
УДК 621.7.044

С.И. Молодых, А.Г. Нарыжный

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Украина*

ПРАВКА ВЗРЫВОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

Рассмотрен процесс косоугольного столкновения заготовки с криволинейной поверхностью матрицы, присущий всем динамическим процессам листовой штамповки. Математическое моделирование подтверждает механизм правки-прокатки и приближения заготовки к форме матрицы. Разработаны типовые технологические процессы для трех классов деталей – оболочек двойной кривизны, желобов и емкостей. Обоснованы преимущества безбассейновых схем штампования правкой энергией взрыва. Технология апробирована на типовых промышленных деталях.

технология, деформирование, динамическая правка, косой удар, матрица, кривизна, точность, пружинение, расчет, обобщенная деталь, область применения, машиностроение, авиа и ракетостроение

Области рационального применения импульсных методов обработки листа достаточно четко определены [1], хотя и зависят от местных условий конкретного предприятия. Учитывая глобальные тенденции развития технологии машиностроения [2], авторы обратили свое внимание на проблемы получения точных оболочек двойной кривизны. Более половины объема всех деталей занимают штампованные и штампованные детали. Их доля в производстве увеличивается, что объясняется высокой весовой отдачей, производительностью процессов штамповки, стабильностью качества и размеров деталей, малой долей ручного труда, высоким коэффициентом использования материала, и как следствие этого низкой себестоимостью продукта [2]. Поэтому все работы и усилия направленные на разработку новых методов, совершенствование существующих методов обработки листового металла давлением методом штамповки не напрасны и способствуют совершенствованию всего машиностроения.

Однако, производство маложестких, точных оболочек связано с большими трудностями и, несмотря на очевидные преимущества перед другими методами обработки металлов, прессовая штамповка имеет сущест-

венные недостатки и ограничения, которые нередко отрицают сам принцип обработки металла давлением.

Основной недостаток это высокая стоимость оборудования - прессов, большой срок окупаемости капитальных затрат, сложность наладки и обслуживания, требование высокой квалификации рабочих и, особенно, наладчиков, дороговизна технологического оснащения [3].

Ну и, конечно, чисто технологические ограничения прессов – ограниченные давления и габариты изделий, вертикальное направление нагрузки, если не применять дорогостоящий жидко-эластичный пуансон.

Оболочки двойной кривизны (рис. 1) можно классифицировать по знаку Гауссовой кривизны и соотношению величин радиусов кривизны. Тогда они разделяются на два класса – обшивки и желоба не только конструктивно, но

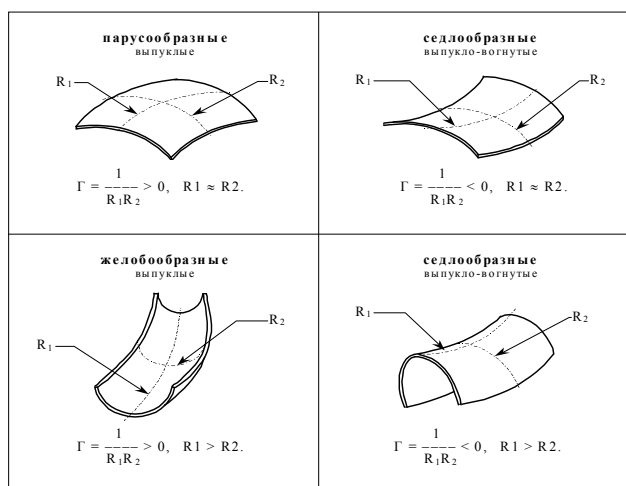


Рис. 1. Классификатор оболочек двойной кривизны

и технологически.

Существуют два основных прессовых метода изготовления крупногабаритных оболочек: мелкое технологическое членение с штамповкой частей на большом количестве дорогостоящей оснастки и последующую сборку их в стапеле со сваркой и ручной рихтовкой для устранения поволоков.

Другой метод последовательных нажатий с постепенным приданием заготовке требуемой формы и контролем процесса шаблонами. Методы трудоемки и не позволяют достичь высокого качества поверхности и точности.

