

PACS: 62.20.Fe

Л.И. Алиева

КОМБИНИРОВАННОЕ РАДИАЛЬНО-ОБРАТНОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Статья поступила в редакцию 07 декабря 2016 года

Рассмотрены способы изготовления полых и стержневых деталей с фланцем методом комбинированного радиально-обратного выдавливания. Приведены результаты моделирования процесса, выполненного с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Дана оценка закономерностям формоизменения и деформированного состояния заготовки в процессе комбинированного выдавливания деталей типа стакана с фланцем и стержня с фланцем. Установлено, что при комбинированном выдавливании с истечением металла в радиальном и обратном направлениях очаги интенсивной пластической деформации сосредоточены в зонах выходных отверстий на переходных кромках деформирующего инструмента. Представлены графические зависимости формообразования элементов деталей, которые позволяют прогнозировать получение деталей с необходимыми геометрическими параметрами.

Ключевые слова: способы выдавливания, детали с фланцем, комбинированное радиально-обратное выдавливание, метод конечных элементов, деформированное состояние, формоизменение

Розглянуто способи виготовлення порожнистих і стержневих деталей з фланцем методом комбінованого радіально-зворотного видавлювання. Наведено результати моделювання процесу, виконаного за допомогою методу кінцевих елементів. Дано оцінку закономірностям формозміни й деформованого стану заготовки в процесі комбінованого видавлювання деталей типу склянки з фланцем і стержня з фланцем. Встановлено, що при комбінованому видавлюванні з течією металу в радіальному та зворотному напрямках осередки інтенсивної пластичної деформації зосереджені в зонах вихідних отворів на перехідних крайках деформуючого інструменту. Представлено графічні залежності формоутворення елементів деталей, які дозволяють прогнозувати отримання деталей з необхідними геометричними параметрами.

Ключові слова: способи видавлювання, деталі з фланцем, комбіноване радіально-зворотне видавлювання, метод кінцевих елементів, деформований стан, формозмінення

Введение

Процессы холодного объемного деформирования являются эффективны-

ми малоотходными способами изготовления высококачественных заготовок и деталей различной конфигурации для машиностроения. Полые и стержневые детали с фланцем весьма распространены в приборо- и машиностроении. Освоенными технологиями получения деталей такого типа являются многопереходная высадка [1], а также продольное (обратное и прямое) и радиальное выдавливание (рис. 1,б), дополненное, как правило, операцией высадки фланца [1,2].

Для полых и многоступенчатых стержневых деталей с фланцем более производительной представляется технология комбинированного выдавливания, сочетающая способы поперечного радиального и продольного обратного выдавливания [2,3].

В предыдущих исследованиях комбинированного выдавливания деталей с фланцем отмечены особое влияние положения фланца и его роль в процессе, где в одном комбинированном очаге деформации совмещаются радиальное выдавливание фланца и продольное прямое выдавливание отростка [4]. Фланец, который уже сформирован, может выступать в роли застойной зоны, относительно которой металл продолжает интенсивно сдвигаться и перемещаться в прямом направлении. Это приводит к разрушению детали по линиям максимального сдвига ввиду исчерпания ресурса пластичности металла и к отделению фланца.

Данного недостатка лишен менее изученный способ радиально-обратного выдавливания деталей, в котором с одного торца заготовки выдавливают фланец, а с противоположного торца – осевой отросток или полый стержень [5–8].

Целью настоящего исследования является оценка закономерностей формообразования и возможностей процесса радиально-обратного выдавливания полых и стержневых деталей с фланцем.

Способы комбинированного выдавливания

Принято считать, что комбинированное выдавливание – это процесс деформирования заготовки, в котором совмещаются несколько простых способов выдавливания и происходит одновременное истечение металла по нескольким направлениям. Такое повышение степени свободы течения металла вызывает заметное снижение полных и удельных нагрузок на инструмент, что благоприятно влияет на работоспособность инструмента. Приведенное определение способа комбинированного выдавливания является недостаточным, поскольку в настоящее время разработаны схемы последовательного (по времени или по пути деформирования) комбинирования простых схем выдавливания. В первую очередь это связано с включением в комбинацию наряду с традиционными схемами продольного (обратного и прямого) выдавливания и новых схем поперечного (радиального и бокового) выдавливания. Последовательное (строго говоря, последовательно-параллельное) радиально-прямое и радиально-обратное выдавливание со-

стоит в выполнении простых способов последовательного деформирования по пути деформирования [3,9]. В отличие от этой группы существуют и способы поэтапного комбинированного выдавливания, когда простые способы выдавливания дополняют друг друга по времени осуществления.

На рис. 1 представлены способы комбинированного радиально-обратного выдавливания полых и сплошных деталей с фланцем.

