



УДК 621.7.044.4

Кривцов В. С., Нарыжный А. Г.**Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт». Украина, г. Харьков****МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ****Анотація**

Розглянутий внесок співробітників Національного аерокосмічного університету у розвиток напрямів механіко-математичного моделювання імпульсних технологічних систем.

Abstract

The contribution of employees of the National aerospace university is considered to development of directions of mechanic-mathematical design of the impulsive technological systems.

В авиа-, двигателе-, автомобиле-строении и других отраслях промышленности распространены технологические системы импульсного типа, которые используют при выполнении технологического действия удар или взрыв. Для механических процессов в таких системах характерны особенности вроде волн напряжений и деформаций, сопровождающихся интерференцией, локального и общего многоэтапного неоднородного пластического деформирования, обуславливающего накопление значительных остаточных деформаций, ударно-контактных колебаний, разрушения. Кроме механического действия элементы испытывают импульсное действие тепловых потоков, вызывающих как тепловые деформации, так и изменение свойств и характеристик материалов. Часто такие (гетерогенные) системы включают контрастные по своим механическим свойствам элементы — твердые деформируемые и жесткие; жидкие, отличающиеся сжимаемостью, вязкостью и кавитацией; газообразные; резиноподобные, отличающиеся большими упругими деформациями. Особенным для таких гетерогенных систем является контактно-ударное взаимодействие элементов, имеющее либо характер сцепления, либо неотрывного скольжения, либо неклассического одностороннего контакта с неопределенной зоной, трением и возможностью отрыва. Материалы при импульсных нагрузениях проявляют особые свойства, например, повышение предела текучести, зависимость предела текучести от скорости деформаций и др. [1, 2]. По сути подобные системы представляют собой объекты изучения механики сплошных сред.

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный

институт» с начала 50-х годов прошлого века проводятся работы по разработке, внедрению в промышленность и исследованию импульсных технологических процессов и соответствующего оборудования [3–7]. Основные направления развиваемых технологий — листовая и объемная штамповка, разделительные операции, ударная резка слитков в системах непрерывной разливки стали, сварка, опрессовка, брикетирование рыхлых материалов и металлической стружки.

Источниками импульсного воздействия служат — взрыв бризантного взрывчатого вещества (БВВ) на поверхности, в воздухе или в жидкости, удар быстролетящего твердого тела по детали или по поверхности жидкости, электрический разряд в жидкости, взрыв электрического проводника в жидкости, импульсное магнитное поле. Основные виды развиваемых техпроцессов — листовая и объемная штамповка взрывом (ВШ) в воздухе и в жидкости, гидродинамическая штамповка (ГДШ), электрогидравлическая штамповка (ЭГШ), импульсная резка слитков и импульсное брикетирование рыхлых материалов и металлической стружки.

Первоначально на этапе освоения технологий исследования соответствующих механических процессов имели в основном эмпирический характер. Позже методики исследования стали разнообразнее, в частности, стало применяться математическое моделирование механических процессов, протекающих в подобных технологических системах.

Механико-математическое моделирование основано на построении адекватных математических моделей механических процессов, отражающих существенные особенности механических систем, и решении соответствующих задач, чаще всего с применением компьютера как универсального моделирующего устройства. Математическая модель механической системы содержит ряд условий, накладываемых на движение отдельных элементов и системы в целом: уравнение движения, уравнения баланса энергии, уравнения сохранения массы, уравнения деформаций и уравнения, описывающие свойства материалов при деформировании. Дополнительные условия описывают контактное взаимодействие, связи, начальные и граничные условия, накладываемые на элементы систем. Еще одна группа условий — периодичности, симметрии или антисимметрии, позволяет уменьшить объем модели и потребные для моделирования ресурсы компьютера, либо решать задачи

на конкретном компьютере с большей точностью. При формулировании математических моделей или их подсистем используются лагранжевы и эйлеровы способы. Математические формулировки определяющих условий имеют вид операторных уравнений, как, например, уравнения движения, а также неравенств, например, контактные условия, условия пластичности, кавитации. Такое разнообразие формулировок допускает и предполагает использование различных методов решения соответствующих задач. В случае условий в виде неравенств соответствующие математические задачи существенно нелинейны и могут быть решены только приближенно. Основной способ приближенного решения подобных задач — дискретизация континуальных моделей по пространственным переменным и времени с последующим численным решением полученных систем алгебраических уравнений и неравенств на компьютере.

