

УДК 685.1

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА СОСТАВНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРОШИВКОЙ.

**Симонова Л.А., Валиев А.М., Панкратов Д.Л., Валиева Р.Ф.**

*Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВПО КФУ, Набережные Челны,  
e-mail: amvaliev@mail.ru.*

Создание автоматизированных систем, позволяющих по геометрическим параметрам готового изделия производить расчет технологических параметров процесса, геометрии инструмента и формы исходной заготовки по геометрическим параметрам готового изделия (поковки) без участия технолога-эксперта, является сложной и трудоемкой задачей. Решение данной задачи значительно уменьшает сроки и затраты на конструкторско-технологическую подготовку и освоение производства новых поковок по рассматриваемой технологии. Так для производства составных металлических изделий прошивкой, представляющего собой сложный многостадийный процесс, создание автоматизированной системы моделирования и управления технологическим процессом сборки изделия является особенно актуальным. Статья посвящена разработке автоматизированной системы моделирования и управления технологическим процессом сборки составного изделия прошивкой, состоящей из информационной системы технологической подготовки процесса сборки с поддержкой принятия решений на основе базы прецедентов, модулей моделирования технологического процесса и корректирующего управления технологическим процессом сборки составного изделия.

**Ключевые слова:** Автоматизированная система, моделирование, управление, технологический процесс, составные изделия, прошивка, формоизменение

## AUTOMATED DESIGN SYSTEM OF TECHNOLOGICAL PREPARATION AND PROCESS CONTROL PRODUCTION OF COMPOSITE METAL PRODUCTS BY FIRMWARE

**Simonova L.A., Valiev A.M., Pankratov D.L., Valieva R.F.**

*Kazan (Volga Region) Federal University Branch in Naberezhnye Chelny,  
Naberezhnye Chelny, e-mail: amvaliev@mail.ru.*

Creation of automated systems to geometrical parameters of the finished product to settle an invoice technological parameters of process, tool geometry and shape of the initial perform geometric parameters of the finished product (forgings) without the participation of an expert technologist is a complex and laborious task. The solution to this problem significantly reduces the time and cost of design and technological preparation and production of new forgings for the technology in question. So for the production of composite metal products by firmware, which is a complex multistage process, an automated system modeling and process control product assembly is particularly relevant. Article is devoted to the development of an automated system of modeling and process control firmware build a composite product consisting of the information system of technological preparation of the build process to support decision making based on a database of precedents, process simulation modules and corrective process control assembly of the composite product.

**Keywords:** Automated system, modeling, management, technological process, composite products, firmware, forming

Существующие САЕ-системы моделирования процессов обработки металлов давлением позволяют в основном моделировать и проанализировать процесс формоизменения при уже заданных технологических параметрах процесса, геометрии инструмента и исходной заготовки [1]. Поиск оптимального варианта в основном осуществляется за счет высокой квалификации технолога, его «профессиональной» интуиции, когда он по результатам моделирования корректирует входные параметры процесса, устраняя таким образом недостатки предыдущего варианта [2]. На основе таких решений технолога потом формируется база прецедентов, которые ложатся уже в основу САМ-систем кузнечно-штамповочного производства.

Создание автоматизированных систем, позволяющих по геометрическим параметрам

готового изделия производить расчет технологических параметров процесса, геометрии инструмента и формы исходной заготовки по геометрическим параметрам готового изделия (поковки) без участия технолога-эксперта, является сложной и трудоемкой задачей. Решение данной задачи значительно уменьшает сроки и затраты на конструкторско-технологическую подготовку и освоение производства новых поковок по рассматриваемой технологии. Так для производства составных металлических изделий прошивкой, представляющего собой сложный многостадийный процесс, создание автоматизированной системы моделирования и управления технологическим процессом сборки изделия является особенно актуальным.

На рис. 1 представлена структурная схема автоматизированной системы моде-

лирования и управления технологическим процессом сборки составного изделия прошивкой, состоящей из информационной системы технологической подготовки процесса сборки с поддержкой принятия

решений на основе базы прецедентов, модулей моделирования технологического процесса и корректирующего управления технологическим процессом сборки составного изделия.