Более перспективна по большинству показателей качества импульсная обработка металлов взрывом (ИОМД). Этим методом освоены все процессы формовка, вытяжка, растяжка, однако, в основном они повторяют прессовые схемы и методы деформирования. Поэтому ИОМД имеет почти

те же и ограничения по формам и предельной штампуемости, что и пресовая штамповка. В результате область эффективного применения этого ресурсосберегающего метода неоправданно сужается, имея дополнительные ограничения по производительности и совместимости с традиционным производством. Известны такие недостатки, как необходимость вакуумирования матриц, многoperеходность при больших деформациях, малая прочность оснастки при высокой ее стоимости.

Корни многих из перечисленных проблем лежат в копировании принципиальных схем штамповки на прессах без учета особенностей динамики деформирования, а именно не точном, упрощенном представлении финальной фазы динамического деформирования и теоретического его описания, пренебрежением некоторыми факторами, считавшихся второстепенными. Известные модели рассматривают весь процесс штамповки интегрально, энергетически, и лишь до момента касания матрицы с нулевой скоростью заготовки [4], опуская при этом самый сложный процесс взаимодействия матрицы с быстролетящей заготовкой. Отдельные попытки исследования соударения ограничивались плоским его вариантом и носили качественный характер, поскольку такая постановка вопроса не давала удовлетворительного объяснения многим наблюдаемым явлениям, таким, например, как нагрев, аномальная потеря пластичности, уменьшенная величина пружинения [5].

Процесс косоугольного соударения подробно рассматривался в Новосибирском институте гидродинамики, но лишь в гидродинамической постановке, применительно к задаче сварки взрывом. При этом пренебрегали силами сопротивления металла, что было оправдано при сварочных режимах нагружения – скоростях несколько сотен метров в секунду, и давлениях сотни килобар. Естественно, конечные формы изделий-полуфабрикатов в этом случае не рассматривались, и не были управляемым технологическим параметром.

Между тем, авторы утверждают, что при реальных скоростях штамповки взрывом листовых металлов (от 40 до 250 м/с) прочность металла вносит существенный вклад в формообразование. Эффект косоугольного соударения значительно меняет характер и результат соударения. Плоская, одновременная модель встречи с матрицей имеет отношение только к особым

формам деталей, либо к тем точкам поверхности деформируемой заготовки, которые случайно оказались параллельными формирующей поверхности матрицы в момент завершения движения (купол сферы, ребра жесткости). Причиной этого является несовпадение формы движения заготовки при динамической штамповке с формой матрицы. [6], и мало зависит от условий нагружения. Это означает, что только когда формы движения детали совпадают с формой матрицы, возможен режим плоского соударения. Во всех остальных 99% случаях соударение происходит под углом, по линии движущейся к середине детали. Такое косоугольное соударение присутствует в разной мере абсолютно во всех динамических процессах листовой штамповки и сильно влияет на его результаты. Оно сопровождается комплексом сложных и малоизученных явлений. Значительные сдвиговые и контактные напряжения вызывают существенное изменение размеров и формы деталей, потерю пластичности и устойчивости, упрочнение и разупрочнение металла, перераспределение напряжений и пружинение.

Цель нашего исследования – существенно расширить области эффективного применения импульсной обработки листовых металлов давлением взрыва, повысить технологические возможности производства при снижении затрат и повышении качества разнообразных сложных и крупногабаритных оболочек двойной кривизны повышенной точности из высокопрочных сплавов. Эта цель достигнута благодаря изучению эффекта косоугольного соударения заготовок с матрицей при формоизменении и создании системы технологий, в которых параметрами удара управляют (используют при положительном его воздействии и устраняют или уменьшают эффект при отрицательном влиянии его на процесс формоизменения).

Рассмотрим процесс косоугольного соударения заготовки с криволинейной по-

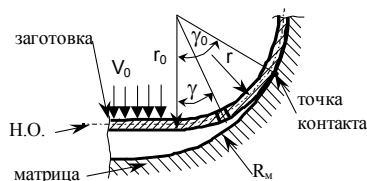


Рис. 2. Расчетная схема зоны складки

натекании листовой заготовки на матрицу со скоростью V_0 . Здесь возник-

верхностью матрицы в досварочном режиме, свойственный всем динамическим процессам листовой штамповки. На рис. 2 представлена расчетная схема зоны складки при

