

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ШТАМПОВКИ ВЗРЫВОМ

Х. Д. ГРЁНЕВЕЛЬД («Эксплоформ БВ», г. Лелиштад, Нидерланды)

Фотограмметрический анализ позволяет определить форму рабочей поверхности изделия и ее изменения после обработки. Описано применение этого анализа в задачах численного моделирования штамповки взрывом и конструирования соответствующих технологий. Он может эффективно использоваться и в других видах материалобработки (термообработка, сварка и др.).

*Ключевые слова:* штамповка взрывом, конструкционные материалы, граница области штампуемости, фотограмметрия

В последние годы технология штамповки взрывом (ШВ) переживает свое второе рождение. Она довольно широко применялась в 1960–1970-х годах, но в 1980-х ее использование почти прекратилось. Нынешнее возрождение можно объяснить состоянием рынка. Повысились требования к скорости выполнения заказов и появился спрос на изделия сложных форм из малораспространенных металлов. Расширилось использование субконтрактов со специализированными производителями, которых стало легко находить по Интернету. Программное обеспечение 3D CAD/CAM теперь позволяет более эффективно выполнять проекты, в которых предпочтительно использование ШВ.

Еще одной причиной возрождения технологий ШВ является применение современных методов анализа. Численное моделирование обеспечивает лучшее понимание влияния большого количества параметров процесса.

**Штамповка взрывом.** Известно много вариантов осуществления ШВ. Однако принцип их действия одинаков и заключается в следующем. Металлический лист укладывается на матрицу, полость в матрице вакуумируется, всю сборку помещают в водяной бассейн. Над листом размещают заряд взрывчатого вещества определенной конфигурации (рис. 1). Взрыв с высокой скоростью метает лист на матрицу\*.

Параметры процесса могут быть адаптированы к различным исходным формам обрабатываемого изделия, материалам и толщинам. Вариантами общей схемы могут быть, например, ШВ труб или конусов вместо листов.

Современные возможности ШВ позволяют изготавливать изделия из нержавеющей стали тол-

щиной 60 мм (для современного термоядерного реактора ITER), размером 10×2 м (для ядерной установки RES в Кадараше, Франция). Никель, титан и кобальтовые сплавы штамуются взрывом, например, для газовых турбин. Еще большие размеры и усложненные формы возможны при штамповке конструкций из сварных заготовок. ШВ успешно совмещается с такими способами сварки, как MIG (сварка металлическим электродом в инертном газе), TIG (сварка неплавящимся (вольфрамовым) электродом в инертном газе), лазерная, электронно-лучевая сварка, сварка трением с перемешиванием и сварка взрывом.

**Анализ деформаций.** При штамповке сложных форм различным элементам деформируемого металла соответствуют различные пути деформаций (рис. 2). Их конечные деформационные состояния соответствуют точкам с координатами  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  на плоскости диаграммы деформаций. Множество таких точек занимает на плоскости область деформационных состояний (ОДС). При применении ШВ важно знать границы той части ОДС, в которой деформирование не заканчивается разрушением или короблением материала — границы области штампуемости (ГОШ). Каждому материалу свойственна индивидуальная ГОШ.

ГОШ известны для материалов, широко применяемых в автостроении. Для материалов автостроения такие данные менее доступны. Дисперсионно упрочняемым сплавам алюминия присуща

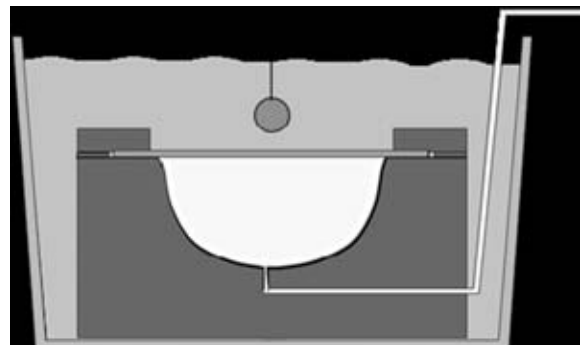


Рис. 1. Схема штамповки взрывом

\* Minors D. J., Zhang B. Applications and capabilities of explosive forming // J. Mater. Proc. Technol. — 2002. — № 125–126. — P. 1–25.

