

УДК 539.319:678.027.94

А.В. ЧЕСНОКОВ*Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Украина*

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приводится обзор результатов исследований в области создания научных основ технологической подготовки производства термонагруженных деталей летательных аппаратов (ЛА) из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) в Украине. Приведена концепция производства деталей ЛА из УУКМ с прямолинейным расположением армирующих волокон. Анализируются результаты теоретических и экспериментальных исследований, раскрывающих функции технологической подготовки производства: обеспечение технологичности, разработка технологических процессов (ТП), создание системы контроля и управления ТП, проектирование и изготовление средств технологического оснащения. Приведены результаты апробации ТП и оснащения, подтверждающие технологическую готовность к серийному производству деталей ЛА из УУКМ.

Ключевые слова: термонагруженные детали, углерод-углеродный композиционный материал, функции технологической подготовки производства, технологическая готовность производства.

Состояние проблемы

Совершенствование технологии производства углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) во всем мире относится к приоритетным направлениям, определяющим обороноспособность и научно-технический потенциал государства, владеющего ими [1], при этом особое внимание уделяется реализации полного цикла производства материала без международной кооперации.

Создание конструкций современных летательных аппаратов (ЛА), используемых в условиях высоких температур и повышенных термомеханических нагрузок, не эффективно без применения деталей из УУКМ. Применение УУКМ в качестве внутренней теплозащиты РДТТ (сопловый насадок критического сечения) и внешней теплозащиты ракет (головные обтекатели) позволяет существенно расширить ресурсы работоспособности конструкций и повысить их экономичность [2].

Наиболее высокие термомеханические характеристики деталей ЛА из УУКМ получают при равномерном, прямолинейном расположении углеродных жгутов без повреждений в материале, совместностью работы матрицы и волокон в материале [3].

Производство деталей ЛА из УУКМ в Украине сдерживается в результате изменения концепции международной кооперации в производстве УУКМ. Применяемый способ производства УУКМ был чрезвычайно длительный со значительными затратами энергии и материалов, насыщение углеродом матрицы из жидкой фазы производилось с приме-

нием дорогостоящего комплекса оборудования на территории Российской Федерации.

Работы в области совершенствования технологической подготовки производства термонагруженных деталей ЛА выполняются в соответствии с Общегосударственной целевой космической программой Украины на 2008 – 2012 годы [4] и относятся к приоритетному направлению исследований для совершенствования воздушно-космической системы многоразового использования «Воздушный старт» и материалов с улучшенными характеристиками.

В Украине накоплен значительный научно-технический потенциал в области производства УУКМ. Технология производства армирующих каркасов (АК) для жидкофазного насыщения углеродом матрицы исследована в работе [5] и создано опытное производство АК. Под руководством проф. В.А. Гурина разработан и совершенствуется метод пироуглеродного уплотнения пористых сред [1]. Хотя существующие технологии изготовления АК для деталей ЛА неприменимы для пироуглеродного уплотнения по причине их низкой газопроницаемости. Создание полного цикла эффективного производства деталей ЛА из УУКМ возможно за счет сокращения ресурсоемкости при подготовке жгутов к переработке и изготовлении АК, а также необходимо обеспечить эффективное пироуплотнение АК.

Для обеспечения технологической готовности производства деталей ЛА из УУКМ необходимо создание научных основ технологической подготовки производства и ее реализация, что является важной научно-технической проблемой [6].

Концепция производства

Для удовлетворения текущих потребностей ракетно-космического комплекса в деталях из УУКМ и планируемого повышения спроса необходима разработка полного цикла производства материала в стране. На основании анализа требований к деталям из УУКМ, их размеров и формы (определенных по материалам открытой печати и техническим заданиям выполненным договорам) в качестве детали-представителя выбрана деталь, имеющая наибольшие габариты, – цилиндр Ø530 мм с отверстием Ø245 мм, высотой 350 мм.

Деталь и УУКМ производятся одновременно. Стабилизация свойств деталей возможна только при устойчивом выполнении всех ТП изготовления УУКМ, что позволяет снизить коэффициент запаса прочности деталей и вес изделия в целом. Для обеспечения устойчивости ТП должны быть определены требования к каждому ТП и раскрыта их взаимосвязь.

Несмотря на многообразие способов производства деталей из УУКМ [3] обязателен следующий порядок ТП:

- подготовка углеродных жгутов к переработке в АК;
- изготовление АК;
- насыщение АК углеродом матрицы;
- механическая обработка.

Для обеспечения технологической готовности к производству деталей на основании научно обоснованных подходов необходимо реализовать функции технологической подготовки производства, включающие: обеспечение технологичности конструкции; разработку ТП; проектирование и изготовление средств технологического оснащения; контроль и управление ТП.

Концепция производства деталей ЛА из УУКМ в Украине включает следующие принципы:

- применение имеющейся производственной базы высокопроизводительного метода пироуглеродного уплотнения;
- обеспечение благоприятных условий выполнения каждого ТП изготовления деталей ЛА из УУКМ на основании определения критериев технологичности для каждого ТП;
- применение технологических методов повышения газопроницаемости АК, сохранения прямолинейности и равномерности расположения армирующих волокон;
- комплексная автоматизация процессов производства и контроля ТП;
- применение ресурсосберегающих технологий, позволяющих перейти на уровень безотходного производства.

Обеспечение технологичности

Технологическая подготовка выполняется для серийного производства деталей из УУКМ. Для оценки технологической рациональности применен вектор качества выходных характеристик объектов производства:

$$K_i = (K_{i,1}, K_{i,2}, \dots, K_{i,j}), \quad (1)$$

где $K_{i,1}, \dots, K_{i,j}$ – частные качественные характеристики после i -го ТП.

