

металла. Авторы назвали такое течение вихревым, хотя и понимают некоторую условность такого термина.

3. Теоретический анализ процесса выдавливания при наличии нескольких варьируемых параметров представляет значительные трудности, поэтому его можно выполнить только на персональных ЭВМ с достаточно производительными процессорами (Athlon 2500+ или более современными моделями).

4. Предложенный метод теоретического анализа можно успешно использовать для анализа процессов деформации весьма сложных деталей, в которых течение металла характеризуется вихревым течением.

**Список литературы:** 1. Берлин Б.М., Соленов В.М., Целяев В.Г. Некоторые особенности изготовления полых фланцевых поковок на высокоскоростном молоте // Кузнечно-штамповочное производство, 1972. – № 10. – С. 6-8. 2. Семенов И.Е. Расчет усилия деформирования при обратном выдавливании изделий коробчатой формы // Труды МВТУ, № 263. Машины и технология обработки металлов давлением. – М., Машиностроение, 1978. – С. 130-132. 3. Куликов И.В. Силовой режим выдавливания деталей коробчатой формы // Вестн. Харьк. политехн. ин-та, 1985. – N 225. Прогрессивная технология обраб. металлов, вып.6. – С. 68-70. 4. Теория обработки металлов давлением / Под ред. И.Я. Тарновского – М.: Металлургия, 1963. – 672 с. 5. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков: Выща школа, 1981. – 248 с. 6. Евстратов В.А., Кротенко Г.А. Математическое моделирование формоизменения и силового режима выдавливания в условиях вихревого течения. Часть 1. Анализ образования фестонов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2002. – С. 245-249.

**УДК 621.7.044**

**В.В. ТРЕТЬЯК**, канд. техн. наук, доцент

**А.Ю. КОМАРОВ**, аспирант

**С.А. СТАДНИК**, аспирант

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”,  
Украина

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Рассматриваются особенности использования импульсных технологий для получения деталей сложных конфигураций с помощью импульсных технологий. Приведены преимущества и недостатки существующих способов обработки материалов. Рассмотрен алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния заготовки. Приведен пример действующей программы для расчета детали типа «кожух».

**Ключевые слова:** импульсная обработка материалов, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние заготовки

Розглядаються особливості використання імпульсних технологій для отримання деталей складних конфігурацій за допомогою імпульсних технологій. Приведені переваги і недоліки існуючих способів обробки матеріалів. Розглянутий алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану заготівки. Наведений приклад розрахунку діючої програми для розрахунку деталі типу «кожух».

**Ключові слова:** імпульсна обробка матеріалів, математичне моделювання, напружено-дефор-

The features of the use of impulsive technologies for the receipt of details of the complicated configurations by impulsive technologies are considered.. Advantages and lacks of existent methods of treatment of materials are resulted. The algorithm of computation of the tense-deformed state of purveyance is considered. The example of computation of the operating program for computation of detail of type of -koguh is resulted.

**Keywords:** impulsive treatment of materials, mathematical design the tense-deformed state of purveyance

Современный этап развития промышленности характеризуется расширением номенклатуры выпускаемых изделий и усложнением их конструкции, применением новых материалов со специальными свойствами, быстрой сменяемостью объекта производства, возрастанием требований к качеству продукции и улучшению условий труда. В связи с этим в машиностроении постоянно поддерживается тенденция совершенствования существующих и создание новых методов обработки материалов[1,2].

В настоящее время применяются способы, основанные на использовании одного из пары жёстких инструментов. Роль второго инструмента в этом случае выполняют эластичная, газовая, жидкостная среды или магнитное поле.

Особые возможности этих методов раскрываются при применении импульсных источников энергии: взрывчатых веществ, сжатого воздуха, горючих газовых смесей, импульсного магнитного поля, высоковольтного электрического разряда в жидкости и др. (рис. 1).

В листовой штамповке импульсные методы применяют для выполнения операций вытяжки, пробивки, вырубки, местной формовки, обжима, отбортовки, зиговки, калибровки, сборки и др. Кроме того, они широко используются для упрочнения и сварки металлов, очистки их от окалины, резки, клёпки, прессования порошковых материалов, очистки литья и др.

