

УДК 621.7.044

М.К. КНЯЗЕВ¹, О.В. МАНАНКОВ¹, Я.С. ЖОВНОВАТЮК¹, В. АСПИАСУ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²Технологический исследовательский центр «Лабейн», Испания

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ ЛИСТОВЫХ КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Выполнен теоретический анализ возможных пределов формообразования листовых деталей в форме полного (неусеченного) конуса в зависимости от угла при вершине для мало- и высокопластичных материалов. Представлены результаты опытов по электрогидроимпульсной штамповке конических деталей с применением конических вставок и без них. Выполнен сравнительный анализ результатов исследования с известными литературными данными. Намечены направления дальнейших исследований с целью совершенствования способов электрогидроимпульсной штамповки листовых конических деталей

коническая листовая деталь, формообразование, матрица, коническая вставка, импульсное нагружение, распределение давления, распределение утонений, разрыв, электрогидроимпульсная штамповка

Введение

Производство конических листовых деталей традиционным способом в инструментальных штампах требует большого количества пар «матрица-пуансон» или одного-двух штампов сложной конструкции. Альтернативными способами, позволяющими существенно снизить себестоимость листовых деталей в мелкосерийном производстве, являются импульсные способы [1, 2], в том числе способ электрогидроимпульсной штамповки (ЭГШ).

Анализ проблемы. Образование конической формы импульсным распределенным давлением уже в первый момент процесса характеризуется формированием конического кольцевого элемента, прилегающего к формозадающей поверхности матрицы за перетяжным радиусом. При наличии высокого импульсного давления на поверхности контакта развиваются силы трения большой величины. Кроме того, последующее деформирование конического кольцевого элемента требует приложения больших радиальных усилий для преодоления окружных сжимающих напряжений. Действие указанных явлений, а также сопротивление фланца, приводит к тому, что в процессах штамповки импульсным

нагружением практически не наблюдается вытяжка фланца. Поэтому формирование конической детали происходит в основном за счет растяжения провисающей (не контактирующей с матрицей) части заготовки. Это означает, что центральная часть заготовки становится все более тонкой в процессе формообразования вплоть до оформления вершины конуса. Поэтому разрывы заготовки чаще происходят именно в центральной части из-за недопустимо большого утонения.

На первом этапе предлагается оценить предельно возможный угол конической детали (полный, неусеченный конус), которую можно получить при условиях отсутствия разрывов, равномерного распределения толщины материала t_f по длине образующей, равенства объемов исходной заготовки (диска толщиной t_0 и диаметром D) и окончательной детали конической формы, без вытяжки фланца. В этом случае основным фактором, определяющим толщину стенки конечной детали, является угол при вершине конуса 2α (рис. 1). Здесь оценка предельно допустимого утонения выполнена по параметру «относительное уменьшение площади поперечного сечения» из условия равенства объемов начальной и конечной формы заготовки.

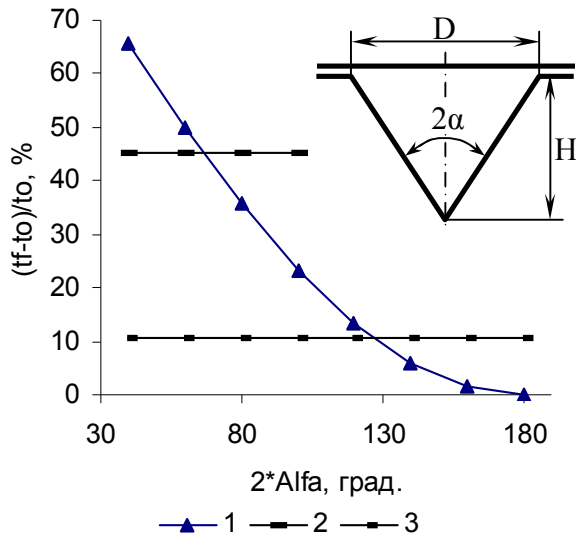


Рис. 1. Расчетная зависимость утонения стенки конической детали от угла при вершине 2α :
 1 – вдоль образующей конуса при условии равномерного распределения материала и отсутствия вытяжки фланца;
 2 – максимально допустимое утонение для высокопластичных материалов;
 3 – максимально допустимое утонение для малопластичных материалов

