

**Учебно-методические рекомендации по изучению дисциплины
«Основы моделирования процессов обработки давлением»
для бакалавров**

Предназначены для самостоятельного изучения дисциплины бакалаврами дневной формы обучения. Изучение основывается на самостоятельной работе бакалавров в течение соответствующего семестра по рекомендациям документации, входящей в состав учебно-методического комплекса дисциплины (УМКД). Исключение составляет практическая форма занятий, которая в обязательном порядке должна проводиться в условиях лабораторий и специализированных аудиторий профилирующей кафедры.

Рекомендации определяют порядок работы студента по трём видам процесса образования для дневной формы обучения, предусмотренным рабочей программой изучаемой дисциплины:

1. основного – по изучению лекционного материала,
2. практического – в рамках практических аудиторных занятий,
3. дополнительного – посредством самостоятельной работы (СР) с библиографическим материалом и выполнению текущих заданий практической части учебной программы самостоятельно.

ЛЕКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ дисциплины изучается в соответствии с рабочей программой дисциплины, входящей в УМКД. Тематический состав лекционного материала, подлежащего самостоятельному изучению, определяется формой 3.1 рабочей программы УМКД. Следует обратить внимание на то, что план, в том числе, лекционного материала в форме 3.1 приводится в сочетании со ссылками на литературные источники формы 6, в которых данные разделы курса излагаются в наиболее полном виде. Самоконтроль знания лекционного материала дисциплины осуществляется бакалавром по опорным вопросам дисциплины, содержащимся в конце рабочей программы, по перечню вопросов экзаменационных билетов, а так же тестовых вопросов.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ при самостоятельной подготовке выполняются строго в профильных аудиториях кафедры. Тематический план практических занятий приводится в форме 3.3 (посредством обозначений формы 3.1), соответствующей рабочей программы, со ссылками на методические руководства в списке литературы (форма б).

Бакалаврам следует обратить внимание на то, что протоколы лабораторных работ по мере их выполнения или в конце семестра (по согласованию с преподавателем) должны быть проверены, защищены и заверены преподавателем. Бакалавр допускается к сдаче экзамена или зачёта (форма контроля определяется рабочей программой дисциплины) только при условии выполнения всех практических занятий.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА (СР) бакалавра определяется изучением тем дисциплины, входящих в содержание дополнительной литературы рабочей программы дисциплины (форма б).

Практические работы при самостоятельном изучении требуют обязательного их выполнения (экспериментальной части) в лабораторных условиях, для чего время отработки работы заранее оговаривается с лектором дисциплины и согласовывается с аудиторным расписанием лабораторий профилирующей кафедры. При этом, в рамках самостоятельного изучения, бакалавр должен заранее изучить теоретическую часть работы самостоятельно, подготовив протокол работы. Выполнение такой работы в лабораторных условиях сводится к проведению экспериментальной части и к анализу полученных экспериментальных данных.

Тематический план работ приводится в форме 3.1-3.3, соответствующей рабочей программы, со ссылками на методические руководства в списке литературы (форма б).

Протоколы работы оформляются на листах формата А4 или А5 в рукописном или печатном виде (рабочее поле должно иметь размеры 170×250 или 110×170 мм, левое поле-25 мм). По согласованию с лектором курса,

допускается оформлять протоколы в ученических тетрадях стандартного образца. Протокол каждой работы должен состоять из темы; цели работы; кратких теоретических сведений; порядка выполнения; результатов анализа и выводов. Все необходимые иллюстрации к работе должны быть пронумерованы и иметь название, а в соответствующих местах текста протокола необходимо ссылаться на соответствующий рисунок или таблицу. Перед защитой работ все протоколы сшиваются (если они были подготовлены раздельно друг от друга), в порядке их следования в течение семестра с обязательным оформлением титульного листа. Титульный лист должен содержать: название министерства, название вуза, название кафедры, наименование дисциплины, фамилии бакалавра и преподавателя, под руководством которого выполнены работы, а также название города и учебного года.

Расписание контроля преподавателем самостоятельного изучения дисциплины студентом содержится в деканате соответствующего факультета и на информационном стенде профилирующей кафедры.

ПЛАН
конспекта лекций по дисциплине
«Основы моделирования процессов обработки давлением»
(для бакалавров)

Часть 1. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1. Особенности физического моделирования процессов ОМД.
2. Задачи физического моделирования процессовковки и штамповки.
3. Основные условия физического моделирования ТП КШП
4. Константы, критерии и законы подобия
5. Применение законов подобия в ОМД
6. Решение практических задач технологии КШП по данным физического моделирования
7. Выбор рационального варианта технологического процесса
8. Исследование течения металла в процессахковки и штамповки
9. Моделирование процессовковки и штамповки целью назначения рациональных режимов деформирования

Часть 2. АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

10. Сущность аналогового моделирования
11. Электрическое моделирование задач калибровки волочильного инструмента
12. Поляризационно-оптическое моделирование в решении задач технологии КШП
13. Физическая сущность поляризационно-оптического метода
14. Поляризационно-оптическое моделирование в листовой штамповке
15. Применение поляризационно-оптического моделирования для решения технологической задачи совершенствования инструмента при свободной ковке
16. Применение поляризационно-оптического моделирования для решения задач проектирования штампового инструмента
17. Применение поляризационно-оптического моделирования для решения задач объёмной штамповки

Часть 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

18. Математическая модель. Особенности математического моделирования в ОМД, разновидности математических моделей
19. Статистические модели в технологии кузнечно-штамповочного производства
20. Общая характеристика статистических моделей
21. Разработка статистической модели по данным планируемого эксперимента

22. Разработка статистических моделей методом парного линейного регрессионного анализа
23. Построение математических моделей технологических процессов кузнечно-штамповочного производства на основе анализа формоизменения металла в моделируемых процессах
24. Сущность и применяемые расчетные методы.
25. Построение математических моделей технологических процессов кузнечно-штамповочного производства численными методами
26. Построение математических моделей расчетным планируемым экспериментом. Параметрическая идентификация моделей
27. Прямое и обратное моделирование процессов штамповки
28. Применение метода математического моделирования для управления процессом листовой штамповки.

Наполнение лекционного материала плана конспекта лекций подробно рассматривается в содержании учебного издания

Резников, Ю.Н. Моделирование технологических процессов кузнечно-штамповочного производства: учеб. пособие / **Ю.Н. Резников.** – Р. н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 1994.– 94с.

В качестве дополнительной литературы, содержащей обзор и анализ современных проблем моделирования процессов ОМД, рекомендуется ознакомиться с содержанием монографии

Вовченко, А.В. Совершенствование технологии процессов объёмной штамповки на основе применения гранично-элементных расчётов: монография / **А.В. Вовченко.** – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – 264с.

Методические рекомендации (практические занятия)

Практические занятия – одна из важных форм учебного процесса в курсе «Основы моделирования процессов обработки давлением». На занятия выносятся наиболее важные и сложные вопросы практического применения знаний из области теоретического (лекционного) курса, без которых разобраться в материале дисциплины невозможно. Занятия ориентируют бакалавров на творческий подход к изучению изложенного лекционного материала. Особое значение при подготовке к практическим занятиям придается самостоятельной работе с источниками и учебной литературой. Практические занятия направляют бакалавров на комплексное рассмотрение всех вопросов курса моделирования процессов обработки давлением. Они дают возможность студентам эффективно усваивать учебные материалы, овладеть

первоисточниками и научной литературой, помогают развивать проектное мышление в вопросах разработки разнообразных схемно-проектных решений в области моделируемых процессов ОМД, приобретать навыки мотивированного обоснования выбранной точки зрения в технологических вопросах. Главным условием усвоения курса является тщательная подготовка студента к каждому занятию.

Подготовку к занятию следует вести в следующем порядке:

- внимательно ознакомиться с планом занятия, списком рекомендованной литературы, методическими рекомендациями;
- прочитать конспект лекции по теме планового занятия, акцентируя внимание на содержании основного материала, необходимого для освоения поставленных целей;
- важнейшим этапом работы при подготовке к практическому занятию является изучение рекомендованной к каждой теме литературы. Источники и литература автоматизации кузнечно-штамповочного производства являются основой достоверных знаний. Помощь обучающимся при подготовке к занятиям окажет рекомендуемая литература, указанная в разделе 6 Рабочей программы.

При работе над рекомендованными источниками и литературой необходимо помнить, что недостаточно ограничиваться беглым ознакомлением или просмотром текста.

На основе изучения источников литературы необходимо подготовить протокол, оформив соответствующие записи в нём.

Наиболее трудоемкой частью, но совершенно необходимой, для подготовки к практическому занятию является конспектирование в протоколах методической литературы. Конспективная форма записи требует не только фиксации наиболее важных положений источника, но и фиксации и методологических положений и доказательств. Нередко в протоколах фиксируются и собственные замечания и вопросы, которые в дальнейшем обсуждаются на лекционном или лабораторном занятиях.

Протокол составляется в последовательности, предусмотренной планом каждой темы занятия, содержащимся в соответствующем методическом указании.

К каждому проактивному занятию рекомендуются варианты заданий, которые следует выполнять по методике материалов сопровождения каждого из них.

На практических занятиях бакалавр должен:

- принимать активное участие в обсуждении вопросов занятия;
- внимательно следить за обсуждением рассматриваемых особенностей тем;
- уметь вести полемику с оппонентами и мотивированно доказывать свою точку зрения.

Приобретенные знания и навыки повышают познавательную деятельность, дают возможность бакалаврам формировать свои умения и

навыки, анализировать факты, использовать научные источники, делать обоснованные выводы, приобретать навыки и знания для такой формы обучения и контроля, как тестирование.

Темы практических занятий:

Изучение конструкции оснастки для физического моделирования процессов ОМД в условиях плоского и осесимметричного деформированных состояний.

Цель работы. изучить предлагаемые варианты конструкции оснастки для физического моделирования процессов ОМД в условиях плоского и осесимметричного деформированных состояний.

Исследование деформированного состояния при физическом моделировании процесса объёмной штамповки

Цель работы: изучение методики исследования распределения деформации и размеров зерен по сечению поковки в условиях плоского деформированного состояния.

Численное моделирование процессов пластической деформации методом граничных элементов

Цель работы: изучить методику расчёта процесса пластической деформации с применением метода граничных элементов и рассчитать перемещения граничных и внутренних точек, рассматриваемого деформируемого тела.

Построение с использованием электронных таблиц Microsoft Excel статистической модели стойкости вырубного штампа

Цель работы: изучить применение электронных таблиц Microsoft Excel для построения математических моделей и построить уравнение кривой для стойкости вырубного штампа.

Аппроксимация кривых упрочнения сталей и сплавов с использованием электронных таблиц Microsoft Excel

Цель работы. Изучить возможности получения аналитических зависимостей кривых упрочнения различных металлов и сплавов с использованием среды программируемых электронных таблиц Microsoft Excel.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

Факультет «Машиностроительные технологии и оборудование» (МТиО)

Кафедра «Технологии формообразования и
художественная обработка материалов»

Методические указания к курсу
практических занятий по дисциплине

«Основы моделирования процессов
обработки давлением»

Ростов-на-Дону, 2018

УДК 621.73(075.8)

Составители: д-р техн. наук, доцент
д-р техн. наук, профессор

Вовченко А.В.,
Резников Ю.Н.

Методические указания к курсу практических занятий по дисциплине «Основы моделирования процессов обработки давлением». – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2018.–25с.

Методические указания предназначены для бакалавров дневной и заочной форм обучения по направлению 15.03.01 «Машиностроение», профиля «Информационные технологии обработки металлов давлением».

УДК 621.73(075.8)

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой «Технологии формообразования и художественная обработка материалов» канд. техн. наук, доцент Г.В. Чумаченко

В печать ____.12.2018

Формат 60×84/16 Объем 1.6 усл.п.л.

Тираж ____ экз. Заказ № ____.

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Вовченко А.В., Резников Ю.Н.

© Донской государственный
технический университет, 2018

РАБОТА №1

Изучение конструкции оснастки для физического моделирования процессов ОМД в условиях плоского и осесимметричного деформированных состояний [1,2]

Цель работы: изучить предлагаемые варианты конструкции оснастки для физического моделирования процессов ОМД в условиях плоского и осесимметричного деформированных состояний [3,4].

Материалы, инструмент, оборудование.

1. Оснастка для моделирования плоскодеформированного состояния (рис.1.1).
2. Универсальный подкладной штамп (рис.1.2) для моделирования осесимметричного деформированного состояния с набором кондукторов для эксцентричной установки заготовок (рис.1.3).
3. Образцы заготовок и поковок, используемых и полученных на изучаемых разновидностях оснастки.
4. Слесарный инструмент для сборки и разборки приспособлений, измерительный инструмент.