Существует ряд явных преимуществ дистанционных операций взрывной обработки (рис.1,б), которые позволили им занять сегодня надлежащее место в промышленности и которые открывают перед инженером-конструктором новые степени свободы:

- стоимость матрицы снижается, поскольку используется только объемлющая (подпорная) матрица, а не комплект матрицы со штампом.
- можно избежать больших капиталовложений на прессовое оборудование.
- некоторые детали, которые трудно изготовить механическими способами, можно выпускать путем взрывной обработки. К таким изделиям относятся несимметричные детали, крупногабаритные детали, а также детали обычных конфигураций, изготовленные малыми сериями.
- взрывная обработка позволяет иногда изготавливать сложную деталь или конструкцию как единое целое, а не из отдельных частей, соединяемых с помощью сварки. Примером такой детали является алюминиевая насадка сопла.
- взрывная обработка часто обеспечивает хорошее качество поверхности изделия, поскольку здесь штамп не нужен.
- доводки изделия вручную или посредством других вторичных операций часто можно избежать.
- в больших деталях можно выдержать жесткие допуски.
- промежуточные отжиги, необходимые при механической штамповке,

взрывная обработка делает ненужными благодаря более полному использованию возможностей вытяжки металла.

- взрывные давления можно распределить равномерно по всей площади заготовки, что исключает концентрацию напряжений, с которой приходится сталкиваться при механических способах обработки.

Разработаны и другие методы, в которых используются различные мощные источники энергии, приводящие в движение металл с высокими скоростями.

К наиболее известным относятся электрогидравлический (рис.1,а) и электромагнитный методы, а также те методы, в которых используется пневмомеханическое оборудование.

К наиболее важным существующим приложениям электрогидравлического метода относятся штамповка деталей из листового металла и выгибание трубчатых изделий. Этим способом успешно штампуют изделия из разнообразных металлов с различными размерами, формами и толщинами.

Штампующие детали изготавливаются в диаметре от нескольких сантиметров до 1—2 м, а их толщина составляет от сотых долей миллиметра до 2—3 см. Для матриц используются такие же материалы, как и при взрывной штамповке. Возможность быстрого повторения циклов делает электрогидравлическую штамповку удобной для многосерийной штамповки одинаковых деталей, хотя время для подготовки детали к операции сравнимо с тем, которое затрачивается при взрывной обработке. Процесс пригоден для штамповки маленьких и больших деталей и поддается автоматизации.

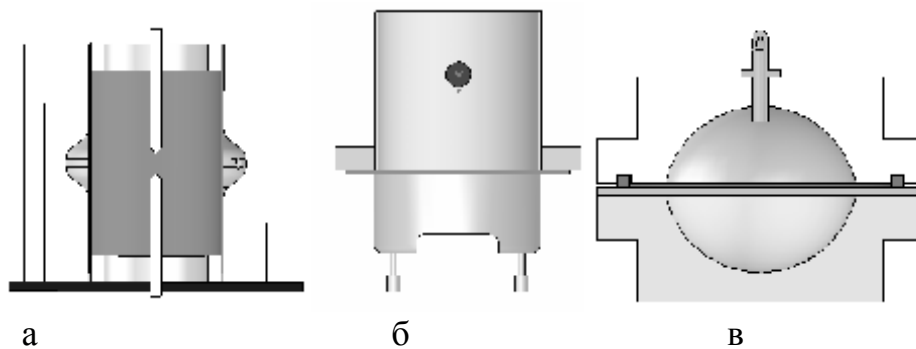


Рисунок 1 – Различные схемы импульсных методов деформирования:  
а – электрогидравлическая штамповка, б – штамповка взрывом, в – штамповка с помощью взрыва газа

При электромагнитной штамповке заготовку помещают в электромагнитную катушку, через которую затем пропускают ток. Если магнитное поле изменяется достаточно быстро, то величина возникающей выталкивающей силы становится достаточной, чтобы уменьшить диаметр металлической трубы или чтобы вогнать плоскую заготовку в полость матрицы. Чем больше скорость нарастания силы тока в катушке, тем быстрее изменяется напряженность магнитного поля, индуцируемого в катушке, и тем сильнее ток, индуцируемый в заготовке.

Энергию для электромагнитной штамповки обычно черпают из разряжающегося конденсатора. Электрическая цепь имеет по существу такой же вид, как и при электрогидравлической штамповке, но искровой промежуток заменяется катушкой.

