

*А.И. САБАКАРЬ*, канд.техн.наук, доцент, НАУ им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”  
*В.В. БОРИСЕВИЧ*, канд.техн.наук, доцент, НАУ им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”,  
*В.К. БОРИСЕВИЧ*, д-р. техн.наук, профессор, НАУ им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”,  
*В.В. ТРЕТЬЯК*, канд.техн.наук, доцент, НАУ им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”

## **ОБОБЩЕННЫЙ ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ СКОРОСТНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ**

В статье проанализированы возможности использования различных типов математических моделей для построения и анализа технологических процессов импульсной металлообработки. Представлена типовая схема преобразования математических моделей для объектного представления детали и технологии для импульсных технологий. Проанализированы возможности использования математических моделей для микро, макро и метатуровне при описании импульсных технологий. Представлена последовательность преобразования математических моделей для расчета скоростного деформирования заготовки импульсными нагрузками для вариационных методов решения краевых задач.

Ключевые слова: импульсная обработка деталей, скоростное деформирование, математическая модель, вариационные методы решения краевых задач

В статті проаналізовані можливості використання різних типів математичних моделей для побудови і аналізу технологічних процесів імпульсної металообробки. Представлена типова схема перетворення математичних моделей для об'єктного представлення деталі і технології для імпульсних технологій. Проаналізовані можливості використання математичних моделей для мікро, макро і метарівні при описі імпульсних технологій. Представлена послідовність перетворення математичних моделей для розрахунку швидкісної деформації заготовки імпульсними навантаженнями для варіаційних методів рішення краєвих задач.

Ключові слова: імпульсна обробка деталей, швидкісна деформація, математична модель, варіаційні методи рішення краєвих задач

In the article the possibilities of the using of different types of mathematical models for creation and for analysis of the impulse metal-working processes are analysed. The typical procedure of transformation of mathematical models for object representation of the parts and of the impulse metalworking processes is presented. Possibilities of the use of mathematical models are analysed for mikro-, macro- and metalevels at description of impulse technologies. The sequence of transformation of mathematical models for computation of speed deformation of the blank by the impulse loading is presented for the variation methods of solution of a boundary problem.

Keywords: impulse working of the part, high-speed deformation, mathematical model, variation methods of solution of a boundary problem

### **Введение**

Применение новых подходов к проектированию технологических процессов для изготовления деталей авиационной техники диктует использование оригинальных ресурсосберегающих импульсных технологий, которые обеспечивают решение технических задач в сжатые сроки при минимальных затратах на проектирование и подготовку производства. В частности это относится к штамповке взрывом [1].

С учетом общей тенденции к широкому использованию информационных компьютерных технологий эти работы должны органично вписываться в цикл производства изделий авиационной техники.

Использование современных технологий импульсной штамповки, на базе ком-

плексного подхода к знаниям, накопленным наукой и производством за счет использования новейших математических методов и компьютерных технологий, позволяет значительно снизить сроки изготовления деталей, свести к минимуму материальные и временные затраты на подготовку и производство изделий.

За последние годы разработаны теоретические основы листовой штамповки импульсными нагрузками. Они базируются на трудах А.Л. Ильюшина, М.А. Лаврентьева, Х.А. Рахматулина, Ф.А. Баума, К.П. Станюковича, А.Д. Томленова, Ю.Н. Алексеева, Е.А. Попова, Р. Коула и др., В них рассмотрены общие вопросы деформированного состояния материала заготовок, влияние характера импульсного нагружения.

### 1 Типы и уровни математических моделей, использующихся для проектирования импульсных технологических процессов

Сложность процессов импульсной обработки диктует потребность в разработке новых методов решения задач математического моделирования для описания различных геометрических объектов (изготавливаемой детали, штампа, оборудования), а также самого процесса обработки.

Такая сложность требует блочного описания объектов – как детали, так и технологического процесса. Возникает необходимость выделения нескольких промежуточных иерархических уровней и описаний (рисунок 1.1). А поскольку процесс проектирования носит сложный характер, необходимо использование принципа объектного описания системы [2].