В качестве частных характеристик объектов производства применяются прочностные, геометрические и др. характеристики, получаемые измерением. Полный перечень измеряемых характеристик задается в техническом задании на выполнение ТП. Условием приемлемости ТП является:

для прочностных характеристик $K_{i,j} \geq K_{i,j}^{T3}$;

для геометрических характеристик $K_{i,j} = K_{i,j}^{T3}$,

где $K_{i,j}^{T3}$ – параметр, указанный в техническом задании на выполнение ТП.

При проектировании деталей из УУКМ и разработке ТП необходимо применение принципов унификации для разработки эффективных ТП с высоким показателем гибкости производства. К параметрам рациональности конструкции и ТП относятся и показатели технологичности. Выявить показатели, наиболее полно отражающие достижение оптимальных затрат при производстве деталей, возможно на основании анализа технологического цикла их производства. Для оптимизации технологического цикла построена модель, охватывающая все этапы изготовления деталей из УУКМ, и произведена классификация моделей по уровням детализации (рис. 1).

Модели ТП являются взаимозависимыми. Анализ взаимодействия ТП изготовления деталей из УУКМ проведен в работе [7]. Выявлены исходные параметры процессов, факторы, влияющие на ход ТП и выходные параметры.

Для определения количественных закономерностей взаимовлияния и модели изготовления деталей из УУКМ в первую очередь определены модели, оказывающие наибольшее влияние на взаимодействие ТП и определяющие требования к устойчивости ТП, из которых получены показатели технологичности. Модели, описывающие отдельные более самостоятельные процессы, получены при рассмотрении ТП, в которые они входят.

Моделями этапа ТП, связывающими характеристики стержней и устойчивость автоматизированной сборки АК, являются модели силового



Рис. 1. Классификация моделей ТП

взаимодействия стержней при сборке и опрессовке (рис. 1). Характер взаимодействия стержней зависит от соотношения диаметров сопрягаемых стержней (вертикального d_B и горизонтального d_Γ) и шага расположения вертикальных стержней t , измеренный перпендикулярно подаваемому стержню [8]. Сопряжение с натягом приводит к деформации стержней, которая состоит из искривления оси стержня и деформации сечения. Искривление оси стержня определено с учетом сдвига смежных поперечных сечений относительно друг друга, а контактная деформация определена, рассматривая контакт цилиндрических тел из одинакового материала. Натяг полностью компенсируется суммой деформаций:

$$\frac{(d_B + d_\Gamma) - t}{2} = \frac{5P_1 H_B^3}{6\pi d_B^4 E_B} \left(1 + \frac{9d_B^2 k_G}{2H_B^2} \right) + n_\delta \frac{1}{2} \sqrt{\frac{36(1 - \mu_\pi^2)^2 (d_B + d_\Gamma)}{E_\pi^2 d_B d_\Gamma}} P_1^2, \quad (2)$$

где P_1 – сила взаимодействия стержней; H_B – высота до направляющей плиты; E_B , E_π – модули упругости стержней вдоль и поперек волокон; μ_π – коэффициент Пуассона поперек волокон; k_G – коэффициент отношения модульных характеристик для рассматриваемого материала $k_G = \frac{E_B}{G}$.

Уравнение (2) после преобразований к кубическому виду решено относительно P_1 для взаимодействия стержней при $d_B = d_\Gamma = d$ с применим формулы

Кардано. В общем виде функция силы взаимодействия стержней может быть представлена в виде:

$$P_1 = f(d; H_B; t; E_B; E_\pi; k_G). \quad (3)$$

Определены усилия, воспринимаемые стержнями различных направлений при сборке АК и получены условия прочности в зависимости от вида воспринимаемой нагрузки. Прочность стержней должна соответствовать следующим условиям:

$$[\sigma_B] \geq \sigma_B = \frac{4N}{\pi d^2};$$

$$[E_B] \geq E_B = \frac{P_1 (3H_B^2 + \pi^3 k_G d^2)}{3d^4}, \quad (4)$$

где N – сжимающая сила, действующая на стержень; $[\sigma_B]$, $[E_B]$ – предельные значения параметра.

Определено, что при подаче одиночного стержня усилие сопротивления проникновению стержня в АК значительно ниже, чем при подаче слоя. Отмечено недопустимость применения подачи стержней слоем при наличии натяга в сопряжении стержней [9].

Для объективного определения прочностных характеристик стержней учтены условия нагружения стержней при сборке АК. На основании испытаний стержней на устойчивость определяется сила $P_{уст}$, на расслоение P_p . Схема испытаний приведена на рис. 2. Из условий нагружения стержней определены их эффективные характеристики – модуль Юнга E_B^Δ и предел прочности σ_B^Δ , которые и применяются в расчетах как предельные значения с учетом коэффициента запаса прочности. Расчет эффективных прочностных характеристик производят по зависимостям [10]:

$$\sigma_B^\Delta = \frac{4P_p}{\pi d_{max}^2};$$

$$E_{\Pi P}^\Delta = \frac{4P_{уст} (16H_B^2 \mu^2 + \pi^2 k_G k_\Phi d_{max}^2)}{\pi^3 d_{max}^4}, \quad (5)$$

где d_{max} – максимальный диаметр стержня; μ – коэффициент приведения длины стержня $\mu = 0,5$; k_Φ – безразмерный коэффициент формы сечения, для круглой $k_\Phi = 4,2$.

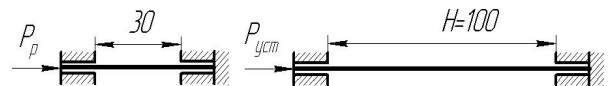


Рис. 2. Схема проведения испытаний на смятие торца и устойчивость стержней

Связь параметров АК и ТП их изготовления с эффективностью пироуглеродного уплотнения раскрывает модель газопроницаемости АК (рис. 1).