Одним из первых промышленных приложений электромагнитного метода была высадка небольших деталей. К другим приложениям относится штамповка трубчатых

тых деталей диаметром до 150 мм и небольших изделий из полосового металла толщиной до 3,2 мм. Возможности этого процесса зависят от количества энергии, накопленной в конденсаторе, и от величины полезно использованной части этой энергии. К преимуществам этого метода относится его простота, а недостатки обусловлены ограниченностью осуществимых типов операций.

Пневмомеханическое оборудование используют для производства деталей с помощью процессовковки, ударной штамповки, прессования через матрицу и прессования порошков. В этих машинах контролируемое высвобождение накопленной энергии сжатых газов приводит к образованию мощных ударных нагрузок. Это обычно осуществляется по принципу «разбалансирования» ударных нагрузок. Удар, развиваемый высоким давлением, которое действует на небольшую площадь, перевешивает удар, производимый низким давлением, действующим на большую площадь. Когда это происходит, высокое давление получает возможность воздействия на большую площадь, в результате чего возникает управляемый несбалансированный удар чрезвычайно большой мощности, который передается через плунжер заготовке.

Ударная нагрузка на рабочий поршень за 1 мсек возрастает от нуля до нескольких тонн. Такое быстрое приложение большой нагрузки приводит к тому, что рабочий поршень разгоняется на отрезке пути порядка 10 см до скорости несколько сотен метров в секунду. На площади несколько десятков квадратных сантиметров может развиваться давление несколько тысяч атмосфер, что создает усилие свыше 200 т. Многие операции продолжаются всего несколько миллисекунд, считая от момента контакта с заготовкой до окончательного образования изделия.

Многие материалы при обработке с высокой скоростью и при нагревании до состояния пластичности ведут себя по существу как жидкости. Комбинация нагрева и высокого давления позволяет с помощью пневмомеханического оборудования использовать это гидродинамическое поведение для производства прессованных, кованных и литых деталей с очень тонкими перемычками и фланцами.

Следует, однако, заметить, что импульсные методы штамповки призваны не заменить традиционные процессы обработки металлов давлением, а расширить их технологические возможности за счёт ряда преимуществ. К ним можно отнести упрощение и снижение стоимости оснастки, а в ряде случаев и оборудования, повышение точности получаемых деталей, расширение возможности штамповки труднодеформируемых материалов в холодном состоянии, выполнение операций, не осуществляемыми другими методами, и т.д.

Важно определить эффективную область применения импульсных методов штамповки. Накопленный практический опыт показывает такую целесообразность в первую очередь для получения деталей сложной формы в условиях опытного и мелкосерийного производств, когда применение новой технологии позволяет упростить оснастку, сократить технологический цикл и улучшить культуру производства.

Второй путь – разработка технологических процессов импульсной штамповки с высокой степенью автоматизации, а также оригинальных процессов, совмещающих несколько операций листовой штамповки. Такие процессы весьма успешно конкурируют с традиционными в условиях крупносерийного и массового производств.

Экономические расчёты показывают целесообразность сочетания статических и импульсных методов штамповки.

При разработке новых технологических процессов прежде всего анализируют

возможность штамповки деталей сложной формы, обусловленную устойчивостью пластического течения и формообразования поверхностей детали, участки которой деформируются при разных напряженных состояниях.

При сжатии-растяжении участков, заготовки контактирующих с рабочей поверхностью штампа, потерю формы устраняют их прижимом (например, фланца при вытяжке) соответствующим усилием, а потерю пластического течения – за счет снижения усилий, растягивающих участок.

При одно- и двухосном растяжении свободных от контакта участков заготовки критическое состояние пластического течения, интенсивность деформации  $\epsilon_{i\text{кр}}$  и ее составляющих  $(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)_{\text{кр}}$  обусловлена путем нагружения  $m_\sigma = \sigma_2 \sigma_1^{-1}$ . Его установить сложно даже при аналитическом решении задачи деформирования, т.к. в нем отражено конечное деформированное состояние. По конечному деформированному состоянию, в том числе определенному экспериментально, оценка возможности штамповки нередко приводит к ошибкам: материал разрушался при деформациях ниже критических, установленных по конечному деформированному состоянию.