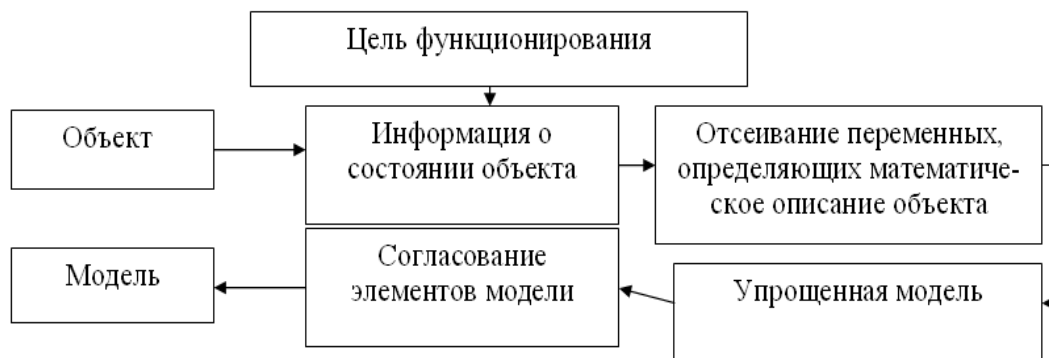


Рисунок 1.1 Этапы формирования математической модели

Такая декомпозиция приводит к появлению ряда особенностей описаний, из которых наиболее значимыми являются функциональный, конструкторский и технологический аспекты.

Функциональный аспект связан с отображением основных принципов функционирования в виде характеристик физических и информационных процессов, протекающих в объекте.

Конструкторский аспект связан с реализацией функционального проектирования, т. е. с определением геометрических форм объектов и их взаимным расположением в пространстве.

Технологический аспект относится к реализации результатов конструкторского проектирования, т.е. связан с описанием методов и средств изготовления объекта – детали.

В соответствии с объектным описанием импульсной системы деформирования системы требуется использование различных математических моделей. В зависимо-

сти от места в иерархии описаний математические модели [3] можно разделить на модели, относящиеся к микро-, макро- и метауровням (рисунок 1.2).

По степени детализации описания в пределах одного иерархического уровня математические модели можно разделить на полные и макромоделли.

В полной математической модели фигурируют фазовые переменные, характеризующие состояние всех имеющихся межэлементных связей объекта. Такую модель применяют для моделирования процессов методами прогонки.

Макромодель это такая модель, в которой отражаются состояния значительно меньшего числа межэлементных связей, что соответствует описанию детали при укрупненном выделении элементов. Такая модель применяется при решении обратной задачи формирования самого технологического процесса.



Рисунок 1.2 Процесс преобразования математических моделей

Особенностью моделей на микроуровне является отражение физики импульсных процессов, протекающих в непрерывном пространстве и времени.

Типичными представителями на микроуровне (рис. 1.2) являются дифференциальные уравнения в частных производных (ДУЧП). В них независимыми переменными являются пространственные координаты и время. С помощью этих уравнений рассчитываются поля напряжений и деформаций при математическом моделировании методами прогонки.

Возможности применения моделей на микроуровне ограничены отдельными деталями, а попытки анализировать с их помощью типовые процессы приводят к чрезмерному росту затрат машинного времени и памяти.

На макроуровне используют укрупненную дискретизацию пространства по функциональному признаку. Это приводит к представлению моделей на этом уровне в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Эти системы являются универсальными моделями на макроуровне, пригодными для анализа как динамических, так и установившихся состояний объектов.

Поскольку на метауровне в качестве элементов принимают достаточно сложные совокупности элементов, он характеризуется большим разнообразием типов используемых моделей. Для многих деталей на метауровне они по-прежнему предста-

вляются системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Однако в ряде задач удается использовать специфические особенности постановки задачи для их упрощения. В результате математические модели заменяется системой логических уравнений (ЛАУ).

При решении обратной задачи для таких моделей используется классификационная обработка данных и применяются алгоритмы распознавания образов, в частности структурно-аналитические модели [4].

Для решения прямой задачи необходимо применять модели микроуровня с использованием вариационных методов скоростного деформирования.