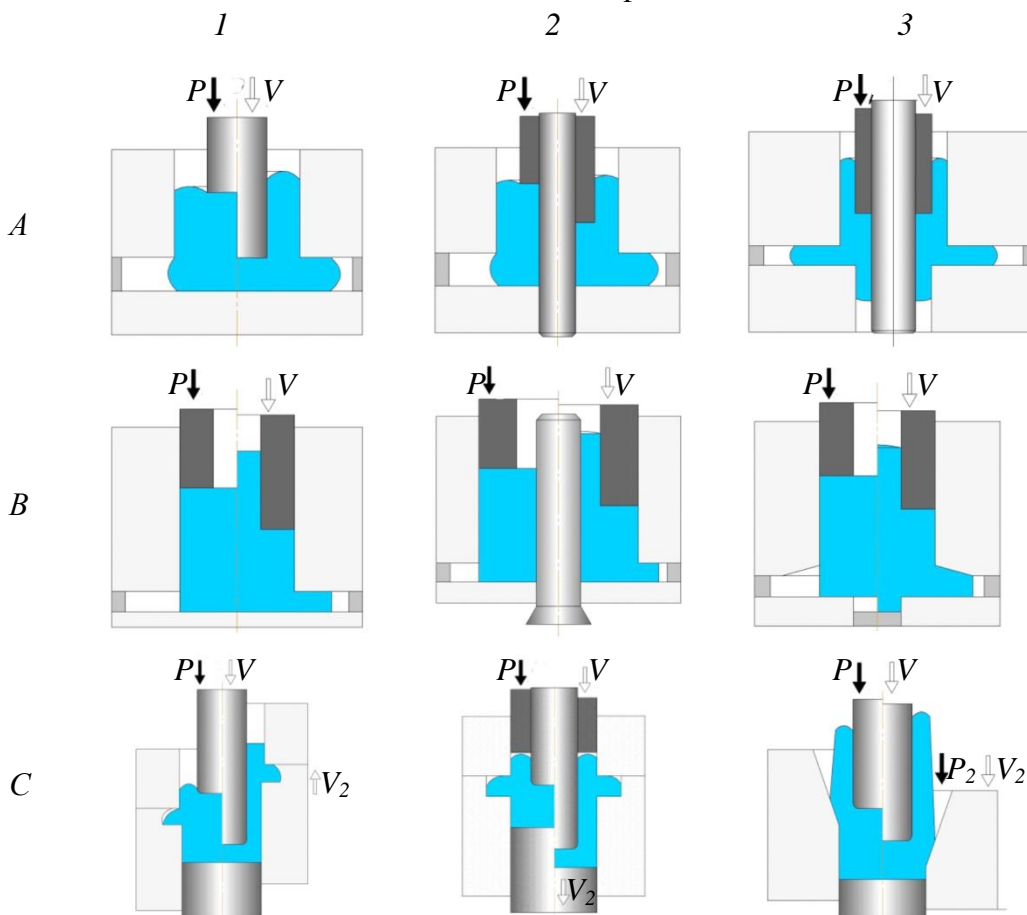


Рис. 1. Способы комбинированного радиально-обратного выдавливания

Способы групп *A* и *B* относятся к совмещенным способам комбинированного выдавливания, в которых металл из очага деформации выдавливается одновременно по нескольким направлениям. Схемы группы *A* объединяют способы деформирования с одновременным формированием у детали с одного торца полости, а с противоположного торца – фланца. По схеме *A1* из исходных сплошных заготовок получают полые детали типа стакана с фланцем, расположенным в донной части. Схемы *A2* и *A3* предусматривают использование исходной трубчатой заготовки и радиально-обратное выдавливание полых детали типа втулки со ступенчатой внутренней поверхностью. Отличие схемы *A3* состоит в том, что истечение выдавливаемого металла возможно и в третьем направлении.

Способами, включенными в группу *B*, одновременно с радиальным выдавливанием фланца путем обратного выдавливания формируют стержневой элемент детали. Этот стержень может быть сплошным (схема *B1*) или полым (схемы *B2*, *B3*). Особенность группы состоит также и в использовании полого пуансона, формирующего наружный ступенчатый контур детали «обжатием» исходной заготовки.

В группу *C* включены представители поэтапного комбинированного выдавливания. Для последовательного поэтапного выдавливания по различным сочетаемым схемам деформирования в данном случае (в отличие от предыдущих групп) на каждом этапе процесса должна быть установлена определенная согласованная кинематика движения деформирующего и формообразующего инструментов. После формирования на первом этапе процесса внедрением пуансона и радиальным выдавливанием фланца включаются в движение либо матрица (схема *C1*), либо контрпуансон (схема *C2*) [2,3]. По схеме *C3* матрица способна к реверсивному движению, обеспечивающему формообразование профильной наружной поверхности штампуемого изделия [10].

Методика исследований

Для исследования закономерностей формообразования и технологических возможностей способов комбинированного радиально-обратного выдавливания были применены методы компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Для анализа напряженно-деформированного состояния при комбинированном выдавливании деталей с фланцем использовали МКЭ с применением программного продукта Qform 2/3D [11]. Экспериментальные исследования выполняли при помощи методов делительных сеток и тензометрирования.