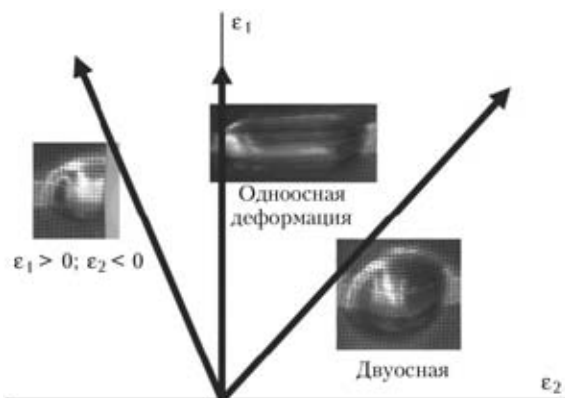


Рис. 2. Диаграмма деформаций с путями деформации для трех форм

высокая степень формуемости в условиях ШВ. Указанные обстоятельства заставляют развить метод определения области деформационных состояний и границ области штампуемости для ШВ.

**Численное моделирование.** Обычно для проектирования технологий ШВ используется моделирование модулем Hydroform программы Autoform. Гидроштамповка во многом напоминает ШВ, но отличается от нее малостью инерционных сил. Тем не менее приближение обычно дает хорошие результаты — предсказанные деформации удовлетворительно совпадают с реальными. Автор полагает, что это наиболее прямое и эффективное приближение. Моделирование с использованием программы Ansys/Autodyn применяется в особых случаях, когда необходимо принимать во внимание комплекс параметров процесса взрыва.

На рис. 3 изображено изделие сложной формы, успешно изготовленное на пределе допустимых деформаций в режиме, смоделированном на Autoform.

**Фотограмметрия.** Фотограмметрия — это метод определения деформаций металлического листа в условиях реальной штамповки. На лист, подлежащий штамповке, наносится равномерная сетка точек. При этом автором использован электрохимический метод нанесения, поскольку он эффективен и точки остаются заметными после термообработки. В процессе штамповки сетка точек искажается, что свидетельствует о деформации листа. Точки на поверхности образца фотографируются под различными углами цифровым фотоаппаратом и информация об их положении обчисляется программой Phast (рис. 4).

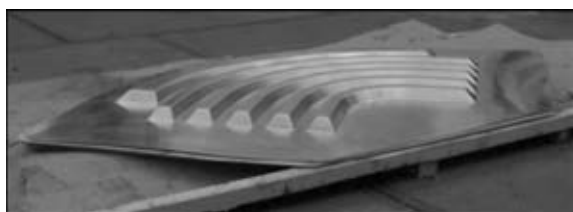


Рис. 3. Изделие длиной 2,5 м, изготовленное в режиме вблизи границы области штампуемости



Рис. 4. Изготовление цифровых снимков для фотограмметрического анализа

Вместе с образцом фотографируется маячок с кольцевыми штрих-кодами. Анализируются изображения штрих-кодов и определяется точное положение и угол зрения камеры при съемке каждого кадра, а также точки на каждом снимке и определяются их пространственные координаты. Затем по определенным таким образом пространственным смещениям центров точек рассчитываются деформации, утонение листа и т. д.

**Метод определения ГОШ для ШВ.** Характерная скорость деформаций при ШВ лежит в диапазоне  $10 \dots 100 \text{ с}^{-1}$ . Известно, что при этих скоростях деформации некоторые металлы становятся более пластичными. С учетом этого автор разработал метод определения ГОШ для практического использования при ШВ, который заключается в следующем. Листовой образец исследуемого материала размером  $250 \times 250 \text{ мм}$ , на котором нанесена сетка точек, подвергается штамповке в матрице с набором глубоких выемок различных форм, в которые лист может вытягиваться вплоть до разрушения. На рис. 5 изображен образец, подвергнутый такому испытанию.