Численные методы решения задачи деформирования заготовки позволяют пошагово установить путь нагружения и исчерпанный на нем запас пластичности. Однако при импульсном нагружении они разработаны недостаточно. Так, во многих работах основное внимание уделено оптимизации численными методами поля нагрузки на заготовку по прогнозируемому конечному полю деформаций, влияние кавитации на нагрузку не учитывается. Исследование динамики гидроупругопластической системы, включающей пластически деформируемую заготовку и гидроупругую среду: жидкость с полостями (пузырьками) кавитации связано с большими сложностями как вычислительного процесса, так и алгоритмизации решения. Например, модель упругой среды необходимо уточнять с привлечением результатов экспериментов по определению ее свойств, как и границы самой зоны кавитации.

Отсутствие надежных моделей расчета процесса импульсного деформирования тормозит разработку новых технологических процессов для оригинальных деталей с новыми свойствами, востребованными в авиационной промышленности, судостроении, энергетическом и химическом машиностроении

Поэтому предложен численный метод решения задачи деформирования заготовки взрывом при упрощающих допущениях, базирующихся на установленных закономерностях процесса деформирования и передачи энергии от ударной волны к подвижной преграде (заготовке). Для реализации численных методов разрабатывались: математическая модель деформирования заготовок, алгоритмы численных методов решения, модель внешней нагрузки, учитывающая взаимодействие заготовки с возмущениями в жидкости от взрыва и возникновение кавитации, а также ее влияние на передачу энергии заготовке[3].

Модель деформирования заготовки представлена системой уравнений: движения, связи напряжений и деформаций, пластичности (условием Губера-Мизеса).

Дифференциальные уравнения движения аппроксимированы конечно-разностными уравнениями для выделенных элементов заготовки (рис.2.) У деталей, штампуемых импульсными нагрузками, генеральная форма, на которой предусматривают для ужесточения их конструкции различные фрагменты (рельеф, рифты, пуклевки и т.д.) представлена оболочкой. Поэтому изгибающие моменты и перерезывающие силы можно не учитывать.

При деформировании участки заготовки (плоской, конической) контактируют со штампом (зона II) либо свободны (зона I). На элементы свободной зоны заготовки действует (рис.3) импульсное давление  $P$ , инерционные силы  $m\ddot{z}$ ,  $m\ddot{R}$ , меридиональные и широтные усилия, обусловленные взаимодействием с соседними участками.

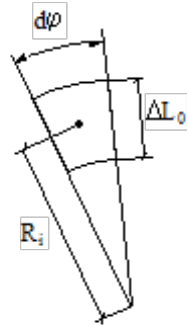
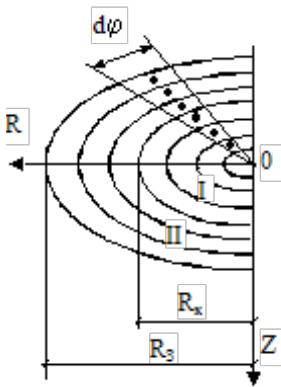


Рисунок 2 - Элементы заготовок

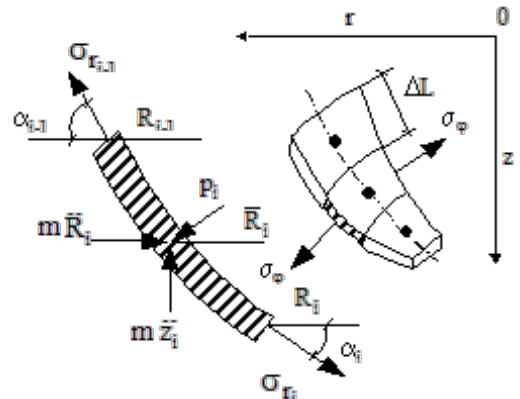
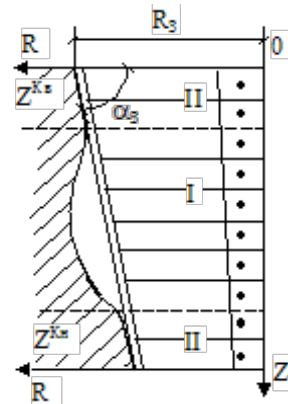