Важным показателем эффективности насыщения является открытая пористость. В АК между армирующим материалом возникают полости, сообщающиеся между собой посредством каналов. Форма и размеры каналов зависят от вида АК и формы армирующего материала. Для определения проницаемости различных АК условно разделено поровое пространство на транспортные и межволоконные поры [11]. Движение реагента по транспортным порам описано широко используемым в теории фильтрации уравнением Дарси с учетом эффекта Клинкенберга. Движение газа по межволоконным порам описано с учетом скольжения газа вдоль стенок капилляров. Определены коэффициенты проницаемости для движения реагента в межволоконных порах.

На основании анализа полученных зависимостей определены параметры, которые отражают изменение газопроницаемости через межволоконные поры и введен коэффициент относительной проницаемости через межволоконные поры, отражающий изменение газопроницаемости при изменении структуры или параметров АК:

$$k_{\text{пр}} = \frac{1}{d} \left(\frac{1 - \phi_{\text{ст}}}{\phi_{\text{ст}}} \right)^2, \quad (6)$$

где $\phi_{\text{ст}}$ – наполнение стержня волокном.

Для повышения газопроницаемости АК предложено удалять связующее после сборки АК [11]. При этом волокна занимают все свободное пространство, ограниченное волокнами других направлений. Такое состояние названо свободной формой.

При изменении формы сечения изменяется наполнение стержня волокном. Влияние перехода к свободной форме сечения стержня на коэффициент относительной проницаемости АК, рассчитанный по зависимости (6), представлен на рис. 3.

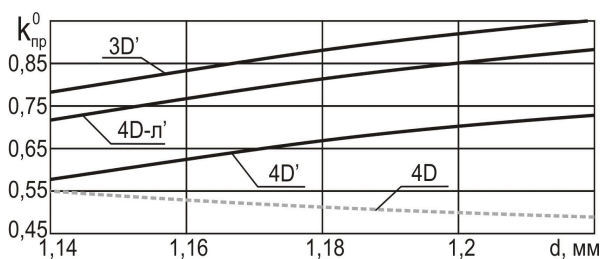


Рис. 3. Изменение проницаемости АК: 3D', 4D', 4D-л' – АК со свободной формой волокон

Результаты наглядно подтверждают необходимость удаления связующего из стержней после сборки АК. Применяемые ранее связующие невозможно удалять, поэтому на основании анализа веществ по химическому составу и применимости в качестве связующего выбран углевод, не применяемый ранее в качестве связующего для КМ.

Параметры транспортных пор определены с применением системы трехмерного твердотельного моделирования. Подтверждено, что структура 3D' имеет закрытую пористость и ее насыщение неэффективно [11]. Открытую пористость имеют 4D' и 4D-л' структуры.

В дополнение к показателям технологичности, рекомендованных ГОСТ 14.205-83, определены специальные показатели технологичности, оказывающие влияние на устойчивость ТП и пригодность полученного полуфабриката к устойчивому выполнению последующих ТП изготовления деталей из УУКМ [12]. На этапе конструкторской подготовки производства рекомендуется сравнивать заданное наполнение АК волокном и его зернистость с предельно достижимыми значениями по направлениям армирования и в произвольной плоскости. Для расчета параметров наполнения АК волокном и зернистости выделены повторяющиеся элементы, по которым и определены сравниваемые параметры и их предельные значения. Получены коэффициенты армирования в произвольной плоскости сечения с учетом технологических возможностей для стержневых АК [13]. Полученные размеры повторяющихся элементов характеризуют зернистость структуры и применяются в качестве базовых показателей технологичности АК.

Для процессов с силовым взаимодействием, к которым относится сборка АК, параметром технологичности является минимальный коэффициент запаса прочности k_c . Запас прочности рассчитывается по отношению прочности стержней (5) к прогнозируемым технологическим напряжениям (4).

Технологичность по параметру газопроницаемости определяется по отношению коэффициентов относительной проницаемости и диаметров минимальной и максимальной поры.

Разработка технологических процессов

Структура ТП и требования к технологическим этапам пултрузии стержней на углеводсодержащем связующем обоснована в работе [14]. Для поиска оптимальных параметров изготовления стержней необходимо изучение процессов, происходящих на этапах ТП (рис. 1), и создание модели, охватывающей весь ТП изготовления стержней и сборки АК (рис. 1).

Для раскрытия процессов на этапе пропитки-отжима пропитанный жгут представлен капиллярно-пористым телом, внутри которого происходит фильтрация жидкости. Полученная зависимость максимального давления в полуфабрикате при отжиме от параметров процесса. Численным моделированием определено влияние угла входного конуса

фильеры и диаметра полуфабриката на относительный параметр максимального давления [15]. Сопротивление движению сквозь фильеру составляет:

$$P_O = \sin \alpha \int_{d_1/2}^{d_0/2} p(d) S_K(d) dd, \quad (9)$$

где S_K – площадь конуса фильеры, контактирующая с полуфабрикатом.

Повреждение жгута снижается при угле входного конуса $2\alpha < 70^\circ$.

Диаметр отжимной фильеры можно рассчитать в зависимости от конечного содержания связующего (по массе) в стержне с учетом его концентрации:

$$d_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{F_B + \left(\frac{\pi d^2}{4} - F_B \right) \cdot \frac{1 - k_{п2}}{k_{с0}(1 - k_{п1})}}, \quad (10)$$

где F_B – площадь волокон в сечении; $k_{п1}$, $k_{п2}$ – коэффициенты пустот в полуфабрикате на стадии пропитки и формования соответственно.

Однофакторные экспериментальные исследования этапа [15] определили степень влияния технологических параметров на качество пропитки, которое оценивалось массой нанесенного связующего. В результате исследований определены основные значущие факторы этапа – давление пропитки и концентрация связующего.

Процесс сушки исследован для нахождения рационального режима теплопередачи. Определен механизм движения связующего при сушке полуфабриката в зависимости от направлений градиентов температуры и влагосодержания. Для повышения монолитности стержня и интенсификации процесса сушки обоснована эффективность разогрева полуфабриката изнутри – пропусканием электрического тока [14] и для эффективного удаления влаги с поверхности – обдув нагретым воздухом. Экспериментальное исследование этапа сушки позволило определить диапазон подводимой энергии, что позволило определить эффективный способ удаления растворителя и разогрева полуфабриката безопасным, энергосберегающим методом. Распределением связующего по сечению стержня можно управлять напряжением (фактор этапа), подводимым к углеродному жгуту.