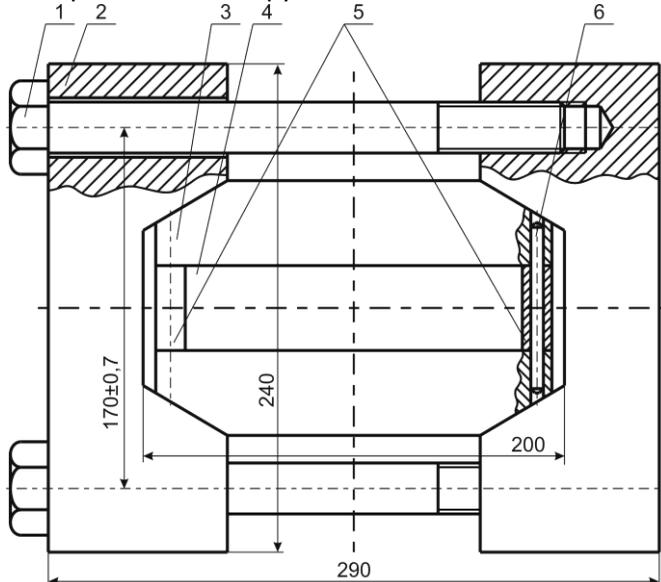


Рис.1.1 Оснастка для моделирования плоскодеформированного состояния (вид в «плане»)

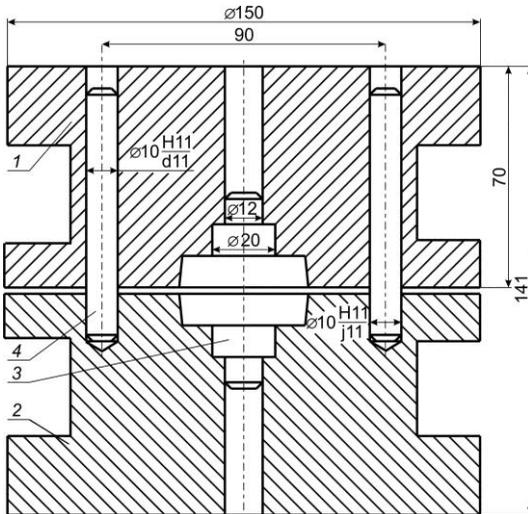


Рис.1.2 Универсальный подкладной штамп для моделирования осесимметричного деформированного состояния

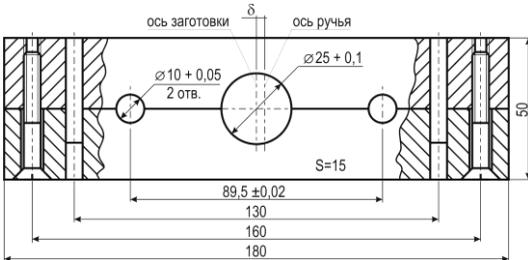


Рис.1.3 Кондуктор для эксцентричной установки заготовок в подкладной штамп (рис.1.2)

и.т.д.).

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с видами оснастки, представленными на рис. 1.1, 1.2 и 1.3. Объяснить назначение элементов, обозначенных номерами позиций.

2. Выполнить эскизы инструментальных вставок приспособления, показанного на рис.1.1 в области расположения заготовки (поз.4).

3. Объяснить назначение кондуктора (рис.1.3) и определить

Общие сведения.

Изучаемые штампы (оснастка), предназначенные для физического моделирования процессов ОМД, могут быть классифицированы:

- по виду моделируемого деформированного состояния (плоское, осесимметричное и.т.п.);

- по степени универсальности геометрической формы ручья (в зависимости от возможности изменения степени сложности поковок без изменения конструкции штамповой оснастки);
- по возможности применения различных материалов, моделирующих процессы ОМД (свинец, медь, слоистые пластические модели

порядок его применения в ходе эксперимента.

4. Рассмотреть исходные заготовки и готовые изделия, полученные в приспособлениях. Оценить назначение и особенности каждого из видов оснастки.

5. Сделать выводы по работе о типах поковок и задачах исследования по каждому из рассмотренных приспособлений.

Содержание отчёта.

Отчёт о выполнении работы должен включать:

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень материалов, инструментов и оборудования.
4. Эскизы штамповой оснастки (рис.1.1-1.3) с описанием назначения каждой детали, обозначенной номерами позиций, и областью её применения.
5. Выводы по работе.

РАБОТА №2

Исследование деформированного состояния при физическом моделировании процесса объёмной штамповки [1,2]

Цель работы: изучение методики исследования распределения деформации и размеров зерен по сечению поковки в условиях плоского деформированного состояния.

Материалы, инструмент, оборудование.

1. Образцы из свинца с координатной сеткой, полученные после формоизменения в условиях плоской деформации.
2. Мерительный инструмент.
3. Диаграммы рекристаллизации для принятого натурального моделируемого материала [5].

Общие сведения.

Физическое моделирование процесса штамповки в оснастке, приведенной в л.р. №1 завершается на этапе получения деформированного образца (рис.1.1, поз.4), состоящего из двух симметричных половинок. До проведения процесса деформирования на внутреннюю поверхность контакта была нанесена координатная сетка с постоянным размером квадратных ячеек.

Дальнейшая обработка эксперимента сводится к исследованию деформированного состояния по искаженной координатной сетке. Ниже приводится методика обработки искаженных дефор-

мацией ячеек сетки, предложенная Э. Зибелем [6].

Порядок выполнения работы.

1. Изучить методику расчёта компонент тензора деформаций по искажению ячейки координатной сетки с вписанной в неё окружностью – метод Э. Зибеля.

Исходная квадратная ячейка делительной сетки при одно-родной деформации превращается в параллелограмм. Вписанная в исходный квадрат окружность превращается в эллипс (рис.2.1). Фиксируются сопряжённые диаметры ($2a_1$ и $2b_1$), соединяющие точки касания эллипса со сторонами параллелограмма, и угол δ между ними.

Главные оси эллипса определяются так:

$$2 \cdot a = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (a_1^2 + b_1^2) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4 \cdot a_1^2 \cdot b_1^2 \cdot \sin^2 \delta}}; \quad (2.1)$$

$$2 \cdot b = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (a_1^2 + b_1^2) - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4 \cdot a_1^2 \cdot b_1^2 \cdot \sin^2 \delta}}. \quad (2.2)$$

Главные компоненты деформации находятся по

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{a}{a_0} = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 + \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4 \cdot a_1^2 \cdot b_1^2 \cdot \sin^2 \delta}}{2 \cdot a_0^2}; \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{b}{a_0} = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{a_1^2 + b_1^2 - \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)^2 - 4 \cdot a_1^2 \cdot b_1^2 \cdot \sin^2 \delta}}{2 \cdot a_0^2}, \quad (2.4)$$

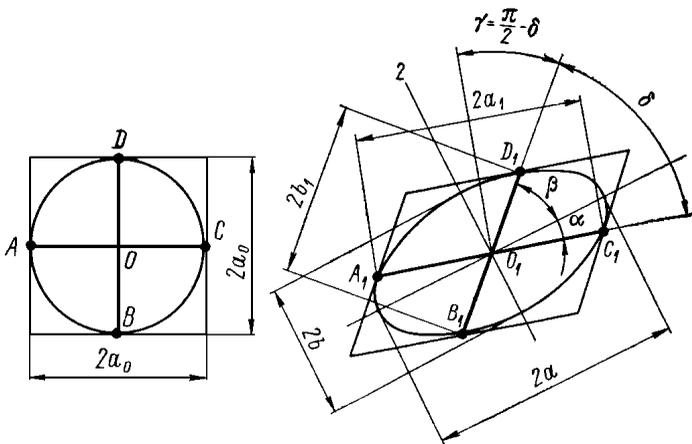


Рис.2.1 Схема преобразования окружности в эллипс по Э. Зибелю

а интенсивность деформации с учётом условия несжимаемости определяется так:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2} . \quad (2.5)$$

Для выполнения расчётов удобно пользоваться координатами точек касания A, B, C, D , а полученные характеристики формоизменения (деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_i$) считать локальными для точки O в центре ячейки (рис.2.1).

2. Измерить параметры координатной сетки и выполнить расчёты для двух ячеек: наименее и наиболее деформированных (по собственному мнению).

3. Пользуясь диаграммой рекристаллизации (например, приведенной на рис.2.2) выбранного моделируемого материала и рассчитанными в п.2 данными, определить величину зерна в со-

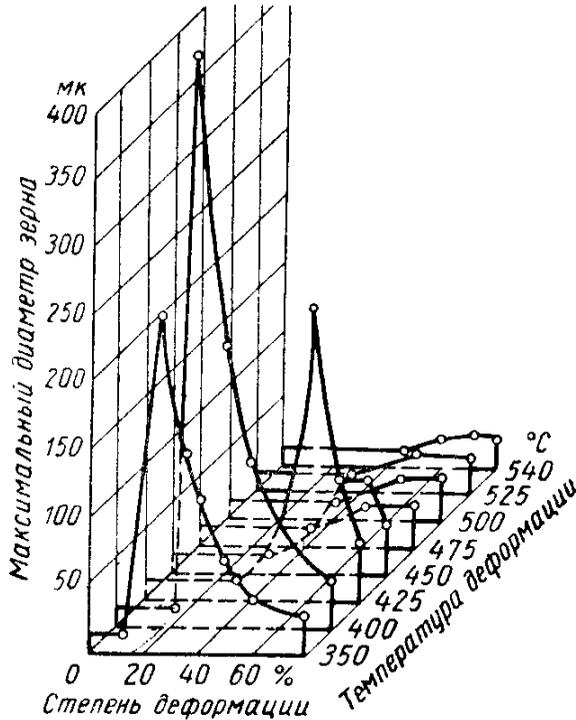


Рис.2.2 Диаграмма рекристаллизации алюминиевого сплава АК5, деформация под прессом

ответствующих ячейках натурального образца при заданной температуре.

4. Сделать выводы:

- а) о максимальной и минимальной величине зерна натурального образца, полученного при его деформировании в условиях, соответствующих условиям модели;
- б) о качестве схемы штамповки.

Содержание отчёта.

Отчёт о выполнении работы должен включать:

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень материалов, инструментов и оборудования.
4. Картину деформированного состояния всей координатной сетки с указанием выбранных для исследования ячеек.
5. Методику исследования деформированного состояния по искаженной картине координатной сетки с укрупнёнными картинками выбранных ячеек и вписанных в них окружностей или эллипсов.
6. Диаграмму рекристаллизации для принятого натурального моделируемого материала с указанием величин зёрен в соответствующих ячейках.
7. Выводы по работе.

РАБОТА №3

Численное моделирование процессов пластической деформации методом граничных элементов [1,2,7]

Цель работы: изучить методику расчёта процесса пластической деформации с применением метода граничных элементов (МГЭ) и рассчитать перемещения и напряжения в граничных и внутренних точках рассматриваемого деформируемого тела.

Материалы, инструмент, оборудование.

1. Условия задач о растяжении плоского кольца внутренним усилием, осадке полосы и квадратной заготовки.
2. Универсальная программа BEM_PL(2D)¹ [8], реализованная на основе численного метода граничных элементов [9].
3. ПК и принтер.

¹ BEM – от Boundary Element Method (метод граничных элементов)

Общие сведения.

Задача расчёта кинематических и силовых параметров процессов обработки металлов давлением является физически нелинейной и может быть записана в виде суммы линейного $L(u)$ и нелинейного $N(u)$ операторов [10]:

$$L(U) + N(U) = P, \quad (3.1)$$

где P – некоторая известная функция.

Итерационный процесс основывается на представлении уравнения (3.1) в виде

$$L(U) = P - N(U) \quad (3.2)$$

Задавая начальным значением U_0 (в частности, $U_0 = 0$)

$$L(U_1) = P - N(U_0) \quad (3.2a)$$

Решение повторяется до достижения требуемой точности величины U_i .

Для решения линейно-упругой задачи ($L(U)$), соответствующей рассматриваемой, применяется гранично-элементное уравнение (ГИУ) [9, С.219]

$$c_{ij} u_j + \int_{\Gamma} p_{ij}^* u_i d\Gamma = \int_{\Gamma} p_i u_{ij}^* d\Gamma, \quad (3.3)$$

где $p_i = \sigma_{ji} n_j$ – усилия в точках границы, определяемые компонентами тензора напряжений и направляющими косинусами к внешней нормали, u_i – перемещения на границе, а редко используемый в ОМД внеинтегральный член, определяет перемещение тела в пространстве как целого.

В настоящем решении используется известная аналогия между течением несжимаемой вязкой жидкости и упругодеформируемым несжимаемым телом (коэф. Пуассона $\nu = 0.5$). Благодаря такому подходу величины u_i равны скоростям пластического течения в искомых точках на границе области.