Разработка вопросов моделирования проводилась по четырем направлениям:

— разработка математических зависимостей (моделей) поведения материалов при импульсных воздействиях, включая определение механических характеристик отдельных материалов;

— разработка адекватных механико-математических моделей (МММ) технологических систем или их частей (заготовка, оснастка, инструменты, приспособления), отражающих закономерности и особенности термомеханических процессов в их взаимосвязи и взаимозависимости. Модели содержат большое количество параметров, описывающих материальные свойства, форму и размеры элементов, взаимодействие между ними. Возможны различные МММ, более или менее полно отражающие свойства систем, обладающие большей или меньшей вычислительной эффективностью;

— разработка методик, раскрывающих МММ в виде полей переменных и функций состояния, обеспечивающих точность и вычислительную эффективность процедур моделирования;

— моделирование в узком значении, а именно — решение задач механики сплошных сред и анализ их решений.

Ниже приведена характеристика вклада сотрудников Национального аэрокосмического университета в эти направления.

Разработка моделей поведения материалов

На основе экспериментальных исследований обнаружена зависимость поля напряжений материала, испытывающего импульсное воздействие, от ускорения деформаций и предложена математическая модель подобного поведения материалов. Предложена методика определения механических характеристик

для подобных материальных моделей поведения. [8–11].

Проведены эксперименты по исследованию механических свойств и зависимости механических характеристик металлической стружки при импульсном брикетировании с использованием удара быстролетящим твердым телом. Предложены математические модели поведения массива стружки при импульсном воздействии. [12–13].

Разработана и предложена расчетно-экспериментальная методика определения параметров математической модели поведения металлов, учитывающая влияние скорости деформации на предел текучести, определены характеристики ряда металлов [14].

Разработка механико-математических моделей технологических систем

Рассмотрена модель технологической системы листовой штамповки в составе заготовки и жесткой оснастки. Поле скоростей деформаций заготовки аппроксимируется простыми функциями на основе эмпирических исследований. Материал заготовки — жестко-пластичный. Рассмотрен этап монотонного нагружения, разгрузка не учитывается [6].

Разработаны различные схемы ГДШ, исследованы специфические особенности механических процессов в системе ГДШ, на основе экспериментальных исследований предложена модель взаимодействия жидкости и заготовки, а также зависимость давления жидкости на заготовку [15–18].

Предложена и исследована нестационарная модель многослойных матриц ВШ с учетом механического и теплового возмущения напряженно-деформированного состояния (НДС) [19].

Предложены и исследованы нестационарные модели НДС оснастки в различных системах импульсной листовой штамповки, выражающие волновые процессы. Модели имеют одномерный характер и описаны в цилиндрической или сферической системах координат. Оснастка представляет собой упругие сплошные или составные цилиндрические либо сферические матрицы. Рассмотрен калибровочный переход, предполагается, что заготовка не искажает импульс давления, действующий со стороны жидкости. Взаимодействие с жидкостью учтено в акустическом приближении [20, 21]. Предложена и обоснована сравнением с экспериментальными данными двумерная осесимметричная модель технологической системы ГДШ в составе упругопластической составной матрицы и упругопластической заготовки, движущейся под действием импульсного давления. Учтены ударно-контактное взаимодействие заготовки и матрицы, возможность волновых процессов, интерференция, накопление пластических деформаций, упругая разгрузка в элементах технологической системы [22].



Предложена и исследована двумерная осесимметричная МММ процессов в системе ГДШ в составе жесткой матрицы, пластической заготовки, сжимаемой жидкости и ударника в эйлеровой системе отсчета. Модель предполагает возможность анализа волновых процессов в жидкости и давления на неподвижную заготовку. Контакт заготовки и жесткой матрицы имеет кинематический характер [23].

Предложена и изучена двумерная МММ процессов в системе ЭГШ в составе жесткой матрицы, сжимаемой жидкости и электрического разрядника при одиночном разряде в эйлеровой системе отсчета. Модель предполагает возможность анализа волновых процессов в жидкости и давления на поверхность матрицы [24]. Предложена методика определения поля давлений на поверхности заготовок в системе ЭГШ при одновременном разряде нескольких разрядников [25, 26].

Предложена упругая квазистационарная модель НДС конструкции установки импульсной резки слитков [27]. Предложена нестационарная упругая плитно-стержневая модель конструкции установки импульсной резки. Возмущение при резке заданы на основе эмпирических результатов [28]. Разработана модель процесса резки слитка [29].