## 2. Особенности применения вариационных методов решения краевых задач скоростного деформирования тел

Известный и широко используемый структурно-вариационный метод Рвачева В.Л. [5], основой которого являются R-функции, позволяет решать краевые задачи при точном описании в аналитическом виде геометрии тел. Однако инерцию последних в этом случае нет возможности учесть, хотя есть предложения на этот счет [6]. В последней работе предлагается использовать временной слой, дающий квазистатическое описание явления.

Кроме этого структурно-вариационный метод Рвачева В.Л. не позволяет находить решения краевых задач с наперед заданной точностью и количество используемых координатных функций неопределимо.

Вместе с этим используется вариационный метод Филоненко-Бородича [7,8], по которому основной тензор, описывающий напряженно-деформированное состояние (НДС) тела при нагружении, не включает физико-механические свойства, да и с описанием геометрии существуют большие математические сложности.

В данной работе предложен обобщенный вариационный метод решения краевых задач, получающийся из указанных, путем раскрытия тензорного уравнения НДС.

Итак, для общности рассуждения говорим о краевой задаче для уравнений

$$Au = f \quad \text{в } \Omega \quad (2.1)$$

при краевых условиях

$$L_i u = \varphi_i \quad \text{на } \partial\Omega_i \quad (i=1, 2, \dots, m). \quad (2.2)$$

Здесь  $\partial\Omega_1, \dots, \partial\Omega_m$  – участки границы, часть из которых может совпадать, а также с  $\partial\Omega$  – границей тела  $\Omega$ .

Полагаем, что компоненты краевой задачи удовлетворяют необходимым и достаточным условиям для обеспечения единственного классического или обобщенного точного решения.

Формула решения

$$u = B_{(\Phi)} \quad (2.3)$$

называется структурой решения краевой задачи согласно формулам (2.1) и (2.2), если они удовлетворяются точно не зависимо от выбора неопределенной компоненты  $\Phi$ . В формуле (2.3) символ  $B$  – оператор, отображающий множество геометрических компонент на некоторое функциональное пространство.

Соотносясь к работе [7], запишем тензорное уравнение

$$T_{(0)}^{\alpha\beta} = B_{(\phi)}^{\alpha\beta} + T_{(x)}^{\alpha\beta}, \quad (2.4)$$

где  $T_{(0)}$  – обобщенный тензор кинетических напряжений;  
 $T_{(x)}$  – корректирующий тензор кинетических напряжений;  
 $B_{(\phi)}$  – структурный тензор напряжений.

Тогда следствием вариационных уравнений принципа возможных изменений напряженного состояния фиктивного тела (три пространственные координаты и плюс одна временная координата) становится эквивалентность их бесконечной системе уравнений, представляющихся в единой форме

$$\delta \left( \tilde{R} - \int_{\Sigma_1} \omega_{\alpha s} n_\beta T_{(0)}^{\alpha\beta} ds \right) = 0, \quad (2.5)$$

где  $\tilde{R} = \int_V \epsilon_{\alpha\beta} T_{(0)}^{\alpha\beta} dv$  – полная дополнительная работа деформации системы;

$\omega_{\alpha s}$  – компоненты перемещения;

$\epsilon_{\alpha\beta}$  – компоненты тензора деформации.

Аналогично записывается вариация полной дополнительной мощности деформации

$$\delta \left( \tilde{W} - \int_{\Sigma_2} v_{\alpha s} n_\beta T_{(0)}^{\alpha\beta} ds \right) = 0, \quad (2.6)$$

где  $\tilde{W} = \int_V \dot{\epsilon}_{\alpha\beta} T_{(0)}^{\alpha\beta} dv$  – полная дополнительная мощность деформации;

$v_{\alpha s}$  – скорость точек тела;

$\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$  – скорость деформации.