Как показали расчеты, при указанных допущениях можно отштамповать коническую деталь с минимальным углом при вершине $2\alpha \approx 67^\circ$ из высокопластичных материалов и $2\alpha \approx 128^\circ$ – из малопластичных материалов. Конечно, такой анализ не учитывает многих других факторов, действующих в условиях реальной штамповки. Однако он позволяет определить ориентировочные пределы формообразования конических деталей в зависимости от пластических свойств материала и угла конусности.

Для следующего приближения принято, что те кольцевые участки заготовки, которые последовательно принимают форму усеченного конуса и приходят в контакт с поверхностью матрицы, прекращают деформирование из-за действия описанных выше факторов (рис. 2). Диск площадью $A_{д,i-1}$ трансформируется в конический кольцевой элемент высотой Δh_i и диск общей площадью $A_{д,i}$. Такая постановка задачи отражает тот факт, что зона деформирования концентрируется в центральной части

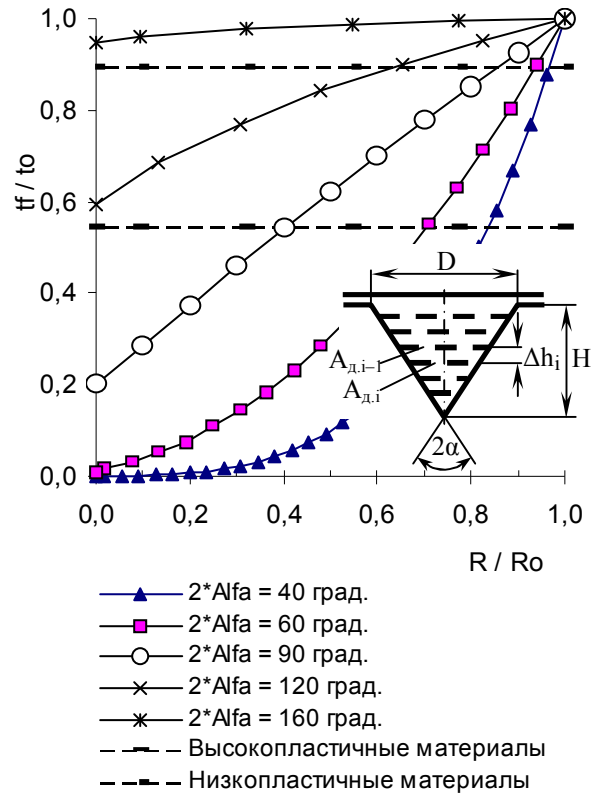


Рис. 2. Распределение относительной толщины стенки по радиусу конуса в зависимости от угла при вершине с учетом сил трения и отсутствия деформирования по поверхности контакта с матрицей

заготовки с постепенно уменьшающимся до нуля диаметром. Например, предельный угол конусности при изготовлении конических деталей из низкопластичных материалов составляет примерно 150° , из высокопластичных материалов – примерно 115° (для сравнения см. рис. 1). Для конической детали с углом при вершине $2\alpha = 90^\circ$ заготовка из низкопластичных материалов разорвется при проштамповке до относительного диаметра, равного 0,85, а из высокопластичных материалов – 0,4.

В реальных процессах импульсного формообразования центральная часть заготовки редко бывает плоской по форме. Чаще всего она представляет собой сегмент сферы или эллипсоида с максимальным утонением на вершине сегмента. Такое развитие процесса только ухудшает ситуацию и, поэтому, следует ожидать разрыва заготовки на более ранних стадиях.