На этапе формования во входном конусе фильеры происходит перераспределение связующего относительно волокон внутри полуфабриката. Для расчетов связующее представлено вязкопластичной системой и описано обобщенным уравнением Шведова-Бингама. Сопротивление движению полуфабриката сквозь формирующую фильеру складывается из преодоления давления формования, трения о боковую поверхность и сил сцепления [16]:

$$P_\Phi = S_K p_2 \sin \alpha_2 + (S_{ц} + S_K) (\tau_a k_2 + (1 - k_2) p_2 f_{тр2} \cos \alpha_2), \quad (11)$$

где $S_{ц}$ – площадь цилиндрической поверхности фильеры; $f_{тр2}$ – коэффициент трения жгутов о боковую поверхность фильеры; k_2 – коэффициент, учитывающий количество поверхности, покрытой связующим; τ_a – адгезионные напряжения сдвига при относительном смещении поверхностей.

В результате предварительных однофакторных экспериментов определено рациональное расположение формирующих фильер и основные значущие факторы этапа – диаметр и количество формирующих фильер [16]. Применение «каскадного» формования фильерами с уменьшающимся диаметром позволяет снизить повреждение волокон и стабилизировать диаметр стержня. Повреждение периферийных волокон происходит при сопротивлении движению полуфабриката около 2,5 Н.

Выявлен эффект влияния стабильности выполнения этапов ТП на усилия сопротивления движению полуфабриката сквозь фильеры. Этот параметр предложено контролировать и при выходе за пределы – выполнять поднастройку ТП. Рабочим диапазоном сопротивлений прохождению полуфабриката является 0,1...0,3 Н для фильеры отжима и 1,0...2,2 Н для фильеры формования.

В результате исследований этапа протяжки определено влияние способа протяжки на эллипсность и искривление оси стержней [17]. Рекомендовано протяжку полуфабриката по технологическим этапам выполнять с помощью приводной бобины диаметром 4 м. Получаемая эллипсность стержня до 0,03 мм и искривленность оси обусловлена случайными факторами – колебанием натяжения жгутов и их расположением по сечению стержня.

Для получения модели, охватывающей весь ТП изготовления стержней и отражающей взаимосвязь этапов ТП, проведен планируемый многофакторный эксперимент. В результате предварительных исследований были определены пять ключевых факторов и по плану эксперимента, диапазон варьирования был разбит на четыре уровня, табл. 1. Шестнадцать различных сочетаний факторов были повторены трижды, порядок проведения экспериментов определялся по таблице случайных чисел.

При проведении экспериментов контролировались следующие параметры отклика: диаметр стержня d , устойчивость и расслоение стержня (по схеме рис. 2, и рассчитывались эффективные характеристики стержней, предел прочности $\sigma_B^{\exists}$ и модуль Юнга, $E_{пр}^{\exists}$), масса связующего в стержне

$m_{св}$, сопротивление движению полуфабриката сквозь отжимную P_O и формирующую P_F фильеру.

Результаты обработаны методами математической статистики, получены уравнения регрессии, моделирующие факторы отклика. Из моделей удалены составляющие с уровнем значимости ниже доверительного интервала и выполнена проверка на адекватность по критерию Стьюдента для уровня значимости 0,05.

Полученные регрессионные зависимости приведены в табл. 2.

Модель ТП изготовления стержней входит в модель изготовления деталей из УУКМ (рис.1) как структурный модуль. Оптимизация ТП изготовления стержней выполнена с учетом взаимосвязи ТП изготовления деталей из УУКМ [7]. Геометрические и прочностные характеристики стержней оказывают влияние на силовые параметры автоматической сборки АК и ее устойчивость. Целевой функцией оптимизации являлось повышение минимального коэффициента запаса прочности стержня при сборке АК. Оптимизация выполнялась с применением программной надстройки «Поиск решения», входящей в программу электронных таблиц Microsoft Excel. Результат оптимизации после раскодирования значений факторов и принятые к реализации значения варьируемых факторов рассчитаны параметры стержней и сборки АК, табл. 4. Полученный минимальный коэффициент запаса прочности стержня 22 обеспечивает устойчивость автоматизированной сборки АК.

Результаты проведенных исследований создают научные основы разработки ТП подготовки жгутов к сборке с гарантированным обеспечением заданных технологических характеристик, разработанной методики контроля качества подготовки жгутов.

Сборка АК выполняется в две операции – установка вертикальных стержней в направляющие плиты и укладка слоев горизонтальных стержней, определена структура выполнения операций. Установка вертикальных стержней осуществляется перемещением стержней по вибрирующей плите к отверстиям и после попадания – вдоль них. Укладка слоев горизонтальных стержней состоит из подачи стержня роликами по направляющей между рядами вертикальных стержней на заданную глубину и его обрезку. После набора слоя стержней выполняется его опрессовка и поворот АК, набор слоев выполняют до заданной высоты.