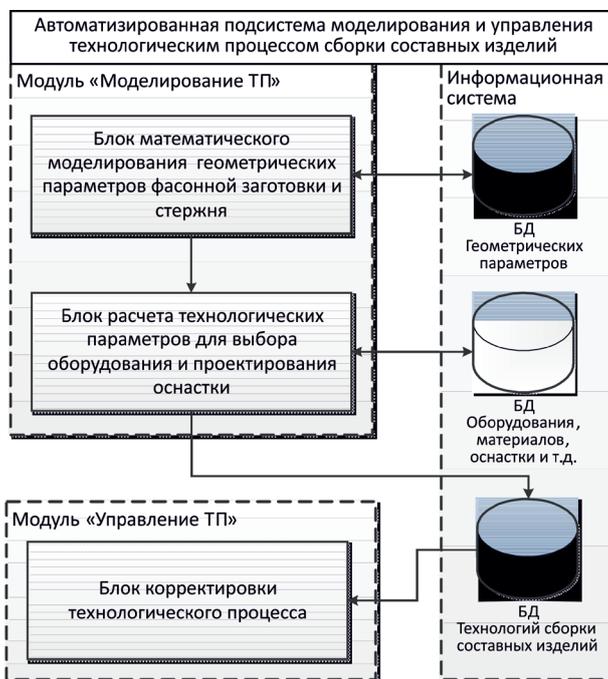


Рис. 1. Структура автоматизированной подсистемы моделирования и управления технологическим процессом сборки составного металлического изделия прошивкой

Исходными данными разработанной системы является САД-модель готового составного изделия, а также сведения о материалах соединяемых элементов. По исходным данным в информационной системе осуществляется поиск похожего прецедента в базе. В базе прецедентов хранятся готовые решения в виде САД-моделей фасонной заготовки и стержня, принятых решений по выбору оборудования и проектирования оснастки, сформированных управляющих команд. При отсутствии полностью совпадающего прецедента производится либо создание нового прецедента, либо выбирается наиболее близкий, который в дальнейшем адаптируется. Разработка нового прецедента или его адаптация производится с помощью модуля «моделирование ТП» сборки составных изделий.

Модуль моделирования технологического процесса сборки состоит из:

а) Блока математического моделирования геометрических параметров фасонной заготовки и стержня, основанного на математических моделях, учитывающих смещение металла, образования кольцевого зазора и величины утяжки при прошивке.

Для разработки математических моделей формоизменения и на основе их алго-

ритмов проектирования геометрических параметров фасонной заготовки и стержня были проведены исследования с помощью имитационного моделирования в программном комплексе Deform-2D процесса внедрения стержня в цилиндрическую заготовку по схеме открытой прошивки.

В качестве математического аппарата имитационного моделирования в Deform-2D используется принцип виртуальных скоростей и работ, метод конечных элементов, с помощью которых осуществляется дискретизация следующей системы исходных уравнений:

– уравнение равновесия:  $\sigma_{ij,j} = 0$ , где  $\sigma_{ij,j}$  – компоненты тензора напряжений;

– уравнение движения:  $\sigma_{ij,j} + \rho \frac{dv_i}{dt} = 0$ , где  $\rho$  – плотность;  $v_i$  – компоненты вектора скорости;

– уравнения течения:  $s_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij}$ , где

$s_{ij}$  – девиатор тензора напряжений;  $\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}$  –

интенсивности напряжений и скоростей деформацией соответственно;

– условие несжимаемости:  $v_{i,i} = 0$ .

На основе результатов имитационного моделирования и анализа трудов [3–5] вы-

делены основные особенности формоизменения заготовки при открытой прошивке с диаметром прошивки  $d_n = 0,3 \div 0,7D_0$ . При  $d_n < 0,3D_0$  деформация заготовки носит местный характер, так как процесс прошивки начинает переходить в процесс вдавливания прошивки в полупространство. При  $d_n = 0,7 \div 1,0D_0$  происходит незначительное погружение прошивки в заготовку, которая сильно осаживается, что исключает возможность получения неразъемного соединения.