По определению вариации

$$\delta \tilde{R} = \sum_n \frac{\partial \tilde{R}}{\partial C_n} \delta C_n; \quad \delta \tilde{W} = \sum_n \frac{\partial \tilde{W}}{\partial C_n} \delta C_n. \quad (2.7)$$

Кроме этого вариации обобщенного тензора кинетических напряжений также запишутся

$$\delta T_{(0)}^{\alpha\beta} = \sum_n \frac{\partial T_{(0)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} \delta C_n = \sum_n \left( \frac{\partial B_{(\phi)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} \delta C_n + \frac{\partial T_{(x)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} \delta C_n \right) = \sum_n \frac{\partial T_{(x)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} \delta C_n \quad (2.8)$$

потому, что  $\sum_n \frac{\partial B_{(\phi)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} \delta C_n = 0$ .

Тогда вместо уравнения (2.5) получим систему уравнений

$$\frac{\partial \tilde{R}}{\partial C_n} - \int_{\Sigma_1} \omega_{\alpha s} n_\beta \frac{T_{(x)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} ds = 0, \quad (2.9)$$

а вместо уравнения (2.6) –

$$\frac{\partial \tilde{W}}{\partial C_n} - \int_{\Sigma_2} v_{\alpha s} n_\beta \frac{T_{(x)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} ds = 0, \quad (n=1, 2, \dots). \quad (2.10)$$

Здесь  $C_n$  – коэффициенты функций обобщенных кинетических напряжений.

Применительно к упругому и упруго-пластическому изотропным телам с учетом соотношений

$$T_{\alpha\beta}^{(0)} = B_{\alpha\beta}^{(\phi)} + T_{\alpha\beta}^{(x)}, \quad \frac{\partial B_{\alpha\beta}^{(\phi)}}{\partial C_n} = 0, \quad \frac{T_{(x)}^{\alpha\beta}}{\partial C_n} = f_{(x)}^{\alpha\beta} \quad (2.11)$$

получаем следующую систему уравнений

$$\frac{\partial \tilde{R}}{\partial C_n} = \frac{1}{2G} \int_V \left\{ -2G\alpha B^{(\phi)} g_{\alpha\beta} f_{(n)}^{\alpha\beta} - \alpha_2 g_{\nu\mu} \left( B_{(\phi)}^{\nu\mu} + T_{(x)}^{\nu\mu} \right) g_{\alpha\beta} f_{(n)}^{\alpha\beta} + \right. \\ \left. + \alpha_1 g_{\alpha\nu} g_{\beta\mu} \left[ f_{(n)}^{\nu\mu} \left( B_{(\phi)}^{\alpha\beta} + T_{(x)}^{\alpha\beta} \right) + f_{(n)}^{\alpha\beta} \left( B_{(\phi)}^{\nu\mu} + T_{(x)}^{\nu\mu} \right) \right] \right\} dv. \quad (2.12)$$

Подставив в уравнение (2.12) уравнение (2.9), получим

$$\int_V \left[ \alpha_1 g_{\alpha\nu} g_{\beta\mu} \left( f_{(n)}^{\nu\mu} T_{(x)}^{\alpha\beta} + f_{(n)}^{\alpha\beta} T_{(x)}^{\nu\mu} \right) - \alpha_2 g_{\nu\mu} g_{\alpha\beta} f_{(n)}^{\alpha\beta} T_{(x)}^{\nu\mu} \right] dv = \\ = 2G \int_{S_2} \omega_{\alpha S} n_S f_{(n)}^{\alpha\beta} ds - \int_V \left[ 2G\alpha B^{(\phi)} g_{\alpha\beta} f_{(n)}^{\alpha\beta} - \alpha_2 g_{\nu\mu} g_{\alpha\beta} B_{(\phi)}^{\nu\mu} f_{(n)}^{\alpha\beta} + \right. \\ \left. + \alpha_1 g_{\alpha\nu} g_{\beta\mu} \left( f_{(n)}^{\nu\mu} B_{(\phi)}^{\alpha\beta} + f_{(n)}^{\alpha\beta} B_{(\phi)}^{\nu\mu} \right) \right] dv. \quad (2.13)$$

Здесь в уравнениях (2.12) и (2.13) использованы следующие обозначения:

$G$  – модуль сдвига;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $g_{\alpha\beta}$  – символ Кронекера;  $\alpha_1$  – коэффициент, определяемый из соотношения

$$\alpha_1 = 1 + \varphi + \frac{1}{2} T_i \frac{\partial \varphi}{\partial T_i},$$

