

УДК 621.77

В.В. КЛУБОВИЧ, д-р техн. наук (ФТИ НАН Б),
В.А. ТОМИЛО, д-р техн. наук (БНТУ),
В.В. ЛЕВКОВИЧ, канд. техн. наук (ФТИ НАН Б)

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

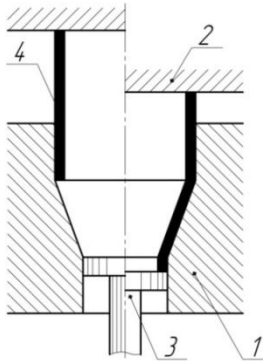
Современное машиностроение стремится к созданию и использованию различных деталей облегченной и одновременно высокопрочной конструкции. Снижение массы изделий позволит получить улучшенные характеристики по производительности, функциональности, расходу топлива и т.д. Для достижения таких целей в машиностроении используются высокопрочные алюминиевые сплавы и труднодеформируемые, коррозионностойкие и жаропрочные стали. Для изготовления тонкостенных трубчатых изделий постоянного и ступенчатого профиля, обладающих вышеперечисленными достоинствами, разработан ряд технологических решений.

Листовая штамповка на серийно выпускаемом кузнечнопрессовом оборудовании является распространенным способом получения трубчатых изделий. Возможности формоизменения труб при обработке в штампах ограничиваются следующими тремя причинами:

- потерей устойчивости заготовки в осевом направлении;
- потерей устойчивости заготовки в окружном направлении;
- выворотом труб во внутрь.

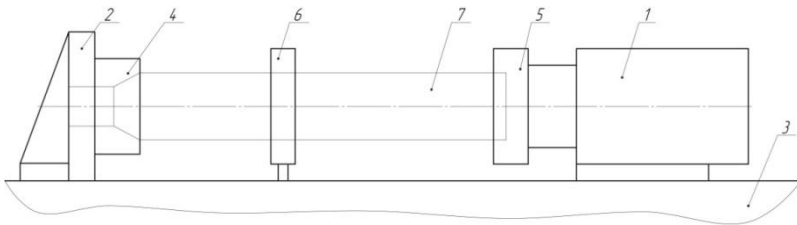
На рисунке 1 представлен простейший штамп для проведения обжима на серийном кузнечнопрессовом оборудовании при вертикальном расположении заготовки [1–6].

Существенным недостатком данного процесса является ограничение длины трубчатой заготовки, определяемой открытой высотой пресса. Для штамповки деталей большой длины применяется специальное оборудование (рисунок 2) [3].



1 – матрица; 2 – плита; 3 – выталкиватель; 4 – трубная заготовка

Рисунок 1 – Схема обжима трубной заготовки в штампе



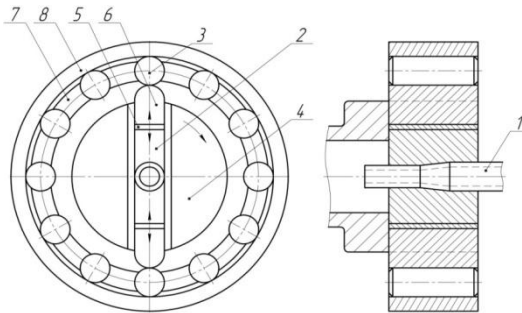
1 – гидроцилиндр; 2 – кронштейн; 3 – станина; 4 – матрица; 5 – направляющая втулка; 6 – люнет; 7 – трубная заготовка

Рисунок 2 – Схема станка-пресса для обжима концов труб

Данная технология применяется в основном для тонкостенных заготовок. При увеличении толщины стенки возрастают усилия обжима, что приводит к усложнению оборудования.

Применение для обработки трубчатых заготовок ротационных и радиально-ковочных машин (РКМ) предоставляет более широкие возможности механизации и автоматизации процесса в сравнении с обработкой в штампах.

На рисунке 3 приведена схема обработки в ротационной машине [3].



