

УДК 004.9: 621.73

**И. С. Лексутов**

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОГО ЧИСЛЕННОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В статье описана организация и реализация совместного экспериментального и численного моделирования технологических процессов на примере холодной объёмной штамповки.

*Ключевые слова:* моделирование, холодная объёмная штамповка, эксперимент, метод сеток.

Системы численного компьютерного моделирования (CAE – англ. Computer aided engineering) помогают оптимизировать затраты на технологическую подготовку производства в разнообразных областях. Проведение виртуальных экспериментов частично заменяет натурные, требующие изготовления опытного инструмента, проведения практически полного цикла производства товара либо услуги и поиска оптимальных решений методом реальных проб и ошибок.

Так, например, в области обработки металлов давлением распространение получили системы инженерного анализа ANSYS, SuperForge, Form3D, QForm3D. Эти системы достаточно универсальны и удобны в практическом применении, однако экспериментальное моделирование невозможно заменить полностью имитационным. Наиболее надёжной стратегией является подтверждение численных результатов экспериментальными исследованиями. Для этого нужно чтобы существовал инструментарий, в виде компьютерной программы, для количественного и качественного сравнения экспериментальных и численных результатов моделирования. Для чего требуется реализовать единообразный подход к расчёту основных показателей разрабатываемого технологического процесса в виртуальном и реальном эксперименте для корректного их сравнения.

Не каждый метод экспериментального исследования подходит для использования совместно с численными методиками. Одним из возможных вариантов является пара: метод конечных элементов (МКЭ) – метод сеток. Эти методы широко применяются при исследованиях процессов пластической деформации металлов. Во всех ранее перечисленных системах инже-

---

**Лексутов Илья Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» (Омский государственный университет путей сообщения, Омск); e-mail: Leksutov@mail.ru.

© Лексутов И. С., 2016

нерного анализа используются различные вариации МКЭ. Метод делительных сеток также хорошо известен и распространён. Основная проблема этого метода — высокая трудоёмкость обработки результатов, когда требуется многократно замерять координаты расположения точек пересечения линий сетки или других используемых маркеров, фиксировать изменение формы элементарных ячеек. После чего вычисляются показатели деформированного или напряжённого состояния.

Автоматизация процесса обработки результатов эксперимента по методу сеток заключается в измерении координат точек пересечения линий сетки в компьютерной среде и автоматическом формировании файла данных, по которым рассчитывается интенсивность деформации. Измерения производятся путём обработки сканированного или фотографического изображения деформированной заготовки. Большинство операций производятся в САД «Компас», куда интегрируется соответствующий модуль (библиотека) автоматизации. На рисунке 1 показан результат обработки экспериментальных данных по холодной осесимметричной штамповке кольцевых заготовок в компьютерной программе [1].

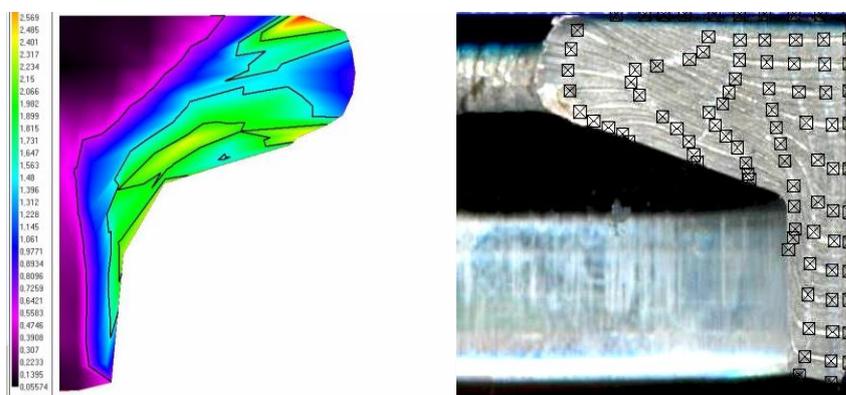
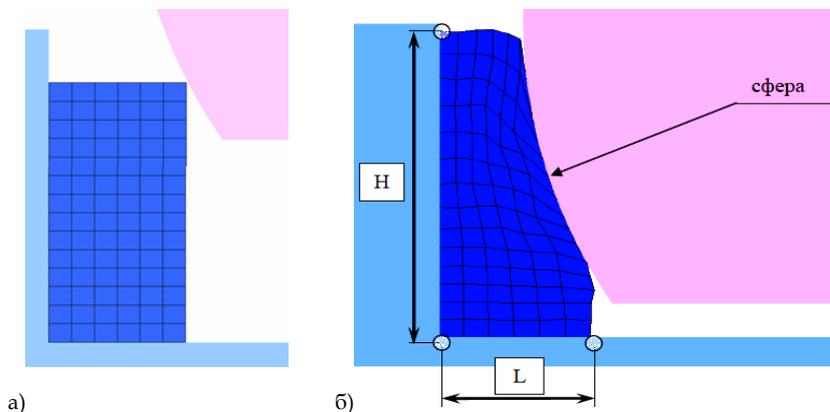


Рис. 1. Деформированная заготовка: слева — результат автоматизированного вычисления интенсивности деформации; справа — изображение заготовки после эксперимента (исходные данные)