Рисунок 3 - Схема нагружения элемента оболочки

Уравнения движения для таких элементов имеют вид

$$\begin{aligned} (\sigma_r R S \cos \alpha)_i - (\sigma_r R S \cos \alpha)_{i-1} + (P \Delta L R_n \cos \alpha_n)_i &= (m \cdot \ddot{Z}_n)_i \\ (\sigma_r R S \sin \alpha)_{i-1} - (\sigma_r R S \sin \alpha)_i - (\sigma_\varphi S R \Delta L)_i + (P \Delta L R_n \sin \alpha_n)_i &= (m \cdot \ddot{R}_n)_i \end{aligned}$$

где  $m_i = \rho \Delta L_0 R_{0i} S_0$  - масса  $i$ -того элемента.

Для элементов в зоне контакта в уравнениях учитывают силы трения, а для элементов на перетяжном ребре – усилия, необходимые для их изгиба – спрямления и на преодоление сил трения на ребре.

Величину усилий на ребре в листовой штамповке определяют по зависимостям:

$$\begin{aligned} \sigma_{изг} &= (\sigma_i)_R S_0 \cdot (2r_m + S)^{-1} \\ \sigma_{тр.к} &\approx (\sigma_i)_R \cdot \mu \alpha. \end{aligned}$$

При вытяжке кромка фланца плоской заготовки утолщается, поэтому силы трения приложены только к крайнему элементу со стороны свободной поверхности

$$N_{mp} = q \mu (R_3^2 - R_0^2),$$

где  $q$  - давление прижима;  $\mu$  - коэффициент трения;  $R_3$ ,  $R_0$  – радиусы заготовки и очка матрицы.

Движение элементов плоского фланца описывают одним уравнением, а элемента в зоне ребра двумя. Причем для него в уравнениях учитывают усилия от изгиба – спрямления и трения, приложенные только со стороны фланца, а угол наклона элемента принимают равным  $\alpha_i = 0,5 \alpha_{i-1}$ .

Уравнения движения для элементов конической заготовки на поверхности контакта представлены в таком виде:

$$\begin{aligned} [(\sigma_r R S)_{i+1} - (\sigma_r R S)_i] \cos \alpha_3 + \sigma_{\varphi_i} \Delta h_i S_i - F_{mp} \cdot \cos \alpha_3 &= m_i \ddot{R}_i, \\ [(\sigma_r R S)_{i+1} - (\sigma_r R S)_i] \sin \alpha_3 - F_{mp} \cdot \sin \alpha_3 &= m_i \ddot{Z}_i. \end{aligned}$$

Благодаря возможному осевому перемещению торцев заготовки к середине образующей элементы большего (верхнего) основания будут обжиматься ( $\sigma_\varphi < 0$ ), а на нижнем – раздаваться ( $\sigma_\varphi > 0$ ).

Сила трения обусловлена величиной реакции  $Q$  со стороны матрицы

$$F_{\text{тр}i} = \mu \cdot Q = \mu(P \cdot R + \sigma_{\phi} \cdot S)_i \Delta L_i.$$

На нижней поверхности контакта окружные напряжения  $\sigma_{\phi}$  вызваны только частью давления  $P$ , (т.е.  $\eta P$ ), т.к. при соударении с матрицей давление нейтрализуется реакцией со стороны матрицы. Поэтому в левую часть уравнения добавится слабое  $\eta P \Delta L \cdot R_i \sin \alpha_3$ , а в уравнение  $\eta P \Delta L \cdot R_i \cos \alpha_3$ .

В новых двух уравнениях три неизвестных:  $\eta$ ,  $\ddot{Z}$  и  $\ddot{R}$ , но решение возможно, т.к.  $\ddot{Z}$  и  $\ddot{R}$  связаны соотношением  $Z_i^k = (R_3 - R_i) \operatorname{tg} \alpha_3$ .

При решении системы алгебраических уравнений движения элементов заготовки для  $j$ -того интервала времени обычно используют уравнения связи приращений деформаций, представленными суммой упругих и пластических, с приращениями напряжений.

Однако значения расчетных напряжений  $i$ -того элемента в промежутке времени, когда приращения деформаций малы, нередко существенно колеблются, что не позволяет надежно установить путь нагружения  $m_{\sigma}$ , по которому анализируют предельное формообразование.