1 – трубчатая заготовка; 2 – разъемная матрица; 3 – ролик; 4 – шпindelь;
5 – прокладка; 6 – боек; 7 – сепаратор; 8 – обойма

Рисунок 3 – Схема обработки трубчатой заготовки на ротационной машине

Ротационно-ковочные машины используют для получения изделий высокой точности и качества поверхности, с отверстием и без отверстий, переменного и постоянного сечения по длине из жаропрочных и малопластичных сплавов. На ротационно-ковочных машинах с вращающейся обоймой можно получать изделия различного поперечного сечения (квадратного, треугольного и прямоугольного). Однако это преимущество связано с большим усложнением конструкции, связанным с возвращением бойков в исходное положение. Шум, производимый ротационно-ковочными машинами при работе, препятствует их широкому распространению.

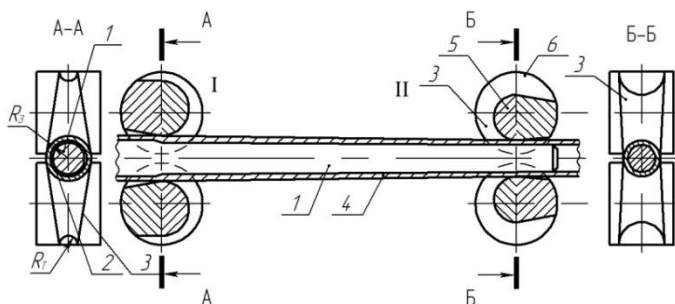
Ротационно- и радиально-обжимные машины применяются для обработки изделий, имеющих очень широкий диапазон размеров. Так, на ротационно-обжимных машинах обрабатывают изделия диаметром от 0,15 мм (сплошного профиля) до 320 мм (трубы); на радиально-обжимных машинах – сплошные профили диаметром до 400 мм и полые диаметром до 600 мм.

Точность и чистота обработки изделий методом обжатия зависят от качества изготовления и геометрии инструмента, жесткости, качества сборки и тщательной наладки механизма обжатия. При удовлетворительном сочетании всех факторов и параметров можно получить поверхность с шероховатостью Ra 20–2,5 [7]. В процессе ротационного обжатия улучшается структура металла и повышаются его механические свойства.

Среди способов холодной прокатки трубчатых заготовок наибольшее распространение получили прокатка в валковых станах (ХПТ) и прокатка в роликовых станах (ХПТР) [8].

Прокатка на станах холодной прокатки труб (ХПТ) имеет периодический характер и близка к горячей пилигримовой, но отличается тем, что деформация участка металла происходит на неподвижной конической оправке при неподвижной заготовке в возвратно-поступательном движении рабочей клетки; кроме того, при холодной прокатке трубная заготовка используется полностью, а при горячей пилигримовой прокатке значительная часть металла (пилигримовая головка) идет в отходы.

Схема прокатки на стане ХПТ приведена на рисунке 4.



1 – коническая оправка; 2 – кольцевой зазор; 3 – ручей калибров;
4 – прокатываемая трубчатая заготовка; 5 – калибр; 6 – рабочие валки
(I – переднее, II – заднее положение клетки)

Рисунок 4 – Схема прокатки на стане ХПТ

Характерной особенностью и достоинством станов ХПТ является возможность уменьшения площади поперечного сечения трубы за один цикл прокатки на 70–80 % и вытяжка 14–18 и более, что обусловлено дробностью деформации и схемой напряженного состояния металла.

Схема деформации металла на роликовых станах (ХПТР) аналогична холодной прокатке труб на валковых станах. Прокатку труб ведут на цилиндрической оправке тремя или четырьмя рабочими роликами, по периметру которых нарезан круглый ручей постоянного радиуса, равного радиусу готовой трубы.

