

УДК 621.771.013

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И ЛИСТА НА КАЧЕСТВО ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ДОГИБКЕ КРОМОК

В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин

Предложен и обоснован способ улучшения геометрических характеристик труб большого диаметра получаемых способом вальцевой формовки.

Ключевые слова: формовка, калибровка, геометрия периметра, крутящий момент.

В практике современного производства прямошовных труб большого диаметра формовку основного периметра заготовки перед сваркой осуществляют на гибочных прессах шаговой формовки (ЖОЕ) либо в трехвалковых листогибочных машинах ЛГМ (TRB).

К достоинствам прессовой технологии следует отнести возможность формовки заготовки труб с малым отношением R/h .

Основные недостатки прессовой формовки – неравномерная деформация по периметру, большая металлоемкость и высокая цена прессового оборудования, высокая стоимость инструментального обеспечения.

Формовка заготовки трубы на ЛГМ обеспечивает равномерную деформацию за счет непрерывности процесса формовки. Поскольку процедура подачи заготовки при формовке реализуется рабочим инструментом, конструкция машины проще, с меньшей металлоемкостью.

Основные недостатки процесса формовки в вальцах состоят в ограничении по усилию формовки при использовании безопорного нажимного вала из-за его прогиба между нажимными устройствами.

При использовании многоопорного верхнего вала ограничивающим фактором становится крутящий момент, приложенный к валкам, поскольку работа деформации при вальцевой формовки реализуется фрикционными силами на контакте инструмента с заготовкой.

К геометрии периметра труб, предъявляются очень жесткие требования. Так, к примеру, для труб $\varnothing 1151 \times 30,9$ мм проекта Nord Stream овальность по торцам труб не должна превышать 5,0 мм, что составляет менее 0,5 % от диаметра. При этом на 50 % из партии величина овальности ограничена допуском 3 мм.

Геометрия периметра заготовки после вальцевой формовки представлена на рис. 1.

Для устранения несоответствия кривизны прикромочных участков заданной кривизне трубной заготовки предусмотрена операция догибки этих участков в калибре двухвалковой клетки.

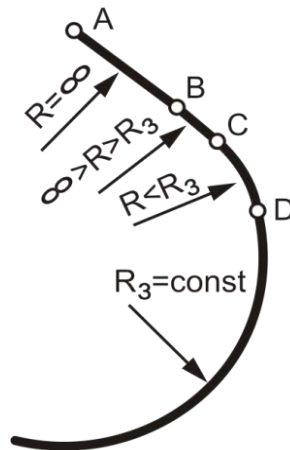


Рис. 1. Геометрия периметра в прикромочной области после снятия усилия формовки: АВ – участок полного распружинивания; ВС – участок переменной кривизны; CD – локальный перегиб в зоне погружения без вращения; D и далее – стабильная кривизна радиуса R_3 .

Поскольку валки клетки догибки образуют круглый калибр, то окружные скорости по дну калибра и на выпусках существенно различаются (рис. 2). Для компенсации этого негативного фактора периферийная часть нижнего валка выполнена неприводной.

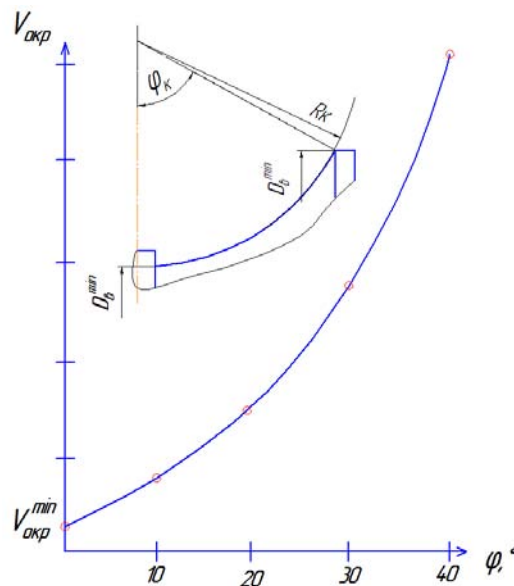


Рис. 2. Изменение окружной скорости на поверхности калибра нижнего валка догибки в функции угловой координаты

Такая кинематика догибки приводит к очевидной необходимости минимизировать ширину прикромочной полки с целью снижения контактных усилий с одновременным снижением уровня скольжения, что в значительной мере позволит улучшить качество догибки.