Необходимо также учитывать, что при нагружении плоской ударной волной или волной с большим радиусом на начальной стадии деформирования заготовка от перетяжного ребра образует форму, близкую к конической с углом конусности $2\alpha \approx 90^\circ$. Это облегчает условия для вытяжки фланца (исключается трение о коническую поверхность матрицы), что обеспечивает дополнительный объем материала для формирования конической части деталей с углом при вершине $2\alpha < 90^\circ$.

Проведение экспериментов и анализ их результатов

С технологической точки зрения необходимо так организовать процесс формообразования конической детали, чтобы обеспечить равномерное распределение утонений вдоль образующей конуса, то есть максимально приблизиться к ситуации, представленной на рис. 1.

Управление полем нагружения заготовки. По результатам работы [1] известно, что при магнитоимпульсной штамповке осесимметричное поле нагружения, создаваемое плоским спиральным индуктором, имело провал в центральной зоне.

Поле давления с провалом в центральной зоне вызывает образование участка, имеющего кривизну, обратную конечной (центр выщелкивает в конечной стадии деформирования), а продольная пластическая волна, идущая от защемления у фланца, способствует появлению радиальной составляющей скорости перемещения частиц заготовки, направленной от оси заготовки, создавая повышенное утонение вблизи вершины конической детали. При ЭГШ, если максимальное давление расположено в центре заготовки, центральная ее часть получает на промежуточных стадиях деформирования большие прогибы и кривизну того же знака, что и конечная кривизна детали. Продольная пластическая волна в этом случае распространяется от центра к периферии и, следовательно, за фронтом волны образует

смещение элементов заготовки, имеющее радиальную составляющую, направленную к оси заготовки, то есть способствующее заполнению вершины конуса без дополнительного утонения. Указанные предположения о характере деформирования заготовки при ЭГШ проверены авторами работы [1] экспериментально при штамповке конических деталей с углом при вершине 60° и 90° и диаметром у основания 30 мм из заготовки толщиной 0,92 мм сплава АМГАМ.

В лаборатории ЭГШ ХАИ были проведены эксперименты, имеющие целью повторить полученные результаты, но для конических деталей с $2\alpha = 90^\circ$ и диаметром у основания 100 мм из заготовки толщиной 1,2 мм сплава АМЦАМ. Для экспериментов использовали оснастку (рис. 3), изготовленную по заказу Технологического исследовательского центра «Лабейн», с вакуумированием полости матрицы.

По результатам первой серии опытов не удалось получить деталь без разрывов (рис. 4), что примерно соответствует результатам анализа (см. рис. 2).

Поле давления, создаваемое представленной разрядной камерой, измеренное с помощью многоместного мембранного датчика, имело существенные отличия (рис. 5) от распределения давления, исполь-

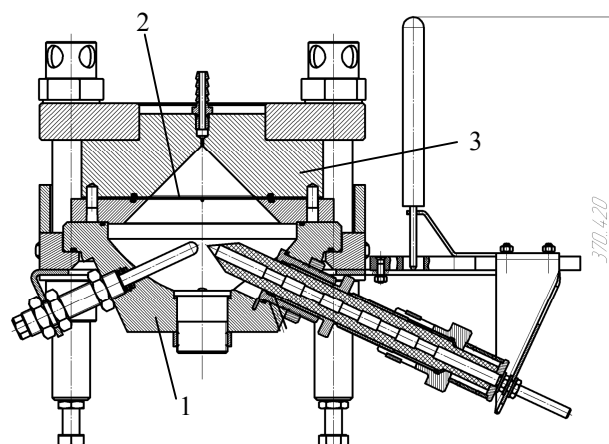


Рис. 3. Конструктивная схема технологического узла для осуществления электрогидравлической штамповки конических деталей:
1 – разрядная камера;
2 – заготовка; 3 – матрица