где  $\varphi$  – функция пластичности;

$T_i$  – инварианты тензора  $T_{(0)}$ ;

$\alpha_2$  – функция состояния тела будет

$$\alpha_2 = \frac{1}{3} \left( \frac{3\nu}{1+\nu} + \varphi + T_i \frac{\partial \varphi}{\partial T_i} \right),$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Изложенное касается малых деформаций, но при больших деформациях, в особенности для тел, находящихся в состоянии нелинейной упругости или пластичности имеются свои формулы, приведенные в работах [7,8].

В дальнейшем, кроме этого, будут использоваться зависимости для материалов, находящихся под нагрузкой в состоянии нелинейной упругости, основы которой даны в работах [9, 10].

Представляем формулы по вычислению тензоров Пиола для случаев тела Мурнагана, гиперупругого тела, относящихся к сжимаемым материалам, а также даны зависимости для нелинейного несжимаемого упругого тела (материалы с наложенными связями, например, резина или наноматериал).

Материал Мурнагана является трехконстантным материалом и тензор Пиола (энергетический тензор напряжений) для него представим в следующем виде ( $\overset{\circ}{\nabla} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0}$ , т. е.  $\overset{\circ}{\nabla} \mathbf{u} = \overset{\circ}{\nabla} \mathbf{u}^m$ )

$$P = (\lambda + 2\mu) \overset{\circ}{\nabla} \mathbf{u} + \left( \frac{3}{2} \lambda + \mu + \ell + 2m \right) \overset{\circ}{\nabla}^2 \mathbf{u}, \quad (2.14)$$

где  $\overset{\circ}{\nabla} \mathbf{u}$  – градиент перемещения;  $\lambda, \mu, \ell, m$  – коэффициенты из работы [10].

Уравнение равновесия для объема тела под действием объемных сил будет

$$\overset{\circ}{\nabla} P + X = \mathbf{0}, \\ (\lambda + 2\mu) \overset{\circ}{\nabla}^2 \mathbf{u} + \left( \frac{3}{2} \lambda + \mu + \ell + 2m \right) \overset{\circ}{\nabla}^3 \mathbf{u} + X = \mathbf{0},$$

(2.15)

где  $\overset{\circ}{\nabla}$  – градиент места в отсчетной конфигурации (для движения точки тела).

Или уравнение равновесия для объема с мерой деформации Фингера

$$\overset{\circ}{\nabla} \cdot [2\nabla r^m(\psi_0 E + \psi_1 F + \psi_2 F^2)] + X = 0.$$

(2.16)

Для гиперупругого тела тензор Пиола такой

$$P = (\lambda + 2\mu) \overset{\circ}{\nabla} u + \left(\frac{3}{2}\lambda + 3\mu + \ell + 4m + \frac{5}{4}n\right) \overset{\circ}{\nabla}^2 u \quad (2.17)$$

и уравнение равновесия такое же как и уравнение (2.16), только  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  - вычисляются из других соотношений (см. работу [10]).

Нелинейно упругий материал с наложенными связями для изотропного случая рассчитывается по формуле

$$P = \nabla r^m(-pE + 2\psi_1 F + 2\psi_2 F^2) = (1 - \overset{\circ}{\nabla} u)[-p + 2\mu \overset{\circ}{\nabla} u + (6\mu + 8m + n) \overset{\circ}{\nabla}^2 u]. \quad (2.18)$$

Тогда уравнение равновесия в объеме представляется как

$$-\nabla P(1 - \overset{\circ}{\nabla} u) + 2\mu \overset{\circ}{\nabla}^2 u + (4\mu + 8m + n) \overset{\circ}{\nabla}^3 u + X = 0. \quad (2.19)$$

Формулы (2.14, ..., 2.19) нужны для вычисления  $V_{(\Phi)}^{\alpha\beta}$  согласно действий по структурно-вариационному методу. Приведем пример – упругое тело, рассчитываемое как краевая задача смешанного типа (см. работы [5, 6]).