Разработана модель термомеханического состояния энергоузла машины импульсного типа, использующего сгорание порохового заряда [30].

Разработана поршневая модель процессов в пространственной технологической системе ГДШ и ЭГШ в составе жесткой составной матрицы, поршня, вязкой кавитирующей и сжимаемой жидкости, а также упругопластической заготовки [31, 32].

Разработка и применение методик моделирования

Описанные выше модели использованы при разработке методик определения параметров механических процессов при выполнении технологических операций.

Предложен комбинированный подход к определению НДС штампуемых заготовок: поле скоростей деформаций аппроксимируется простыми функциями на основе эмпирических исследований, а затем на основе инкрементальной теории пластичности определяется поле напряжений [6].

В работе [14] использован метод конечных разностей для совместного решения задач о распространении импульсного магнитного поля и НДС, разработана программа для компьютера.

В работах [23, 24] при исследовании технологических систем ГДШ и ЭГШ использован конечно-разностный метод Годунова, разработаны программы для компьютера.

В работах [19, 20] использован операционный метод Лапласа, а также метод конечных разностей

(в [20] — характеристико-разностный); разработаны программы для компьютера. В [22] использован конечно-разностный метод Уилкинса.

В работе [33] предпринята попытка использования методов молекулярной динамики при расчете процессов пластического деформирования.

Работы [22, 28–31] используют метод конечных элементов в лагранжевой постановке. В работе [32] использована смешанная дискретизация — твердые элементы технологической системы дискретизованы по методу конечных элементов, а жидкая среда — по методу SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

В работе [30] использованы экономичные разностные схемы Самарского и метод конечных элементов для совместного решения задач определения полей температур и НДС; разработаны программы для компьютера.

Моделирование в узком значении. Результаты моделирования

Метод, предложенный в [6] длительное время был основным при определении параметров НДС заготовок, с его помощью произведены расчеты различных техпроцессов [5, 8, 9, 15, 16, 18].

С использованием модели материала, учитывающей влияние скоростей и ускорений деформаций на предел текучести решен ряд задач деформирования тонкостенных деталей, отмечено незначительное с инженерной точки зрения отличие результатов от подобных же результатов, но для моделей без учета ускорения деформаций [9, 10].

Решен ряд задач, исследован процесс сжатия металлической рыхлой стружки, определены оптимальные параметры техпроцесса брикетирования стружки [12, 13, 34]. Проведены прочностные расчеты, определены оптимальные значения технологических параметров, определены параметры НДС элементов конструкции установки импульсной резки металлов [27–29].

Решены задачи деформирования цилиндрических оболочек импульсным магнитным полем, определены параметры моделей алюминиевых сплавов [14].

Исследованы особенности нестационарных полей давления в технологических системах ГДШ [15–18, 23] и ЭГШ [24, 26].

Исследованы особенности НДС в оснастке и заготовках при импульсной штамповке с учетом волнового характера НДС и ударно-контактного взаимодействия элементов технологических систем. Разработана методика прочностного расчета матриц, разработана методика анализа накопления остаточных напряжений и деформаций пластического типа, показано проявление упругой приспособляемости матриц при циклических импульсных нагружениях [20–22, 32].

Исследованы закономерности и особенности тепловых и механических процессов в энергоузах машин импульсного типа со сгоранием порохового заряда, определены оптимальные значения технологических параметров таких систем [30].

Показаны ограниченные возможности традиционных сеточных методов механики сплошных сред для построения совершенных, полных и адекватных моделей гетерогенных импульсных технологических систем [31]. Предложена смешанная схема дискретизации (МКЭ + SPH) гетерогенных технологических систем [33].

Выводы

Обзор работ сотрудников Национального аэрокосмического университета показывает, что метод механико-математического моделирования технологических импульсных систем находит все более широкое применение и имеет большее значение для их проектирования, а также изучения и оптимизации механических процессов, являющихся основой техпроцессов. Накоплен значительный опыт разработки, применения различных моделей и методов их реализации.

Модели технологических систем усложняются, они включают большое количество элементов, имеющих различную природу, взаимодействующих по контактно-ударному типу.

Для дискретизации по времени предпочтительны явные методы.