кают особые, не описанные ранее, условия со сдвиговыми, растягивающими, изгибающими и контактными напряжениями, приводящие к смещению металла вместе со складкой и повторному нагружению при распрямлении складки о матрицу. Поле проекций скоростей, полученное из решения уравнений неразрывности и граничных условий, имеет вид:

$$V_r = V_0 \left(1 - \frac{\cos \gamma}{r/r_0} \right) \left(1 - \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} \right); \quad (1)$$

$$V_\gamma = V_0 \left[\gamma \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} + V_{\gamma r} \right] = V_0 \left[\gamma \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} + \ln \frac{r}{r_0} \right].$$

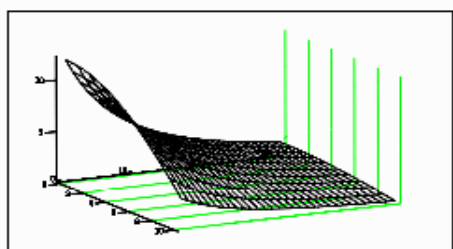


Рис. 3. Поле скоростей в зоне

График этих зависимостей представлен на рис. 3. Интенсивность деформаций получаем из известных формул и полученного поля скоростей. Конечные уравнения для интенсивности деформаций в зоне складки дают распределение деформаций, изображенное на рис. 4.

Как видно из графика, деформации возрастают к точке контакта, достигая предельных значений на внешней стороне складки. Четко виден вклад изгибных составляющих по толщине заготовки в общую картину деформаций. Интенсивность здесь изображена без учета общего растяжения характерного для бесприжимной штамповки – правки линейчатых полуфабрикатов. Найденное поле скоростей деформаций не может быть реализовано во всем диапазоне переменных, поскольку процесс идет в пластической области и реальные значения деформаций не могут превысить значения предела физического закона $\sigma - \epsilon$. Ограничения накладываем услови-

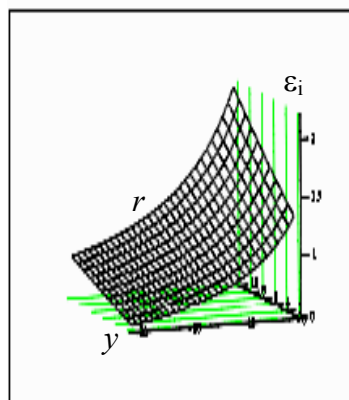


Рис. 4. Распределение интенсивности

ем пластичности Мизеса для линейного упрочнения совместно с уравнениями равновесия.

Используя последние с учетом сил инерции в правой части, как движущих сил, можно записать замкнутую систему дифференциальных уравнений, решение которой, однако, получается только численным методом, из которого нельзя извлечь зависимости необходимые для изучения технологических закономерностей.

Для решения неоднородного уравнения равновесия с правой частью найдем неизвестные касательные напряжения из принципа Даламбера: $\sum F_r = 0$, для фрагмента складки dm толщиной h (рис. 2) в соответствии с найденным полем скоростей.

$$h \cdot d\tau = \frac{dV_r}{dt} \cdot d\bar{m} \quad (2)$$

Считаем процесс установившимся во времени, когда динамика описывается скоростью характерной точки $dt = \frac{r}{V_\gamma} \cdot d\gamma$ в подвижной системе координат, связанной со складкой.

После подстановок, интегрирования и приведения подобных с использованием граничных условий, получим формулу для вычисления касательных напряжений сдвига, являющихся важнейшими для рассматриваемого процесса.

$$\tau_{r\gamma} = \rho V_0^2 \cdot \aleph_0 \cos \gamma \cdot \left[\left(\frac{1}{\bar{r}} + \frac{1}{1 \pm h/2r_0} \right) \left(1 + \gamma \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} \right) + \ln \frac{\bar{r}}{1 \pm h/2r_0} \right], \quad (3)$$

где $\aleph_0 = 1 - \sin y / y_0$ – константа, зависящая о геометрии матрицы; $\bar{r} = r / r_0$ – относительный радиус кривизны складки.

Зная одно из напряжений, можем найти его частные производные, входящие в уравнение равновесия. Следовательно, комбинация касательных напряжений и их частных производных, входящая в систему может быть определена.