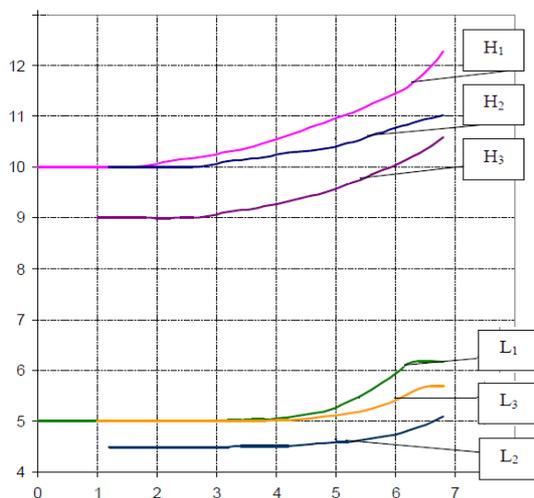
Расчёт показателей деформированного состояния производится по методике, изложенной в [2]. Важно отметить, что для наиболее точного сравнения результатов расчёта и эксперимента нельзя допускать перестройки расчётной сетки, так как в ходе натурального эксперимента структура сетки неизменна. Следует отметить, что основным показателем адекватности численного моделирования нужно считать соответствие конечной формы и размеров виртуальной и экспериментальной детали.

Для примера реализации описанного подхода приведём исследование процесса осадки кольцевой заготовки сферическим инструментом. На рисунке 2 показана исходная заготовка с нанесённой делительной сеткой и эта же заготовка после деформирования. При этом видно, что

делительная сетка полностью соответствует расчётной по количеству узлов и ячеек. Так как расчётная сетка не перестраивалась в ходе численного решения задачи, то это даёт возможность корректного сопоставления результатов эксперимента и расчёта.



**Рис. 2. Численное моделирование деформирования кольцевой заготовки:**  
 а — исходная заготовка с делительной сеткой;  
 б — заготовка после деформирования



**Рис. 3. Изменение высоты и толщины (по нижнему торцу) поковки для серии экспериментов из трёх соотношений размеров исходной заготовки**

Построение зависимостей изменения размеров заготовки от хода инструмента при реализации описываемого подхода возможно в автоматическом режиме. В данном процессе происходит считывание выделенных координат узлов делительной сетки, расположенных на верхней

торцевой и наружной поверхностей заготовки, а также точки на внутренней поверхности на уровне основания детали и последующего вычисления размеров  $H$  (высота) и  $L$  (ширина сечения) получаемой в ходе процесса деформирования детали (рис. 3). При этом возможно корректно совместить на одном графике результаты серии экспериментов с разными начальными и конечными размерами заготовки.

Опираемый подход к совместному численно-экспериментальному моделированию технологических процессов можно распространить не только на другие виды технологических процессов обработки металлов давлением, но и на процессы формовки различных материалов, а также технологические процессы другого рода. Основной подход к такому моделированию, который можно сформулировать здесь, — это максимальное соответствие вида и количества измеряемых в ходе эксперимента и численного моделирования параметров, а также способов их вычисления и представления результатов. В приведённом примере показан способ реализации описанного подхода, когда способ численного решения задачи максимально приближен к условиям проведения экспериментального исследования, а результат эксперимента обрабатывается с использованием методик расчёта численным методом. Результаты эксперимента и расчёта представлены также единообразно — при помощи цветowych полей в графическом виде. В условиях, когда в ходе исследования получено два набора численных данных (эксперимент и моделирование) одинаковой структуры, становится возможным автоматизированное сравнение серий экспериментальных и численных результатов моделирования, что в конечном итоге уменьшит затраты и время на подготовку или модификацию технологических процессов производства товаров и услуг. Все это имеет важное значение в условиях внедрения концепции компьютерно-интегрированного производства, автоматизации процесса жизненного цикла изделий и рыночных механизмов промышленной конкуренции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2010615733. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010.
2. Лексутов В. С., Евстифеев В. В., Александров А. А. Расчёт интенсивности деформации осесимметричных поковок // Омский научный вестник. 2007. № 2 (56). С. 131–133.
3. Евстифеев В. В. Построение рациональных технологий холодного выдавливания / В. В. Евстифеев, А. А. Александров, В. Г. Азаров, И. С. Лексутов, К. Н. Пантюхова // Какой автомобиль нужен России? : материалы 69-й Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ). Омск: СибАДИ, 2010. С. 148–155.

\* \* \*

**Leksutov Ilya S.**  
**AUTOMATION OF JOINT NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH  
OF DEFORMATION PROCESSES**

(Omsk State Transport University, Omsk)

The article describes the organization and implementation of joint experimental and numerical simulation of processes on the example of cold forging.

*Keywords:* cold forging, simulation, experiment, grid method.

REFERENCES

1. Certificate of state registration of the computer, no. 2010615733. Moscow, Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks, 2010
2. Leksutov B. C., Evstifeev V. V., Aleksandrov A. A. The calculation of the intensity of the deformation of axisymmetric forging [Raschet intensivnosti deformatsii osesimmetrichnykh pokovok], *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2007, no. 2 (56), pp. 131–133.
3. Evstifeev V. V., Aleksandrov A. A., Azarov V. G., Leksutov I. S., Pantyukhova K. N. Building a rational technology of cold extrusion [Postroenie ratsional'nykh tekhnologiy kholodnogo vydavlivaniya ], *Kakoy avtomobil' nuzhen Rossii? (What kind of car does Russia need?): materialy 69-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Assotsiatsii avtomobil'nykh inzhenerov (AAI)*, Omsk, SibADI Publ., 2010, pp. 148–155.

\* \* \*