МКЭ-моделирование проведено при следующих условиях: упрочнение алюминиевого сплава АД31 описано кривой упрочнения $\sigma_s = 191.55e^{0.202}$ МПа, а меди М2 – кривой $\sigma_s = 392.11e^{0.3591}$ МПа при скорости деформирования 0.25 s^{-1} ; коэффициент трения по А.Н. Леванову $\mu = 0.08\text{--}0.16$; скорость перемещения инструмента 1 mm/s ; инструмент абсолютно жесткий.

При экспериментальном исследовании деформированного состояния методом делительных сеток применена методика И.П. Ренне по обработке результатов искажения делительной сетки [12]. Для сопоставления результатов анализа привлечены также результаты анализа, проведенного энергетическим методом верхней оценки [6,13].

Результаты исследования

По данным расчетов МКЭ-процесса радиально-обратного выдавливания стакана с фланцем из медной заготовки (радиус заготовки $R_0 = 20 \text{ mm}$, высота $T = 30 \text{ mm}$, радиус пуансона $R_p = 10.5 \text{ mm}$, толщина фланца $H = 10 \text{ mm}$)

получен массив результатов математических экспериментов в виде полей распределения компонент деформаций и напряжений (рис. 2).

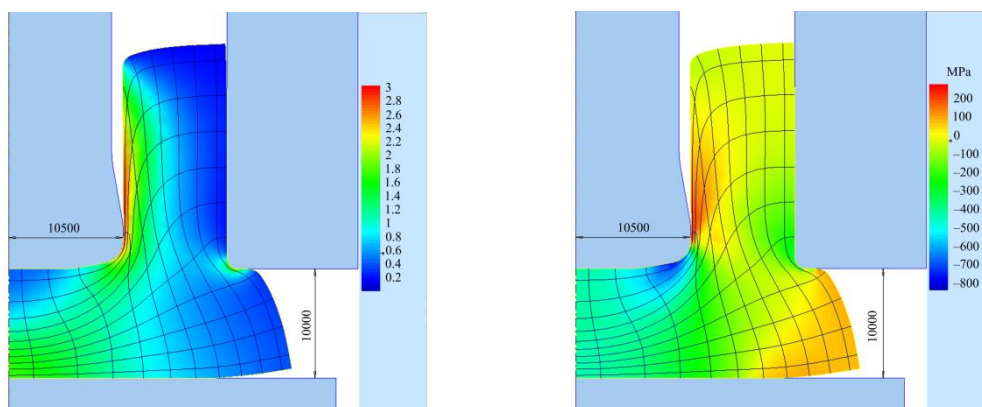


Рис. 2. Картины напряженно-деформированного состояния деталей при радиально-обратном выдавливании, полученные МКЭ-моделированием

В соответствии с результатами моделирования было установлено, что очагом интенсивной деформации является вся центральная зона заготовки, которая находится под пуансоном. По линии, проведенной от кромки пуансона до закругления полуматрицы, происходит разделение течения металла в радиальном и обратном направлениях. Наиболее интенсивной деформации подвергаются слои металла, примыкающие к калибрующему пояску пуансона. В стенке выдавленного стакана наблюдается деформированное состояние со значительной неравномерностью. Наружные слои и зона, примыкающая к кромке стакана, являются слабдеформированными. Фланец, получаемый при комбинированном выдавливании, имеет несколько иную форму, чем при простом радиальном выдавливании. Наблюдаются неприлегание периферийной зоны фланца к торцу инструмента и искажение его формы в виде «носка сапога». По-видимому, это объясняется воздействием сил трения, а также особенностью кинематики течения металла в круговую полость, когда в радиальную полость вытесняется металл из нижней центральной зоны очага деформации. Распределение значений сопротивления деформирования и среднего напряжения (рис. 2) в основном соответствует распределению интенсивности деформаций.

Картины поэтапного формоизменения, полученные МКЭ, а также энергетическим методом [6], дали возможность оценить изменения геометрии полуфабриката по мере развития процесса. Характер приращения размеров полуфабриката по высоте стенки стакана Δl_1 и по радиусу фланца Δl_2 меняется при изменении толщины фланца, соотношений геометрических параметров процесса и условий контактного трения, при этом разброс значений, как правило, увеличивается с уменьшением толщины фланца.

Отметим, что отношение скоростей истечения металла в радиальном и обратном направлениях растет с увеличением отношения высоты фланца к

толщине формируемой стенки стакана при одном и том же значении величины хода S .

Различные условия трения на боковых поверхностях стакана и пуансона, а также в донной части оказывают существенное воздействие на процесс формообразования полуфабриката ($R_p = 10.0$ mm, $R_0 = 22.5$ mm, $H = 3.0$ mm, $T = 12.0$ mm). При этом отклонение полученных приращений Δl_1 для максимально большого разброса коэффициентов трения μ в направлениях истечения металла может достигать 30% и более и далее увеличиваться по ходу процесса деформирования (рис. 3,а). При минимальном трении в направлении обратного выдавливания и повышенном в зоне фланца ($\mu = 0.4$) величина приращения высоты стенки стакана возрастает на 50% (кривая 1). И, наоборот, увеличение трения ($\mu = 0.4$) в зоне стенки сокращает приращение высоты стенки (кривая 3). Это означает, что трение является весомым управляющим фактором, позволяющим корректировать размеры получаемой детали без каких-либо дополнительных технологических решений. Однако обеспечение одинаковых условий трения на боковой стенке стакана и в донной части в зоне фланца практически не влияет на величину приращений размеров полуфабриката (кривая 2).