Второе уравнение равновесия позволяет найти нормальные напряжения, которые получим после интегрирования и преобразований: При отсутствии общего растяжения нейтральной оси, когда нет прижима, гра-

нические условия $\sigma_y = 0$ при $y = 0$, дают константу $C_y = 0$, которая характеризует наличие прижима.

При малых углах соударения имеем упрощенную формулу напряжений вдоль образующей:

$$\sigma_\gamma = \frac{V_0^2 \rho}{\bar{r}} \left[\gamma \ln \bar{r} + \frac{\gamma^2}{2} \cdot \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} \right]. \quad (4)$$

Интегрирование выражения для σ_r весьма затруднительно, учитывая громоздкое выражение для ε_i и τ (3). Поэтому на первом этапе предлагается воспользоваться условием пластичности для линейного упрочнения, и зная σ_γ (4), получить σ_r прямой подстановкой без решения уравнения равновесия, а затем сравнить численные решения с полученными:

$$\sigma_r = \sigma_\gamma - \sqrt{2} \sqrt{(\sigma_{02} + \Pi \varepsilon_i)^2 - 3\tau_{r\gamma}^2}. \quad (5)$$

Таким образом, есть все компоненты интенсивности напряжений, которое можем найти по формуле (6) для цилиндрической системы координат при осевой симметрии

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\gamma^2 - \sigma_r \sigma_\gamma + 3\tau_{r\gamma}^2}. \quad (6)$$

При касании матрицы заготовка останавливается ударом со скоростью $V_r = V_0 \cdot \cos \gamma_0$, возникают контактные напряжения, которые исследованы и описаны [6]:

$$\sigma_{rk} = -\frac{2P \cos \theta}{\pi R}, \quad (7)$$

($P = \rho V_r C$) с началом координат в точке касания. Перенесем начало в центр изгиба складки $R_k = R^1 - r_0$.

Поле деформаций в точке контакта

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial R} = \left(-\frac{2\rho \cos \theta}{\pi R} - \sigma_{02} \right) \frac{1}{\Pi}. \quad (8)$$

После интегрирования получим поле перемещений в точке контакта

$$U = \frac{2P \cos \theta}{\pi \Pi} \ln R - \frac{\sigma_{02}}{\Pi} R = \frac{2SV_r C \cos \theta}{\pi \Pi} \ln R - \frac{\sigma_{02}}{\Pi} R \quad (9)$$

В точке контакта меняется НДС заготовки (рис. 5), и в условие пластичности добавляются напряжения сжатия σ_r , увеличивая интенсивность

напряжений σ_i .

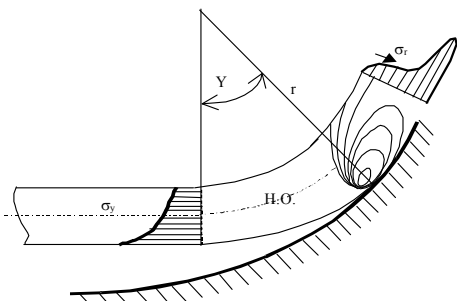


Рис. 5. Напряжения и изобары при штамповке правкой

Учитывая, что величина σ_{rk} достигает больших значений, превышающих все остальные компоненты напряжений, главными напряжениями становятся радиальные, определяемые взаимодействием с матрицей и благодаря этому заготовка дублирует ее форму.

Формула, описывающая контактные напряжения сжатия после достижения пластичности:

$$\sigma_{Rk} = - \frac{2V_0 \cos \theta \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{1/\rho \cdot d\sigma/d\varepsilon}}{\pi R}, \quad (10)$$

где: θ и R – угол и расстояние, определяемое из точки контакта до рассматриваемой точки; γ – угол между матрицей и направлением исходного движения заготовки; $d\sigma/d\varepsilon$ можно заменить касательным модулем пластичности.

Математическое численное моделирование (рис. 6) подтвердило механизм прокатки и приближение заготовки к форме матрицы – эффект правки при определенной, оптимальной скорости в диапазоне 120-180 м/с.

Иные методы визуализации не позволяют наблюдать описываемый эффект. Экспериментально установлено, что при дальнейшем увеличении скорости точность падает из-за упругого отскока, нарушающего точное повторение формы матрицы.