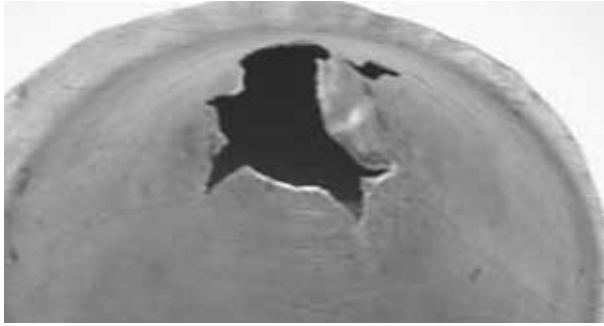


Рис. 4. Типовой разрыв заготовки при формообразовании конической детали электрогидроимпульсным способом

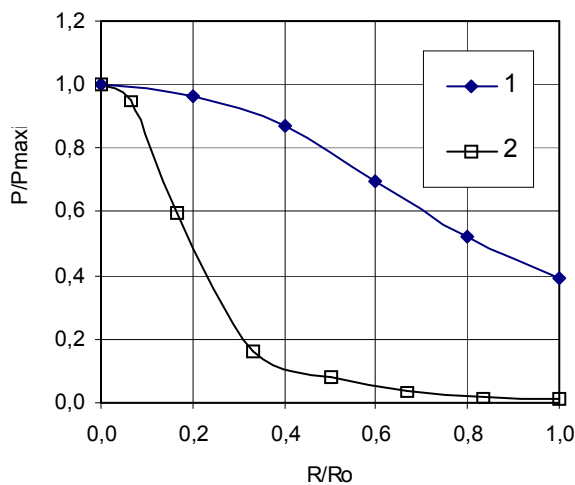


Рис. 5. Распределение давления:
1 – создаваемого разрядной камерой (см. рис. 3);
2 – по результатам работы [1]

зованного в работе [1]. Различия в полях нагружения обусловили различное распределение утонений в полученных заготовках для двух рассматриваемых случаев (рис. 6) и разрыв заготовки в ее центральной части в эксперименте ХАИ.

В первом случае градиент давлений по радиусу был недостаточно большой: разность давлений между центральной зоной заготовки и ее периферией составила 0,6. Во втором случае нагружению подверглась практически только центральная зона заготовки, ограниченная радиусом $R/R_o = 0,3$.

В эксперименте ХАИ периферийная часть заготовки с самого начала процесса деформирования была прижата высоким давлением к поверхности матрицы, что вызвало ее торможение и практически

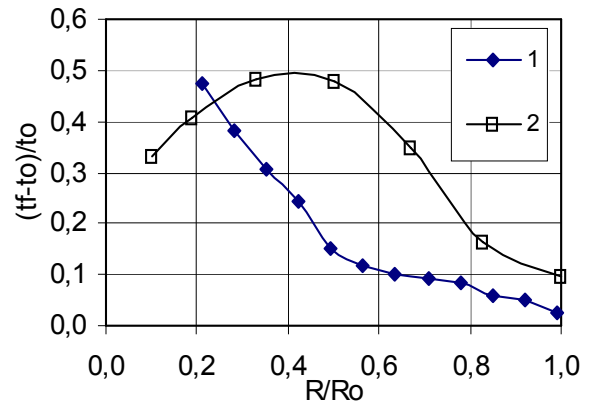


Рис. 6. Распределение утонений по радиусу конической детали:
1 – по результатам лаборатории ЭГШ ХАИ (см. рис. 4);
2 – по результатам работы [1]

вывело из процесса деформирования, а деформация утонения концентрировалась в быстро уменьшающейся провисающей центральной зоне заготовки (см. рис. 6, кривая 1), которая достигла критической величины (разрыва) при $R/R_o \approx 0,2$, что несколько отличается от результатов предыдущего анализа ($R/R_o = 0,4$, см. рис. 2). Такое различие обусловлено относительно небольшой вытяжкой фланца – примерно 7 мм на сторону. При этом отношение начального диаметра фланца к его конечному значению составило $D_{фо} / D_{фк} = 1,13$, а по результатам работы [1] – примерно 1,28.