Поэтому целесообразно использовать коэффициент пропорциональности между  $\sigma$  и  $e$ , равный секущему модулю  $E_c = \sigma_i \cdot e_i^{-1}$  на диаграмме  $\sigma_i = \Phi(e_i)$

$$\sigma_r = 2/3(\sigma_i/e_i)(e_r - e_s); \quad \sigma_{\phi} = 2/3(\sigma_i/e_i)(e_{\phi} - e_s)$$

Т.к. на каждом шаге  $\Delta t$  реализуются малые пластические деформации и значения  $E_c$  на соседних интервалах мало изменяются, то изменение напряжений будет плавным и адекватно отражать путь нагружения.

Принятое допущение справедливо, когда нагружение возрастает в процессе деформирования пропорционально изменению площади свободной зоны заготовки (согласно Ильюшину А.А., реализуется простое нагружение), т.е. при таких операциях: раздача, обжим, формовка, вытяжка деталей с широким фланцем.

Геометрические параметры  $i$ -того элемента и его месторасположение для  $j$ -того временного интервала определяют по формулам:

$$\Delta L_i = \left[ (R_i - R_{i+1})^2 + (Z_i - Z_{i+1})^2 \right]^{0,5}, \quad \sin \alpha_i = (Z_{i+1} - Z_{i-1}) / \Delta L_i; \quad \cos \alpha_i = (R_i - R_{i+1}) / \Delta L_i.$$

$$Z_{ij-1} = Z_{ij} + \dot{Z}_{ij} \Delta t + 0,5 \ddot{Z}_{ij+1} (\Delta t)^2, \quad R_{ij-1} = R_{ij} + \dot{R}_{ij} \Delta t + 0,5 \ddot{R}_{ij+1} (\Delta t)^2.$$

Трудности определения внешней нагрузки на заготовку обусловлены сложностью явлений, протекающих при взаимодействии возмущений в жидкости от взрыва в ней заряда на подвижную преграду.

Алгоритмы решения задачи импульсного деформирования заготовки состоит из следующих этапов:

- заготовку разделяют на элементы длиной  $\Delta L = (5 \div 8)S$  и рассчитывают их массу  $m_i$ ;
- определяют внешнюю нагрузку на каждый элемент: до наступления кавитации через промежуток  $t_i = \Sigma(\Delta t_i + t_i)$  в интервале  $\Delta t_i$ ;
- по значениям  $R_i$ ,  $Z_i$ ,  $\Delta Z_i$  определяют логарифмические деформации  $e_r$ ,  $e_{\phi}$  и интенсивность  $e_i$ ;
- определяют интенсивность напряжений  $\sigma_i$  по закону упрочнения  $\sigma_i = A e_i^n$ , а также определяют компоненты напряжений.

Расчет заканчивают, когда нет приращения интенсивности деформаций  $\Delta e_i = 0$  для всех элементов заготовки.

Для вышеприведенного алгоритма [4,5] разработана действующая программа и произведен расчет напряженно-деформированного состояния детали типа бандаж. Рабочие окна программы представлены на рисунках 4-6.