Общая относительная деформация трубы за один проход 80–85 % достигается в основном за счет уменьшения толщины стенки, т.к. по диаметру труба может быть уменьшена только на 2–4 мм. Станы ХПТР обеспечивают производство труб с высоким классом (4–6-ой) шероховатости поверхности, малыми допусками по толщине стенки ± 5 –10 % и отношением диаметра к толщине стенки 150 к 1.

Ротационное выдавливание позволяет изготавливать сложные детали цилиндрической и конической формы с прямолинейной или криволинейной образующей, имеющей постоянное, переменное или ступенчатое сечение стенок из алюминиевых и медных сплавов, углеродистой стали, нержавеющей стали, титановых и молибденовых сплавов. Это является преимуществом по сравнению с другими методами формообразования, например, штамповкой выдавливанием, вытяжкой с утонением стенки или глубокой вытяжкой, при которых невозможно реализовать такие формы. Заготовками служат листы, трубы, сварные, штампованные и штамповарные конструкции.

Процесс выдавливания с утонением заключается в постепенной раскатке роликами плоской или пространственной заготовки по вращающейся оправке (утонение может достигать 75 % толщины исходной заготовки). Процесс выдавливания без утонения стенки заключается в местном пластическом изгибе заготовки, причем зона пластического изгиба перемещается по заготовке по винтовой линии. Ротационное выдавливание позволяет обрабатывать заготовки с начальной толщиной до 40 мм (в случае алюминиевых и медных сплавов). Возможна обработка с подогревом. В настоящее время на давилно-раскатных станках и машинах в промышленном масштабе различными способами могут быть получены цилиндрические детали диаметром до нескольких метров и толщиной стенки до 0,25–1 мм.

Предел прочности после проведения операции резки возрастает, также волокна приобретают предпочтительную ориентацию в направлении сдвига металла (параллельно контуру изготавливаемой детали), в результате чего значительно повышается усталостная прочность и предел прочности при растяжении. При изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов ротационное выдавливание осуществляется в несколько переходов, чередующихся с операциями отжига. Метод обеспечивает возможность получения

изделий с высокой точностью по толщине стенки ($\pm 0,05$ мм). С целью обеспечения высокого класса чистоты поверхности, выдавливание проводится с использованием смазочных материалов.

При ротационном выдавливании различают два метода, которые зависят от направления течения материала вдоль оси. При прямой раскатке материал течет в направлении осевой подачи роликов. Область заготовки, еще не задействованная в процессе формования, перемещается перед роликом. Этот метод требует в качестве исходной детали полузаготовку, дно или внутренний фланец, который прижимается к свободному концу оправки. Если дно или внутренний фланец у заготовки отсутствуют, то применяется вариант обратной раскатки. При этом заготовка перемещается по оправке до места ее зажатия и захватывается там. Материал во время формования течет под роликом, сначала в направлении свободного конца оправки, а затем в свободную рабочую зону станка. Продольная подачи и направление течения металла, таким образом, противоположны. Получаемая длина детали, в отличие от варианта прямой раскатки, не ограничивается продольным ходом суппорта и длиной оправки. Принципиальная схема ротационного выдавливания приведена на рисунке 5.

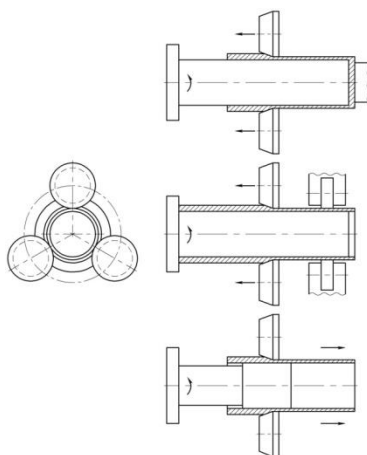


Рисунок 5 – Принципиальная схема ротационного выдавливания

Основные преимущества ротационного выдавливания следующие: высокое качество изделий, экономия и улучшение механических свойств обрабатываемого металла; высокая производительность процесса, особенно при однопроходном выдавливании конусов; по сравнению со штамповкой резкое сокращение затрат на оснастку; возможность получения точных оболочек из малопластичных металлов и сплавов; небольшие энергозатраты на формообразование; сокращение сроков подготовки производства; возможность получения оболочек, которые трудно или невозможно получить другими методами формообразования; возможность обнаруживать при деформировании скрытые дефекты металла; выполнение на одном и том же оборудовании и с одной установки доделочных операций (закатка, фальцевание, выглаживание, калибрование и т.п.).