Для раскрытия закономерностей движения стержней по вибрирующей поверхности и поиска рациональных параметров вибрации описано движение массива стержней в зависимости от направления и интенсивности вибрации. Режим движения

Таблица 1

Основные значения планируемых факторов

	Концентрация связующего, $k_{с0}$, %	Давление пропитки, p_1 , МПа	Напряжение разогрева, V , В	Диаметр и количество формирующих фильер,	
				d_ϕ , мм	n_ϕ
Max	90	0,4	36	1,18	4
Min	60	0,1	0	1,12	1
Шаг	10	0,1	12	0,02	1
X_i	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5

Таблица 2

Уравнения регрессии

$d = 1,205 - 0,005X_1 + 0,009X_4 - 0,005X_5 + 0,004X_4X_5 + 0,005X_1X_4 - 0,005X_1X_5$
$\sigma_B^3 = 81,9 + 4,2X_1 - 2,45X_4 + 1,8X_5 - 2,35X_2X_3 - 2,85X_4X_5 - 1,58X_1X_4 - 1,69X_2X_4$
$E_{ПР}^3 = 49,28 + 3,6X_1 + 4,13X_2 - 4,13X_4 + 2,5X_5 - 1,80X_2X_3 - 2,52X_4X_5 - 3,05X_1X_3 - 2,68X_1X_4 - 1,92X_2X_4$
$m_{св} = 0,147 + 0,006X_1 + 0,005X_2 - 0,004X_2X_3 - 0,003X_1X_3$
$P_O = 0,147 + 0,014X_1 + 0,011X_2$
$P_F = 2,19 + 0,072X_1 - 0,395X_4 + 0,087X_5 + 0,124X_1X_2 + 0,222X_1X_5 + 0,086X_2X_5$

Таблица 3

Оптимальные значения факторов ТП

	$k_{с0}$, %	p_1 , МПа	V , В	d_ϕ , мм	n_ϕ
Результат оптимизации	90	1	13,97	1,155	3,4
Принятое значение	90	1	24	1,16	4

Таблица 4

Расчетные параметры стержней и сборки АК

d , мм	$E_{ПР}$, МПа	σ_B^3 , МПа	P_O , Н	P_F , Н	P_i , Н	N , Н	$k_{с\ min}$
1,196	86,95	48,36	0,15	2,23	0,0256	6,08	22,16

стержней описывается безразмерными коэффициентами по поверхности – $z'_\pm$ и по направляющему конусу отверстия – $z'^k_\pm$ [18]:

$$z'_\pm = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha \pm \zeta)}{|\cos(\beta \mp \zeta)|};$$

$$z'^k_\pm = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha - \alpha^k \pm \zeta)}{|\cos(\beta - \alpha^k \mp \zeta)|}, \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения; $\zeta = \arctg f$ – угол трения скольжения.

Наибольшая вероятность попадания стержней в отверстия направляющих плит с минимальным по-

вреждением торцов стержней, при вибрации в горизонтальной плоскости. Так как все стержни находятся на одной вибрирующей поверхности, условие, ограничивающее диапазон рациональных параметров вибрации представим в виде:

$$0 < -z'_- = z'_+ < 1; \\ \left(-z'_- < 1 \text{ и } z'_+ > 1 \right) \text{ или } \left(-z'_- < 0 \text{ и } z'_+ > 0 \right). \quad (13)$$

В зависимости от частоты и амплитуды вибрации возможны три режима движения стержней по плите – покой, возвратно-поступательное с остановкой (режим 1) и возвратно-поступательное с мгновенным изменением направления движения (режим 2). В работе [18] показаны режимы движения стержней в зависимости от параметров вибрации и параметры, принятые для проведения эксперимента. Экспериментальные исследования позволили определить рациональные параметры вибрации, позволяющие получать почти 100% заполнение отверстий направляющей плиты стержнями под действием вибрации (рис. 4).

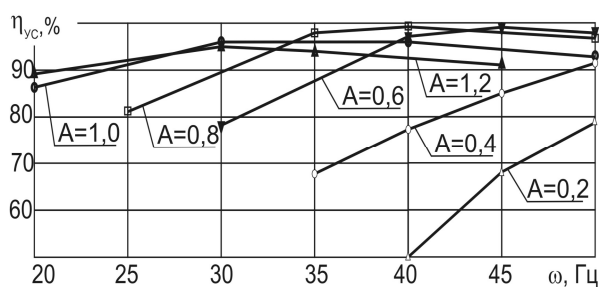


Рис. 4. Заполнение сборочных плит стержнями от параметров вибрации

Результаты комплексных исследований напряжений, возникающих на этапе подачи стержня, при укладке горизонтальных слоев [19], позволили определить характер взаимодействия стержня с роликом и параметры подающего устройства, определено поведение стержня в направляющей и критическая сила потери устойчивости стержня. Экспериментально исследованы силовые параметры подачи стержня в АК от глубины внедрения и расстояния до направляющей плиты. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими зависимостями взаимодействия стержней, полученными ранее [8, 19]. Полученные результаты позволяют определить параметры подающего устройства.

Проведены исследования силовых параметров опрессовки слоя горизонтальных стержней для АК структуры 4D-л для детали-представителя и определена зависимость усилия опрессовки от заданного шага укладки горизонтальных слоев и габаритов собираемого АК. Полученные результаты позволяют определить параметры узла опрессовки. Приве-

ден расчет напряжений наиболее сложных деталей узла – направляющих плит, содержащих 60 и 15,6 тыс. отверстий. Плиты нагружены распределенной нагрузкой от опрессовки слоя методом конечных элементов с помощью твердотельного моделирования, используя программное обеспечение.

Обрезка поданного в АК стержня выполняется у АК с необходимостью минимального повреждения торца стержня, так как увеличение диаметра стержня приводит к повышению усилия вталкивания и снижению устойчивости процесса. Многократная обрезка высокомодульных волокон приводит к быстрому износу режущей кромки. Проведены исследования влияния угла и вида реза на стойкость инструмента и деформацию торца стержня [20]. Рекомендованное конструктивное исполнение узла обрезки стержней и угол заточки режущего инструмента позволили в 4 раза повысить стойкость инструмента.

Новизна разработанных способов получения стержней и сборки АК подтверждена патентами Украины [21, 22].

Контроль и управление технологическими процессами

Разработана модель функционально-технологической взаимосвязи узлов пултрузионной установки и технологических этапов, позволившая определить контролируемые параметры и расположение датчиков контроля. Разработана система функционирования АСУ ТП с учетом запаздывания, связанного со временем движения полуфабриката к следующему технологическому этапу и позволяющая реагировать на изменение технологических параметров и на основании полученных алгоритмов производить корректировку ТП, не допуская выхода его за пределы устойчивости [23].