При этом для однородного тела векторное уравнение Ламе будет

$$(\lambda + \mu) \text{grad div } u + \mu \Delta u + X = 0.$$

(2.20)

Граничные условия описываются следующим образом. На участке  $\partial\Omega_1$  границы  $\partial\Omega$  задан вектор перемещений  $f_1$ , а на участке  $\partial\Omega_2$  - внешняя нагрузка  $\varphi$  (см. работу [5])

$$\begin{aligned} u|_{\partial\Omega_1} &= f_1, \\ N(u)|_{\partial\Omega_2} &= \varphi. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Далее получаем структуру решения смешанной краевой задачи линейной теории упругости

$$\begin{aligned} u = \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \{ &\omega_2^2 \omega_1 \Phi^1 + \omega_2^2 \dot{u} + \omega_1 \{ \Phi^2 + \frac{\omega_2}{\mu(\lambda + 2\mu)} [\mu \nabla \omega_2 (\dot{\Phi} \nabla \omega_2) + \\ &+ (\lambda + 2\mu) \dot{\Phi} |\nabla \omega_2|^2 - \nabla \omega (\nabla \omega_2 \dot{\Phi}) I] \} \}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

где  $\dot{\Phi} = -2\mu D_1^{(2)} \Phi^2 - \lambda \nabla \omega_2 \text{div} \Phi^2 - \mu (\nabla \omega_2 \text{rot} \Phi^2) - \varphi$ .

Структура со «склейкой» граничных условий – описаний границ  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (см. формула (2.22)) включает неопределенные гармонические функции  $\Phi^1$  и  $\Phi^2$ , получающиеся из разложений

$$\Phi_1 = \sum_{i,j}^N C_{ij}^{(k)} \varphi_i(x_1) \varphi_j(x_2),$$

$$\Phi_2 = \sum_{i,j}^N C_{ij}^{(k)} \psi_i(x_1) \psi_j(x_2) \quad (2.23)$$

Здесь составляющие разложений будут:  $C_{ij}^{(k)}$ ,  $C_{2ij}^{(k)}$  - коэффициенты разложения, которые определяются из условия минимума функционала, представляющего собой потенциальную энергию упругой деформации (см. работу [6]);  $\varphi(x)$ ,  $\psi(x)$  – многочлены Чебышева первого рода.

Если не выполнять «склеивку», т.е. не привносить априори в решение особенностей поведения структуры в точках смены граничных условий, когда  $\omega_1 = \omega_2 = 0$ , тогда структура решения является следующей функцией, согласно работе [11]

$$u = \varphi_1 + \omega_1 \Phi_1 + \omega [-D_1(\varphi_1 + \omega_1 \Phi_1) + \varphi_2 + \omega_2 \Phi_2 + \omega \Phi_3]. \quad (2.24)$$

Разложение гармонических функций  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , согласно формуле (2.23) такое же, только  $\Phi_3$  отражается третьим многочленом, а структура будет такой

$$\begin{aligned} \Phi_1' &= \sum_{i,j,k}^N C_{ijk}^{(k)} \varphi_i(x_1) \varphi_j(x_2) \varphi_k(x_3), \\ \Phi_2' &= \sum_{i,j,k}^N C_{2ijk}^{(k)} \psi_1(x_1) \psi_2(x_2) \psi_3(x_3), \\ \Phi_3' &= \sum_{i,j,k}^N C_{3ijk}^{(k)} \xi_1(x_1) \xi_2(x_2) \xi_3(x_3). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Применяя структурно-вариационный метод, определяем оператор  $V_{(\Phi)}$  и вносим его в соответствующие соотношения работ [7, 8], из которых также находим  $T_{(k)}^{\alpha\beta}$ .

В итоге получаем компоненты обобщенного тензора кинетических напряжений  $T_{(0)}^{\alpha\beta}$  и описываем напряженно-деформированное состояние тела.