Ротационное выдавливание имеет также недостатки и ограничения, которые необходимо учитывать при выборе процесса формообразования. К числу последних следует отнести: возможность изготовления только полых осесимметричных деталей; необходимость применения в ряде случаев специально спрофилированных заготовок; сложность подбора режимов обработки; повышенные требования к качеству давяльной оснастки (ролики, оправки и т.д.); техническую сложность наладки современных давяльно-раскатных полуавтоматов и автоматов с копировальными устройствами и программным управлением; недостаточную изученность процесса; необходимость рабочих более высокой (чем при штамповке) квалификации; высокую стоимость давяльно-раскатных станков большой мощности и т.д. Также появление высококачественных холоднокатанных листов с незначительным полем допусков на толщину листа и таких видов сварки, как электронно-лучевая и лазерная, обеспечивающих получение высококачественных сварных швов, может обеспечить получение тонкостенных изделий листовой штамповкой с последующей сваркой, обладающих высоким качеством и надежностью.

Горячее ротационное выдавливание стало одним из наиболее экономичных и прогрессивных способов изготовления деталей новой техники из титана, тугоплавких металлов и сплавов. Это объясняется благоприятной схемой напряженного состояния при ротаци-

онном выдавливании, что позволяет обрабатывать малопластичные металлы и их сплавы с большими степенями деформации.

Проведено моделирование прямого ротационного выдавливания трубчатой заготовки из алюминия AL7075 методом конечных элементов. Схема ротационного выдавливания приведена на рисунке 6.

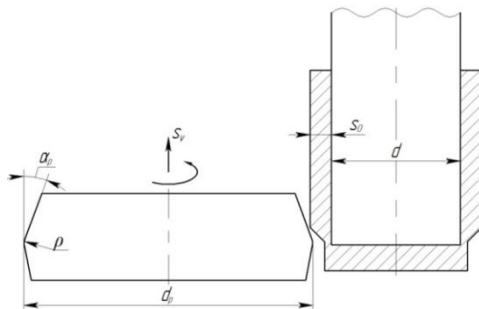


Рисунок 6 – Схема прямого ротационного выдавливания

Давильный ролик приводят во вращение и подают вдоль оси. Заготовка зафиксирована на оправке. Угол α_p – передний рабочий угол давилного ролика, d_p – диаметр давилного ролика, d – диаметр оправки, s_0 – исходная толщина трубчатой заготовки, s_v – подача ролика, ρ – радиус закругления ролика. Параметры процесса следующие: $\alpha_p = 20^\circ$, $d_p = 160$ мм, $d = 40$ мм, $s_0 = 13$ мм, $s_v = 0,5$ мм/оборот, $\rho = 2$ мм, скорость вращения ролика 60 оборотов/с, степень деформации 0,25.

На рисунке 7 приведены результаты моделирования: осевое и радиальное усилия при ротационном выдавливании.

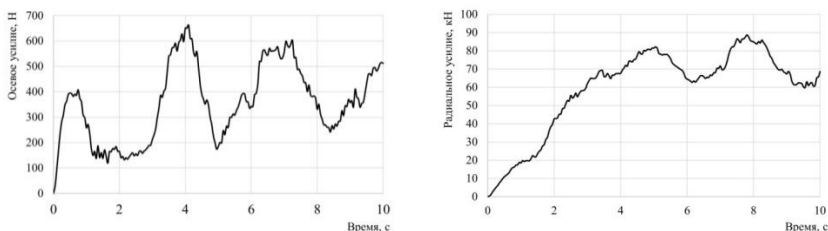


Рисунок 7 – Осевое и радиальное усилия при ротационном выдавливании

Колебания кривой на графике осевого усилия объясняется изменением площади контакта заготовки и ролика, вызванное образованием наплыва на заготовке. Среднее осевое усилие составляет 450 Н, среднее радиальное усилие при установившемся процессе – 70 кН.

