабочего персонала, что непременно вызовет ряд трудностей на производстве.

Наиболее приемлемым методом является рационализация параметров процесса формования. Поскольку данное направление не требует высокого уровня затрат на переоснащение производства, изменения технологического процесса, а связано только лишь с математической и программной реализацией. Следовательно, это направление позволяет в наиболее короткие сроки с минимальными затратами снизить затраты производства композитных изделий.

Любой метод формования описывается тремя технологическими параметрами (температура, время, давление) (рис. 2). Как правило, параметры процесса задаются директивно исходя из паспортных данных связующего. Причем параметры указывает производитель, который

не учитывает особенности оборудования и конструкции существующего производства. Режимы формования для конструкций на одном и том же связующем, но разной геометрии и назначения, как правило, будут идентичными. В некоторых случаях (тонкостенные листовые изделия) такой подход приведет к неоправданным затратам времени и энергии и, кроме того, нет гарантии, что полученные изделия будут отвечать требованиям, заложенным на этапе проектирования.

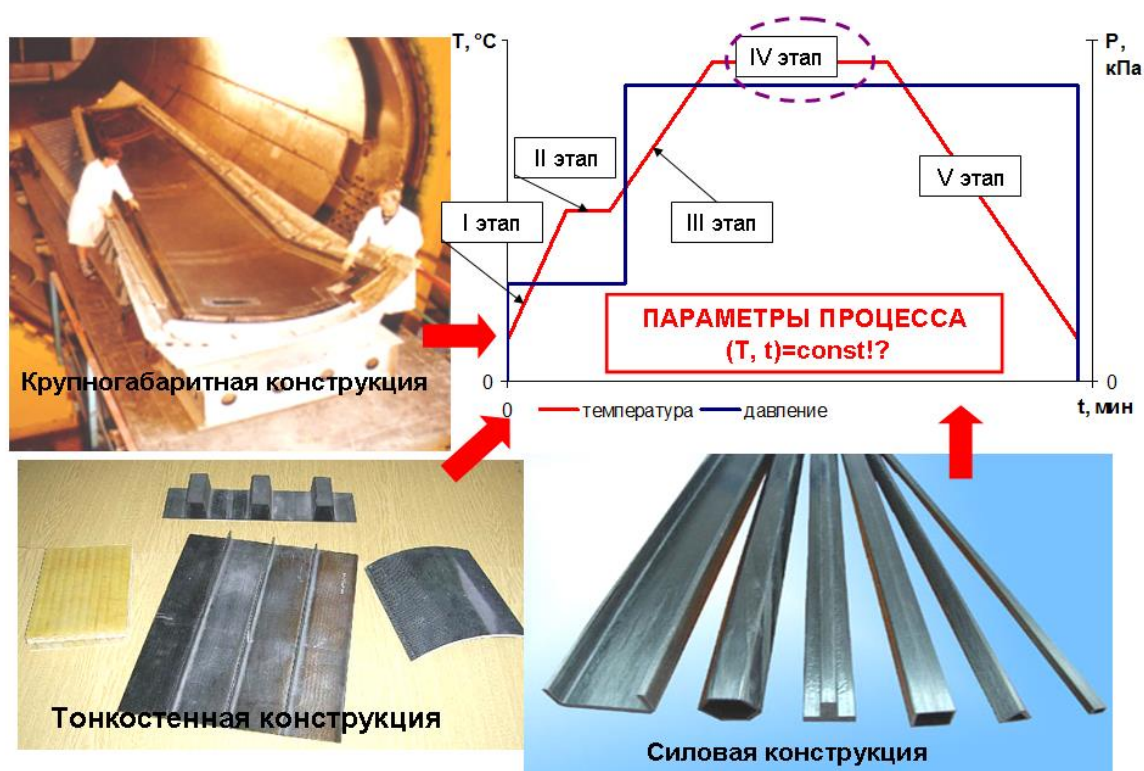


Рисунок 2 – Типовой режим вакуум-автоклавного метода формования

Следовательно, возникает необходимость в предварительном моделировании режима формования, который учитывал бы особенности конструкции, тип связующего, а также оборудование и при этом был бы энергетически оправдан.

Задача минимизации затрат в процессе формования может быть решена как прямыми методами, так и косвенными.

Первый возможный путь связан с определением минимально необходимой температуры формования при минимальном потребном времени данного процесса.

Наиболее продолжительным и энергоемким этапом режима формования является этап изотермической выдержки. Параметры этого этапа устанавливаются директивно согласно паспорту на используемый тип связующего, зачастую эти параметры не всегда оправданы, поскольку приводят к увеличению продолжительности процесса

формования. Возможны два направления в определении параметров данного этапа: экспериментальный и оперативный (рис. 3).