Различным формам выемок соответствуют различные пути нагружения (см. рис. 2). Величина заряда взрывчатого вещества подбирается таким образом, что в трех выемках на срединной линии матрицы материал оказывается на грани разрушения. После нагружения образец подвергается фотограмметрическому анализу. В результате такого исследования определяется ОДС материала. На рис. 6 (см. с. 3 обложки) показана определенная таким образом ОДС алюминиевого сплава, где цвет точек несет информацию о конечном сос-

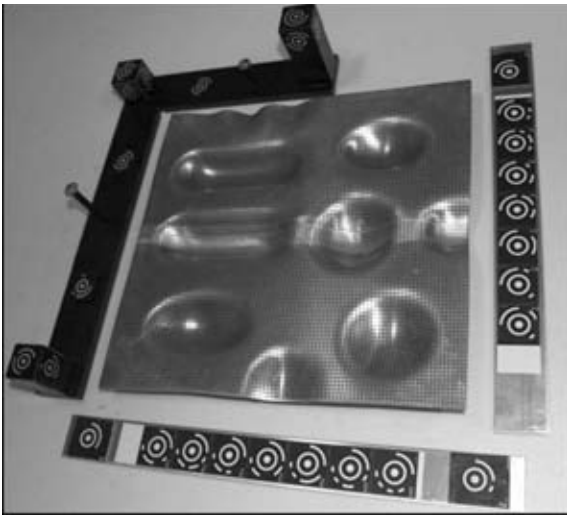


Рис. 5. Пробный образец с набором форм, представляющих различные пути деформации

тоянии материала, зеленая линия — ГОШ сплава, проведенные ниже точек, соответствующих началу разрушения (интенсивно оранжевые точки).

Этим методом можно также оценивать пластичность сварных конструкций. Образец на рис. 5 был изготовлен сваркой трением с перемешиванием фирмой «Aerobus» (Бремен, ФРГ). Материалом был также алюминиевый сплав 2219, и его ГОШ всего на 5 % ниже ГОШ исходного материала.

**Определение формы с помощью фотограмметрии.** Фотограмметрию можно также использовать и для определения пространственных форм по текстуре поверхности, что проиллюстрируем на примере художественной штамповки (барельеф) на металлических панелях фасада здания в Эйндховене (Нидерланды).



Рис. 7. Барельеф, выполненный в воске

На рис. 7 изображен барельеф, выполненный художником в воске. Эту фигуру следовало реализовать на более чем 100 металлических листах. Художник может вылепить из воска любую фигуру, но изготовить ее точную копию из листового металла — это совсем другое дело. Фигура очень сложна и возможность ее изготовления необходимо было проверить моделированием. Для моделирования ШВ необходима была электронная САД-копия фигуры, что было сделано следующим образом. Сначала поверхность фигуры окрасили в белый цвет и обрызгали черными чернилами. На барельеф поместили маячок и поверхность фотографировали с различных позиций. Согласно программе поверхность разбивается на прямоугольники заданной формы. Каждый прямоугольник имеет неповторимый черно-белый рисунок, который опознается на каждом снимке. Генерируются  $X$ - $Y$ - $Z$ -координаты каждого прямоугольника. Полученное множество точек используется для генерирования 3D-формы поверхности в САДе.

Теперь имеем САД-модель барельефа. Прежде чем приступить к моделированию, следует задать свойства материала. Можно использовать стандартный материал из имеющегося в программном архиве, но два обстоятельства делают выбор проблематичным. Во-первых, скорости деформирования будут значительно выше тех, которые использовались при испытаниях, проводившихся для составления архива. Во-вторых, пластичность материала меняется для каждой новой партии выпускаемых изделий, что вынуждает работать на пределе возможностей материала. Выход был найден — материал был приобретен у производителя, надежно обеспечивающего его высокую пластичность. ГОШ материала определяется по процедуре, описанной ранее, после чего приступили к моделированию.