Разработана система позиционирования и взаимосвязи координатных систем установки укладки слоев горизонтальных стержней, получены алгоритмы и зависимости для расчета координат опорных точек подающего устройства в зависимости от собираемой структуры АК, шага укладки стержней. Это позволило разработать кинематическую схему установки, определить расположение систем управления и контроля узлами установки, создало основу для разработки системы управления [9].

Разработана система контроля изделий на стадиях производства (рис.5), позволяющая по данным поточного и выборочного контроля на основании ранее разработанных методов прогнозирования пригодности изделий к дальнейшей переработке при приближении к критическим значениям сигнализировать о необходимости проведения мониторинга параметров ТП и состояния узлов.

Анализ методов испытания деталей из УУКМ для сопловых насадок подтвердил высокую стоимость проведения натурных испытаний и их вредные экологические последствия. Результаты сравнений условий испытаний образцов деталей из УУКМ в потоке высокотемпературной плазмы с условиями работы сопла подтверждают возможность использования плазматрона для сравнительных испытаний. Для повышения точности испытаний и приближения длительности воздействия на материал к эксплуатационным нагрузкам использован разработанный под руководством проф. В.Л. Дзюбы высокоресурсный плазматрон.

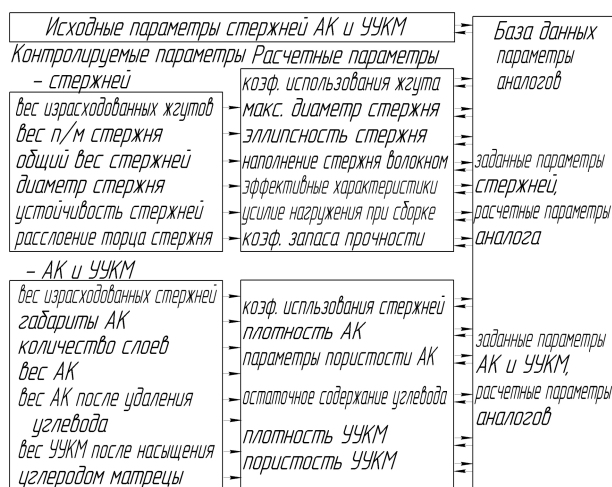


Рис. 5. Система контроля изделий на стадиях производства

Разработка средств технологического оснащения

На основании анализа результатов исследования операций подготовки жгутов и изготовления АК определены основные принципы проектирования средств технологического оснащения. Особое внимание уделено обеспечению рациональных параметров и устойчивости технологических этапов, минимизации затрат производства.

Указанные принципы реализуются модульной компоновкой оборудования, комплексным подходом к автоматизации и управлению технологическим оснащением.

Общая схема установки подготовки жгутов к переработке пултризией представлена на рис. 6. Установка имеет модульную компоновку, для обеспечения определенных ранее требований к узлам предложены новые конструкции узлов, удовлетворяющие требованиям и обеспечивающие заданные технологические режимы. Новизна принятых конструкторско-технологических решений запатентована [24, 25]. Технологические возможности установки охватывают весь ряд типоразмеров стержней.

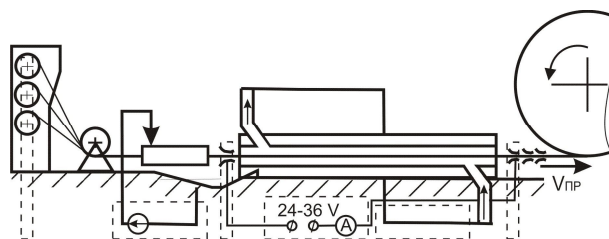


Рис. 6. Схема пултризионной установки

Спроектированы средства технологического оснащения для изготовления АК для деталей первой группы, включающее оборудование установки вертикальных стержней (рис.7) и установку укладки слоев горизонтальных стержней (УСГС) (рис.8). Оборудование установки вертикальных стержней рассчитано на заполнение направляющих плит стержнями под действием вибрации всех типоразмеров АК менее детали-представителя.

Для реализации разработанных принципов УСГС спроектирована и изготовлена установка, особое внимание уделено стабильности выполнения этапов сборки в автоматическом режиме. Для повышения производительности на установке размещено два самостоятельных узла подачи стержня (рис.8). Высокая точность позиционирования и подачи стержня достигнута применением шаговых приводов. Разработанная схема управления установкой реализована с применением микропроцессорной системы управления приводами УСГС. Применение комплектующих ведущих мировых фирм-производителей обеспечило высокую надежность и низкое энергопотребление разработанного устройства. Разработано программное обеспечение и система управления установкой, позволяющее введением параметров каркаса перейти на изготовление АК другого типоразмера или формы, менее детали-представителя.

Оборудование ориентировано на серийное производство деталей ЛА из УУКМ.



Рис. 7. Оборудование установки вертикальных стержней вибрацией



Рис. 8. Установка УСГС

Апробация технологических процессов и оборудования

Апробация готовности производства деталей ЛА (насадок критического сечения, головной обтекатель) выполнена в условиях опытного производ-

ства и включала: изготовление стержней, сборку АК и насыщение углеродом матрицы, выполняемое пироуплотнением в ННЦ ХФТИ, г. Харьков.

На основании выборок стержней в процессе изготовления, выполненных случайным образом, проводились измерения их геометрических и прочностных характеристик, рассчитана вероятность получения максимального диаметра стержня и рассчитана вероятность получения определенного диапазона эффективных прочностных характеристик, результаты приведены в табл. 5 [10]. Полученные стержни пригодны для автоматической сборки армирующих каркасов рассматриваемого диапазона типоразмеров.