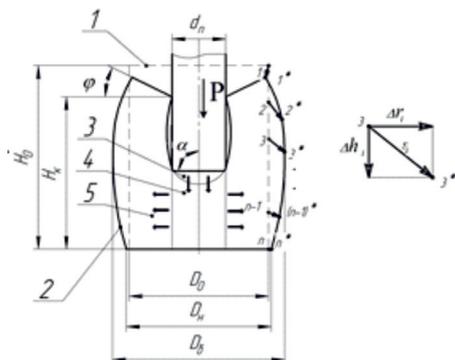


Рис. 2. Анализ формоизменения цилиндрической заготовки при открытой прошивке

Размеры заготовки до прошивки характеризуются высотой  $H_0$  и диаметром  $D_0$

заготовки (рис. 2, контур 1). В результате прошивки заготовка осаживается, и высота ее становится равной  $H_k$ . Заготовка приобретает бочкообразную форму с диаметром бочки  $D_б$  (контур 2).

Объем кольцевого зазора при прошивке можно охарактеризовать следующей относительной величиной:

$$\theta_3 = \frac{V_3}{V_{в.п.}} 100\%, \quad (1)$$

где  $V_3$  – объем кольцевого зазора, мм<sup>3</sup>;  $V_{в.п.}$  – объем внедренной части цилиндрического пуансона, мм<sup>3</sup>.

Контур верхней торцевой поверхности поворачивается на угол  $\varphi$ , что и образует утяжину.

Цифрами 1, 2, ... n показаны начальные положения равноудаленных друг от друга точек на боковой поверхности, где n – количество точек. Цифрами 1\*, 2\*, ... n\* показаны конечные положения тех же точек после прошивки. Перемещение из начального положения характеризуется вектором  $\vec{s}_i(\Delta r_i, \Delta h_i)$ , где  $\Delta r_i$  и  $\Delta h_i$  – величина перемещения i – точки в радиальном и осевом направлениях соответственно. Следовательно, отложив данные смещения точек от контура требуемого формоизменения образца, можно получить контур фасонной заготовки в точках 1\*\*, 2\*\*, ... n\*\* (рис. 4, а).

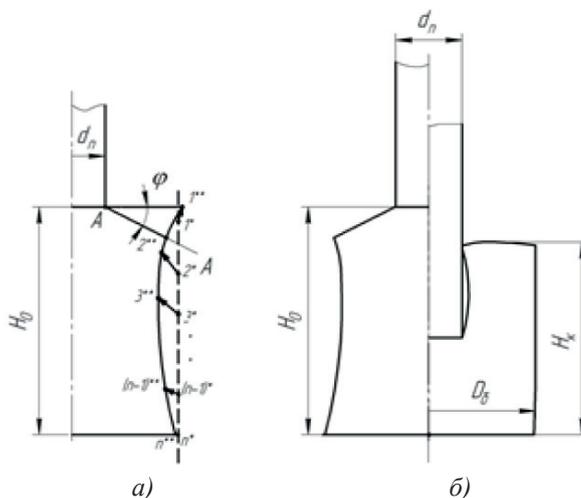


Рис. 3. Проектирование образующей фасонной заготовки

Однако данная методика не позволяет компенсировать утяжину, образующуюся на верхнем торце прошиваемой заготовки. Ввиду этого, спроектированный контур фасонной заготовки необходимо скорректировать на угол  $\varphi$  со стороны образования утяжины. Для этого через точку с координатой  $(\frac{d_n}{2}; H_0)$  проводят секущую плоскость AA под углом  $\varphi$  к торцевой поверхности (рис.3, а).

На рис. 3, б показаны контуры спроектированной фасонной заготовки слева – до прошивки; справа – после прошивки. Форма фасонной заготовки после прошивки представляет собой цилиндр с диаметром  $D_б$  и высотой  $H_k$ .