Реализация технологии, предложенной в работе [1], для конусов диаметром 100 мм потребует применения кольцевого концентратора-отражателя, ограничивающего давление на периферии, и увеличения выделяемой энергии. Удельная энергия для формовки конуса в работе [1] составляла примерно 17 Дж/мм^3 , а в опытах ХАИ – $2,7 \text{ Дж/мм}^3$, при общей запасаемой энергии 25 кДж. Таким образом, необходимо увеличение величины запасаемой энергии до 160 кДж. Это приведет к значительному удорожанию электрогидроимпульсного оборудования, что не всегда экономически оправдано.

Использование дополнительной технологической оснастки. В работе [2] рассматриваются

импульсные способы изготовления листовых деталей в форме усеченного конуса. Для деталей с относительной высотой $H/D = (0,25...0,45)$ и углом $2\alpha > (80...130)^\circ$ рассматриваются четыре технологических способа: 1) оптимизация внешней нагрузки, условий прижатия фланца, его смазки; 2) применение дополнительной оснастки для максимального использования пластических свойств периферийной части заготовки; 3) увеличение поверхности (гофрирование) в неприжатой зоне заготовки за счет утонения ее периферийной части; 4) штамповка из полуфабриката с формой близкой к конической.

Последние три способа предполагают использование специальных технологических приемов и дополнительной оснастки, которая по габаритам и трудоемкости изготовления приближается к основной оснастке.

Авторы данной работы предложили использовать специальные конические вставки (рис. 7), которые последовательно в процессе штамповки помещаются в полость матрицы. Предполагалось, что вставки позволят ограничить деформацию утонения в центральной зоне заготовки за счет сил трения по поверхности контакта заготовки и выступающей части вставок, исключить контакт периферийной части заготовки с матрицей и, тем самым, создать условия для преимущественного деформирования периферийной части заготовки.

Опытную штамповку выполняли с тремя разрядами при относительно низком уровне выделяемой энергии (5 кДж) при каждом разряде. Использование вставок позволило существенно улучшить распределение утонений и получить детали с малым радиусом вершины (рис. 8). Так утонение величиной 0,1 достигается на периферийной части заготовки уже на радиусе $R/R_0 = 0,83$ (рис. 9) по сравнению со штамповкой без вставок – $R/R_0 = 0,62$ (см. рис. 6). При этом величина вытяжки фланца получилась той же, что и в случае штамповки без вставок

При использовании двух вставок удалось изготовить деталь без разрывов с радиусом вершины кону-

са примерно 5 мм. Попытки продолжить штамповку с целью уменьшения радиуса вершины приводили к разрывам заготовки по радиусу, соответствующему



Рис. 7. Вставки, примененные для формообразования конических деталей: справа – на начальном этапе; слева – на промежуточном этапе

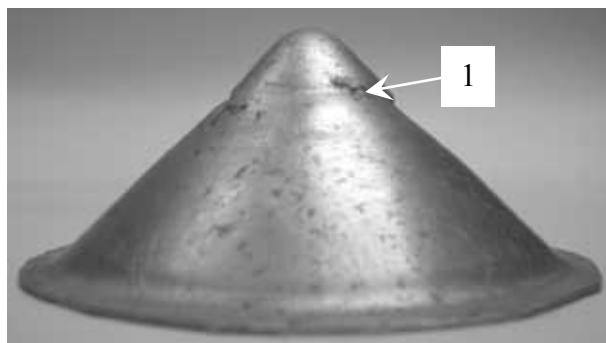


Рис. 8. Образец конической детали ($2\alpha = 90^\circ$, $D = 100$ мм), отштампованной электрогидроимпульсным способом с применением двух конических вставок: 1 – место возможного разрыва