Для практического решения интегралы уравнения (3.3) рассматриваются без внеинтегрального члена и заменяются суммами нормальных и касательных компонент напряжений и перемещений, действующих уже на дискретных элементах границы – на граничных элементах (ГЭ) [11]:

$$\sum_{j=1}^N u_s^j \int_{\Delta\Gamma^j} \sigma_s^* d\Gamma + \sum_{j=1}^N u_n^j \int_{\Delta\Gamma^j} \sigma_n^* d\Gamma = \sum_{j=1}^N \sigma_s^j \int_{\Delta\Gamma^j} u_s^* d\Gamma + \sum_{j=1}^N \sigma_n^j \int_{\Delta\Gamma^j} u_n^* d\Gamma, \quad (3.4)$$

где N – число ГЭ, $\Delta\Gamma^j$ – их площадь.

Входящие в уравнения (3.3) и (3.4) величины со звездочками полагаются известными, в частности, определяющимися фундаментальным решением Кельвина [9, С.207]. Для решения нелинейной задачи пластической деформации ($N(U)$) используется итерационный цикл, подчиняющийся зависимости:

$$k(a^{n-1})a^n = f^{n-1}. \quad (3.5)$$

Один из способов реализации метода упругих решений – расчёт на основе алгоритма переменной вязкости, переменных параметров упругости и величин поправок к исходным данным. В этом случае соответствующие зависимости имеют вид:

$$U(I)_{n+1} = U(I)_n + \Delta U(I)_n, \quad (3.6)$$

где $\Delta U(I)_n$ – величина поправки, учитывающая изменение коэффициента жесткости или параметров упругости при формоизменении.

Рассмотренный подход соответствует методу упругих решений А.А.Ильюшина, при котором неупругая задача сводится к последовательности решений упругих. Технологические задачи о больших деформациях при высокой температуре должны рассматриваться как задачи о течении нелинейно-вязкой жидкости, поэтому разрешающие уравнения для задач обработки металлов давлением записываются аналогично тому, как это принято в гидродинамике:

$$\mu_c \cdot \dot{u}_{i,jj} + \sigma_{,j} = -F_i; \quad \dot{u}_{i,i} = 0, \quad (3.7)$$

где компоненты массовой силы в каждой ячейке внутренней области определяются как

$$F_i = -\mu_c \cdot \omega \cdot \Delta \dot{u}_i \quad (3.8)$$

$\mu_c = G = \frac{1}{3}E$ - начальное значение коэффициента жесткости; G -

модуль сдвига $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; E – модуль Юнга $E = \frac{\sigma_i}{\dot{\epsilon}_i}$; $\Delta \dot{u}_i$ -

оператор Лапласа для скорости перемещения; ω - параметр, характеризующий уменьшение коэффициента жесткости в процессе деформирования, связанное с нелинейностью зависимости $\sigma_i = f(\dot{\epsilon}_i)$ для деформируемых материалов

$$\omega = 1 - \frac{\mu}{\mu_c}. \quad (3.9)$$

В качестве характеристики вязкости уже деформируемого металла использован известный в теории обработки металлов давлением коэффициент жесткости

$$\mu = \frac{1}{3} \frac{\sigma_j}{\dot{\varepsilon}_j}, \quad (3.10)$$

где σ_j – интенсивность напряжений; $\dot{\varepsilon}_j$ – интенсивность скоростей деформаций.

Как уже упоминалось выше, расчеты выполняются по методу упругих решений А.А. Ильюшина, с использованием совмещения линеаризующих алгоритмов переменной вязкости и переменных параметров упругости в виде выражений И.А. Биргера [12,13]:

$$\Psi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}; \quad E_j = \frac{3E_{j-1}}{3E_{j-1}\Psi - 1 - 2\nu_{j-1}}; \quad \nu_j = \frac{\frac{1}{2} - \frac{1-2\nu_{j-1}}{E_{j-1}} \frac{1}{2\Psi}}{1 + \frac{1-2\nu_{j-1}}{E_{j-1}} \frac{1}{2\Psi}}. \quad (3.11)$$

$$G_j = \frac{1}{2\Psi};$$

Последовательность вычислений, в связи с этим, можно геометрически представить так, как это сделано на рис.3.1 с учетом формулы (3.11). Здесь, для каждого текущего итерационного значения деформации и скорости деформации находятся последовательно: величина упругого напряжения; неупругого напряжения с учётом величины его изменения – по реологическому уравнению деформируемого металла известной марки; вызванное этим явлением изменение коэффициента жесткости (3.10), модуля упругости (E_j) и остальных значений параметров выражений (3.11), отражающееся на величинах α . На следующей итерации и в следующем приближении процесс повторяется, но уже от новых значений параметров (3.11) и полагается, что

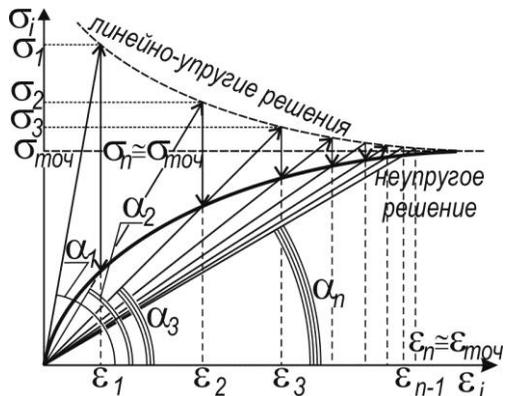


Рис. 3.1 Графическая интерпретация процесса последовательных приближений (итерационного процесса) по алгоритму переменных параметров упругости

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n-1} + \Delta\varepsilon_n. \quad (3.12)$$

Как видно из **рис.3.1**, процесс последовательных приближений (итерационный процесс) сходится к точному значению деформации ε_m , если функция непрерывна, а скорость сходимости существенно зависит от вида функции. Если материал обладает большим упрочнением, т.е. кривая мало отклоняется от прямой $\sigma=E\varepsilon$ (или, что то же самое, функция $\omega(\varepsilon)$ - мала), то уже 3-4 приближения дают достаточно точное значение деформации. И наоборот, если материал обладает малым упрочнением, то может потребоваться значительное число итераций (приближений) чтобы получить значение деформаций с требуемой точностью [14].

Следует отметить, что рассмотренная методика является универсальной и пригодна для расчёта поковок любой конфигурации.

Обобщённая блок-схема алгоритма гранично-элементного расчёта нелинейной задачи формоизменения приведена на **рис.3.2**.

Порядок выполнения работы.

1. Изучить методику гранично-элементного расчёта
2. На основе программного решения задач о растяжении плоского кольца внутренним усилием и осадке полосы получить данные о деформировании заданных тел под действием рассматриваемого нагружения.
3. Сделать выводы по работе о характере формоизменения граничного контура и внутренних ячеек.

Условия заданий.

ЗАДАНИЕ 1. Задача о растяжении плоского кольца внутренним усилием **рис.3.3**.

Размеры кольца: $r=20$ мм и $R=40$ мм; материал – алюминиевый сплав Д16 при $t=400^\circ\text{C}$; граничные условия: нормальное напряжение на внутреннем контуре

$$\sigma_n \geq \sigma_m \cdot \ln \frac{R}{r} = 9.8 \cdot \ln \frac{40}{20} = 6.8 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}, \text{ касательное напряжение}$$

σ_s на внутренней поверхности отсутствует; на наружном контуре $\sigma_n = \sigma_s = 0$.

Ниже приводится пример заполнения файла исходных данных для задачи о растяжении плоского свинцового кольца с указанием принятых в нём форматов представления чисел (справа по тексту). Более подробно порядок заполнения аналогичных файлов рассмотрен в методических указаниях [7,15].

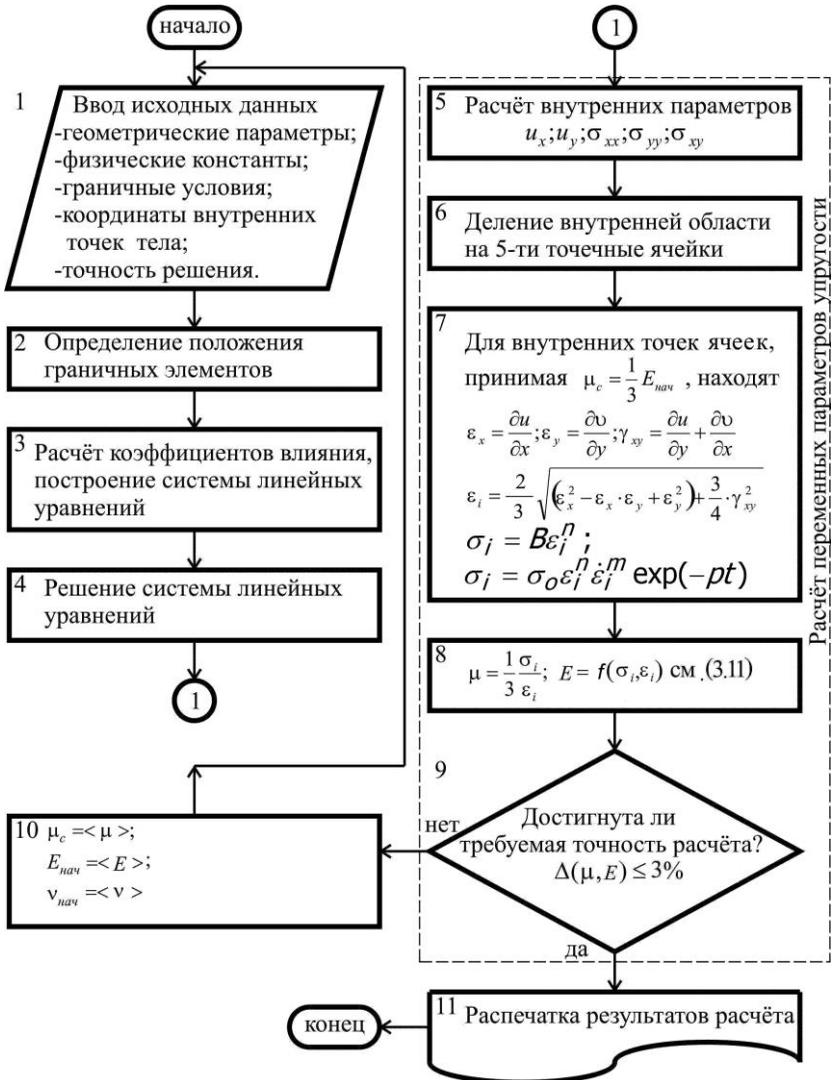


Рис.3.2 Блок-схема алгоритма расчёта задачи формоизменения

31	37.5000	0.0000	0	1
32	36.2222	9.7057	0	0
33	32.4759	18.7500	0	0
34	26.5165	26.5165	0	0
35	18.7500	32.4759	0	0
36	9.7057	36.2222	0	0
37	0.0000	37.5000	0	2
38	38.7500	0.0000	0	1
39	37.4296	10.0292	0	0
40	33.5585	19.3750	0	0
41	27.4004	27.4004	0	0
42	19.3750	33.5585	0	0
43	10.0292	37.4296	0	0
44	0.0000	38.7500	0	2
45	0.0000	17.5000	0	2
46	2.0000	17.5000	0	0
47	4.0000	17.5000	0	0
48	2.0000	19.5000	0	0
49	2.0000	15.5000	0	0
50	15.5000	2.0000	0	0
51	17.5000	2.0000	0	0
52	19.5000	2.0000	0	0
53	17.5000	4.0000	0	0
54	17.5000	0.0000	0	1

1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	5
5	5	6
6	6	7
7	7	8
8	8	9
9	10	11
10	11	12
11	12	13
12	13	14
13	14	15
14	15	16

0	16	
.		
1	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000

3I5

2I5
I5 2F10.4 2I5
I5 2F10.4

Содержание отчёта.

Отчёт о выполнении работы должен включать:

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень материалов, инструментов и оборудования.
4. Краткие теоретические сведения.
5. Условия задач, решаемых МГЭ.
6. Распечатки файла исходных данных и файла результатов расчёта после достижения сходимости с точным решением.
7. Картины деформированного состояния граничного контура и внутренних ячеек сечения изделия.
8. Выводы по работе.

РАБОТА №4

**Построение с использованием электронных таблиц
Microsoft Excel статистической модели стойкости
вырубного штампа [1,2]**

Цель работы: изучить применение электронных таблиц Microsoft Excel для построения математических моделей и построить уравнение кривой для стойкости вырубного штампа [18-20].

Исходные данные: результаты заводских исследований количества штампов на 1000 ударов при вырубке деталей толщиной 0.5-10 мм (табл. 4.1).

Порядок выполнения работы

1. По данным табл. 4.1 рассчитать стойкость штампов - количество ударов до перезаточки:

$$N = \frac{1000}{a} \quad (4.1)$$

Таблица 4.1

№ п/п	Толщина материала S , мм	Кол-во штампов на 1000 ударов a , шт.	№ п/п	Толщина материала S , мм	Кол-во штампов на 1000 ударов a , шт.
1	0,5	0,0039	7	5,0	0,0279
2	1,0	0,0070	8	6,0	0,0327
3	1,4	0,0099	9	7,0	0,0373
4	2,0	0,0127	10	8,0	0,0419
5	3,0	0,0180	11	9,0	0,0463
6	4,0	0,0230	12	10,0	0,0507

2. Данные расчетов занести в **табл. 4.2** (первые 2 колонки)

Таблица 4.2

№ п/п	S	N	$\log S$	$\log N$
1				
.....				
12				

3. Построить зависимость $N(S)$.