Таблица 5
Распределение геометрических и прочностных характеристик стержней

Диаметр стержня		Модуль Юнга		Предел прочности	
d	P(d)	$E_{\text{ПР}}^{\text{Э}}$	$P(E_{\text{ПР}}^{\text{Э}})$	$\sigma_{\text{В}}^{\text{Э}}$	$P(\sigma_{\text{В}}^{\text{Э}})$
1,16÷1,17	3	56,9÷65,7	8	56,7÷61,2	2
1,17÷1,18	21	65,7÷74,5	22	61,2÷65,7	19
1,18÷1,19	32	74,5÷83,4	18	65,7÷70,3	23
1,19÷1,20	29	83,4÷92,2	23	70,3÷74,8	39
1,20÷1,21	12	92,2÷101	23	74,8÷79,3	11
1,21÷1,22	3	101÷109,8	4	79,3÷83,8	3
		109,8÷118,6	2	83,8÷88,3	3
$d=1,19 \pm 0,03 \text{ м}$		$E_{\text{ПР}}^{\text{Э}}=83 \pm 26 \text{ МПа}$		$\sigma_{\text{В}}^{\text{Э}}=72 \pm 15 \text{ МПа}$	

Ключевым показателем эффективности технологического процесса является коэффициент использования материала, который составил 0,98, что на 17% выше от ближайшего аналога и свидетельствует о правильности определения технологических параметров и принятых конструктивных решениях узлов установки и системы управления. Основная масса отходов получена из-за низкой технологичности жгутов. Снижено в 6 раз энергопотребление и выбросы от установки, повышена электробезопасность оборудования.

Апробация ТП и оборудования установки вертикальных стержней вибрацией проведена для цилиндрического АК диаметром 240 мм (15,6 тыс. вертикальных стержней). Применение оборудования позволило в автоматическом режиме установить 99,8 % стержней, общее время выполнения операции 15 мин, снижение трудоемкости по сравнению с ручным способом 64 раза.

Установка укладки слоев горизонтальных стержней апробирована при изготовлении АК детали-представителя структуры 4D-л в АК 292 слоя стержней с 249 стержнями в каждом. Трудоемкость сборки составила 240 чел/час, что в 6 раз меньше по сравнению с ручной сборкой, улучшены условия

работы сборщиков. Подтверждена работоспособность принципа сборки и конструкций узлов, разработанное программное обеспечение надежно управляло сборкой АК.

Полученные АК (рис.9) пригодны для пироуглеродного уплотнения. Длительность технологического цикла производства детали-представителя сокращена в 3,9 раза, на 18,6 кг сокращены расходы углеродного жгута.

Разработанные ТП и оборудование могут быть применены для производства деталей, применяемых в машиностроении, медицине и горном деле.



Рис. 9. Образец кольцевого (после обработки) и цилиндрического АК

Выводы

Приведенный выше обзор выполненных работ по созданию научных основ технологической подготовки производства термонагруженных деталей из УУКМ, включающий:

- разработку концепции создания полного цикла производства деталей ЛА из УУКМ в Украине, основанную на применении пироуплотнения АК;
- классификацию и взаимосвязь моделей ТП изготовления деталей из УУКМ. Выявление характеристик устойчивости ТП и на их основании показателей технологичности, контролируемых параметров и методик контроля;
- исследования технологических этапов изготовления стержней, получение и оптимизацию модели ТП с целью повышения устойчивости ТП изготовления деталей. Систематизацию требований и определение методик расчета узлов технологического оснащения;
- разработку принципов автоматизации ТП подготовки жгутов и сборки АК, алгоритмов и программного обеспечения. Создание системы контроля изделий на стадиях производства и оповещения о необходимости проведения мониторинга ТП и оснащения;
- разработку принципов и проектирование средств технологического оснащения;
- апробацию ТП и оборудования в условиях опытного производства.

Подтверждается, что технологическая подготовка производства обеспечила технологическую готовность к производству термонагруженных деталей из УУКМ.

Улучшены технико-экономические показатели изготовления деталей из УУКМ. При производстве стержней и АК снижено материалоемкость до уровня безотходного производства, экономия углеродного жгута на детали-представителе 18,6 кг. Общая длительность изготовления детали-представителя сокращена в 3,9 раза (на 1100 час). Новизна принятых конструкторско-технологических решений подтверждена патентами Украины.

Реализация результатов работы неразрывно связана с флагами отечественного производства и применения деталей из УУКМ: ННЦ "ХФТИ", г. Харьков, в ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля, г. Днепропетровск, ГП «Завод УУКМ «Углекомполит», г. Запорожье, а также подготовкой специалистов в ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, Нац. аэрокосм. ун-те им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков.