Улучшение геометрии периметра, которое для процесса TRB сводится, по существу, к приведению кривизны прикромочных участков в соответствии с кривизной основного периметра, может быть достигнуто сочетанием эффективной калибровки валков догибки и минимизацией ширины прикромочных участков, которые не могут быть сформованы в вальцах и имеют после формовки переменную кривизну.

Задача разработки принципов калибровки является самостоятельной и в работе [1] приводятся решения, которые определяют эффективность этого средства воздействия на качество изделия.

Другой путь улучшения качества геометрии периметра труб – минимизировать долю влияния процесса догибки путем уменьшения ширины участков переменной кривизны, прилежащих к кромке.

Поскольку при формовке в вальцах реализуется схема трехточечного изгиба, этот путь можно реализовать только уменьшением расстояния между опорными валками, что неизбежно приведет к росту усилий формовки.

В кругу специалистов существует ошибочное представление о том, что увеличение усилия формовки неизбежно влечет за собой рост крутящих моментов на валках листогибочной машины. Это представление основано на реальных фактах превышения допустимых нагрузок по крутящему моменту в результате увеличения нагрузок по усилию формовки за счет сближения опорных валков.

Действительно, применительно к условиям формовки, для связи усилия формовки и сил трения на контакте заготовки и инструмента может быть использовано уравнение Амонтона-Кулона

$$F_{\text{тр}} = P \cdot f, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения

P – усилие сжатия контактирующих поверхностей.

Такая закономерность подтверждена экспериментально [2], и установлено значение коэффициента f , который для условий вальцевой формовки составляет 0,27–0,29. Однако совсем не следует, что потенциальная сила трения в соответствии с выражением (1) реализуется полностью в работу формовки.

Работа, которую необходимо затратить в процессе изгиба листа до кривизны радиуса R , определяется выражением:

$$A_{\phi} = M_{\text{изг}} \cdot \phi, \quad (2)$$

где $M_{\text{изг}} = \sigma_s \cdot W_{\text{изг}}$ – изгибающий момент;

ϕ – угол, на который изгибается лист.

В свою очередь, момент сопротивления изгибу $W_{\text{изг}}$ зависит только от геометрии сечения заготовки и для жестко-пластической среды может быть определен из зависимости:

$$W_{\text{изг}} = \frac{bh^2}{4}, \quad (3)$$

где b и h , соответственно, ширина и толщина изгибаемого листа.

Таким образом, в реальном процессе используется только часть потенциальной энергии фрикционных сил в количестве, определенном энергобалансом процесса.

В процессе численного эксперимента по определению параметров формовки были определены энергосиловые параметры процесса для трубы $\varnothing 1150$ мм с толщиной стенки 30 мм из стали X70.

Как следует из графиков представленных на рис.3, уменьшение раствора L между опорными валками с 700 до 600 мм повлекло рост усилия формовки (рис. 3а,б), что совершенно естественно, поскольку почти на 15 % уменьшилась длина плеча опорной реакции при трехточечном изгибе, однако суммарный крутящий момент при этом уменьшился на 7 %, что объясняется изменением совокупной схемы взаимного положения опорных точек контакта валков с заготовкой и направлений векторов сил трения, которыми реализуется работа формовки.

Факт превышения крутящими моментами допустимых значений имеет следующее объяснение.

При изгибе, за счет удлинения растянутых по выпуклой поверхности и, сокращения длины сжатых по вогнутой поверхности волокон, в процессе формовки, скорости этих поверхностей отличаются с соответствующим знаком от скорости нейтральной по толщине листа поверхности, причем это различие для реальной технологии находится в диапазоне 2–4 %.