4. По имеющимся образцам графических представлений функций (см. **рис. 4.1**) сделать предположение о виде кривой.

5. Для проверки предположения о истинном характере функциональной зависимости трансформировать ее в прямую линию, применив координаты прямолинейного преобразования.

Для степенной зависимости ($N = A \cdot S^b$) спрямляющие координаты получают логарифмированием:

$$\log N = \log A + B \log S \quad (4.2)$$

6. Средствами Microsoft Excel (функция LOG10()) вычислить $\log(S)$ и $\log(N)$ и записать их в **табл. 4.2**.

7. Пользуясь средствами Microsoft Excel и данными **табл. 4.2**, построить график зависимости $\log N = f(\log S)$. (4.3)

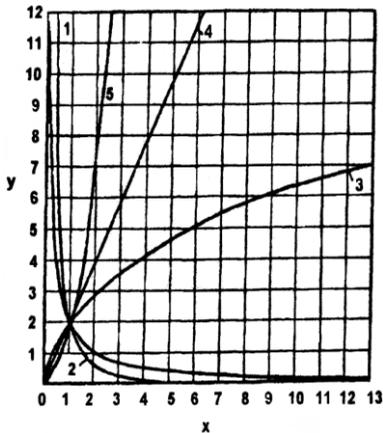


Рис.4.1 Вид уравнения $y=ax^b$:

- 1) $y=2x^{-2}$; 2) $y=2x^{-1}$;
3) $y=2x^{-0,5}$; 4) $y=2x$; 5) $y=2x^2$.

8. Пользуясь средствами Microsoft Excel, определить, является ли зависимость (4.3) линейной. Если да (коэффициент корреляции $> 0,95$), то найти величину отрезка, отсекаемого прямой на вертикальной оси (функция ОТРЕЗОК()) и угловой коэффициент прямой (функция НАКЛОН()).

9. По данным **табл. 4.2** получить уравнение регрессии $N(S)$.

10. Проверить адекватность полученного уравнения по коэффициенту регрессии ($R^2 > 0,95$).

11. Пользуясь Excel, рассмотреть пригодность других регрессионных зависимостей для математического описания данных **табл. 4.2**. Оценить точность различных регрессионных зависимостей по величине коэффициента регрессии. Сделать вывод о наиболее пригодной регрессионной зависимости.

12. Сделать общие выводы по работе.

Содержание отчёта.

Отчёт о выполнении работы должен включать:

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень материалов, инструментов и оборудования.
4. Краткие сведения о решаемой задаче.
5. Распечатки файла результатов расчёта модели стойкости вырубного штампа с регрессионными зависимостями, используемыми в работе.
6. Выводы по работе.

РАБОТА №5

Аппроксимация кривых упрочнения сталей и сплавов с использованием электронных таблиц Microsoft Excel [1,2]

Цель работы. Изучить возможности получения аналитических зависимостей кривых упрочнения [21] различных металлов и сплавов с использованием среды программируемых электронных таблиц Microsoft Excel [20].

Исходные данные. Результаты механических испытаний различных материалов (например, см. **таблицу 5.1** по данным работы [22]).

Порядок выполнения работы.

1. Запустить оболочку Microsoft Excel через панель **Пуск, Программы, Microsoft Excel**, Enter.

2. Создать новый файл (**Файл, Создать**) или выбрать новый лист электронных таблиц в уже существующем файле (**Вставка, Лист**).

ВНИМАНИЕ: при первоначальном запуске программы Microsoft Excel создание нового листа производится автоматически.

3. На листе таблиц выбрать произвольные ячейки под значения переменных величин степени деформации ε и удельного сопротивления деформированию σ (например, ячейки A3 и B3). При

этом, над указанными ячейками желательнее выполнить комментарии (например, А1 – **eps**, В2 – **sigma**, В3 – [кгс/кв.мм.] и т.п.).

Таблица 5.1.

Материал	σ_i [кгс/мм ²] при ε_i						
	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,43	0,50
Сталь 10	41,191	47,645	51,880	55,111	57,755	60,009	61,983
Сталь 20	46,960	54,130	58,822	62,395	65,316	67,803	69,980
Сталь 45	66,220	73,731	78,513	82,094	84,983	87,419	89,532
Сталь У8	91,804	96,234	98,924	100,879	102,421	103,699	104,791
Сталь У12	77,416	82,973	86,406	88,928	90,934	92,608	94,046
Сталь 12Х18Н9Т	68,466	86,781	99,689	109,996	118,719	126,357	133,197
Сталь 40ХНМА	95,026	100,096	103,187	105,437	107,217	108,693	109,957
Медь (99.2%)	14,400	20,225	24,670	28,404	31,686	34,647	37,366
Латунь Л60	25,687	35,089	42,113	47,934	52,997	57,528	61,661
Ал.сплав АД1	10,030	10,900	11,443	11,845	12,167	12,436	12,668
Титан В95	26,877	29,616	31,346	32,634	33,669	34,540	35,293
Никел. сплав ХН77ТЮР	108,728	132,475	148,703	161,409	172,007	181,182	189,319

4. В выбранные ячейки занести значения величин ε и σ (А3 и В3; А4 и В4 и т.д.) по данным лабораторного эксперимента или из **таблицы 5.1** (по выбору преподавателя) для заданного материала (см. пример в **приложении 1**).

При необходимости аппроксимации кривых упрочнения для разных материалов, пп. 2÷4 повторяются для каждого материала на отдельных листах электронных таблиц.

5. По имеющимся данным (см. приложение 1) построить стандартную точечную диаграмму (см. приложение 2):

Вставка:

Диаграмма:

Стандартные:

Тип: Точечная,

Вид: соединение точек отрезками или со сглаживанием.

Далее> (↵);

Ряд:

Добавить: Имя: (например, марка материала);

Значения X: =Лист1!\$A\$3:\$A\$7

(вводится с клавиатуры или мышкой посредством иконок справа от окон значений);

Значения У: =Лист1!\$B\$3:\$B\$7;

Далее > (↵);

Дальнейший диалог сводится к вводу комментариев в поле диаграммы, носит необязательный характер, поэтому рекомендуется выполнить:

Далее > (↵);

Готово.

Результатом описанных выше действий является вывод на лист области построения диаграммы (см. приложение 2).

6. Используя возможности среды электронных таблиц Microsoft Excel произвести аппроксимацию имеющейся реологической кривой различными типами функций (линейной, логарифмической, полиномиальными (2÷6 порядка), степенной и экспоненциальной), с выводом каждого уравнения функции, его диаграммы и величины оценки достоверности на поле графика (см. приложение 3).

6.1. Вспомогательной кнопкой мыши (правой) выделить кривую в области построения диаграммы. В выпавшем меню активизировать раздел «Добавить линию тренда...» (основной – левой кнопкой мыши).

6.2. Определить **ТИП** аппроксимирующего уравнения (и его порядка для полиномиальной функции).

6.3. В разделе **ПАРАМЕТРЫ** обязательно выделить основной (левой) кнопкой мыши следующие разделы:

- ✓ показать уравнение на диаграмме;
- ✓ поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации (R^2).

6.4. Активизировать кнопку **ОК** посредством основной клавиши мыши или клавишей **Enter** клавиатуры.

6.5. Сохранить результаты аппроксимации в протоколе лабораторной работы.

ВНИМАНИЕ: распечатка результатов аппроксимации совместно с исходными данными производится посредством выполнения команд (**Файл, Печать**) при неактивной (!) области построения диаграммы. В противном случае будет произведена распечатка только области построения диаграммы без исходных данных, промасштабированной на формат А4.

6.6. Пп. 3.6.1÷3.6.5 выполнить для каждого типа аппроксимирующей функции, стирая предшествующую линию тренда последовательным её выделением основной клавишей мышки и нажатием клавиши **Delete** на клавиатуре.

6.7. По значениям величин достоверности аппроксимации (R^2) для каждого типа функции сделать выводы по работе.

Содержание отчёта.

Отчёт о выполнении работы должен включать:

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Перечень материалов, инструментов и оборудования.
4. Краткие сведения о решаемой задаче.
5. Распечатки диаграмм и полученных выражений кривых упругости с коэффициентами достоверности аппроксимации.
6. Выводы по работе о типе реологической модели наиболее полно отражающей свойства исследуемого материала.

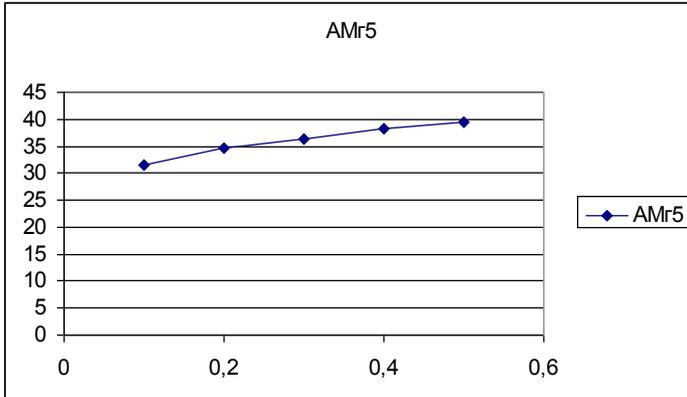
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Пример заполнения листа электронных таблиц для сплава АМг5

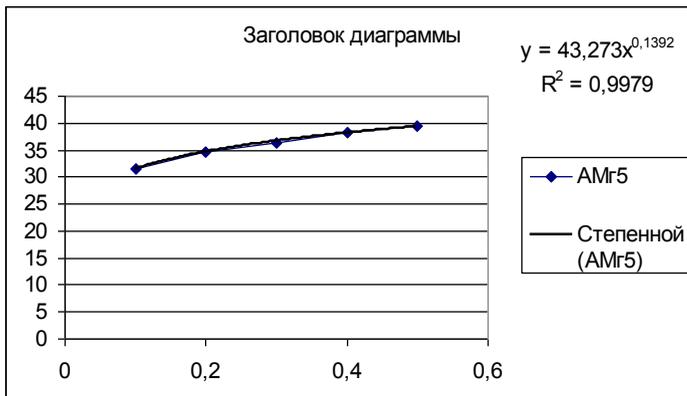
	А	В
1	eps	sigma
2		[кгс./кв.мм.]
3	0,1	31,44
4	0,2	34,64
5	0,3	36,33
6	0,4	38,17
7	0,5	39,39

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Вид стандартной точечной диаграммы в области её построения

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3.**

Аппроксимация данных степенной функцией



ЛИТЕРАТУРА

1. Резников Ю.Н. Моделирование технологических процессов кузнечно-штамповочного производства: метод. указан. к лабораторным работам / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2007.–23с.
2. Резников Ю.Н. Моделирование технологических процессов обработки металлов давлением: метод. указан. к практическим занятиям / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2013.–26с.
3. Сегал В.М. Исследования пластического формоизменения металлов методом муара / В.М. Сегал, Е.М. Макушок, В.И. Резников. – М.: Металлургия, 1974. – 200с.
4. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т.1 Физико-механические основы пластической деформации / С.И. Губкин – М.: Металлургиздат, 1961. – 376 с.
5. Технологический справочник по ковке и объёмной штамповке / Под общ. ред. М.В.Сторожева. – М.: ГНТИМЛ, 1959.–971с.
6. Смирнов-Аляев Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский. – Л.: Машиностроение, 1972.–360с.
7. Резников Ю.Н. Применение метода граничных элементов в механике твёрдого тела: Ч.II. Кусочно-линейная аппроксимация граничного контура: метод. указан. к лабораторной работе / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко. – Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2004.–8с.
8. Свидетельство РФ № 2012661391 о гос. регистрации программы для ЭВМ. Модуль программного постадийного решения прямых и обратных задач пластического формоизменения металла методом граничных элементов (нелинейная реологическая модель) / А.В. Вовченко (RU). – Заявка № 2012619255; поступила 29.10.2012; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.
9. Бреббия К. Методы граничных элементов. Пер. с англ. / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л.- М.: Мир, 1987.–524с.
10. Бреббия К. Применение метода граничных элементов в технике: пер. с англ. / К. Бреббия, С. Уокер – М.: Мир, 1982. – 248с.
11. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела: пер. с англ. / С. Крауч, А. Старфилд.–М.: Мир, 1987.–328с.