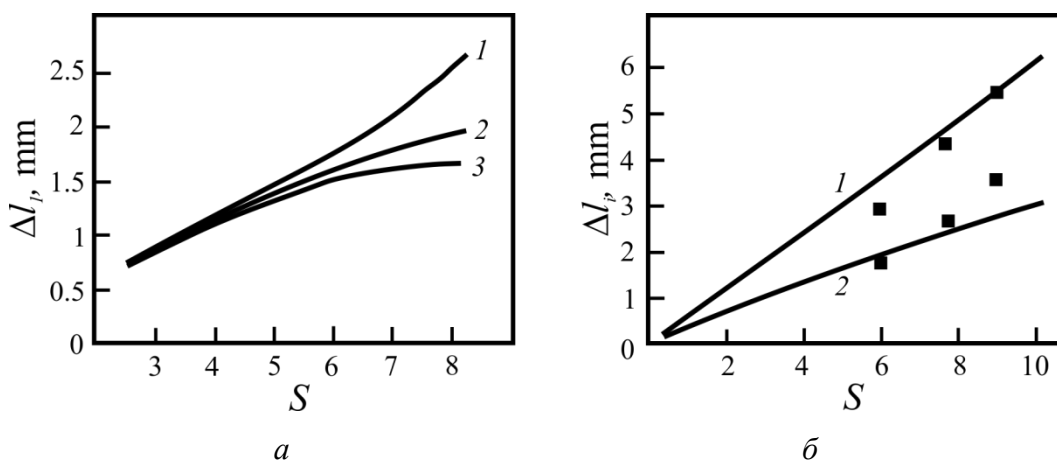


Рис. 3. Теоретические (а) и экспериментальные (б) данные о приращении размеров при выдавливании полуфабрикатов

Для оценки возможностей прогнозирования поэтапного формообразования заготовки в процессе деформирования был проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов, полученных на основе МКЭ-моделирования. Построены графики приращений стенки (кривая 1) и фланца (кривая 2) полуфабрикатов из алюминиевого сплава АД31 ($R_p = 7.5$ mm, $R_0 = 10.6$ mm, $H = 3.0$ mm, $T = 20.0$ mm) с нанесением значений приращения размеров, полученных экспериментально. Расхождение сопоставляемых данных не превышало 20% (рис. 3,б).

Экспериментальные исследования деформированного состояния в процессе комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа

стакана ($R_p = 7.5$ mm, $R_0 = 12.0$ mm, $H = 5.0$ mm, $T = 22.0$ mm) показали результаты, качественно близкие к полученным при МКЭ-моделировании (рис. 4). С начала деформирования очаги деформации (ОД) радиального и обратного истечения разнесены друг от друга, что благоприятно сказывается на процессе формообразования, поскольку препятствует возникновению поверхностей с высоким градиентом деформаций и интенсивными сдвигами (являющимися «предшественниками» трещин). Особенность состоит в том, что, хотя интенсивная деформация и сосредоточивается в отдельных зонах у выходных отверстий, в промежуточной зоне, которую принято считать жесткой (недеформируемой), степень деформации также нарастает. Эту особенность очага деформации следует учитывать при выборе поля скоростей и анализе силового режима процесса.