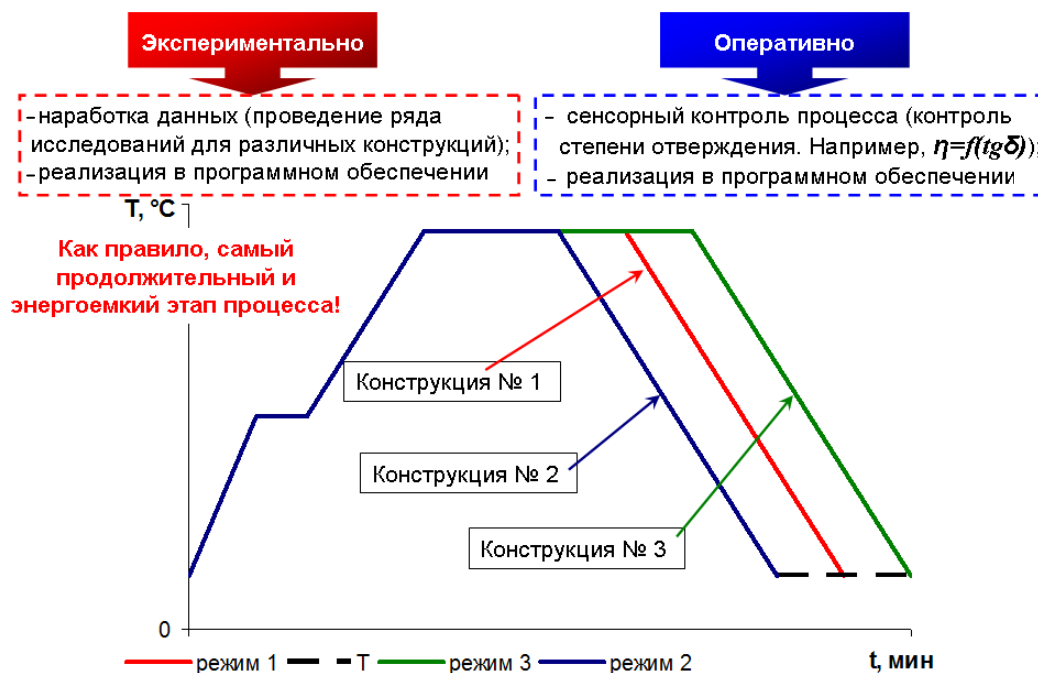


Рисунок 3 – Возможные пути оптимизации этапа выдержки

Однако существуют ряд условий и ограничений, которые необходимо учитывать при оптимизации этого этапа. Прежде всего это обеспечение ФМХ изделия на уровне не ниже, чем для уже существующей методики, отсутствие дефектов в конструкции, энергетическая целесообразность оптимизированного режима, а также возможности оборудования.

Экспериментальная методика заключается в определении параметров формования путем проведения ряда экспериментов с определенной конструкцией, связующим и оборудованием. Нарботкой результатов в процессе производства и занесение полученных результатов в существующую базу данных на предприятии. Как правило, данную методику и используют на производстве. Однако малейшие изменения в конструкции, переход на другое связующее, изменение формы и материалов оснастки, как правило, приводят к тому, что использовать отработанный режим без корректировки становится невозможно. Такая ситуация требует проведения новых серий экспериментов, а следовательно, и увеличению затрат.

Оперативная методика не требует проведения огромного количества экспериментов для заданной конструкции, а заключается в оперативном вмешательстве в процесс формования (изменение, корректировка параметров процесса во время отверждения). Это может быть реализовано только в том случае, когда на протяжении процесса формования происходит непрерывное считывание, сравнение

параметров, которые определяют завершенность химического процесса перехода жидкого (вязкого) связующего в твердую матрицу (рис. 4).