Заключение

Рассмотрены различные технологические решения для обработки тонкостенных трубчатых изделий. На выбор технологии для изготовления заготовок оказывает влияние сложность профиля заготовки и ее размеры, сопротивление деформации материала, массовость производства. Листовая штамповка и радиально- и ротационно-ковочные машины предоставляют высокую производительность, но ограничены в выборе профиля заготовки. Обработка на станах ХПТ и ХПТР позволяет добиться высокой степени утонения, но также ограничена в выборе профиля заготовки. Ротационное выдавливание в свою очередь предлагает наиболее широкие возможности профилирования, но низкую производительность в сравнении с другими методами. Проведено моделирование ротационного выдавливания методом конечных элементов и получены энергосиловые параметры.

Список литературы

- 1. Подготовка** концов труб перед волочением на радиально-ковочной машине AVS / А.П. Карамышев [и др.] // *Металлург.* – 2008. – № 9. – С. 40–41.
- 2. Определение** усилия обжатия заготовок на радиально-ковочной машине AVS / А.П. Карамышев [и др.] // *Металлург.* – 2009. – № 3. – С. 61–64.
- 3. Горбунов, М.Н.** Штамповка деталей из трубчатых заготовок / М.Н. Горбунов. – М.: Машгиз, 1960. – 192 с.
- 4. Чумадин, А.С.** Исследование процесса обжима тонкостенных труб / А.С. Чумадин, А.А. Шишкин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* – 2012. – № 11. – С. 14–18.
- 5. Попов, О.В.** Изготовление цельноштампованных тонкостенных деталей переменного сечения / О.В. Попов. – М.: Машиностроение, 1974. – 120 с.

6. Сосенушкин, Е.Н. Технологические процессы штамповки изделий из толстостенных труб / Е.Н. Сосенушкин, В.В. Третьюхин, Е.А. Яновская // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2013. – № 2. – С. 25–29.

7. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2: Горячая объемная штамповка / под ред. Е.И. Семенова. – 1986. – 592 с.

8. Розов, Н.В. Холодная прокатка стальных труб / Н.В. Розов. – М.: Металлургия, 1977. – 184 с.

УДК 621.98.04

В.В. КЛУБОВИЧ, д-р техн. наук (НАН РБ)
В.А. ТОМИЛО, д-р техн. наук (БНТУ)
М.Л. НЕСТЕРОВИЧ (МЗКТ, БНТУ)

ТЕХНОЛОГИЯ ГИБКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Введение. При изготовлении усиленных элементов кузовов автомобилей применяют высокопрочные конструкционные стали Millux Protection толщиной $S = 4\text{--}6$ мм. Особенность данных сталей состоит в том, что они имеют высокую твердость 320–560 НВ, предел текучести $\sigma_{\text{T}} = 800\text{--}1250$ МПа и предел прочности $\sigma_{\text{B}} = 1000\text{--}1600$ МПа. Однако в большинстве случаев увеличение прочности стали сопровождается снижением ее пластических свойств. В этой связи высокопрочные стали плохо поддаются операциям холодной штамповки, в частности гибке. При гибке указанных сталей радиусом, равным толщине материала $r = S$, имеют место такие негативные явления, как упругое пружинение, образование трещин вдоль линиигиба, повышенное усилие гибки. И если явления упругого пружинения и повышенного усилия гибки не являются критичными, то образование трещин вдоль линиигибки является неисправимым дефектом.

Согласно сведениям производителя данные стали, во избежание образования трещин вдоль линиигибки, возможно изгибать при соблюдении отношения радиуса кривизны пуансона r к толщине материала S , а также отношения расстояния между кромками мат-