Первая попытка моделирования показала, что есть высокий риск разрушения и выпучивания в некоторых местах барельефа. Проблема решается правкой формы фигуры с помощью САД, таким образом, чтобы художник оставался удовлетворенным. После чего из массивного металлического блока с помощью САД-САМ вырезается матрица требуемой формы и с ее помощью штампуются металлические листы. На рис. 8 показан пробный макет, установленный на боковой стороне конструкции. Затем были изготовлены и установлены на фасаде все панели.

**Проверка адекватности моделирования деформаций.** Художник настоял на том, что следует оценить внешний вид барельефа, прежде чем создавать большую дорогостоящую матрицу. Он создал маленькую модель, просканированную фотограмметрией и перенесенную в САМ по описанной выше процедуре. На поверхности чистой метал-



Рис. 8. Макет прототипа установлен на конструкции

лической плиты для пробной матрицы вытравлена сетка равномерно распределенных точек для сопоставления смоделированных деформаций с реальными. Проведен фотограмметрический анализ поверхности. Заметим, что не все точки были обнаружены вследствие отражения света от поверхности металла. Эту проблему можно было бы решить путем цифрового увеличения изображений, но решение потребовало бы слишком больших усилий. Сопоставление предсказанных моделированием деформаций и ОДС малого пробного образца и реальных деформаций и ОДС натурального пробного образца, определенных фотограмметрическим анализом, убеждает, что масштабное моделирование очень хорошо согласуется с результатами измерений на натурном образце.

**Контроль формы при последующих обработках.** Фотограмметрирование применяется также при определении формы с использованием штрих-кодов. Как уже отмечалось выше, используется маячок со штрих-кодами (см. рис. 4). Штрих-коды этого типа могут быть отпечатаны на стикере и наклеены на обмеряемую поверхность. На рис. 9 показан пример фотограмметрического измерения формы с использованием



Рис. 9. Определение формы отштампованной взрывом панели из нержавеющей стали толщиной 60 мм фотограмметрическим методом с использованием штрих-кодов

штрих-кодов на стикерах. Метод штрих-кодов имеет некоторые преимущества по сравнению с методом использования текстуры поверхности для генерации трехмерного облака точек. Для программного обеспечения обнаружить штрих-коды намного легче, чем поверхностную структуру. Каждый штрих-код имеет собственный номер, что делает возможным соотнести каждую точку трехмерного облака с точкой на поверхности образца. Это делает возможным сравнение формы изделия до и после, например, сварки или зачистки кромок.

Штрих-коды можно также вытравливать на рабочей поверхности с целью определения деформаций коробления после термообработки. В этом случае стикеры неприменимы (сгорают).

**Заключение.** Разработан метод определения границы области штампуемости на диаграмме деформаций при ШВ с использованием фотограмметрического анализа. Фотограмметрия применена для определения деформаций реального изделия и сопоставления их с результатами численного моделирования, а также метода текстуры (к сложным пространственным формам) и метода штрих-кодов (к менее сложным формам). Последний метод позволяет также определять изменения формы в результате других видов обработки (сварка, зачистка кромок и термообработка).

Explosive formed products are more and more commonly applied. The state-of-the art is rapidly extended towards new product groups. Material characterization and process control becomes more important for efficiently designing new explosive forming processes. A method was developed for determining the forming limits of metals in explosive forming. A test shape was designed with features that represents different strain paths in the Forming Limit Diagram. A regular dotted pattern is electrochemically etched on the sheet surface. Test plates are formed and analyzed using photogrammetry. The resulting Forming Limit Curve is used as an input for forming simulation software that works with a hydrostatic code. This approach provides a straightforward method for predicting the forming characteristics that come with a certain workpiece and it strongly enhances the design of new products that are to be formed by explosive forming. This approach is also applied for heat treated and for welded metals. The Forming Limit Diagrams of both the simulation and the photogrammetric analysis of a real explosive formed shape are compared for validation.

Поступила в редакцию 19.10.2009