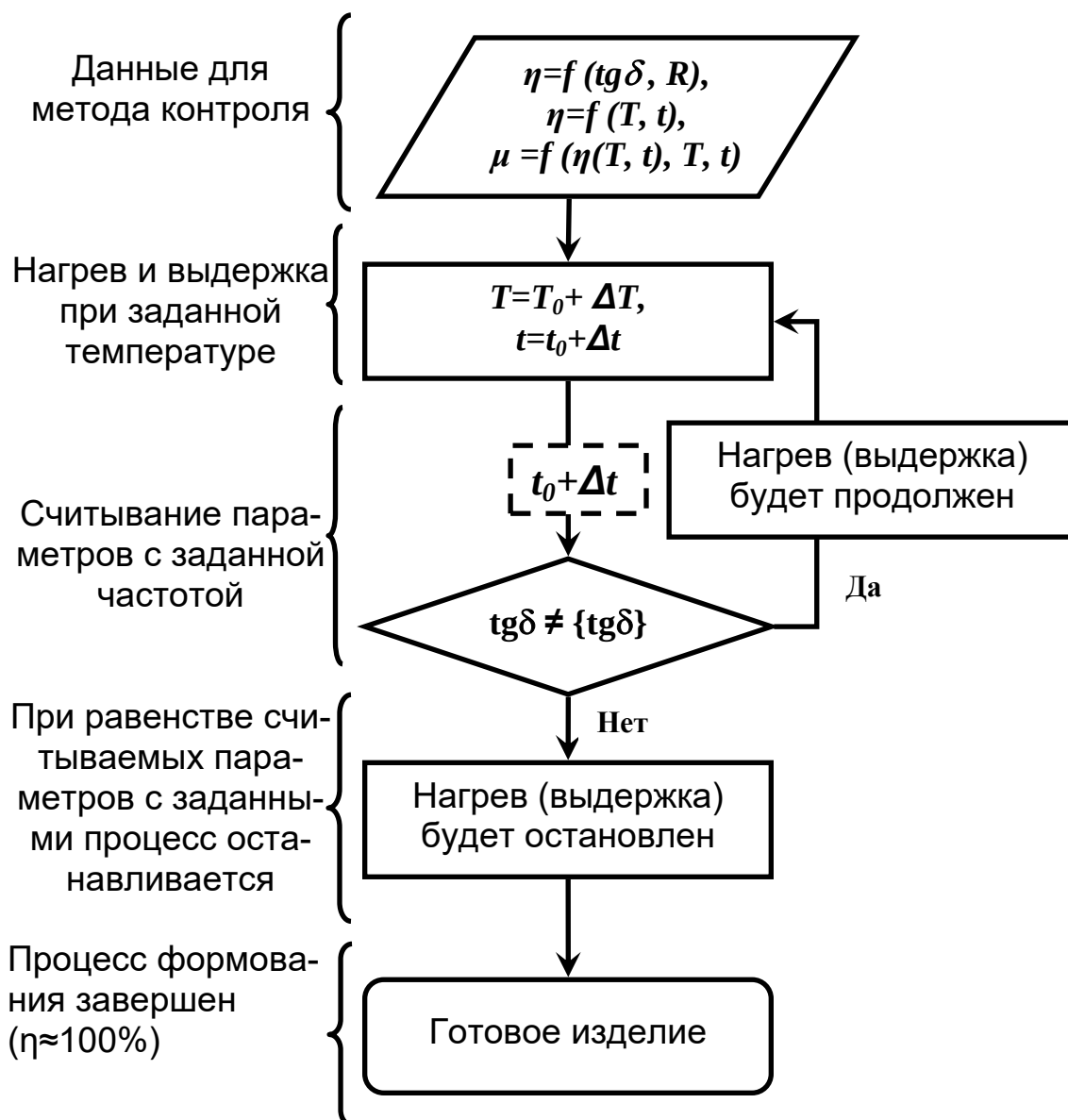


Рисунок 4 – Схема оперативной методики определения параметров формования

В качестве таких параметров, которые однозначно подтверждали бы завершение процесса, могут быть некоторые электрофизические параметры материала и/или же изменение температуры и массы связующего во время отверждения. На сегодняшний день существует ряд методов (диэлектрически-термический анализ (ДЭТА), дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) и др.), которые косвенно определяют степень завершенности процесса отверждения. В целом данный подход не требует проведения серии экспериментальных исследований, а сводится к проведению одному или двум тестовым

операциям формования, после чего и определяются параметры данного процесса.

Второй возможный путь снижения энергозатрат (косвенный) сводится к повышению качества конструкции (обеспечение регламентированных параметров) путем предварительного определения напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего на этапе формования. Для этого необходимо решить ряд задач, связанных с моделированием процессов, возникающих на этапе формования, а также увязать между собой факторы, которые вызывают НДС.

Возникновение НДС в формуемой конструкции связано с различными процессами, происходящими в формуемом пакете. Переход связующего из жидкого в твердое состояние сопровождается уплотнением структуры и появлением усадочного НДС. Этот процесс связан с протеканием химических процессов в связующем. Термические процессы, которые вызывают температурное НДС, можно связать с неравномерностью распределения конверсионно-температурного поля в изделии, а также с особенностями структуры самого пакета КМ. Кроме того, на определенных этапах формования наблюдаются и релаксационные процессы, которые приводят к перераспределению напряжений в изделии.

