

УДК 621.983.7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОДОЛЬНОГО ОБЖИМА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШАР-БАЛЛОНОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Марденгский Анатолий Алексеевич

Магистр 2 года,

кафедра «Технологии обработки материалов»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: М.А. Серезжин

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов»

Производство шар-баллонов для хранения сжатых газов является одной из критически важных задач аэрокосмической отрасли. Изделия данного типа представляют собой сварные конструкции, состоящие из двух полусферических днищ, к которым предъявляются высокие требования по геометрической точности, прочности и герметичности. Основным конструкционным материалом выступают титановые сплавы (BT1-0, BT6, BT23), обладающие уникальным сочетанием высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и работоспособности в широком диапазоне температур. Традиционные методы изготовления полусферических днищ, такие как объемная штамповка с последующей механической обработкой или многопроходная формовка, характеризуются низким коэффициентом использования материала (до 20 %), значительными трудозатратами и высокой энергоемкостью. Аддитивные технологии (электронно-лучевое наплавление) и ротационная вытяжка, демонстрируют высокую эффективность, но требуют сложного и дорогостоящего оборудования, что ограничивает их широкое промышленное внедрение.

В связи с этим значительный интерес представляет технология продольного обжима, которая позволяет формировать полусферические заготовки из предварительно вытянутых цилиндрических стаканчиков. Сущность процесса заключается в приложении осевого сжимающего усилия к заготовке, помещенной в полусферическую матрицу. В отличие от классической вытяжки, где преобладают растягивающие напряжения, продольный обжим реализует схему деформации сжатием с изгибом, что обеспечивает ряд ключевых преимуществ: высокий коэффициент использования материала (до 85 %), минимальное утонение стенки, отсутствие фланца.⁽¹⁾

Однако технологические возможности продольного обжима имеют фундаментальное ограничение, связанное с потерей устойчивости заготовки, которая проявляется в образовании гофр и продольных складок на боковой поверхности. Согласно теоретическим положениям, склонность к гофрообразованию определяется соотношением относительной толщины заготовки $S_D = D/S \cdot 100\%$ (D — наружный диаметр получаемой полусферической заготовки, S — толщина стенки заготовки) и коэффициентом трения в контакте между заготовкой и инструментом. Для оценки этих зависимостей применительно к титановым сплавам было выполнено компьютерное моделирование в программном комплексе PAM-STAMP, который широко используется для анализа процессов листовой штамповки и позволяет прогнозировать формообразование, утонение и появление дефектов.⁽²⁾ Моделирование проводилось для полусферической заготовки диаметром 70 мм из сплава BT1-0 при варьировании толщины заготовки от 0,5 до 1,0 мм (относительная толщина от 0,7 до 1,4) и коэффициента трения от 0,05 до 0,5. Результаты расчетов показали, что устойчивое

течение металла без потери устойчивости достигается при относительной толщине более 1,4 и низких значениях коэффициента трения. Полученные данные были подтверждены экспериментально: при продольном обжиме заготовок из BT1-0 без применения специальных технологических приемов на всех образцах наблюдалось образование гофр (рис. 1а) и неполное формирование полусферы, что подтверждает низкую эффективность классической схемы для тонкостенных титановых заготовок.

Для расширения технологических возможностей процесса предложено направление совершенствования, базирующееся на принципах теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), а именно — на замене жесткого силового воздействия гибким распределенным. Вместо традиционного металлического пуансона, создающего локальные контактные напряжения и провоцирующего потерю устойчивости, предлагается использовать упругий несжимаемый элемент, заполняющий внутреннюю полость заготовки-стаканчика. Физический принцип работы такого элемента заключается в перераспределении осевого усилия прессы в равномерное радиальное давление на внутреннюю поверхность заготовки, что приближает процесс к гидростатическому формованию и позволяет существенно снизить градиент напряжений. В качестве материала упругого элемента выбран силикон T-Flow 40, который сочетает достаточную твердость для деформирования титана с высокой эластичностью и стабильностью свойств. Дополнительно были выведены аналитические зависимости для расчета геометрических параметров инструмента, исходя из условия равенства внутренних объемов стаканчика и готовой полусферы, что обеспечивает полное формообразование без недоштамповки.



Рис. 1. Полусферические заготовки, полученные: а — продольным обжимом без силиконового вкладыша; б — продольным обжимом с силиконовым вкладышем

Экспериментальная проверка усовершенствованной технологии проводилась на гидравлическом прессе с использованием штамповой оснастки, адаптированной под силиконовый вкладыш-пуансон. В отличие от классического обжима, применение упругого элемента позволило получить качественные полусферические заготовки без признаков гофрообразования (рис. 1б) и с равномерным распределением толщины. Положительные результаты были достигнуты для всего исследованного диапазона относительных толщин $S_D=0,7...1,4$, что свидетельствует о значительном расширении технологических возможностей процесса. Таким образом, внедрение упругого несжимаемого элемента в схему продольного обжима является эффективным способом повышения устойчивости процесса и может быть рекомендовано для промышленного использования при изготовлении полусферических днищ из титановых сплавов для шар-баллонов и других ответственных изделий.

Литература

1. Агеев Н. П., Лобов В. А., Затеруха Е. В. Экспериментальное исследование процессов вытяжки и обжима: лаб. практикум //СПб.: Балт. гос. тех. ун. – 2013. – Т. 2013. – С. 49.
2. Лавриненко В. Ю., Чернов В. В., Серёжкин М. А. Моделирование технологических процессов восстановления деталей в машиностроении. – 2019.