Разработаны типовые технологические процессы, методики их расчета и проектирования для трех типовых деталей – оболочек двойной кривизны повышенной точности класса пологих обшивок, незамкнутых желобов и емкостей. Полнота описания обеспечивается многоуровневой структуризацией элементов техпроцесса, начиная с верхнего уровня – принципи

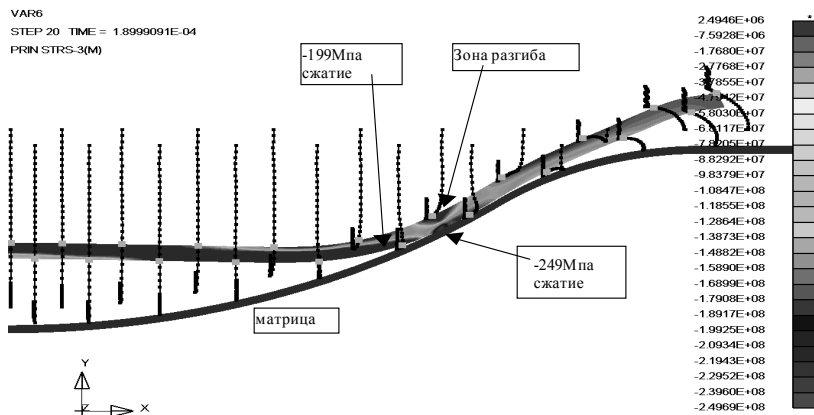
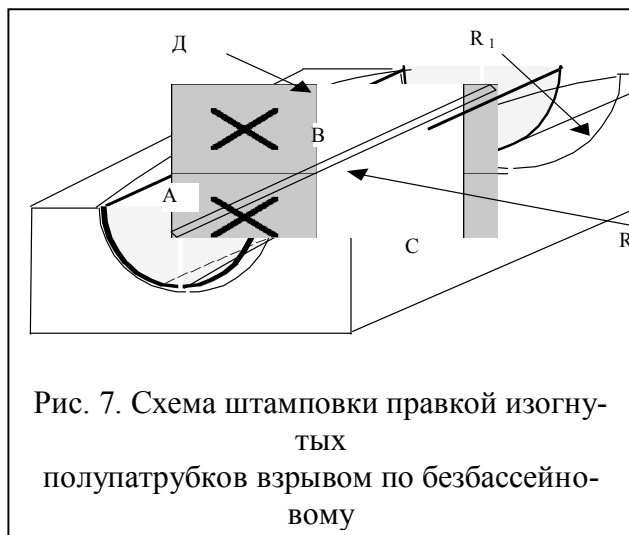


Рис. 6. Наибольшие сжимающие напряжения в заготовке из АмГЗ, 4мм

альной схемы обработки, технологического маршрута ТМ и заканчивая операционной технологией.

Предложена безбассейновая схема штамповки правкой энергией взрыва



как лучшая по сравнению с традиционной штамповкой в бассейнах для рассматриваемого класса деталей (рис. 7).

Во-первых, схема позволяет не перемещать крупногабаритные матрицы внутри технологического цикла, а пользоваться стационарным или подвижным защитно-технологическим оборудо-

ванием типа броням [8] или бронекамер [9]. Это оборудование в 2-10 раз дешевле и менее сейсмично по сравнению с бассейнами [10]. Во-вторых, герметизация внутри штамповой полости не обязательна. Передающая среда заключена в полиэтиленовом мешке или в полости полуфабриката. А благодаря открытости полости матрицы и малым объемом воздуха между заготовкой и матрицей отпадает необходимость вакууми-

рования (рис. 6). Этому же способствует волнообразный, складчатый характер перемещения заготовки по поверхности матрицы и «выжимание» воздуха в сторону открытых краев детали. Такая схема позволяет отойти от традиционной прессовой схемы нагружения динамическим гидроэластичным пуансоном и расширить возможности по габаритам и формам заготовок и деталей до невообразимо сложных. Например, vacuum-vessel для реакторов термоядерного синтеза. Заготовка в новой схеме не обязательно должна прилегать к матрице по всему контуру фланца. Достаточно трех фиксирующих точек прижима для крепления – позиционирования заготовки на штампе. Заготовка в новой схеме может быть максимально приближена к матрице, имея форму многогранного, пространственного полуфабриката (рис. 7).