Проведены исследования для различных соотношений геометрических размеров заготовки и стержня. Принятые значения варьируемых факторов: диаметр

пуансона  $d_{\text{п}}/D_0 = 0.3 \div 0.7$ ; высота заготовки  $H_0/D_0 = 0.5 \div 1.5$  (при больших значениях  $H_0/D_0$  сложно обеспечить устойчивость разового пуансона); угол у основания пуансона  $\alpha = 45^\circ \div 90^\circ$ . Глубина внедрения пуансона  $-0.8 H_0$  (большая глубина прошивки приводит к образованию удаленной перемычки и используется в основном для прошивки сквозного отверстия в заготовке).

Получены математические модели зависимостей размеров конечного формоизменения заготовки  $\Delta r_i$ ,  $\Delta h_i$ ,  $D_6$ ,  $D_{\text{н}}$ ,  $H_{\text{к}}$ ,  $\varphi$  от относительного диаметра стержня  $d_{\text{п}}/D_0$ , относительной высоты заготовки  $H_0/D_0$ , угла у основания пуансона  $\alpha$ :

$$\begin{cases} \Delta r_i = f_1(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \\ \Delta h_i = f_2(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \\ D_6 = f_3(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \\ H_{\text{к}} = f_4(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \\ \varphi = f_5(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \\ \theta_3 = f_6(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

Разработан алгоритм проектирования геометрических параметров фасонной заготовки и стержня, а также требуемых перемещений деформирующего инструмента по чертежу готового составного изделия (рис. 4).

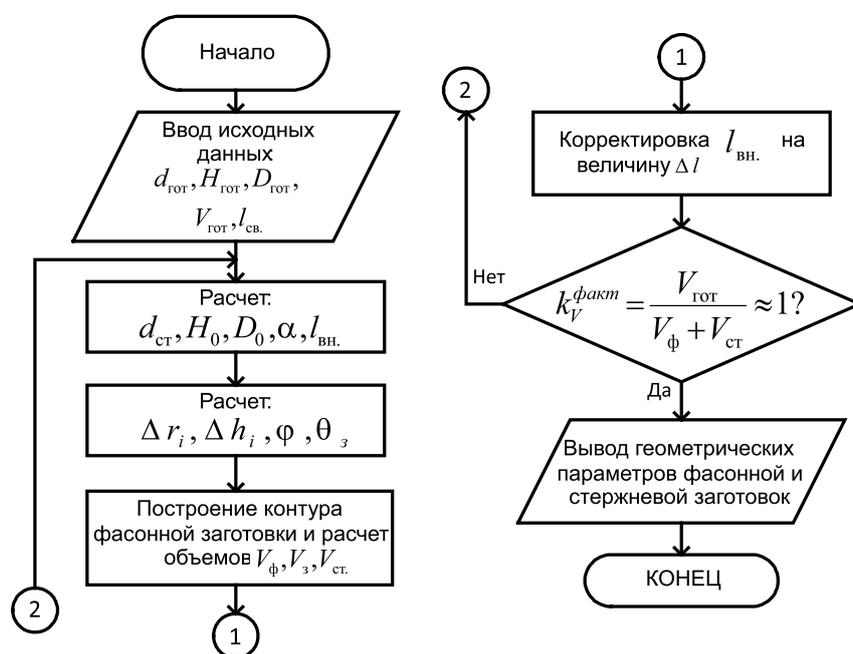


Рис. 4. Алгоритм проектирования геометрических параметров фасонной заготовки и стержня для производства составных изделий прошивкой

На первом этапе происходит ввод исходных данных в виде CAD-модели готового составного изделия, для которого проектируется фасонная заготовка. Далее решением системы уравнений:

$$\begin{cases} D_6 = f_3(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \\ H_{\text{к}} = f_4(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \\ \theta_3 = f_6(d_{\text{п}}/D_0; H_0/D_0; \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

производится расчет размеров  $D_0$  и  $H_0$  цилиндрической заготовки 3, величина кольцевого зазора  $\theta_3$ , угол конусности стержня  $\alpha$  и длина внедренной части стержня  $l_{\text{вн}}$  (рис. 5).