### Выводы

В статье представлены материалы, касающиеся особенностей применения вариационных методов решения краевых задач для скоростного деформирования тел. Проанализированы возможности использования различных типов математических моделей для имитации и анализа технологических процессов импульсной металлообработки. Представлена типовая схема преобразования математических моделей для объектного представления детали и технологии для импульсных технологий. Проанализированы возможности использования математических моделей для микро, макро и метауровней при описании импульсных технологий. Представлена последовательность преобразования математических моделей для расчета скоростного деформирования заготовки импульсными нагрузками для вариационных методов решения краевых задач. В представленной работе заложены основы проектирования, расчета и производства деталей и узлов аэрокосмической техники с применением современных видов оборудования и станков, в особенности с использованием импульсных видов обработки материалов до уровня нанотехнологий.

**Список литературы:** 1. Пихтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом. - М.: Машиностроение, 1964. – 175 с. 2. Третьяк В.В. Объектный подход к проектированию ресурсосберегающих импульсных технологий. // Авиационно-космическая техника и технология. Сб. научн. трудов, вып. № 3 (29). – Харьков: Изд-во ХАИ, 2006. – с. 26-31. 3. Норенков И.П. САПР. Принципы построения и структура. – М.: «Высшая школа», 1987. – 122 с. 4. Зорик В.В., Третьяк В.В., Филипповская Л.А. Возможности структурного синтеза импульсных технологий с использованием алгоритмов распознавания образов. // Кузнечно-штамповочное про-

изводство. Обработка металлов давлением. Научно-технический и производственный журнал, Вып. № 12. – М.: МГТУ «Станкин», 2007. – с. 33-38. 5. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – Киев: «Наукова думка», 1982.-551 с. 6. Рвачев В.Л., Синекон Н.С. Метод R-функций в задачах теории упругости и пластичности. - Киев: «Наукова думка», 1990.-211 с. 7. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Прочность пространственных элементов конструкций. – М. «Высшая школа», 1972. – 752 с. 8. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Напряжения в телах при импульсном нагружении. – М.: «Высшая школа», 1975. – 463 с. 9. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: «Наука», 1970. – 939 с. 10. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. – М.: «Наука», 1980. – 512 с. 11. Коваль Ф.Ф. Новые конструктивные подходы построения общих структур решения краевой задачи. // Математические методы анализа динамических систем. Сб. научн. трудов, вып. 2 – Харьков: Изд-во Харьковского авиационного института, 1978. – с. 23 – 32.

## УДК 621.757 (043.2)

**А.Ю. КОМАРОВ**, аспирант

**Н.Ю. КАЛИНИЧЕНКО**, аспирант

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»

### **АЛГОРИТМ СОЗДАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ 3D-ВИЗУАЛИЗАЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ**

Предложен алгоритм создания визуализации технологических процессов сборки, обслуживания и ремонта. Рассмотрены преимущества и недостатки данной методики. Проведен анализ возможностей применения визуализации в интерактивных электронных технических руководствах, маркетинге и при повышении квалификации персонала.

**Ключевые слова:** визуализация технологических процессов, интерактивные электронные технические руководства, CAD системы, CALS технологии

Запропоновано алгоритм створення візуалізації технологічних процесів складання, обслуговування та ремонту. Розглянуті переваги та недоліки даної методики. Проведений аналіз можливостей застосування візуалізації у інтерактивних електронних технічних керівництвах, маркетингу та при підвищенні кваліфікації персоналу.

**Ключові слова:** візуалізація технологічних процесів, інтерактивні електронні технічні керівництва, CAD системи

It is offered the algorithm of creation of visualisation of technological processes of assemblage, service and repair. Advantages and disadvantages of the suggested technique are considered. Possibilities of application of visualisation in interactive electronic technical managements, marketing and at personnel improvement of professional skill are analyzed.

**Keywords:** visualisation of technological processes, interactive electronic technical managements, CAD systems

В настоящее время технологические процессы (ТП) сборки авиационных агрегатов имеют очень сложную структуру, что ведет к значительным трудовым и временным затратам. Это связано с такими особенностями, как:

- большое количество деталей и сборочных единиц, участвующих в процессе сборки;
- разнообразие технологических приемов сборки;
- высокие требования к выдерживанию определенных параметров;
- сложная конструкция изделий.