Малые перемещения требуют в несколько раз меньших деформаций. Следовательно, и энергии для деформации потребуется меньше в несколько раз, а значит, число переходов приблизится к единице, нагрузка на окружающую среду снизится, стойкость оснастки увеличится.

Кроме того, получение деталей при меньших деформациях позволяет уменьшить пружинение после снятия нагрузки, а значит увеличить точность, либо уменьшить коррекцию оснастки. Также снизив деформации, мы можем успешно штамповать детали из малопластичных сплавов бора, ниобиевых, титановых (BT-5; BT-20); МА-8; САП, из металлокерамических композиций и порошков. Этот процесс может стать единственно возможным методом штамповки ответственных деталей из таких материалов, поскольку только в динамике (при взрыве) возникает эффект динамической прокатки поперечным сдвигом – изгибом с помощью волны – складки. Повышается также устойчивость процесса, поскольку малые перемещения приводят к уменьшению времени деформирования, в течении которого заготовка не успевает изменить свое положение относительно штампа. Каждая часть детали деформируется автономно без взаимного влияния на другие части. Это способствует стабильности и устойчивости процесса. Некоторое повышение трудоемкости изготовления заготовки компенсируется снижением трудоемкости процесса штамповки и расширенными возможностями.

Допустимы три различных варианта принципиальных схем: типовые

для безбассейновой штамповки правки – прокаткой по трем типам штампуемых деталей: из плоской заготовки, пространственной вальцованной полуцилиндрической, и из многогранной заготовки. Преимущества новых решений заключаются в меньшей энергоемкости процесса, повышенной точности, сокращении затрат, расширении технологических возможностей по габаритам, повышении прочности и снижении потребной пластичности обрабатываемых металлов.

Авторами найдены методы управления процессом, разработаны методики расчета технологии и определены пределы ее применимости.

Поскольку устраняются проблемы существующих технологий: штамповки крупногабаритных деталей, разработка имеет два принципиальных выхода. Модернизация, улучшение ранее созданных процессов (вытяжки, формовки, растяжки и т.д.) для малопластичных сплавов, а также создание новой технологии правки, которая охватывает два класса деталей.

В качестве примера для апробации метода были выбраны типовые промышленные детали – обшивки ротора и статора обогатительной центрифуги с радиусом кривизны 11 метров (рис. 8), камеры термоядерных установок стеллораторного типа (рис. 9), и полусферические ёмкости.

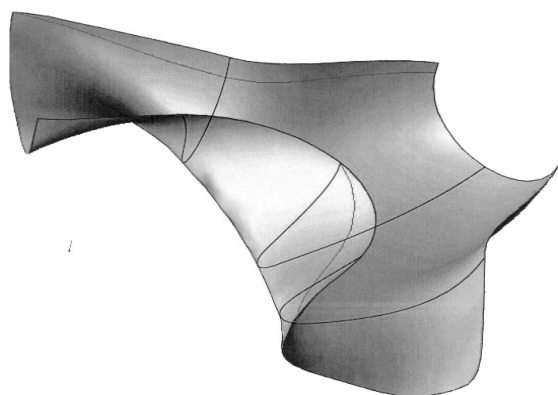


Рис. 9. Типовой фрагмент вакуумной камеры «Стеллоратора», заготовка для которого состоит из 4-х элементар-

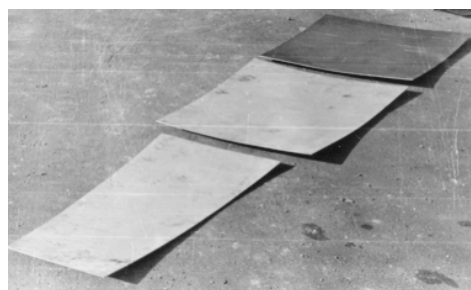


Рис. 8. Лепестки двойной кривизны малого прогиба, $R_{кр} = 11$ м

Класс обшивок двойной кривизны с малым прогибом охватывает также такие детали как параболические антенны и их фрагменты, элементы корпусов судов, ракет и крыш). Проблема получения таких деталей состоит в том,

что величина упругого пружинения при статической штамповке лепестков больше потребной геометрической деформации. Это означает, что все деформации будут упругие, и форма заготовки остается плоской. Только благодаря динамической правке с локальной складкой при косом соударении удалось получить такую пологую форму обшивки.