Литература

1. Гури́н В.А. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов / В.А. Гури́н, В.Ф. Зеленский // *Вопросы атомной науки и техники*. – 1999. – № 4 (76). – С. 13-31.
2. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології: підручник / Ф.П. Санін, Л.Д. Кучма, Є.О. Джур, А.Ф. Санін. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетровського ун-ту, 1999. – 318 с.
3. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций / Ю.В. Соколкин, А.М. Вотинов, А.А. Ташинов и др.; под общ. ред. А.М. Вотинова. – М.: Наука, 1996. – 240 с.
4. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008-2012 р.р.; Національне космічне агентство [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.nkau.gov.ua>.
5. Чесноков О.В. Технологія виробництва каркасів вуглець-вуглецевих термонавантажених елементів конструкцій літальних апаратів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / О.В. Чесноков; Держ. аэрокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського "ХАИ". – Х., 2000. – 19 с.
6. Перспективы улучшения качества углерод-углеродных композиционных материалов / А.В. Чесноков, А.В. Гайдачук, А.М. Потапов, И.В. Гури́н // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2008. – № 6 (53). – С. 21-24.
7. Чесноков А.В. Модель взаимодействия технологических процессов изготовления стержневых армирующих каркасов / А.В. Чесноков // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2010. – № 1 (68). – С. 16-21.
8. Чесноков А.В. Моделирование процесса взаимодействия стержней при сборке армирующих каркасов / А.В. Чесноков // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2009. – № 2 (55). – С. 27-31.
9. Чесноков А.В. К вопросу автоматизации сборки стержневых армирующих каркасов / А.В. Чесноков // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. – № 6 (124), Ч. 2. – Луганськ, 2008. – С. 126-130.
10. Чесноков А.В. Определение эффективных характеристик стержней для автоматизированной сборки армирующих каркасов / А.В. Чесноков // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2010. – Вып. 1 (61). – С. 68-73.
11. Чесноков А.В. Проницаемость реагентом пространственных армирующих структур при насыщении углеродом матрицы / А.В. Чесноков // *Технологические системы*. – 2009. – № 4 (48). – С. 49-53.
12. Чесноков А.В. Показатели производственной технологичности изделий из углерод-углеродного композиционного материала / А.В. Чесноков // *Ресурсоберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля*. – Луганськ, 2009. – С. 215-220.
13. Чесноков А.В. Влияние технологических параметров изготовления структур на их коэффициенты армирования / А.В. Чесноков // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2009. – Вып. 2 (58). – С. 66-71.
14. Чесноков А.В. Разработка и анализ технологии изготовления углепластиковых стержней на углеводосодержащем связующем / А.В. Чесноков // *Вестник двигателестроения*. – 2010. – № 1. – С. 17-21.
15. Чесноков А.В. Исследования этапа пропитки и отжима связующего при пултрузии стержней / А.В. Чесноков // *Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля*. – Луганськ, 2010. – Е7. – Режим доступа: <http://www.pbuv.gov.ua/e-journals/Vsunud/index.html>.
16. Чесноков А.В. Формование давлением стержней в пултрузионной установке / А.В. Чесноков // *Вісн. Східн. нац. ун-ту ім. В. Даля*. – Луганськ, 2009. – № 11 (141). – С. 35-39.
17. Чесноков А.В. Изготовление стержневых армирующих каркасов для углерод-углеродных композиционных материалов на основе «бесконечного» стержня / А.В. Чесноков // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2008. – Вып. 1 (52). – С. 104-107.
18. Чесноков А.В. Повышение производительности установки вертикальных стержней армирующих каркасов УУКМ / А.В. Чесноков // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2009. – Вып. 4 (60). – С. 19-27.
19. Чесноков А.В. Анализ напряженного состояния стержня в подающем узле установки автоматизированной сборки армирующих каркасов / А.В. Чес-

ноков // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2008. – № 4 (51). – С. 9-14.

20. Чесноков А.В. Исследование процесса резания углепластиковых стержней на этапах изготовления армирующих каркасов / А.В. Чесноков // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х., 2009. – Вып. 1 (57). – С. 65-69.

21. Пат. 41482 Украина, МПК⁸ B29C 55/00. Способ изготовления углепластиковых стержней / Чесноков О.В.; Заявитель и патентообладатель Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u200814400; заявл. 15.12.08; опубл. 25.05.09, Бюл. № 10. – 4 с.

22. Пат. 41256 Украина, МПК⁹ C04B 35/83. Способ изготовления просторовых армирующих структур / О.В. Чесноков, О.М. Потапов; Заявитель и патентообладатель Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u200815079; за-

явл. 26.12.08; опубл. 12.05.09, Бюл. № 9. – 4 с.

23. Чесноков А.В. Автоматизация пултрузии углепластиковых стержней / А.В. Чесноков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., 16-17 апреля 2009 г.* – Могилев: Бел. – Рос. ун-т, 2009. – Ч.1. – С. 108.

24. Пат. 46426 Украина, МПК⁹ B29C 55/00. Пристрій для формування наповнених профільних виробів / О.В. Чесноков; Заявитель и патентообладатель Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u200905561; заявл. 01.06.09; опубл. 25.12.09, Бюл. № 24. – 2 с.

25. Пат. 45012 Украина, МПК⁹ B29B 11/00. Пристрій для поперечного різання полімерних стержнів / Чесноков О.В.; Заявитель и патентообладатель Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u200904373; заявл. 05.05.09; опубл. 26.10.09, Бюл. № 20. – 2 с.

Поступила в редакцию 3.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ГОТОВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ТЕРМОНАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ З ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

О.В. Чесноков

Наведено огляд результатів досліджень в галузі створення наукових основ технологічної підготовки виробництва термонавантажених деталей літальних апаратів (ЛА) з вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ) в Україні. Наведено концепцію виробництва деталей ЛА з ВВКМ з прямолінійним розташуванням армируючих волокон. Аналізуються результати теоретичних і експериментальних досліджень, що розкривають функції технологічної підготовки виробництва: забезпечення технологічності, розробка технологічних процесів (ТП), створення системи контролю і управління ТП, проектування і виготовлення засобів технологічного оснащення. Наведено результати апробації ТП і оснащення, що підтверджують технологічну готовність до серійного виробництва деталей ЛА з ВВКМ.

Ключові слова: термонавантажені деталі, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, функції технологічної підготовки виробництва, технологічна готовність виробництва.

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL READINESS OF PRODUCTION OF THE DETAILS LOADED WITH TEMPERATURE FROM CARBON-CARBON COMPOSITION MATERIALS

A.V. Chesnokov

A review over of results of researches is brought in area of creation of scientific bases of technological preproduction the details of aircrafts loaded with a temperature from carbon-carbon composition (CCC) in Ukraine. Conception of production of details of aircrafts is resulted from CCC with the rectilineal location of stratifilss. The results of theoretical and experimental researches, exposing the functions of technological preproduction are analysed: providing of technologicalness, development of technological processes (TP), creation of the checking and management of TP system, planning and making of facilities of technological equipment. The results of approbation of TP and equipments, confirmative technological readiness to the mass production of details of aircrafts from CCC are resulted.

Key words: loaded with the temperature of detail, carbon-carbon composition, functions of technological preproduction, technological readiness of production.

Чесноков Алексей Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, Украина, e-mail: chesnokov@snu.edu.ua.