12. Писаренко Г.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г.С. Писаренко, Н.С. Можаровский. – Киев: Наукова думка, 1981. – 496с.
13. Биргер И.А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности / И.А. Биргер // Прикладная математика и механика. – 1951. – 15. – Вып.6. – С.765–770.
14. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности: учеб. для строит. спец. вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 400с.
15. Вовченко А.В. Основы моделирования процессов обработки давлением: метод. указан. к выполнению курсовой работы / А.В. Вовченко, О.И. Катрич. – Ростов н/Д; Изд. центр ДГТУ, 2018.–19с.
16. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением: учеб. для вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423с.
17. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности: методы расчёта усилий деформирования / Е.П. Унксов. – М.: ГНТИ МЛ, 1959. – 328с.
18. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 239с.
19. Блантер М.Б. Методика исследования металлов и обработки опытных данных / М.Б. Блантер. – М.: Металлургиздат, 1952 . – 444с.
20. Гарнаев А.Ю. Использование MS Excel и VBA в экономике и финансах / А.Ю. Гарнаев. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 1999. – 336с.
21. Шофман Л.А. Основы расчёта процессов штамповки и прессования / Л.А. Шофман. – М.: МАШГИЗ, 1961.–340с.
22. Степанский Л.Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Л.Г. Степанский. – М.: Машиностроение, 1979. – 215с.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

(ДГТУ)

Кафедра «Технологии формообразования
и художественная обработка материалов» (ТФихОМ)

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА И ЗАДАНИЯ

к курсовой работе

по дисциплине

**«Основы моделирования процессов
обработки давлением»**

Ростов–на–Дону, 2018

Составитель: д-р техн. наук, доцент Вовченко А.В.

Рабочая программа и задания к курсовой работе по дисциплине «Основы моделирования процессов обработки давлением». / Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2018.–10с.

Рабочая программа и задания к курсовой работе по дисциплине «Основы моделирования процессов обработки давлением» предназначены для студентов бакалаврской формы обучения по направлению 15.03.01 «Машиностроение» ОПОП «Информационные технологии обработки металлов давлением».

Печатается по решению методической комиссии факультета «Машиностроительные технологии и оборудование» (МТиО)

Научный редактор – д.т.н., профессор Мороз Б.С.

Рецензент – к.т.н., доцент Пасхалов А.С.

© Вовченко А.В., 2018

© Издательский центр ДГТУ, 2018

1. Общие сведения

Дисциплина «Основы моделирования процессов обработки давлением» относится к циклу специальных дисциплин. Программа по дисциплине составлена на основании учебного плана подготовки студентов – бакалавров направления 15.03.01 – «Машиностроение» ОПОП «Информационные технологии обработки металлов давлением».

Целью дисциплины является обучение студентов заочной формы принципам и методам физического, аналогового и математического моделирования, применяемых при проектировании технологических процессов обработки давлением; формирование у них практических навыков производственно-технологической и научно-исследовательской деятельности по анализу технологических процессов обработки давлением в направлении их совершенствования.

Дисциплина базируется на знании таких курсов ОПОП «Информационные технологии обработки металлов давлением», как технология листовой штамповки, технологияковки и объемной штамповки, кузнечно-штамповочное оборудование.

Дисциплина изучается студентами заочного отделения в 7 семестре. В процессе изучения дисциплины выполняется одна курсовая работа. По дисциплине читаются обзорные лекции, проводятся практические занятия.

Изучение дисциплины завершается экзаменом.

2. Рабочая программа

2.1 Введение.

Определение, сущность и назначение модели. Место моделей в изучении и совершенствовании кузнечно-штамповочного производства. Виды моделирования, их сущность в ОМД.

2.2 Физическое моделирование.

Особенности физического моделирования процессов ОМД. Задачи физического моделирования процессовковки и штамповки. Факторы, обеспечивающие реализацию возможностей физического моделирования. Геометрический фактор в физическом моделировании процессов ОМД – влияние формы и размеров заготовок на заполнение ручьев, формирование структуры и свойств поковок. Основные условия физического моделирования

технологических процессов кузнечно-штамповочного производства.

Подобие деформационно-силовой схемы, температурно-скоростного режима, механического режима, контактных условий и их реализация в конкретных технологических процессах.

Константы, критерии и законы подобия; геометрическое, механическое и физическое подобие в ОМД.

Требования первой и второй теории подобия. Применение законов подобия в обработке металлов давлением применительно к моделированию процессов холодного и горячего деформирования. Условия приближенного моделирования в ОМД. Выбор модельных материалов и конкретизация особенностей моделирования на примере процесса вытяжки детали из нержавеющей стали.

Разработка рациональных технологических процессов кузнечно-штамповочного производства по данным физического моделирования.

Физическое моделирование, выполняемое с целью изучения кинематики течения металла в процессах ОМД: методы, цели, практическое применение.

Физическое моделирование процессовковки и штамповки с целью назначения рациональных режимов деформирования.

2.3 Аналоговое моделирование.

Сущность аналогового моделирования применительно к задачам ОМД. Электрическое моделирование: принцип, применение в задачах калибровки волочильного инструмента. Физическая сущность поляризационно-оптического моделирования. Особенности моделирования поляризационно-оптическим методом неупругих задач. Применение поляризационно-оптического моделирования для решения технологической задачи совершенствования формы бойков при протяжке. Проектирование штампового инструмента с учётом данных поляризационно-оптического моделирования. Результаты поляризационно-оптического моделирования о влиянии характера заполнения ручья на напряжения в штампе и поковке.

2.4 Математическое моделирование

Понятие математической модели и математического моделирования. Разновидности математических моделей в ОМД.

Статистические модели в технологии кузнечно-штамповочного производства: общая характеристика, методика разработки по данным планируемого эксперимента.

Разработка статистических моделей методом парного регрессионного анализа. Применение электронных таблиц MS Excel для разработки регрессионных моделей.

Построение математических моделей технологических процессов кузнечно-штамповочного производства на основе анализа формоизменения металла в моделируемых процессах. Сущность и применяемые расчетные методы. Моделирование процесса объёмной штамповки поковок типа шестерён с использованием вариационного метода. Применение метода конечных разностей для математического моделирования процесса нагрева. Моделирование процесса штамповки детали «Чашка» методом конечных элементов и методом верхней оценки. Сущность метода граничных элементов применительно к задачам математического моделирования процессов штамповки.

Разработка математических моделей процессов ОМД методом расчетного планируемого эксперимента. Параметрическая идентификация расчетных моделей: сущность, технологическая эффективность.

Прямое и обратное моделирование процессов штамповки: сущность, применяемые методы расчета формоизменения, технологические аспекты.

Применение метода математического моделирования для управления процессом листовой штамповки.

3. Задания к курсовой работе

3.1 Индивидуальное задание к курсовой работе выбирается в соответствии с номером варианта¹ (см. **табл.1**), который выдаётся студенту в начале 7 учебного семестра.

3.2 В курсовой работе средствами математического моделирования² необходимо:

¹ Для студентов заочной формы обучения номер варианта соответствует порядковому номеру в официальном списке группы на момент начала текущего учебного семестра. Студентам очной формы обучения номер варианта выдается преподавателем индивидуально.

² Рекомендуется использовать реологические модели из работ [1,2] следующих материалов: Pb, Cu, Al и др.

3.2.1 Выполнить дискретизацию и постановку задачи для гранично-элементного или конечно-элементного моделирования процесса ОМД [3-5].

3.2.2 Определить максимальное усилие деформирования заготовки, построить график его зависимости от значения величины контактного перемещения (внедрения) пуансона $P=f(dh)$ [3,с.:134-137], а так же аналогичным образом определить значение работы деформирования и построить график $A=f(dh)$.

3.2.3 Построить графики формоизменения (перемещений или скоростей) свободных поверхностей в зависимости от преобладающих для них осей координат, для 4-5 равномерно распределённых этапов деформирования (выборочных стадий).

3.2.4 Построить графики распределения нормальных (и, при наличии в условиях задачи, касательных) контактных напряжений по поверхностям штампового инструмента.

3.2.5 Построить графики распределения напряжений (растягивающих) внутри поковки по её длине в наиболее критическом сечении.

3.2.6 Определить значение критерия геометрической сложности полученной формы поковки S_T [6,с.158].

3.2.7 Определить значение критерия неравномерности распределения накопленного деформированного состояния J_5 и построить график его изменения от величины контактного перемещения (внедрения) пуансона $J_5=f(dh)$ [3,с.21; 7,с.24].

3.2.8 По значениям критериев п. 2.2.6 и 2.2.7 сделать вывод о сформировавшемся распределении в поковке наследственного неравномерного деформированного состояния [3,с.:184-186; 8].

3.2.9 Представить сборочный эскиз или чертёж штамповой оснастки для физического моделирования рассматриваемого процесса, с подробным описанием назначения каждого элемента с акцентом на форму контактного инструмента [9,с.3; 10,с.3].

3.2.10 Представить результаты (привести иллюстрации) формоизменения границы деформированного тела после последней стадии с сеткой, образованной линиями координат Лагранжа или с полями распределения деформаций в изолиниях их разграничения по объёму тела (площади рассматриваемого сечения). Аналогичным образом построить картины совмещённого постадийного формоизменения границ заготовки на всех этапах расчётного деформирования, но без параметров внутреннего состояния.

Варианты индивидуальных заданий к курсовой работе.

Таблица 1

Вар №	AB=CD	EF	BE	dH	Контактное трение на поверхностях				Глубина сечения мм	Схема № (рис.1)	α	Примечание
	мм	мм	мм	мм							град	
1	40	40	20	10	AD=max	EF=max	-	-	40	1		AD=80
2	40	40	20	10	AD=min	EF=min	-	-	40	1		AD=80
3	40	40	20	10	AD=max	EF=min	-	-	40	1		AD=80
4	40	40	20	10	AD=min	EF=max	-	-	40	1		AD=80
5	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	-	-	40	2	126°52'	AD=80; FF=40
6	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	-	-	40	2	126°52'	AD=80; FF=40
7	40	41,23	20	5	AD=max	EF=max	-	-	40	3	75°58'	AD=80
8	40	41,23	20	5	AD=min	EF=max	-	-	40	3	75°58'	AD=80
9	40	40	20	10	AD=max	EF=max	AB=max	-	40	4		AD=80
10	40	40	20	10	AD=min	EF=min	AB=max	-	40	4		AD=80
11	40	40	20	10	AD=max	EF=min	AB=max	-	40	4		AD=80
12	40	40	20	10	AD=min	EF=max	AB=max	-	40	4		AD=80
13	40	40	20	10	AD=max	EF=max	AB=min	-	40	4		AD=80
14	40	40	20	10	AD=min	EF=min	AB=min	-	40	4		AD=80
15	40	40	20	10	AD=max	EF=min	AB=min	-	40	4		AD=80
16	40	40	20	10	AD=min	EF=max	AB=min	-	40	4		AD=80
17	40	41,23	20	5	AD=max	EF=max	CD=max	-	40	5	75°58'	AD=80
18	40	41,23	20	5	AD=min	EF=max	CD=max	-	40	5	75°58'	AD=80
19	40	41,23	20	5	AD=max	EF=max	CD=min	-	40	5	75°58'	AD=80
20	40	41,23	20	5	AD=min	EF=max	CD=min	-	40	5	75°58'	AD=80
21	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	AB=max	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
22	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	AB=max	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
23	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	AB=min	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
24	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	AB=min	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
25	40	40	20	10	AD=max	EF=max	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
26	40	40	20	10	AD=min	EF=min	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
27	40	40	20	10	AD=max	EF=min	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
28	40	40	20	10	AD=min	EF=max	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
29	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	AB=max	CD=min	40	8	126°52'	AD=80; FF=40
30	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	AB=max	CD=min	40	8	126°52'	AD=80; FF=40

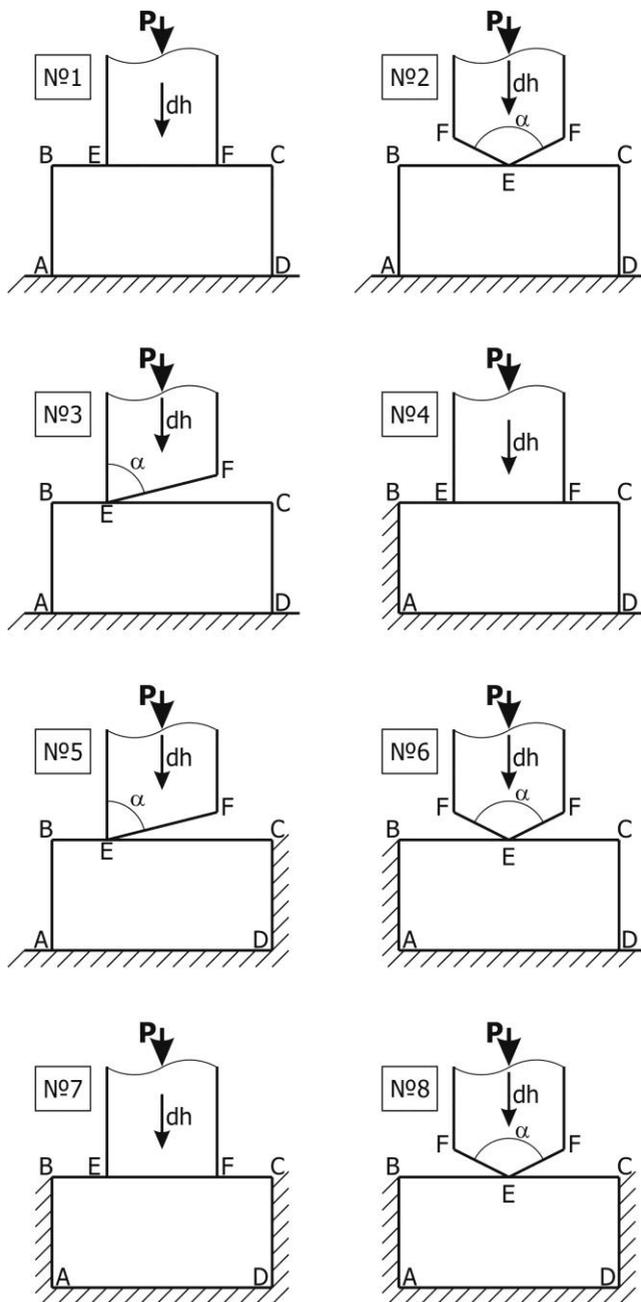


Рис.1 Расчётные схемы к вариантам индивидуальных заданий курсовой работы

Рекомендации к выполнению заданий курсовой работы

В состав курсовой работы входит пояснительная записка, объёмом не более 35 страниц основного текста (без приложений), и 1 лист формата А1 графической части.