Класс изогнутых коробов или желобов включает полуторы и их фрагменты, пустотелые лопатки ГТД, камеры термоядерного синтеза (рис. 8), пилоны ЛЭП (рис. 10).

Разработана и апробирована конструкция упрощенной крупногабаритной оснастки для промышленной реализации технологии правки взрывом пространственных оболочек двойной кривизны для мачт линий электропередачи. Толщина стенки предварительно изогнутой заготовки составляет от 10 до 20 мм, поэтому формообразующая поверхность образована прямоугольными прутками, опирающимися на поперечные шпангоуты, подкрепленные бетоноподобным наполнителем 3.

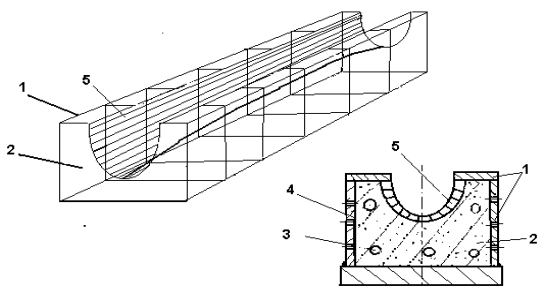


Рис. 11. Упрощенная матрица для штамповки правкой изогнутых желобов ЛЭП

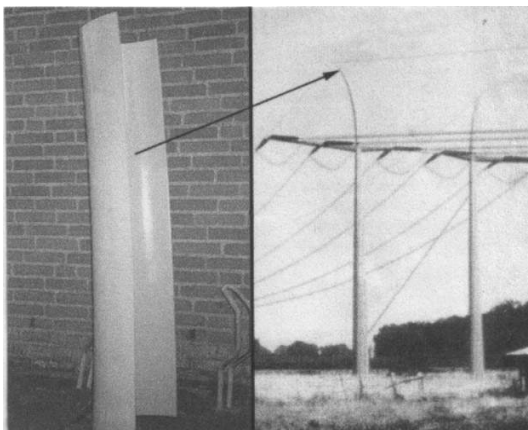


Рис. 10. Концевой фрагмент полумачты евро-ЛЭП, длиной 1,5 м., имеющий каплеобразное сечение

Перспектива коммерческого применения этого ресурсосберегающего метода в энергетике, судостроении, средствах связи, строительстве и архитектуре.

Развитие получают также работы по созданию термоядерных установок – стеллараторов для национальных и международных токамаков (ITER) проектов.

Литература

1. Молодых С.И. Технологические аспекты импульсной штамповки // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: ХАІ, 1999. – Вип. 14. – С. 68-71.
2. Борисевич В.К., Молодых С.И. Количественный анализ областей эффективного применения импульсных методов штамповки.// *Технологические системы*. – 2002. – С. 23-28.
3. Романовский Р.В. Справочник по холодной штамповке. – М. Машиностроение, 1990. – 385 с.
4. Борисевич В.К. Разработка научных основ проектирования оптимальных технологических процессов листовой штамповки взрывом деталей летательных аппаратов и двигателей: Дис... д-р. техн. наук. – Х. ХАИ, 2761979. – 409 с.
5. Сборник технологических материалов «Организация производства обработки металлов взрывом». – М.: НИАТ, 1969. – 224 с.
6. Штамповка взрывом / М.А. Анучин, О.Д. Антоненко, Ю.П. Жбанков и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 410 с.
7. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судостроение, 1967. – 384 с.
8. Броняма для штамповки взрывом / Ю.В. Яковлев, А.А. Губский, В.И. Шалыгин и др. // *Использование энергии взрыва в машиностроении*. – К.: НИИНТИ, 1967. – С. 74-78.
9. Пихтовников Р.В. Некоторые пути развития штамповки взрывом // *Сб. ИОМД*. – Х.:, 1970. – № 2. – С. 5-9.
10. Исследование параметров сейсмических колебаний грунта и напряжений элементов конструкций при взрывной штамповке: Отчет о НИР / МинВуз СССР, ХАИ, 1979 №Б803071. – 149 с.

Поступила в редакцию 10.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.