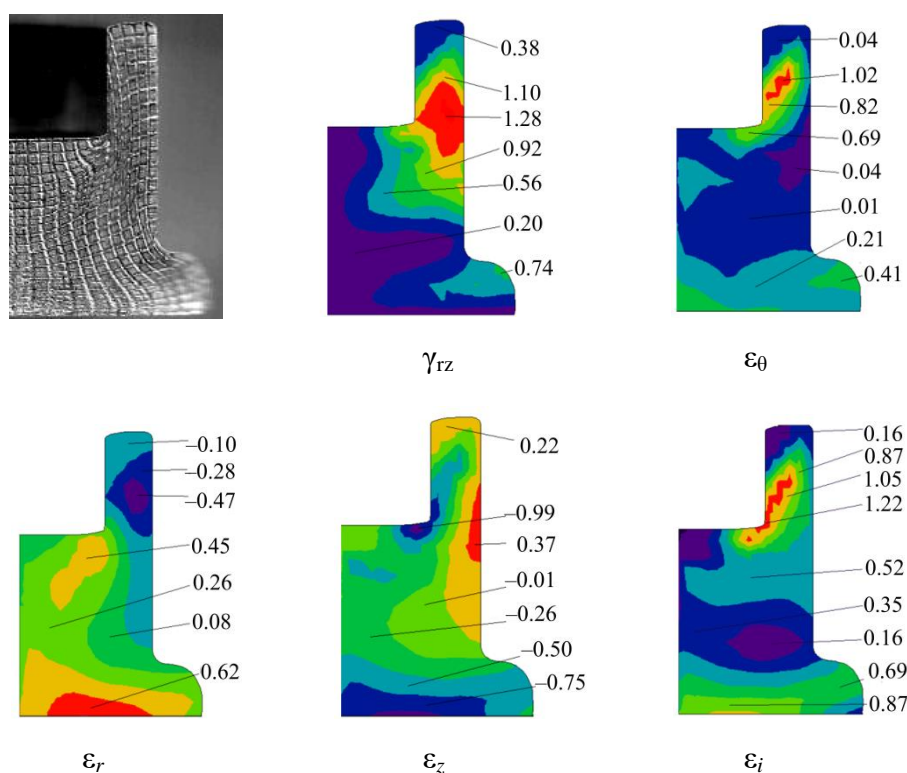


Рис. 4. Искажение сетки и поля деформаций при выдавливании стакана с фланцем

Моделирование процесса радиально-обратного выдавливания стержневых деталей с фланцем ($2R_0 = 28.2$ mm, диаметр отростка $2R = 15$ mm, высота 20 mm, ход S до 10 mm, $H = 3, 4$ и 5 mm) также выполнено при помощи МКЭ и физических экспериментов. Для этого процесса тоже характерно наличие двух автономных очагов деформации. По ходу процесса локализованные ОД увеличиваются в размерах, а высота промежуточной жесткой зоны уменьшается. С развитием процесса и снижением высоты исходной заготовки промежуточная жесткая зона постепенно разделяется на две слабodeформированные области. Одна из них располагается под торцом полого

пуансона, имеет кольцевую форму и примыкает к боковой поверхности матрицы.

Вытеснение металла в обратном направлении в отросток незначительно. Отросток формируется в основном за счет углубления полого пуансона в заготовку. Интенсивная деформация и в этом процессе сосредоточивается у выходных отверстий, а в промежуточной слабodeформируемой зоне деформация нарастает по ходу выдавливания. Сдвиговая деформация распространяется в глубь очага вдоль условной линии, соединяющей кромки выходных отверстий матрицы. В средней части по центру заготовки образуется еще одна слабodeформируемая зона металла, имеющая вид своеобразного стержня с диаметром меньше диаметра осевого отростка. При выдавливании деталей с утолщенными фланцами диаметр этой зоны постепенно уменьшается, вплоть до нуля в нижней части ОД. В нижней придонной части ОД вокруг упомянутой застойной зоны размещается слой металла в виде диска с высотой, приближенно равной толщине фланца, который подвергается непрерывному сжатию в течение всего процесса. Из данной зоны металл вытесняется в радиальную полость, т.е. подвергается выдавливанию. Одновременно с этим происходит образование фланца на детали. Сжатие указанных слоев в виде диска происходит со значениями степени деформации, приближенными к наибольшим наблюдаемым во всей заготовке.

Зоной с максимальной степенью деформации является зона, прилегающая к кромке полого пуансона, т.е. в области разворота и выдавливания металла в обратном направлении. Зоны разворота металла и течения во фланец и отросток представляют собой участки деформации со сложным деформированным состоянием, в которых совмещаются сжатие, сдвиг и разворот вытесняемого металла. При этом неравномерность деформированного состояния получаемого отростка значительна, так как в верхней части отростка и в слоях, прилегающих к оси его симметрии, степень деформации минимальна. Анализ деформированного состояния, выполненный МКЭ-моделированием, в целом подтверждается и экспериментальными исследованиями, проведенными методом делительных сеток [5].

Условия трения на опорной поверхности стакана оказывают влияние на образование таких дефектов формы фланца, как разрыв и изгиб его края. Но воздействие трения в том небольшом диапазоне величин, который характерен для холодного деформирования, вполне прогнозируемо. Влияние радиусов переходных кромок на силовой режим и формоизменение также невелико в сравнении с воздействием размеров самих выходных отверстий.

Для оценки закономерностей формообразования штампуемых деталей по результатам моделирования были построены графики, которые показывают характер формирования детали при помощи установления относительного объема металла \bar{V}_0 (отнесенного ко всему его смещенному объему), который расходуется на образование отростка. При этом изменялись условия трения (коэффициент трения μ) и геометрические параметры процесса комбиниро-

ванного выдавливания (рис. 5) [5]. Высота заготовки из сплава АД31 диаметром $R_0 = 28.2 \text{ mm}$ авнялась 30 mm. Видно, что с увеличением относи-

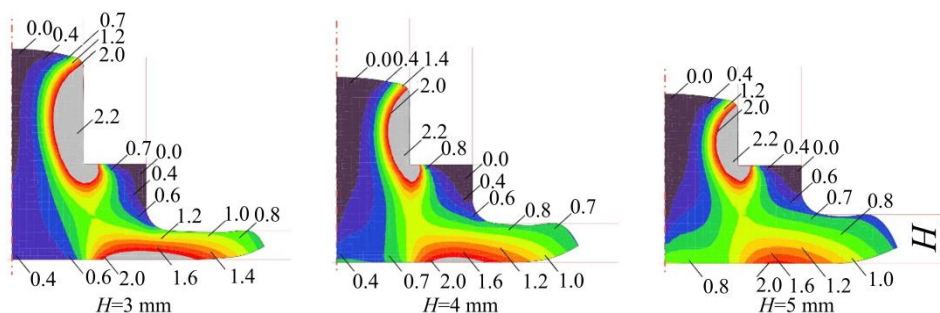


Рис. 5. Картины деформированного состояния заготовки при комбинированном выдавливании