Для описания процессов и дискретизации сред в гетерогенных технологических системах необходимо использовать смешанные методы дискретизации по пространственным координатам, что порождает методологическую проблему — объединение различных методов при исследовании одной технологической системы. Методы дискретизации должны адекватно передавать основные особенности поведения материалов элементов в составе гетерогенных технологических систем при импульсном возбуждении. Хорошо показало себя при анализе гетерогенных систем объединение метода конечных элементов и SPH. Необходим поиск и изучение других комбинаций методов.

Литература

1. Райнхарт Дж. Поведение металлов при импульсивных нагрузках / Дж. Райнхарт, Дж. Пирсон. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. — 296 с.
2. Коларов Д. Механика пластических сред / Д. Коларов, А. Балтов, Н. Бончева. — М.: Мир, 1979. — 302 с.
3. Пихтовников Р. В. Штамповка листового металла взрывом / Р. В. Пихтовников, В. И. Завьялова. — М.: Машиностроение, 1964. — 175 с.

4. Кононенко В. Г. Оборудование и технология импульсной обработки материалов / В. Г. Кононенко. — Л.: ЛДНТП, 1968. — 50 с.

5. Борисевич В. К. Разработка научных основ оптимального проектирования технологических процессов листовой штамповки взрывом деталей летательных аппаратов и двигателей: дис. докт. техн. наук: 05.07.04 / Борисевич Владимир Карпович. — Х., 1979. — 409 с.

6. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. — Х.: Изд-во Харьк. ун-та, 1958. — 188 с.

7. Кривцов В. С. Концепция создания технологических систем производства деталей летательных аппаратов с использованием импульсных методов обработки: дис. докт. техн. наук: 05.07.04 / Кривцов Владимир Станиславович. — К., 1997. — 312 с.

8. Лопатин А. И. Получение динамической диаграммы напряжение-деформация при помощи кольцевых образцов / А. И. Лопатин // Импульсная обработка металлов давлением. — Вып. 2. — Х., 1970. — С. 128–136.

9. Корнилов Г. Л. Особенности уравнений движения и неразрывности в механике деформируемого твердого тела при импульсном нагружении / Г. Л. Корнилов // Вопросы механики деформируемого твердого тела. — Вып. 1. — Х., 1979. — С. 11–14.

10. Корнилов Г. Л. Методики испытания материала и аналитической аппроксимации экспериментального физического закона связи напряжений с деформационными параметрами при действии импульсной нагрузки / Г. Л. Корнилов // Вопросы механики деформируемого твердого тела. — Вып. 1. — Х., 1979. — С. 107–111.

11. Корнилов Г. Л. Термодинамические особенности деформирования твердого тела при импульсном нагружении / Г. Л. Корнилов // Вопросы механики деформируемого твердого тела. — Вып. 4. — Х., 1983. — С. 69–75.

12. Стельмах В. А. Исследование и внедрение машин и процессов импульсной резки металла и брикетирования стружки с использованием энергии горючих газов: дис. канд. техн. наук: 05.324 / Стельмах В. А. — Х., 1970. — 215 с.

13. Чернявский А. С. Уравнение состояния чугуновой стружки в процессе ее прессования / А. С. Чернявский, Э. А. Лимберг, В. Н. Кулешов, И. Н. Сухов // Вопросы упругого и пластического деформирования твердого тела. — Х., 1988. — С. 141–146.

14. Деменко В. Ф. Особенности идентификации физической модели материала, учитывающей деформационные и кинематические параметры, в процессах магнито-импульсного деформирования оболочек / В. Ф. Деменко // Вопросы механики деформируемого твердого тела. — Х., 1987. — С. 63–69.

15. Мацукин Ю. Г. Исследование гидродинамической штамповки на пресс-пушке: дис. канд. техн. наук: 05.07.04 / Мацукин Ю. Г. — Х., 1966. — 223 с.



16. *Касьян В. Г.* Исследование энергетических и технологических параметров типовых процессов гидродинамической штамповки на пресс-пушках: дис. канд. техн. наук: 05.07.04 / Касьян В. Г. — Х., 1972. — 181 с.

17. *Касьян В. Г.* О волновых явлениях, протекающих в закрытых гидродинамических камерах / В. Г. Касьян, Ю. Г. Мацукин // *Обработка металлов давлением в машиностроении.* — 1975. — № 11. — С. 88–93.