Несмотря на то, что приведенные факторы имеют различную природу, их можно связать между собой через некоторые общие для них параметры, а разработанные модели определения НДС позволяют определить НДС в формуемой конструкции в любой момент времени. Согласно проведенным исследованиям такие факторы как структура пакета КМ, технологические параметры процесса отверждения и оснастка вносят основной вклад в возникновение НДС. Следовательно, возможным методом обеспечения регламентированных параметров конструкции, а значит, и снижение затрат будет обеспечение в формуемой конструкции допустимого НДС. Это может быть достигнуто путем обеспечения равномерного температурного поля в формуемом пакете КМ. Результаты проведенных исследований показали, что данная задача может быть реализована путем внедрения комплексных решений таких как: определение рационального температурно-временного режима отверждения, проектирование формообразующей оснастки с учетом обеспечения равномерного двустороннего прогрева пакета КМ, а также реализация релаксационных свойств композитной конструкции на этапах изотермической выдержки и охлаждения. Однако следует учитывать и возможности создания конструкции с заранее заданным НДС, которое компенсируется с монтажным НДС после окончательной установки и сборки изделия.

Существующая методика определения рациональных параметров технологического процесса позволяет достаточно успешно решать

задачу теплопроводности при известных граничных условиях. Данная задача решается в одномерной постановке (когда температурный фронт равномерно распределяется по поверхности конструкции, но существует перепад температуры по толщине пакета КМ). Кроме того, при определенных начальных условиях может быть учтен и экзотермический эффект реакции.

Обеспечение равномерного прогрева по толщине формуемого пакета КМ не всегда возможно только выбором рациональных параметров, это может быть связано как с ограничениями оборудования, так и с параметрами самого пакета КМ, оснастки и вспомогательных слоев (рис. 5).

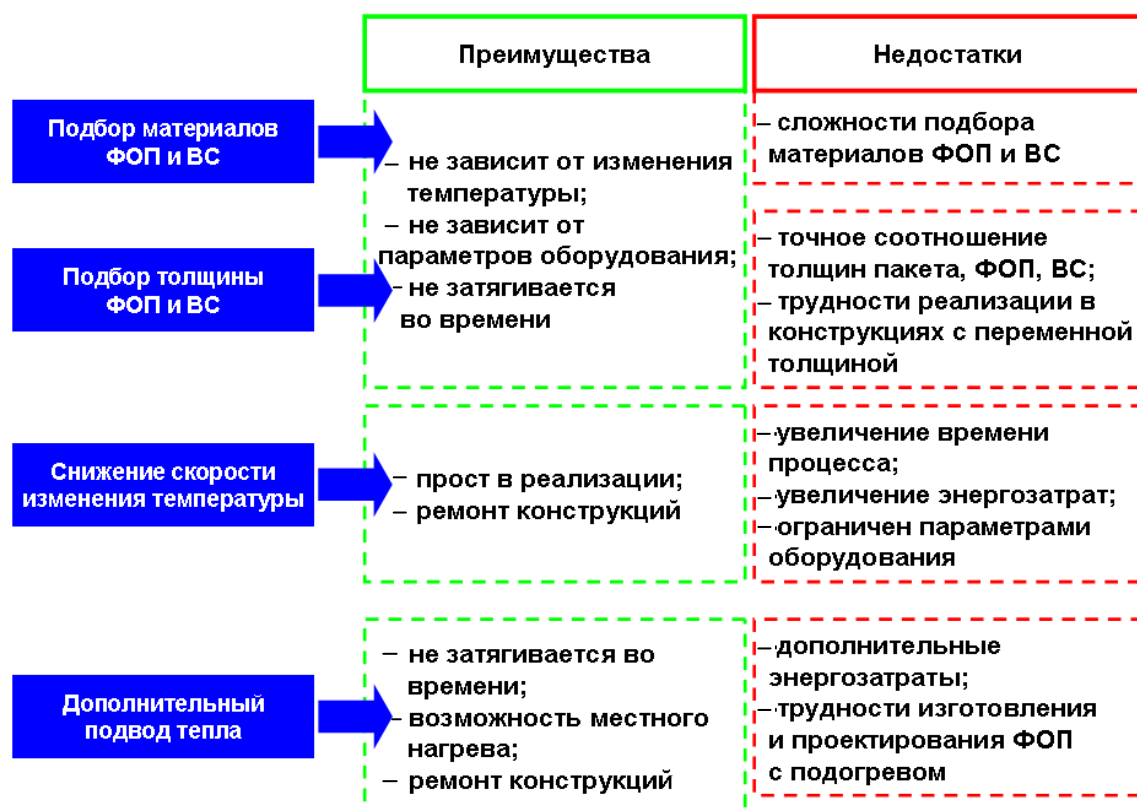


Рисунок 5 – Возможные пути обеспечения равномерного прогрева изделия по толщине

В этом случае возможным методом обеспечения равномерного прогрева по толщине будет дополнительный подвод тепла с одной из сторон.