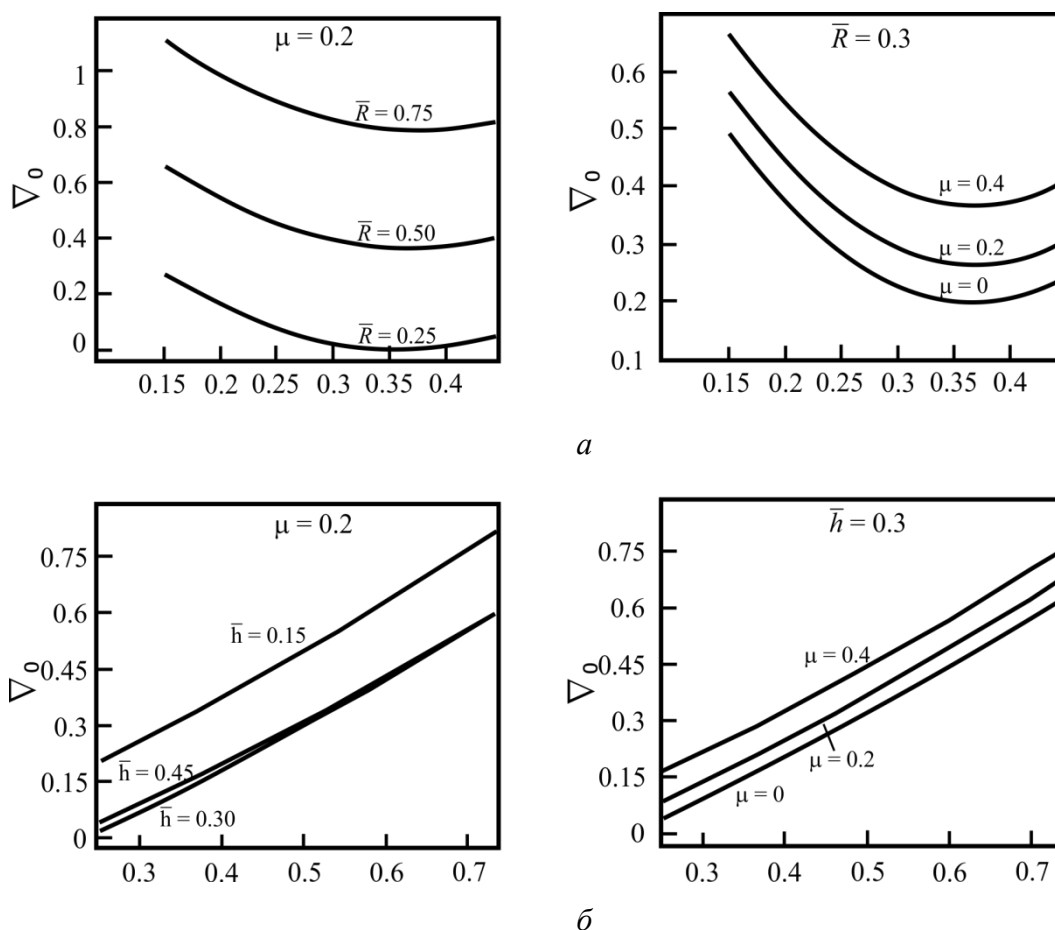


Рис. 6. Зависимость объема формируемого отростка от относительных величин толщины фланца (а) и радиуса отростка (б)

тельной толщины фланца уменьшается объем металла, вытекаемого в отросток с относительным радиусом $\bar{R} = R/R_0$. Такая тенденция наблюдается до значения $\bar{h} = H/R_0 = 0.35$ (при толщине фланца $H = 5 \text{ mm}$), после чего уве-

личивается заполнение отростка металлом, истекаемым в обратном направлении. Это объясняется тем, что на первом этапе преимущественным направлением течения является радиальное выдавливание во фланцевую зону, а на последней стадии при увеличении диаметра и объема фланца повышается сопротивление деформированию во фланце, и происходит рост объема металла, перемещаемого в отросток. Повышение трения во фланцевой зоне также способствует большему перемещению металла в отросток. Преимущественное течение в область фланца подсказывает, что его ограничение по наружному контуру способствует достижению требуемых размеров детали. Интересно отметить, что такое ограничение, хотя и вызывает заметный рост сил деформирования, не является критическим. Вместе с тем этим способом при необходимости удастся достичь достаточно четкого оформления фасонного (многогранного или более сложного) контура фланца, что при обычном радиальном выдавливании в закрытую полость недопустимо из-за появления критических нагрузок на инструмент.