Рекомендуется лист формата А1 условно разделить на области формата А4 (8 шт), на которых следует расположить отдельными иллюстрациями (рисунками со сквозной нумерацией) результаты численного моделирования процесса формоизменения.

Иллюстрации пп. 3.2.1 – 3.2.7 и 3.2.10 рекомендуется представлять в графической части работы, а пп. 3.2.8, 3.2.9 – в пояснительной записке. При этом независимо от расположения иллюстраций, содержание пояснительной записки курсовой работы должно отражать в текстовой форме комментарии, расчёты и выводы по каждому из пп. 3.2.1 – 3.2.10, а также основные выводы по работе в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- к теоретической части курса:

1. Сторожев М.В., Попов Е.А., Теория обработки металлов давлением. 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Резников Ю.Н. Моделирование технологических процессов кузнечно-штамповочного производства: Учеб. пособие Ростов н/Д, Изд. центр ДГТУ, 1994. – 94 с.
3. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. М.:Машиностроение,1968.–504с.
4. Журавлев А.З. Основы теории штамповки в закрытых штампах. М. «Машиностроение», 1973. 224 с.
5. Резников Ю.Н. Методические указания «Расчет технологических процессов обработки металлов давлением методом верхней оценки» / ДГТУ, Ростов-на-Дону, 1997. –13 с.
6. Резников Ю.Н. Методические указания «Расчет инженерным методом коэффициента запаса прочности при волочении» / ДГТУ, Ростов-на-Дону, 2000. -7с.

- к части курса, относящейся к выполнению курсовой работы:

1. Бровман М.Я. Соппротивление деформации в процессах обработки давлением при высоких температурах / М.Я. Бровман //

Технология легких сплавов. – 1979. – №8. – С. 26–30.

2. Фастыковский А.Р. Аналитические зависимости для определения сопротивления деформации металлов и сплавов / А.Р.Фастыковский, В.Н.Перетятыко // Изв. вузов. Сер. Чёрная металлургия. – 2003.–№2.–С.68–69.

3. Вовченко А.В. Совершенствование технологии процессов объёмной штамповки на основе применения гранично-элементных расчётов: монография / А.В. Вовченко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – 264с.

4. Резников Ю.Н. Применение метода граничных элементов в механике твёрдого тела: Ч.II. Кусочно-линейная аппроксимация граничного контура: Методические указания к лабораторной работе / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2004.–8с.

5. Вовченко А.В. Имитационное моделирование технических систем. Применение метода граничных элементов к задачамковки и объёмной штамповки: курс метод. указан. к практическим занятиям / А.В. Вовченко – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2015.–16с.

6. Алиев Ч.А. Система автоматизированного проектирования технологии горячей объёмной штамповки / Ч.А. Алиев, Г.П. Тетерин. – М.: Машиностроение, 1987. – 224с.

7. Резников Ю.Н. Оптимизация технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / Ю.Н. Резников, Б.С. Мороз, А.В. Вовченко. – Ростов-н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002. – 94с.

8. Вовченко А.В. Оценка уровня оптимальности распределения накопленной деформации в поковках, изготавливаемых в открытых штампах / А.В. Вовченко // Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – Т.11. – №6(57). – С. 833–841.

9. Резников Ю.Н. Моделирование технологических процессов обработки металлов давлением: метод. указан. к практическим занятиям / Ю.Н.Резников, А.В.Вовченко– Ростов н/Д: ДГТУ: Издательский центр ДГТУ, 2013.–26с.

10.Вовченко А.В. Основы моделирования процессов обработки давлением: метод. указан. к практическим занятиям / А.В.Вовченко, Ю.Н.Резников – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2018.–25с.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

Факультет «Машиностроительные технологии и оборудование» (МТиО)

Кафедра «Технологии формообразования и
художественная обработка материалов»

Методические указания к выполнению
курсовой работы по дисциплине

«Основы моделирования процессов
обработки давлением»

Ростов-на-Дону, 2018

УДК 621.73(075.8)

Составители: д-р техн. наук, доцент
ст. преподаватель

Вовченко А.В.,
Катрич О.И.

Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Основы моделирования процессов обработки давлением». – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2018.–19с.

Методические указания предназначены для бакалавров дневной и заочной форм обучения по направлению 15.03.01 «Машиностроение», профиля «Информационные технологии обработки металлов давлением».

УДК 621.73(075.8)

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой «Технологии формообразования и художественная обработка материалов» канд. техн. наук, доцент Г.В. Чумаченко

В печать ____.12.2018

Формат 60×84/16 Объём 1.2 усл.п.л.

Тираж ___ экз. Заказ № ____.

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:
344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Вовченко А.В., Катрич О.И.

© Донской государственный
технический университет, 2018

1. Цели и задачи.

Рекомендации предназначены для обеспечения методической поддержки самостоятельной работы студентов бакалаврского уровня подготовки по вопросам выполнения курсовой работы по дисциплине «Основы моделирования процессов обработки давлением».

2. Задание к курсовой работе

2.1 Индивидуальное задание к курсовой работе выбирается в соответствии с номером варианта¹ (см. **табл.1**), который выдаётся студенту в начале 7 учебного семестра.

2.2 В курсовой работе средствами математического моделирования² необходимо:

2.2.1 Выполнить дискретизацию и постановку задачи для гранично-элементного или конечно-элементного моделирования процесса ОМД [3-5].

2.2.2 Определить максимальное усилие деформирования заготовки, построить график его зависимости от значения величины контактного перемещения (внедрения) пуансона $P=f(dh)$ [3, с.:134-137], а так же аналогичным образом определить значение работы деформирования и построить график $A=f(dh)$.

2.2.3 Построить графики формоизменения (перемещений или скоростей) свободных поверхностей в зависимости от преобладающих для них осей координат, для 4-5 равномерно распределённых этапов деформирования (выборочных стадий).

2.2.4 Построить графики распределения нормальных (и, при наличии в условиях задачи, касательных) контактных напряжений по поверхностям штампового инструмента.

2.2.5 Построить графики распределения напряжений (растягивающих) внутри поковки по её длине в наиболее критическом сечении.

¹ Для студентов заочной формы обучения номер варианта соответствует порядковому номеру в официальном списке группы на момент начала текущего учебного семестра. Студентам очной формы обучения номер варианта выдается преподавателем индивидуально.

² Рекомендуется использовать реологические модели из работ [1,2] следующих материалов: Pb, Cu, Al и др.

Варианты индивидуальных заданий к курсовой работе.

Таблица 1

Вар №	AB=CD	EF	BE	dH	Контактное трение на поверхностях				Глубина сечения мм	Схема № (рис.1)	α	Примечание
	мм	мм	мм	мм							град	
1	40	40	20	10	AD=max	EF=max	-	-	40	1		AD=80
2	40	40	20	10	AD=min	EF=min	-	-	40	1		AD=80
3	40	40	20	10	AD=max	EF=min	-	-	40	1		AD=80
4	40	40	20	10	AD=min	EF=max	-	-	40	1		AD=80
5	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	-	-	40	2	126°52'	AD=80; FF=40
6	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	-	-	40	2	126°52'	AD=80; FF=40
7	40	41,23	20	5	AD=max	EF=max	-	-	40	3	75°58'	AD=80
8	40	41,23	20	5	AD=min	EF=max	-	-	40	3	75°58'	AD=80
9	40	40	20	10	AD=max	EF=max	AB=max	-	40	4		AD=80
10	40	40	20	10	AD=min	EF=min	AB=max	-	40	4		AD=80
11	40	40	20	10	AD=max	EF=min	AB=max	-	40	4		AD=80
12	40	40	20	10	AD=min	EF=max	AB=max	-	40	4		AD=80
13	40	40	20	10	AD=max	EF=max	AB=min	-	40	4		AD=80
14	40	40	20	10	AD=min	EF=min	AB=min	-	40	4		AD=80
15	40	40	20	10	AD=max	EF=min	AB=min	-	40	4		AD=80
16	40	40	20	10	AD=min	EF=max	AB=min	-	40	4		AD=80
17	40	41,23	20	5	AD=max	EF=max	CD=max	-	40	5	75°58'	AD=80
18	40	41,23	20	5	AD=min	EF=max	CD=max	-	40	5	75°58'	AD=80
19	40	41,23	20	5	AD=max	EF=max	CD=min	-	40	5	75°58'	AD=80
20	40	41,23	20	5	AD=min	EF=max	CD=min	-	40	5	75°58'	AD=80
21	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	AB=max	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
22	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	AB=max	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
23	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	AB=min	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
24	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	AB=min	-	40	6	126°52'	AD=80; FF=40
25	40	40	20	10	AD=max	EF=max	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
26	40	40	20	10	AD=min	EF=min	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
27	40	40	20	10	AD=max	EF=min	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
28	40	40	20	10	AD=min	EF=max	AB=max	CD=min	40	7		AD=80
29	40	22,36	40	5	AD=max	EF=max	AB=max	CD=min	40	8	126°52'	AD=80; FF=40
30	40	22,36	40	5	AD=min	EF=max	AB=max	CD=min	40	8	126°52'	AD=80; FF=40

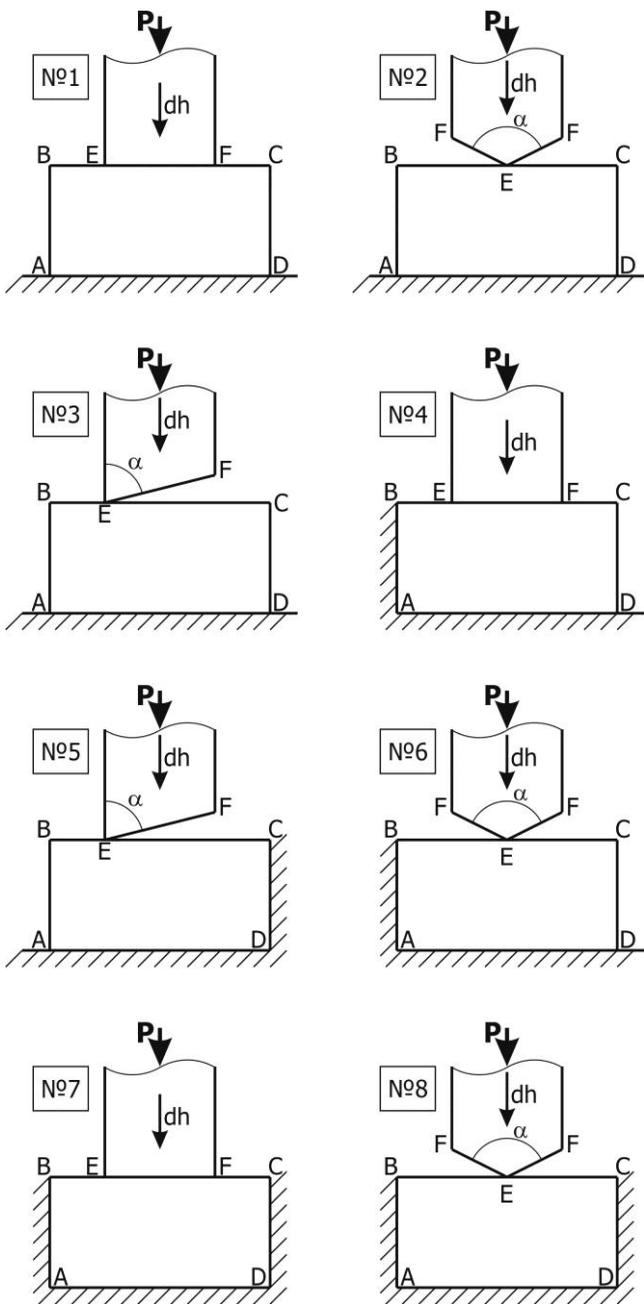


Рис.1 Расчётные схемы к вариантам индивидуальных заданий курсовой работы

2.2.6 Определить значение критерия геометрической сложности полученной формы поковки S_T [6,с.158].