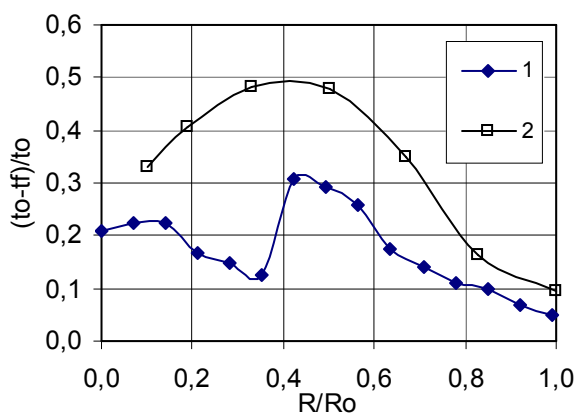


Рис. 9. Распределение утонений по радиусу конической детали: 1 – с применением двух вставок; 2 – по результатам работы [1]

расположению цилиндрического пояска второй (меньшей) вставки. В местах перегиба заготовки, соответствующих цилиндрическим пояскам вставок, наблюдаются повышенные утонения при $R/R_o \approx 0,15$ и $R/R_o \approx 0,45$ (рис. 9) из-за наличия ступеньки.

В дальнейшем рекомендуется использовать вставки с профилированной формой, обеспечивающих плавное (не ступенчатое) сопряжение с поверхностью матрицы. Также, необходимо увеличить число вставок, чтобы сделать распределение утонений еще более равномерным и обеспечить выполнение наружного радиуса вершины, равным исходной толщине листового материала.

Использование других технологических приемов. В работе [1] для изготовления конусов с $2\alpha = 60^\circ$ были апробированы вставки плоской формы, которые опирались на коническую поверхность матрицы. Для промышленного использования можно рекомендовать большее количество плоских вставок по сравнению с количеством конических вставок. При этом необходимо выдерживать соотношение между диаметром вставки D_{ei} и ее толщиной h_{ei} (глубиной промежуточной проштамповки) примерно одинаковое для выбранного числа вставок. Для определения оптимального соотношения h_e / D_e необходимо провести отдельное исследование.

Еще одним технологическим приемом может быть штамповка на пуансон с применением пакета колец, с помощью которых постепенно увеличивают глубину детали. Здесь сложность состоит в возможной потере устойчивости заготовки при обжиме на пуансон. Поэтому необходимо провести исследование влияния таких параметров как толщина листовая заготовки, диаметр пуансона, глубина промежуточной проштамповки и угол при вершине, чтобы определить допустимые соотношения этих параметров с целью получения качественных изделий.

Заключение

Проведенные исследования позволили предложить относительно недорогие способы совершенствования технологии электрогидроимпульсной штамповки. Применение конических вставок в достаточном количестве позволяет вовлечь фланцевую часть заготовки в область деформирования и получить более равномерное распределение толщины заготовки вдоль образующей конуса и за счет этого добиться изготовления качественных изделий. При этом количество энергии, затраченной на изготовление конуса с диаметром у основания 100 мм, оказалось примерно равным количеству энергии, затраченной для конической детали с диаметром у основания 30 мм.

Намечены направления дальнейших исследований: оптимизация поля нагружения заготовки, оптимизация профиля конических вставок и их количества, применение плоских вставок, использование схемы штамповки на пуансон.

Литература

1. Попов Е.А., Дубинин В.В., Легчилин А.И. Импульсная штамповка тонкостенных конических деталей // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 12. – С. 11-13.
2. Зорик В.Я., Пирогов Л.А., Тараненко М.Е. Технология получения конических деталей импульсными нагрузками // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: Держ. аерокосмічний ун-т «ХАІ», 1999. – Вип. 14. – С. 59-63.

Поступила в редакцию 31.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Соловей, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.