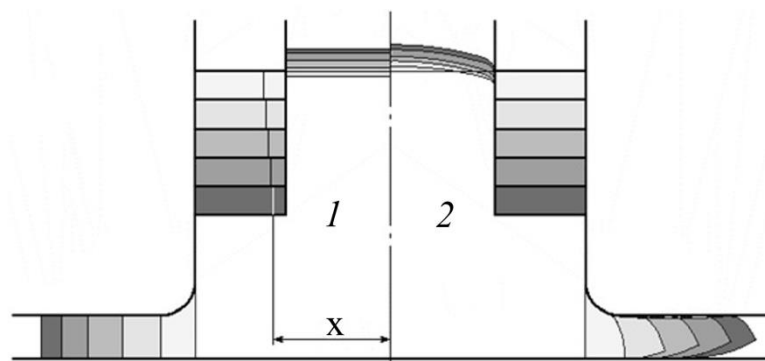


Рис. 7. Изменение геометрии полуфабриката, рассчитанное методом верхней оценки (1) и МКЭ (2)

Для оценки закономерностей формоизменения проводили наблюдения и за нарастанием размеров фланца и отростка при выдавливании деталей. Картины поэтапного увеличения контура детали, представленные на рис. 7, позволяют сопоставлять данные расчета формоизменения детали ($2R_0 = 28 \text{ mm}$, $2R = 20 \text{ mm}$, $S = 15 \text{ mm}$, $H = 3 \text{ mm}$) с отростком и фланцем МКЭ и методом верхней оценки [6]. Оба метода показывают, что приращение высоты детали в сравнении с исходной высотой заготовки незначительно, а образование отростка происходит преимущественно за счет внедрения пуансона в заготовку. Этот вывод подтверждается и экспериментальными данными.

Детали, получаемые рассмотренными способами комбинированного выдавливания, отличаются сложностью конфигураций (рис. 8), высоким качеством поверхности и точностью диаметральных размеров детали, обусловленной тем, что обработка пластическим деформированием производится в одной и той же матрице без переустановки полуфабрикатов.



Рис. 8. Детали, изготовленные радиально-обратным выдавливанием

Места, уязвимые с точки зрения разрушения, – это периферия выдавливаемого фланца, где напряженное состояние близко к линейному вследствие действия одного окружного растягивающего напряжения. Линии сдвига (проведенные между переходными кромками) могут представлять опасность с точки зрения исчерпания ресурса пластичности при деформировании малопластичных металлов и сплавов, а также при худших условиях контактного трения на торце пуансона и боковой поверхности матрицы.

Ограничением в использовании схем радиально-обратного выдавливания стержневых деталей может быть то обстоятельство, что применение полого пуансона возможно лишь для деформирования материала с низким напряжением текучести. В противном случае срок службы такого инструмента, испытывающего значительные растягивающие напряжения, станет недостаточным.

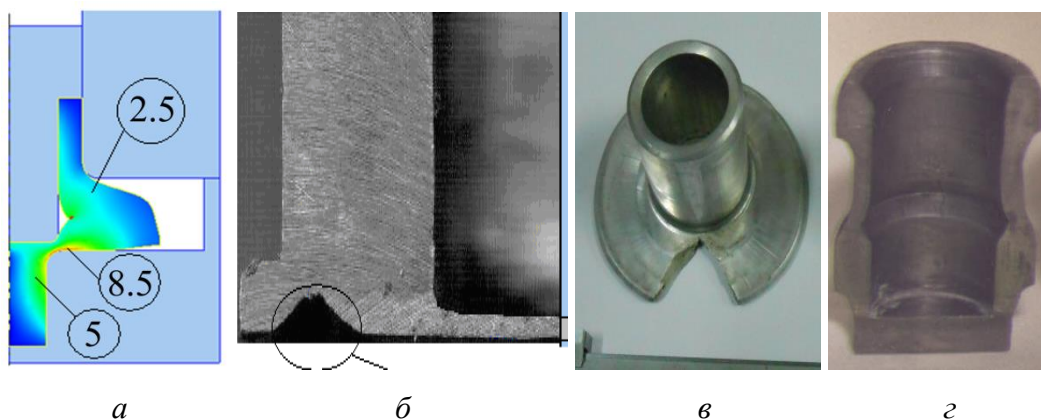


Рис. 9. Дефекты деталей при комбинированном выдавливании

Дефектами, характерными для данных процессов комбинированного выдавливания, являются утяжины, отклонения формы фланцев, неприлегания и разрывы. Дефекты типа утяжин присущи в основном деталям типа стаканов с фланцем. Утяжины внутри полости появляются при совмещенном выдавливании полости стакана при приближении пуансона к зоне образования

фланца (рис. 9,а). При поэтапном выдавливании этот дефект возникает при прохождении пуансоном участка формирования фланца. Для устранения дефекта необходимо обеспечить заблаговременное заполнение радиальной полости под фланец. Утяжина на дне стакана имеет ту же природу, что и при обратном выдавливании стаканов без фланца, т.е. вызвано опережающим течением в стенки внутренних частиц металла по сравнению с течением периферийных частиц (рис. 9,б) [9,14,15]. Во избежание данного дефекта деталей следует ограничить минимальную толщину дна выдавливаемого стакана величиной, равной толщине стенки стакана.