18. *Брагин А. П.* Исследование, разработка и внедрение технологии гидродинамической штамповки на пресс-пушках авиационных листовых деталей пространственных форм с элементами, сложными для формообразования: дис. канд. техн. наук: 05.07.04 / Брагин А. П. — Х., 1979. — 166 с.

19. *Макаров О. В.* Особенности проектирования и расчета осесимметричных замкнутых матриц для импульсной штамповки с учетом термомеханического воздействия заготовки: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / Макаров О. В. — Х., 1974. — 189 с.

20. *Лепихин П. П.* Исследование напряженно-деформированного состояния многослойных толсто-стенных цилиндрических и сферических оболочек при импульсном нагружении: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / Лепихин П. П. — Х., 1979. — 189 с.

21. *Завьялова В. И.* Исследование напряженно-деформированного состояния и разработка методики расчета на прочность матриц для штамповки импульсными нагрузками листовых осесимметричных обечаек / В. И. Завьялова, Г. Л. Корнилов, П. П. Лепихин, В. С. Сотников // *Труды НИАТ — М.*, 1984. — 52 с.

22. *Нарыжный А. Г.* Накопленное окончательное напряженно-деформированное состояние взаимодействующих с ударом тел вращения: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / Нарыжный А. Г. — Х., 2006. — 155 с.

23. *Родько С. Я.* Исследование, разработка и внедрение процессов гидродинамического формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов: дис. канд. техн. наук: 05.07.04 / Родько С. Я. — Х., 1985. — 238 с.

24. *Тараненко М. Е.* Разработка ресурсосберегающих технологий и электрогидравлических процессов с пространственно-временным управлением нагружения для штамповки крупногабаритных листовых деталей: дис. докт. техн. наук: 05.07.04 / Тараненко М. Е. — Х., 1996. — 389 с.

25. *Князев М. К.* Программное обеспечение разработки процессов многоэлектродной электрогидравлической штамповки / М. К. Князев, М. А. Голованова,

Ю. И. Чебанов // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии.* Сб. науч. трудов — Х., 1998. — С. 185–190.

26. *Князев М. К., Антоненко А. А., Ружин А. А.* Совершенствование программных средств для проектирования технологических процессов электрогидравлической листовой штамповки / М. К. Князев, А. А. Антоненко, А. А. Ружин // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии:* Сб. науч. трудов. — Вып. 18. — Х., 2003. — С. 47–56.

27. *Кривцов В. С.* Импульсная резка горячего металла / В. С. Кривцов, А. Ю. Боташев, А. Н. Застела, С. А. Мазниченко, С. И. Планковский, В. Н. Сапрыкин. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. — 476 с.

28. *Кладова О. Ю.* Совершенствование конструкций оборудования для импульсной обработки давлением: дис. канд. техн. наук: 05.03.05 / Кладова О. Ю. — Харьков, 2002. — 181 с.

29. *Хитрых Е. Е.* Математическое моделирование процессов импульсной резки непрерывных слитков / Е. Е. Хитрых // *Международная научно-техн. конф. «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки».* — Тез. докл. — Х., 2007. — С. 74.

30. *Павленко В. Н.* Совершенствование конструктивных параметров и технических характеристик энергетических узлов пресс-пушек для гидродинамической штамповки: Дис. канд. техн. наук: 05.07.04 / Павленко В. Н. — Х., 2002. — 152 с.

31. *Нарыжный А. Г.* Моделирование процесса гидроимпульсной штамповки / А. Г. Нарыжный // *Динаміка, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем та елементів їхніх конструкцій.* Матеріали міжнародної науково-технічної конференції 8–11 вересня 2009 р. — Севастополь, 2009. — С. 35–38.

32. *Нарыжный А. Г.* Смешанная модель технологической системы гидродинамической штамповки / А. Г. Нарыжный // *Авиационно-космическая техника и технология.* — 2010. — Вып. 6/73. — С. 13–17.

33. *Король О. Г.* Использование методов молекулярной динамики при расчете процессов пластического деформирования / О. Г. Король, Ю. К. Чернышов, С. Т. Гаджиян, А. И. Заикина // *Вопросы упругого и пластического деформирования твердого тела.* — Х., 1988. — С. 138–141.

34. *Набатов А. С.* Распределение давлений при брикетировании сыпучего материала / А. С. Набатов // *Вопросы механики деформируемого твердого тела.* — Вып. 1. — Х., 1979. — С. 17–20.