Контур данной цилиндрической заготовки 2 после прошивки должен вписываться

в контур готового изделия 1, то есть должно выполняться следующее условие:

$$\begin{cases} d_{\text{п}} = d_{\text{гор}} \\ H_{\text{к}} = k_v \cdot H_{\text{гор}} \\ D_6 = D_{\text{гор}} \end{cases} \quad (4)$$

где  $H_{\text{гор}}$  и  $D_{\text{гор}}$  – высота и диаметр корпусной части;  $d_{\text{гор}}$  – диаметр стержневой части готового биметаллического изделия (поковки);  $H_{\text{к}}$  и  $D_6$  – размеры цилиндрической заготовки после прошивки (контур 2);  $k_v$  – поправочный коэффициент по объему (на первом цикле расчета алгоритма  $k_v = 1$ ), с помощью которого корректируется объем фасонной заготовки для выполнения условия постоянства объема.

Ввиду того, что таких контуров множество (4 неизвестных при 3 уравнениях), то выбирается контур с максимально возможной величиной кольцевого зазора  $\theta_3 = \theta_{3\max}$ .

После определения размеров цилиндрической заготовки рассчитываются значения перемещения точек ее боковой поверхности в радиальном  $\Delta r_i$  и осевом  $\Delta h_i$  направлениях и угол утяжки верхней торцевой поверхности  $\varphi$  с помощью подстановки полученных на предыдущем этапе расчета значений  $D_0$ ,  $H_0$  и  $\alpha$  в следующие математические модели:

$$\Delta r_i = f_1(d_n/D_0; H_0/D_0; \alpha);$$

$$\Delta h_i = f_2(d_n/D_0; H_0/D_0; \alpha);$$

$$\varphi = f_3(d_n/D_0; H_0/D_0; \alpha)$$

Полученные значения используются при построении контура фасонной заготовки (см. рис. 3,а).

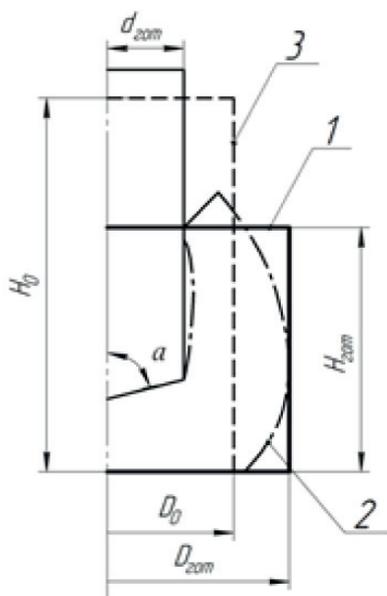


Рис. 5. Проектирование фасонной заготовки по готовому изделию

Для заполнения кольцевого зазора материалом стержня за счет его осадки при сборке соединения, стержень следует удлинить на величину  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \frac{\theta_3}{100} l_{\text{вн.}}, \text{ где } l_{\text{вн.}} - \text{длина внедренной}$$

части стержня.

На заключительном этапе производится расчет выполнения условия постоянства объема с помощью расчета

фактического значения поправочного коэффициента  $k_v^{\text{факт}}$ :

$$k_v^{\text{факт}} = \frac{V_{\text{гот}}}{V_{\phi} + V_{\text{ст}}} \approx 1? \quad (5)$$

Если  $k_v \approx 1$  (отклонение в пределах диапазона точной горячей объемной штамповки  $\pm 0,01$ ), то расчет останавливается и выводится результат проектирования. В случае если  $k_v \neq 1$ , то расчет начинается заново со значением  $k_v = k_v^{\text{факт}}$  в условии (4). Расчет повторяется до выполнения условия (5).

Вывод геометрических параметров фасонной заготовки и стержня в виде CAD – моделей фасонной и стержневой заготовки.