Дефекты в виде разрывов и разрушений фланцев (рис. 9,в) вызваны, как было отмечено, неблагоприятной схемой напряженно-деформированного состояния металла на периферийных участках выдавливаемого фланца. Для улучшения штампуемости и увеличения предельного диаметра фланца рекомендуется предусмотреть высадку фланца на заключительной стадии [2,3]. Для поэтапных схем комбинированного выдавливания также характерны дефекты типа утяжин в полости, появляющиеся при смене стадий обратного и радиального выдавливания (рис. 9,г).

Полученные сведения позволят обосновать технологические рекомендации для получения качественных полых и стержневых деталей с фланцем холодным комбинированным выдавливанием.

Выводы

Рассмотрены способы изготовления деталей с фланцем методом комбинированного радиально-обратного выдавливания. Приведены результаты моделирования процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания стержневой детали с фланцем и отростком МКЭ. Дана оценка закономерностям формоизменения и развития напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе комбинированного выдавливания полых и стержневых деталей. Установлено, что при комбинированном выдавливании с истечением металла в радиальном и обратном направлениях очаги интенсивной пластической деформации автономно сосредоточены в зонах выходных отверстий на переходных кромках деформирующего инструмента. Представлены графические зависимости формоизменения заготовки, которые позволяют прогнозировать получение полуфабрикатов с необходимыми геометрическими параметрами. Дано сопоставление расчетных значений параметров формоизменения, полученных МКЭ, энергетическим методом верхней оценки и путем экспериментальных исследований.

1. *В.А. Евстратов*, Основы технологии выдавливания и конструирования штампов, Вища школа, Харьков (1987).
2. *И.С. Алиев*, Кузнечно-штамповочное производство № 2, 7 (1990).
3. *Л.И. Алиева*, Обработка материалов давлением № 1 (42), 100 (2016).
4. *Л.И. Алиева*, Научно-технический прогресс в металлургии, Темиртау (2015).

5. Л.И. Алиева, Е.М. Солодун, Х.В. Гончарук, А.В. Шкира, Вестник Херсонского национального технического университета № 4 (55), 82 (2015).
6. L. Aliieva, Y. Zhabankov, Metallurgical and Mining Industry № 11, 175 (2015).
7. M. Milutinovic, D. Cupkovic, D. Vilotic, T. Pepelnjak, M. Plancak, J. Technol. Plast. **31**, № 1–2, 110 (2006).
8. Л.И. Алиева, Н.С. Грудкина, Вестник Донского государственного технического университета **12**, № 4, 195 (2012).
9. I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhabankov, Metallurgical and Mining Industry **3**, № 7, 17 (2011).
10. Пат. 108586 Україна, В21J 13/02. Пристрій для видавлювання порожнистих виробів з фасонною зовнішньою поверхнею, Л.І. Алієва; Бюл. № 14-2016.
11. Н.В. Биба, С.А. Стебунов, Ю.А. Гладков, П.С.Мордвинцев, КШП. ОМД № 1, 36 (2011).
12. И.П. Ренне, Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки давлением, ТПИ, Тула (1979).
13. Л.И. Алиева, К.В. Гончарук, А.В. Шкира, Обработка материалов давлением № 2 (41), 35 (2015).
14. Л.И. Алиева, И.С. Алиев, П.Б. Абхари, О.В. Патык, Вісник Національного технічного університету «ХП» № 47, 140 (2011).
15. Л.И. Алиева, Пластическая деформация металлов: коллективная монография, НМетАУ Днепрпетровск (2014), с. 353–369.

L.I. Aliieva

COMBINED RADIAL-BACKWARD EXTRUSION OF FLANGE PARTS

In this paper, methods of manufacturing hollow and rod parts with flange in combined radial-backward extrusion are considered. The results of process simulation are defined by finite element method. The estimation of billet deformation and billet strain state in combined extrusion such as parts of cup and rod with flange are determined. It is considered that in combined extrusion with metal outflow in radial and backward direction, shaping of intensive plastic deformation is concentrated in outlets zones and deformed tool of transient edges. The depending on the shaping of parts that allows to predict for making parts with the necessary geometrical dimensions as graphical shapes are determined.

Keywords: extrusion method, parts with flange, combined radial-backward extrusion, finite element method, strain state, deformation

Fig. 1. Combined radial-backward extrusion methods

Fig. 2. Distribution of stress-strain state in radial-backward extrusion by finite element simulation

Fig. 3. Theoretical (*a*) and experimental (*b*) results with change of dimension to deformed part

Fig. 4. Meshing form and strain field in extrusion with flange as cup

Fig. 5. Distribution of strain state in combined extrusion

Fig. 6. The value dependence of deformed branch from the relative magnitudes of the flange thickness (a) and branch radius (b)

Fig. 7. Changing the geometry of parts, solution of upper bound method (1) and finite element method (2)

Fig. 8. Produced parts by radial-backward extrusion

Fig. 9. Defect parts in combined extrusion