2.2.7 Определить значение критерия неравномерности распределения накопленного деформированного состояния J_5 и построить график его изменения от величины контактного перемещения (внедрения) пуансона $J_5=f(dh)$ [3,с.21; 7,с.24].

2.2.8 По значениям критериев п. 2.2.6 и 2.2.7 сделать вывод о сформировавшемся распределении в поковке наследственного неравномерного деформированного состояния [3,с.:184-186; 8].

2.2.9 Представить сборочный эскиз или чертёж штамповой оснастки для физического моделирования рассматриваемого процесса, с подробным описанием назначения каждого элемента с акцентом на форму контактного инструмента [9,с.3; 10,с.3].

2.2.10 Представить результаты (привести иллюстрации) формоизменения границы деформированного тела после последней стадии с сеткой, образованной линиями координат Лагранжа или с полями распределения деформаций в изолиниях их разграничения по объёму тела (площади рассматриваемого сечения). Аналогичным образом построить картины совмещенного постадийного формоизменения границ заготовки на всех этапах расчётного деформирования, но без параметров внутреннего состояния.

3. Рекомендации к выполнению заданий курсовой работы

В состав курсовой работы входит пояснительная записка, объёмом не более 35 страниц основного текста (без приложений), и 1 лист формата А1 графической части.

Рекомендуется лист формата А1 условно разделить на области формата А4 (8 шт), на которых следует расположить отдельными иллюстрациями (рисунками со сквозной нумерацией) результаты численного моделирования процесса формоизменения.

Иллюстрации пп. 2.2.1 – 2.2.7 и 2.2.10 рекомендуется представлять в графической части работы, а пп. 2.2.8, 2.2.9 – в пояснительной записке. При этом независимо от расположения иллюстраций, содержание пояснительной записки курсовой работы должно отражать в текстовой форме комментарии, расчёты и выводы по каждому из пп. 2.2.1 – 2.2.10, а также основные выводы по работе в целом.

4. Средства реализации моделирования

Моделирование формоизменения рассматриваемых вариантов краевых задач может быть реализовано на основе применения любого программного продукта (численного метода).

Студенту следует учитывать, что все современные лицензионные программные продукты (QForm, Deform и пр.), имеющие интуитивно ясный интерфейс (позволяющий изучить порядок применения продукта самостоятельно), базируются на численном методе конечных элементов (МКЭ) [11-13]. По этой причине методики применения в моделировании формоизменения конечно-элементных программных продуктов в настоящем руководстве подробно не рассматриваются.

При этом уже известно, что существенными особенностями в вопросах моделирования процессов формоизменения и, в частности, в процессах ОМД, в настоящее время так же обладает прямой численный метод граничных элементов (МГЭ) [14-16]. МГЭ в настоящее время не представлен лицензионными программными продуктами, но различные методики и программы на его основе известны достаточно давно. Одной из последних подобных программ является работа [17]³.

В этой связи, следующий далее материал относится к особенностям применения программы [17] к моделированию краевых задач вариантов заданий (рис.1).

Степень автоматизации реализуемого программно процесса численного моделирования МГЭ постадийных задач формоизменения можно представить по структурной схеме, приведенной на рис.2. Так, в частности, на этой схеме стрелками обычной толщины показана связь, обусловленная последовательным перемещением, преобразованием или определением необходимой информации; крупногабаритными стрелками показано: *чёрными* – активация исполнительного (пускового) файла соответствующей про-

³ С результатами сравнительного анализа особенностей МКЭ и МГЭ можно ознакомиться по работам [3,15]

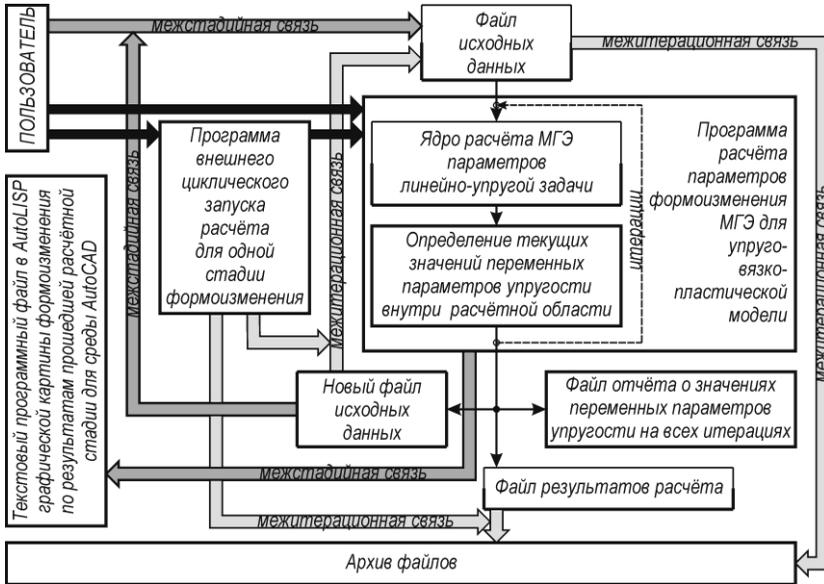


Рис.2 – Упрощённая структурная схема реализации гранично-элементного моделирования задач формоизменения граммы; *светло-серыми* – управление групповой передачей данных (файлами); *тёмно-серыми* – групповая связь, требующая выполнения, преобразования или корректировки данных (в отдельных случаях – пользователем).

В соответствии с **рис.2** применение программной реализации МГЭ к расчёту формоизменения начинается с самостоятельной подготовки студентом файла исходных данных, что в данном случае отражено связью «пользователь» – «файл исходных данных». Файл исходных данных должен иметь название *ddd.dat*⁴ и должен быть заполнен численными значениями используемых в программе переменных [10,16,17], в соответствии с принятыми в ней условиями форматного ввода данных, в связи с чем правила его заполнения ниже рассматриваются подробно.

⁴ Файл может быть сформирован в любом текстовом редакторе, например, в стандартном редакторе MS Office – «блокнот».

5. Правила заполнения файла исходных данных

Структура файла исходных данных состоит из семи последовательных блоков, содержащих как общую для всей задачи, так и индивидуальную, но многократно повторяющуюся однотипную информацию.

Первый блок исходной информации для расчёта располагается в одной – первой строке файла и последовательно содержит следующие переменные, обозначения и форматы которых приведены в **таблице 2**:

Таблица 2

Форматы ввода данных в первый блок файла исходных данных

Пере- мен- ные	<i>INFB</i>	<i>NE</i>	<i>NN</i>	<i>NP</i>	<i>IPL</i>	<i>IDSYM</i>	<i>E</i>	<i>PO</i>	<i>JATmax</i>	<i>KODE</i>	<i>ITERAC</i>	<i>KodOSI</i>
Формат	I1	I4	I5	I5	I5	I5	F12.4	F12.4	I4	I4	I4	I4

INFB – индекс, характеризующий наличие бесконечно удалённой границы:

- 1 – имеется,
- 0 – тело конечных размеров;

NE – число граничных элементов;

NN – число граничных узлов;

NP – число внутренних точек;

IPL – индекс типа задачи:

- 1 – плоско-напряжённое состояние,
- 2 – плоско-деформированное состояние;

IDSYM – индекс условий симметрии:

- 0 – симметрии нет,
- 1 – горизонтальная плоскость симметрии,
- 2 – вертикальная плоскость,
- 3 – две плоскости;

E – модуль Юнга;

PO – коэффициент Пуассона;

JATmax – число пятиточечных ячеек, выделенных внутри тела;

KODE – параметр, определяющий характер, выполняемой процедуры:

KODE=0 формирует файлы: *rrr.dat* – файл *результатов расчёта*, *idd.dat* – файл с данными для следующей итерации расчёта одной и той же стадии формоизменения (в дальнейшем необходимо только его переименовать в *ddd.dat*, предварительно удалив или переместив первоначальный);

KODE=1 формирует файлы: *rrr.dat*, *idd.dat*, *iid.dat* – последний файл – с данными для следующей расчётной стадии формоизменения тела (в дальнейшем необходимо только переименовать его в *ddd.dat*, предварительно удалив или переместив первоначальный). В этом случае граница трансформируется с учетом предшествующих расчётных изменений, а *внутренние точки и ячейки остаются неизменными по местоположению*, как и ранее при *KODE=0*;

KODE=2 формирует файлы: *rrr.dat*, *idd.dat*, *iid.dat* – последний файл – с данными для следующей расчётной стадии формоизменения тела (в дальнейшем необходимо только переименовать его в *ddd.dat*, предварительно удалив или переместив первоначальный). В этом случае положение границы и внутренних точек (и ячеек) *трансформируется с учетом предшествующего формоизменения*.

ITERAC – параметр, определяющий номер расчётной итерации сохраняемых файлов *ddd.dat* и *rrr.dat* в пределах одной расчётной стадии, начиная с нулевого состояния;

KodOSI – коэффициент, принимающий два значения 0 или 1:

KodOSI=0 – для плоской задачи,

KodOSI=1 – для случая пересчёта кинематических параметров в цилиндрическую систему координат.

Второй блок информации состоит из $(NV+NP)$ – числа строк, в каждой из которых приводятся данные о граничных узлах и внутренних точках в последовательном их перечислении. Обозначения и форматы этих переменных приведены в **таблице 3**:

Таблица 3

Форматы ввода данных во второй блок файла исходных данных

Переменные	K	$X(K)$	$Y(K)$	$IDUP(K)$	$ISYM(K)$
Формат	I5	F10.4	F10.4	I5	I5

K – порядковый номер граничного узла или внутренней точки (последние приводятся последовательно, после всех граничных узлов);

$X(K)$, $Y(K)$ – координаты соответствующего граничного узла или внутренней точки;

$IDUP(K)$ – параметр, указывающий на наличие предшествующего по номеру двойного *граничного узла* с теми же координатами (для внутренних точек – не указывается):

$IDUP(K)=0$ – при отсутствии двойного узла;

$IDUP(K)=(K-1)$ – равен номеру узла с аналогичными координатами.

$ISYM(K)$ – показатель, определяющий положение граничного узла или внутренней точки на плоскости симметрии:

$ISYM(K)=0$ – если узел или точка не лежит на плоскости симметрии;

$ISYM(K)=1$ – если узел или точка – на горизонтальной плоскости симметрии;

$ISYM(K)=2$ – если узел или точка – на вертикальной плоскости симметрии;

$ISYM(K)=3$ – если узел или точка – на пересечении плоскостей симметрии.

Третий блок информации состоит из NE -числа строк, в каждой из которых приводятся данные о стыковке текущего номера граничного элемента с соответствующими номерами граничных узлов в его начале и конце. Обозначения и форматы этих пере-

менных приведены в **таблице 4**:

Таблица 4

Форматы ввода данных в третий блок файла исходных данных

Переменные	K	$INC(K,1)$	$INC(K,2)$
Формат	I5	I5	I5

K – порядковый номер граничного элемента в соответствии с принятым направлением обхода границы;

$INC(K,1)$, $INC(K,2)$ – номера граничных узлов расположенных соответственно в начале и конце текущего граничного элемента.

Четвёртый блок состоит из одной строки и содержит данные о разделении общего числа граничных узлов по двум группам, в зависимости от действующих на них граничных условий. Обозначения и форматы этих переменных приведены в **таблице 5**:

$NFIP$ – число граничных узлов, в которых задаются либо только

Таблица 5

Форматы ввода данных в четвёртом блоке файла исходных данных

Переменные	$NFIP$	$NDFIP$
Формат	I5	I5

перемещения либо смешанные граничные условия;

$NDFIP$ – число граничных узлов, в которых заданы только напряжения, действующие в зависимости от принятой длины граничного элемента.

Пятый блок файла исходных данных состоит из $NFIP$ – числа строк, в каждой из которых приводятся данные о граничных узлах, в которых действуют кинематические или смешанные граничные условия. Обозначения и форматы этих переменных приведены в **таблице 6**:

Таблица 6

Форматы ввода данных в пятом блоке файла исходных данных

Переменные	K	$P(2*K-1)$	$P(2*K)$	$IFIP(2*K-1)$	$IFIP(2*K)$
Формат	I5	F10.4	F10.4	I5	I5

K – номер текущего граничного узла;

$P(2*K-1)$, $P(2*K)$ – граничные перемещения или напряжения в направлениях X и Y , соответственно, в зависимости от значения параметров $IFIP(2*K-1)$ и $IFIP(2*K)$;

$IFIP(2*K-1)$, $IFIP(2*K)$ – показатель, указывающий на тип граничных параметров (условий), действующих, соответственно, в направлениях X и Y :

$IFIP(2*K-1)=0$ – для напряжений в $P(2*K-1)$, действующих в направлении X ;

$IFIP(2*K-1)=1$ – для перемещений в $P(2*K-1)$, действующих в направлении X ;

$IFIP(2*K)=0$ – для напряжений в $P(2*K)$, действующих в направлении Y ;

$IFIP(2*K)=1$ – для перемещений в $P(2*K)$, действующих в направлении Y .