Существующие методики позволяют определить требуемое количество тепла, а конструктивно-технологические решения формообразующей поверхности позволяют реализовать на практике (рис. 6).

Снижение НДС в формуемой конструкции путем реализации реономных свойств композита на этапе охлаждения достаточно точно описываются существующими моделями. Предварительный расчет

параметров температуры, давления и времени изотермической выдержки на этапе охлаждения позволяет в некоторых случаях добиться снижении остаточных прогибов в 1,2 – 2 раза.

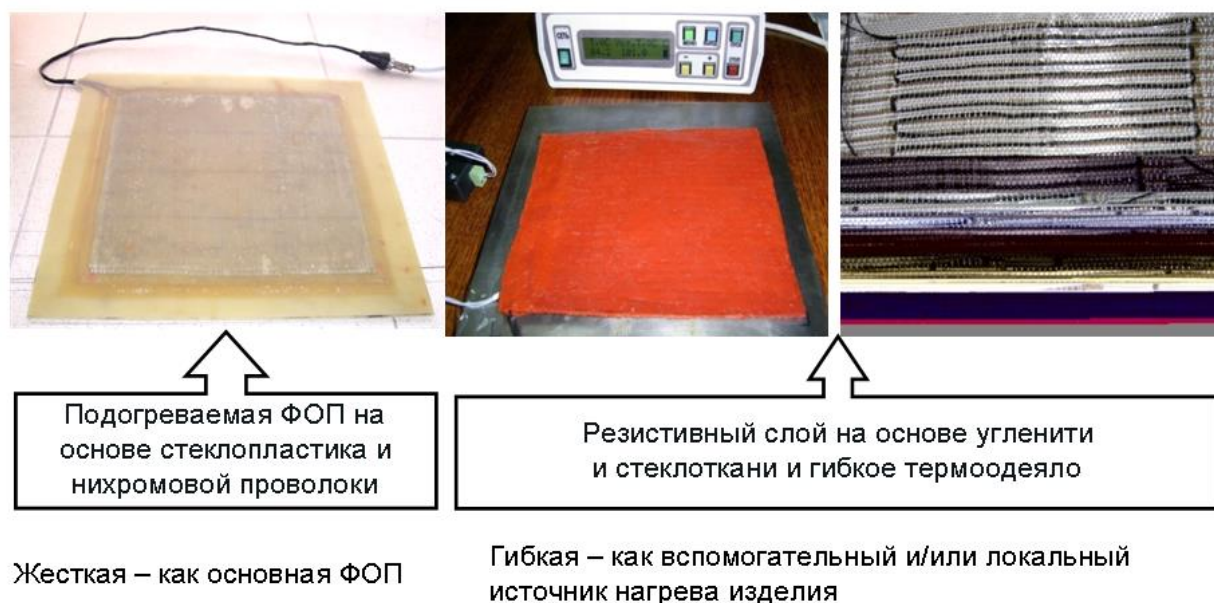


Рисунок 6 – Подогреваемая оснастка

Комбинация предложенных методов позволят снизить НДС в формуемой конструкции до допустимого значения, а в некоторых случаях уменьшить затраты и время производственного процесса.

Список использованных источников

1. John Shury Carbon Fibre to Go Mainstream in Automotive Sector by 2025 [Электронный ресурс] / John Shury. – Режим доступа: <https://www.compositestoday.com/category/analysis/>. – 18.02.2015 г.
2. Dr. Sanjay Mazumdar What Will Drive Composites Growth in 2015 [Электронный ресурс] / Sanjay Mazumdar. – Режим доступа: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2015/01/what-will-drive-composites-growth-in-2015/>. – 01.01.2015 г.
3. Song, Y.S. Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites [Электронный ресурс] / Y.S. Song, J.R. Young, T.G. Gutowski // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009. – 40. Pp. 1257- 1265.

Поступила в редакцию 24.02.2017.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.