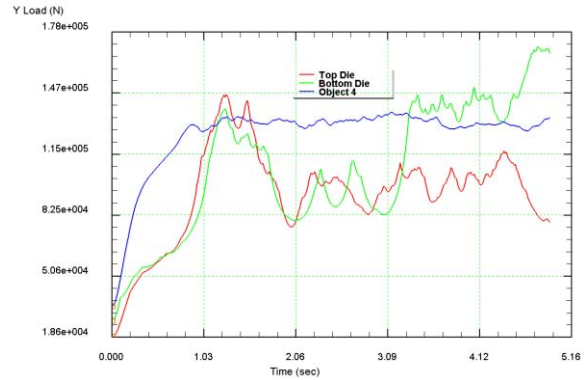
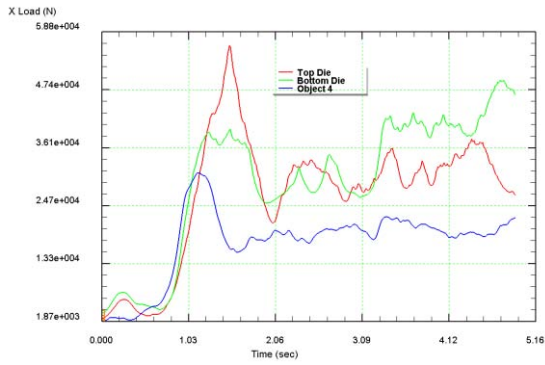
В начале процесса, когда происходит формирование очага деформации, идет перераспределение скоростей, что, в сочетании с нестабильностью кривизны прикромочного участка (см. рис. 1) вызывает существенные колебания крутящего момента (рис. 3в).

Что касается более выраженных динамических изменений крутящего момента при больших усилиях формовки, то это также имеет объяснение, которое состоит в том, что неуравновешенность моментов между валками при меньших усилиях компенсируется пробуксовкой в направлении, продиктованном кинематикой процесса.

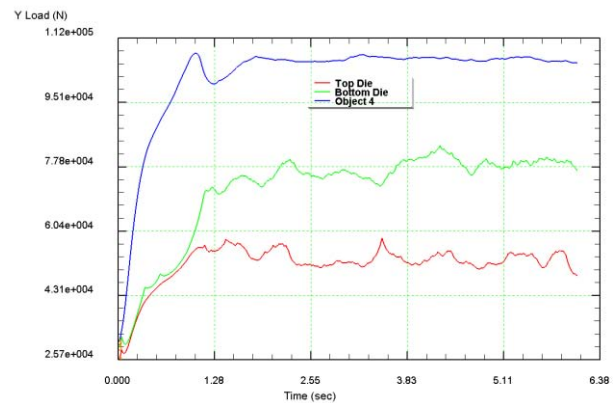
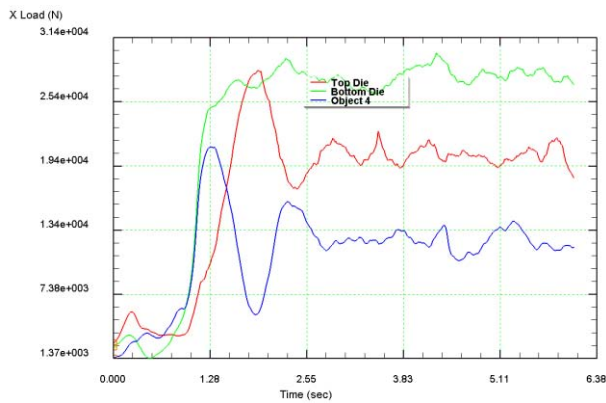
С ростом усилий прижатия на границе инструмента и заготовки снижаются ресурсы саморегулирования процесса из-за роста уровня фрикционных сил, т.е. потенциальной энергии фрикционного контакта.

Предотвращение этого явления может быть обеспечено только за счет реализации управления приводами вращения валков в следящем режиме с использованием схем автоматики.