Шестой блок файла исходных данных состоит из $NDFIP$ – числа строк, в каждой из которых приводятся данные о граничных узлах, в которых действуют статические граничные условия в напряжениях, отнесённых к длине принятого граничного элемента. Обозначения и форматы этих переменных приведены в **таблице 7**:

Таблица 7

Форматы ввода данных в шестом блоке файла
исходных данных

Переменные	K	$P(2*K-1)$	$P(2*K)$
Формат	I5	F10.4	F10.4

K – номер текущего граничного узла;

$P(2*K-1)$, $P(2*K)$ – граничные напряжения в направлениях X и Y , соответственно.

Седьмой блок исходной информации для расчёта состоит из $JATmax$ – числа строк и содержит в последовательном виде информацию о группировке внутренних точек тела (по 5 штук) в ячейки (**рис.3, б-в**), параметры и форматы которых приведены в **таблице 8**:

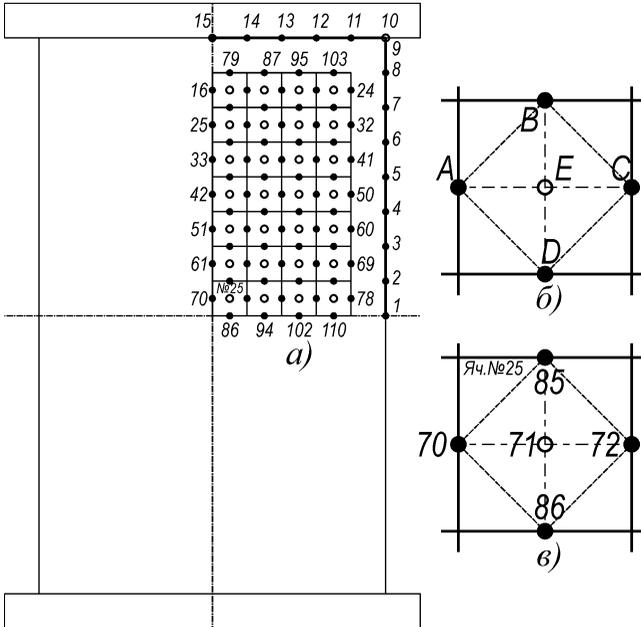


Рис.3. Пример дискретизации сечения заготовки (50×80 мм) (а) ячейками (5×5 мм) (б) и обозначение узлов ячейки №25 (в), для процесса осадки в условиях плоско-деформированного состояния.

$JA(JAT)$, $JB(JAT)$, $JC(JAT)$, $JD(JAT)$, $JE(JAT)$ – приводятся номера внутренних точек, входящих в каждую рассматриваемую ячейку по «улитке» (рис.3(б) точки $A - E$, последовательно); $sumU1p(JAT)$, $sumU2p(JAT)$ – приводятся изменения длин проекций отрезков $JA-JC$ и $JB-JD$ на оси X и Y, соответственно, за

Таблица 8

Форматы ввода данных в седьмой блок файла исходных данных

Переменные	$JA(JAT)$	$JB(JAT)$	$JC(JAT)$	$JD(JAT)$	$JE(JAT)$	$sumU1p(JAT)$	$sumU2p(JAT)$	$Xac(JAT)$	$Ybd(JAT)$	$PJS(JAT)$	$PJV(JAT)$	$PJE(JAT)$
Формат	I4	I4	I4	I4	I4	F8.4	F8.4	F8.4	F8.4	F8.2	F7.4	F12.4

все *предшествующие стадии* (используется при $KODE=2$);
 $Xac(JAT)$, $Ybd(JAT)$ – приводятся *первоначальные* (исходные) проекционные длины отрезков $JA-JC$ и $JB-JD$ (используется при $KODE=2$);

$PJS(JAT)$, $PJV(JAT)$, $PJE(JAT)$ – приводятся значения *первоначальной* площади ячейки, текущие значения коэффициента Пуассона и модуля Юнга в ней после расчётного изменения её геометрических параметров.

Дискретизация внутреннего расчётного объёма (площади сечения) заготовки ячейками применяется в целях реализации алгоритма упругих решений А.А. Ильющина в форме переменных параметров упругости. Вводится в целях организации итерационного цикла, посредством которого исходно неупругая (нелинейная) задача решается посредством последовательности решений упругих (линейных) задач [3, С.83,89; 10]. Схема такого алгоритма в упрощенном виде может быть представлена так, как на **рис.4**.

В соответствии с используемыми обозначениями, например файл

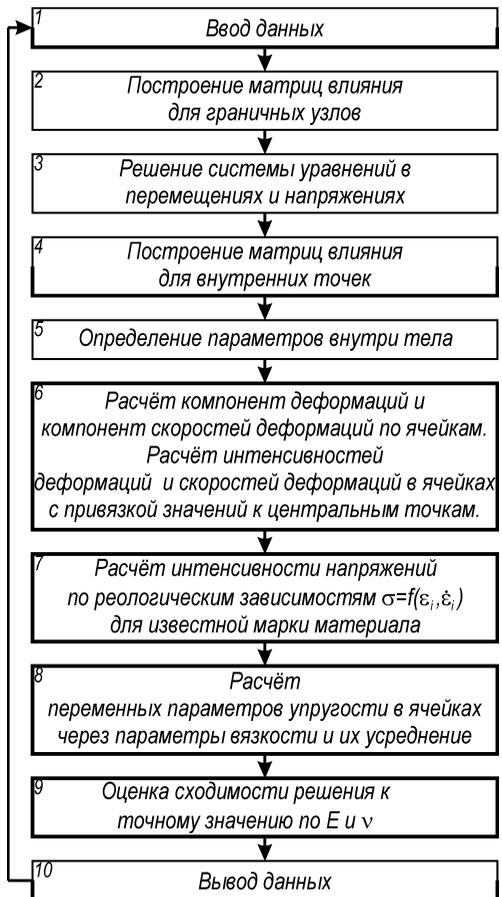


Рис.4. Блок-схема алгоритма упругих решений в форме переменных параметров упругости

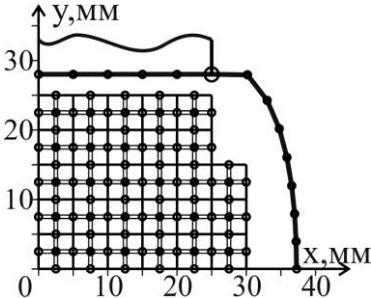


Рис.5 Исходная стадия для процесса осадки

исходных данных для задачи расчёта обратного формоизменения для процесса осадки, представленного на **рис.5**, начинающегося от высоты 55 мм, может быть заполнен в следующем виде (приводятся выборочные данные блоков информации):

0	13	15	95	2	3	1800.0000	0.4500	28	0	0	0
---	----	----	----	---	---	-----------	--------	----	---	---	---

1	38.0464			.0000	0	1					
---	---------	--	--	-------	---	---	--	--	--	--	--

2	37.9689			3.9370	0	0					
---	---------	--	--	--------	---	---	--	--	--	--	--

3	37.7222			7.9008	0	0					
---	---------	--	--	--------	---	---	--	--	--	--	--

15	.0000	27.5000	0	2
16	.0000	22.5000		2

108	27.5000	10.0000	0
-----	---------	---------	---

109	27.5000	5.0000	0
-----	---------	--------	---

110	27.5000	0.0000	1
-----	---------	--------	---

1	1	2
---	---	---

2	2	3
---	---	---

7	7	8
---	---	---

8	9	10
---	---	----

13	14	15
----	----	----

7	8
---	---

9	0.0000	0.5000	1	1
---	--------	--------	---	---

15	0.0000	0.5000	1	1
----	--------	--------	---	---

1	0.0000	0.0000
---	--------	--------

8	0.0000	0.0000
---	--------	--------

16	77	18	78	17	0.0000	0.0000	5.0000	5.0000	25.00	0.4500	1800.0000
----	----	----	----	----	--------	--------	--------	--------	-------	--------	-----------

18	83	20	84	19	0.0000	0.0000	5.0000	5.0000	25.00	0.4500	1800.0000
----	----	----	----	----	--------	--------	--------	--------	-------	--------	-----------

20	89	22	90	21	0.0000	0.0000	5.0000	5.0000	25.00	0.4500	1800.0000
----	----	----	----	----	--------	--------	--------	--------	-------	--------	-----------

70	99	72	100	71	0.0000	0.0000	5.0000	5.0000	25.00	0.4500	1800.0000
----	----	----	-----	----	--------	--------	--------	--------	-------	--------	-----------

72	105	74	106	73	0.0000	0.0000	5.0000	5.0000	25.00	0.4500	1800.0000
----	-----	----	-----	----	--------	--------	--------	--------	-------	--------	-----------

74	109	76	110	75	0.0000	0.0000	5.0000	5.0000	25.00	0.4500	1800.0000
----	-----	----	-----	----	--------	--------	--------	--------	-------	--------	-----------

Основные блоки вводимой информации о расчётной задаче в представленной распечатке файла исходных данных дополнительно условно разделены горизонтальными линиями, а второй блок дополнительно разделен пунктирной линией при переходе от описания граничных точек к внутренним, когда необходимость в указании особых точек – утрачивается. Статические параметры к расчёту приводятся в *кгс/мм²*.

Дополнительная информация, необходимая для подготовки курсовой работы, приводится в учебном пособии [18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровман М.Я. Сопротивление деформации в процессах обработки давлением при высоких температурах / М.Я. Бровман // Технология легких сплавов. – 1979. – №8. – С. 26–30.
2. Фастыковский А.Р. Аналитические зависимости для определения сопротивления деформации металлов и сплавов / А.Р.Фастыковский, В.Н.Перетяцько // Изв. вузов. Сер. Чёрная металлургия. – 2003.–№2.–С.68–69.
3. Вовченко А.В. Совершенствование технологии процессов объёмной штамповки на основе применения гранично-элементных расчётов: монография / А.В. Вовченко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – 264с.
4. Резников Ю.Н. Применение метода граничных элементов в механике твёрдого тела: Ч.II. Кусочно-линейная аппроксимация граничного контура: Методические указания к лабораторной работе / Ю.Н. Резников, А.В. Вовченко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2004.–8с.
5. Вовченко А.В. Имитационное моделирование технических систем. Применение метода граничных элементов к задачамковки и объёмной штамповки: курс метод. указан. к практическим занятиям / А.В. Вовченко – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2015.–16с.
6. Алиев Ч.А. Система автоматизированного проектирования технологии горячей объёмной штамповки / Ч.А. Алиев, Г.П. Тетерин. – М.: Машиностроение, 1987. – 224с.
7. Резников Ю.Н. Оптимизация технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / Ю.Н. Резников, Б.С. Мороз, А.В. Вовченко. – Ростов-н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002. – 94с.
8. Вовченко А.В. Оценка уровня оптимальности распределения накопленной деформации в поковках, изготавливаемых в открытых штампах / А.В. Вовченко // Вестн. ДГТУ. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – Т.11. – №6(57). – С. 833–841.
9. Резников Ю.Н. Моделирование технологических процессов обработки металлов давлением: метод. указан. к практическим занятиям / Ю.Н.Резников, А.В.Вовченко– Ростов н/Д: ДГТУ: Издательский центр ДГТУ, 2013.–26с.

10. Вовченко А.В. Основы моделирования процессов обработки давлением: метод. указан. к практическим занятиям / А.В.Вовченко, Ю.Н.Резников – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2018.–25с.
11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич – М.: Мир, 1975.–541с.
12. Секулович М. Метод конечных элементов / М. Секулович. – М.: Стройиздат, 1993. – 664 с.
13. Коннор Дж. Метод конечных элементов в механике жидкости: пер. с англ. / Дж. Коннор, К. Бреббия. – Л.: Судостроение, 1979. – 264 с.
14. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела: пер. с англ. / С. Крауч, А. Старфилд.–М.: Мир, 1987.–328с.
15. Бреббия К. Методы граничных элементов: пер. с англ. / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел – М.: Мир, 1987. – 524 с.
16. Бреббия К. Применение метода граничных элементов в технике: пер. с англ. / К. Бреббия, С. Уокер – М.: Мир, 1982. – 248 с.
17. Свидетельство РФ № 2012661391 о гос. регистрации программы для ЭВМ. Модуль программного постадийного решения прямых и обратных задач пластического формоизменения металла методом граничных элементов (нелинейная реологическая модель) / А.В. Вовченко (Россия). – Заявка № 2012619255; поступила 29.10.2012; зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.
18. Резников Ю.Н. Моделирование технологических процессов кузнечно-штамповочного производства: учеб. пособие / Ю.Н. Резников. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1994.–94с.