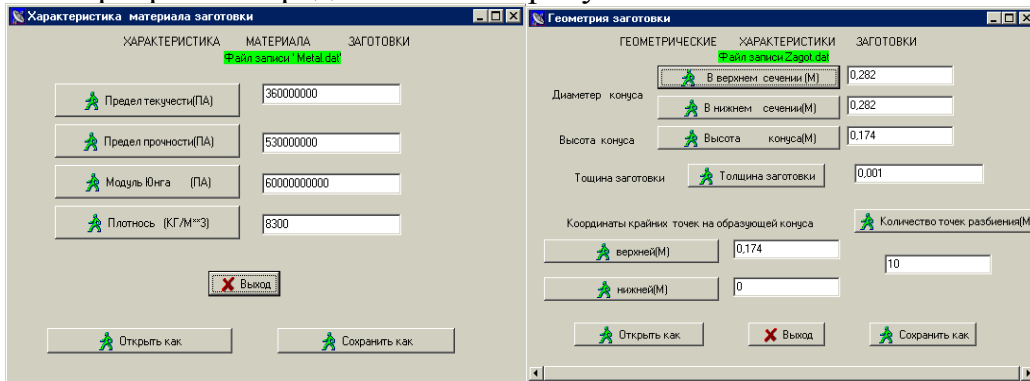


Рисунок 4 - Меню ввода параметров материала и заготовки

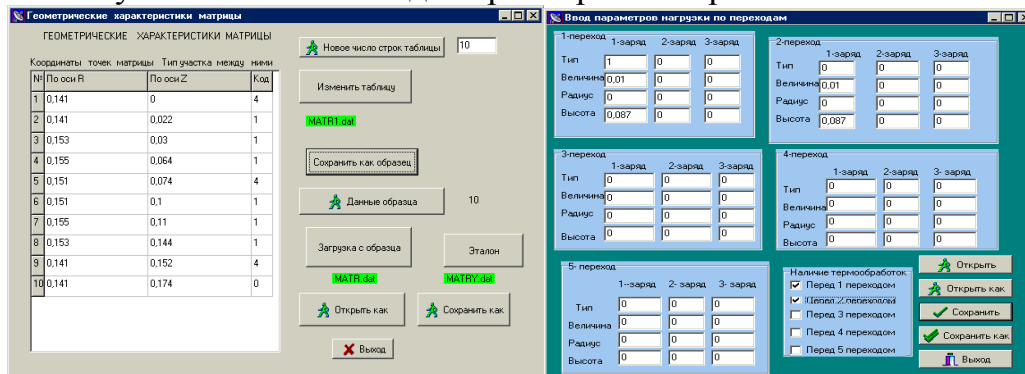


Рисунок 5 - Геометрические характеристики заготовки и нагрузки

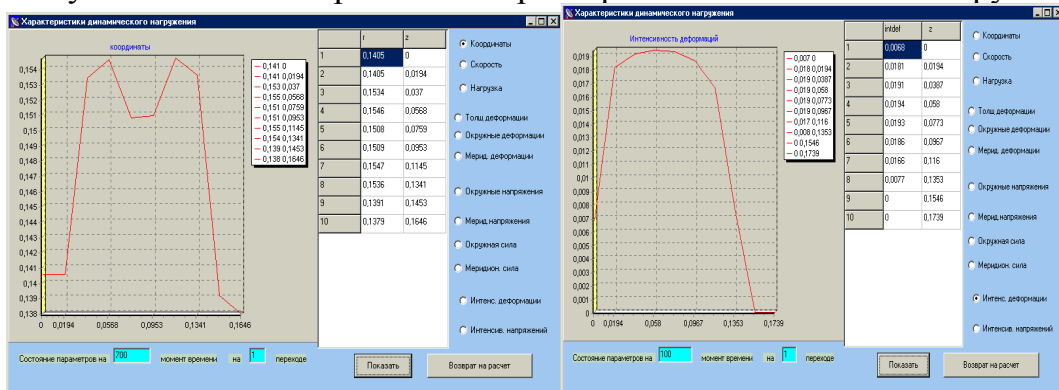


Рисунок 6 - Геометрические характеристики заготовки и параметры интенсивности деформаций

**Список литературы:** 1. Чачин В.М. Листовая штамповка с использованием импульсной нагрузки / В.М. Чачин, Ю.Е Шамарин, А.Ю. Журавский, В.С. Петра-ковский, А..Л.Скрипниченко. Мин-во высшего и среднего образования СССР под ред. В.М. Чачина..-К.:Наук. думка, 1989. -101с. 2. Орешников А.И. Высокоскоростные методы листовой штамповки / А.И. Орешников, В.А. Вагин, В.С. Мамутов: Учеб. пособие под ред. К.Н. Бого-явленского. - Л: ЛПИ, 1984.- 80 с., 3. Третьяк В.В. Расчет импульсного нагружения объектов технологической системы / В.Я. Зорик, В.В. Третьяк, А.Ю. Комаров // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №7 4(43). – С.86-11. 4. Третьяк В.В. Объектный подход к проектированию ресурсосберегающих импульсных технологий. / В.В. Третьяк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – №3 (29). – С.26-31. 5. Третьяк В.В. Вопросы синтеза и оптимизации технологических процессов импульсной обработки / В.В. Третьяк, А.Ю.Комаров, С.А. Стадник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №4 (61). – С.9-13.