б) Блока расчета технологических параметров процесса для выбора оборудования и проектирования оснастки, в основе которого заложено математическое моделирование температурно-силового режима сборки. Выбор с помощью базы данных «оборудование, материалы и оснастка» пресса, индуктора, способа изготовления заготовки и стержня (зависит от программы выпуска) и т.п. Проектирование и имитационное моделирование сборочной оснастки. Формирования управляющих программ обработки либо для изготовления самих заготовок, либо штампового инструмента для их изготовления.

Модуль «Управление ТП» предназначен для обеспечения правильной стадийности процесса сборки составного изделия за счет корректирующего управления параметрами процесса, а именно:

1) на этапе внедрения стержня обеспечивается перемещение штока на расчетную глубину внедрения;

2) на этапе нагрева – обеспечение потери стержнем прочностных свойств расчетом за счет настройки после первого этапа датчика температуры на срабатывание при достижении температуры перехода внедренной части стержня в пластическое состояние в зависимости от максимально зарегистрированного на первом этапе усилия деформирования и заданных свойств материала;

3) на этапе предварительной сборки – заполнение кольцевого зазора с обеспечением плотного физического контакта соединяемых поверхностей за счет анализа регистрируемого усилия на штоке;

4) на этапе окончательной сборки – калибровка формы (окончательное заполнение

полости матрицы) и создание давления на соединяемых поверхностях с всесторонним сжатием за счет анализа регистрируемого усилия на штоке.

Данная подсистема может быть интегрирована в системы АСТПП производства поковок ОМД для класса деталей с большим перепадом диаметра; АСТПП производства биметаллических изделий ОМД; АСТПП технологий восстановления изношенных поверхностей деталей за счет смещения объемов металла пластической деформацией.

#### Список литературы

1. Стебунев С.А., Tom Ellinghausen. QForm 7 – новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. ООО «КванторФорм»: сайт. – URL: <http://www.qform3d.ru/?go=publications#1> (дата обращения 10.07.2014).
2. Черепашков А.А., Носов Н.В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. – Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2009. – 640 с.
3. Охрименко Я.М. и Тюрин В.А. Теория процессовковки. Учеб. пособие для вузов. М., «Высш. школа», 1977. – 295 с.
4. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1976. – 560 с.
5. Березкин В. Г. Формоизменение при обработке металлов давлением М., «Машиностроение», 1973. – 152 с.

#### References

1. Stebunov S.A., Tom Ellinghausen. *QForm 7 – no-voe slovo v modelirovanii processov obrabotki metallov davleniem* [QForm 7 – a new word in the simulation of metal forming processes], Available at: <http://www.qform3d.ru/?go=publications#1> (accessed 10 July 2014).
2. Cherepashkov A.A., Nosov N.V. *Komp'yuternye tehnologii, modelirovanie i avtomatizirovannye sistemy v mashinostroyenii* [Computer technology, modeling and automated systems in mechanical engineering]. Volgograd, In-Folio, 2009. 640 p.
3. Ohrimenko Ja.M. i Tjurin V.A. *Teoriya processov kovki* [Theory of forging processes]. Moscow, High school, 1977. 295 p.
4. Ohrimenko Ja.M. *Tehnologiya kuznechno-shtampovoch-nogo proizvodstva* [The technology of forging and stamping production]. Moscow, Mechanical Engineering, 1976. 560 p.
5. Berezkin V. G. *Formoizmenenie pri obrabotke metallov davleniem* [Forming at the metal forming]. Moscow, Mechanical Engineering, 1973. 152 p.

#### Рецензенты:

Астащенко В.И., д.т.н., профессор кафедры материалов, технологий и качества Набережночелнинского института (филиала) Казанского Федерального Университета, г. Набережные Челны;

Ганиев М.М., д.т.н., профессор кафедры автоматизации и управления, директор Набережночелнинского института (филиала) Казанского Федерального Университета, г. Набережные Челны.

Работа поступила в редакцию 07.08.2014.