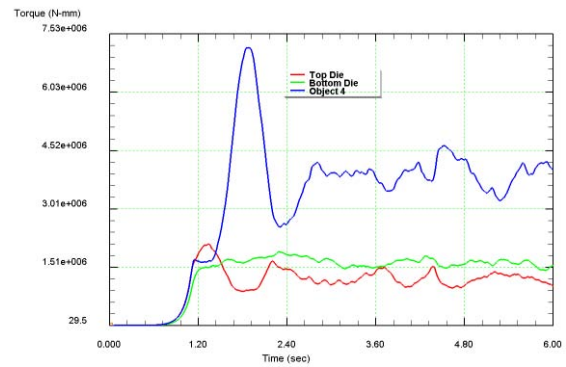
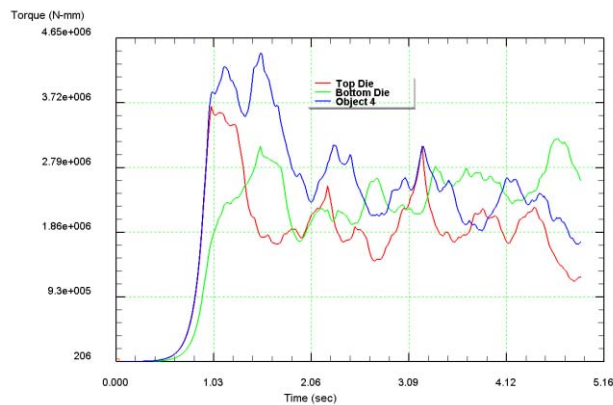
Это классическая задача, которая, применительно к объемным гидроприводам, основанным на использовании аксиально-плунжерных машин, может быть реализована путем использования сигналов датчиков давления для управления сервоклапанами расхода соответствующих гидромоторов.



а) L=600



б) L=700



в) L=600

г) L=700

Рис. 3. Энергосиловые параметры процесса формовки:
а, б – усилие на валках, в, г – крутящий момент

Необходимо также ограничить динамические характеристики (ускорения) приводов в пусковом периоде, поскольку можно полагать, что из-за большого рабочего объема машин гидропривода динамические составляющие гидротеря инициируют рост нагрузок.

Определенным препятствием на пути уменьшения ширины полки является прогиб нажимного вала от усилия формовки, поскольку расстояние между нажимными гидроцилиндрами составляет порядка 15000 мм на формовочной машине для труб длиной 12000 мм.

Применение противоизгиба при такой длине вала только частично компенсирует прогиб от рабочей нагрузки (рис. 4):

$$f_B = \frac{PL^3}{48EI} \left[1 - 0.5 \frac{b^2}{L} + \frac{b^3}{L} \right], \quad (4)$$

где $P = qL$ – усилие формовки;

E – модуль упругости материала вала;

I – момент инерции сечения вала.

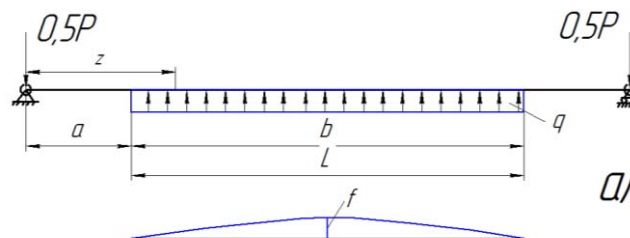


Рис. 4. Схема очага деформации при формовке

Кроме этого, циклические напряжения в зоне действия усилия формовки, в сочетании с касательными напряжениями от рабочего крутящего момента создают на приводной стороне нажимного вала угрозу усталостного разрушения.

Задача эта имеет решение. В последних конструкциях формовочных машин фирмы HAEUSLER, которая является лидеров в этом сегменте оборудования, станины объединены жесткой балкой, размещенной над нажимным валком, а нажимное устройство выполнено в виде нескольких гидроцилиндров, рассредоточенных по длине вала и установленных на этой балке. Таким образом, распределенная нагрузка со стороны заготовки компенсирована распределенным и диаметрально противоположенным усилием нажимных устройств.

Таким образом, как следует из энергобаланса процесса формовки, уменьшение ширины переходных прикромочных участков путем сближения опорных валков может служить эффективным средством улучшения геометрических характеристик прямошовных труб для транспортировки углеводородов за счет снижения роли в формировании геометрии периметра поперечного сечения более сложного и нестабильного процесса догибки прикромочных участков.

Библиографический список

1. Ильичев, В.Г. Особенности профилирования инструмента для догибки прикромочных участков при изготовлении труб большого диаметра / В.Г. Ильичев, И.А. Бобков // Труды 9-го конгресса прокатчиков. – Череповец, 2013.
2. Ильичев, В.Г. Экспериментальное определение сил трения в очаге деформации при формовке труб большого диаметра с малым отношением D/h в условиях ОАО «ВТЗ» / В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин // Сборник конгресса «ОМД-2014.Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии». – М., 2014.