

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.777

Л.И. АЛИЕВА, О.В. ЧУЧИН, П.В. ГНЕЗДИЛОВ
Донбасская государственная машиностроительная академия**СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ СИЛ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ХОЛОДНОМ
ВЫДАВЛИВАНИИ**

В статье рассмотрены разновидности технологических способов холодной объемной штамповки выдавливанием, направленных на снижение сил и давлений деформирования при изготовлении полых деталей. Одним из путей снижения энергосиловых параметров деформирования является снижение жесткости схем напряженного состояния за счет обеспечения раздачи - преимущественного радиального истечения металла. Эффективно также повышение степени свободы истечения металла посредством применения схем комбинированного выдавливания и облегчающих камер и полостей. Проведены экспериментальные исследования с целью сопоставления сил деформирования при изготовлении полых деталей типа стакана из алюминиевого сплава АД31 и технического свинца способами продольного и комбинированного выдавливания с раздачей. Установлено, что при радиально-прямом выдавливании с раздачей сила деформирования может быть снижена в несколько раз по сравнению с обратным выдавливанием. При изготовлении полых деталей сначала в процессе комбинированного обратно-прямого выдавливания, а затем в процессе радиально-прямого выдавливания усилие деформирования снижается на каждом из этапов по сравнению с обратным выдавливанием.

Ключевые слова: выдавливание с раздачей, комбинированное выдавливание, полые детали, схемы деформирования, силы деформирования, экспериментальная оценка.

Л.І. АЛІЄВА, О.В. ЧУЧИН, П.В. ГНЕЗДИЛОВ
Донбаська державна машинобудівна академія**СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ СИЛ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ХОЛОДНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ**

У статті розглянуті різновиди технологічних способів холодної об'ємної штампування видавлюванням, спрямованих на зниження сил і тисків деформування при виготовленні порожнистих деталей. Одним із шляхів зниження енергосилових параметрів деформування є зниження жорсткості схем напруженого стану за рахунок забезпечення роздачі - переважної радіальної течії металу. Ефективно також підвищення ступеня свободи течії металу за допомогою застосування схем комбінованого видавлювання і полегшуючих камер і порожнин. Проведено експериментальні дослідження з метою зіставлення сил деформування при виготовленні порожнистих деталей типу стакану з алюмінієвого сплаву АД31 і технічного свинцю способами поздовжнього і комбінованого видавлювання з роздачею. Встановлено, що при радіально-прямому видавлюванні з роздачею сила деформування може бути знижена в кілька разів у порівнянні зі зворотним видавлюванням. При виготовленні порожнистих деталей спочатку в процесі комбінованого зворотньо-прямого видавлювання, а потім в процесі радіально-прямого видавлювання зусилля деформування знижується на кожному з етапів в порівнянні зі зворотним видавлюванням.

Ключові слова: видавлювання з роздачею, комбіноване видавлювання, порожні деталі, схеми деформування, сили деформування, експериментальна оцінка.

L.I. ALIEVA, O.V. CHUCHIN, P.V. GNEZDILOV
Donbass State Engineering Academy**METHODS OF REDUCE DEFORMATION FORCE IN COLD FORGING**

This paper is considered different of technological method in cold forging process based on the reduction of forces and pressure to make hollow parts. One of the methods to reduce the energy and power of deformation parameters, it is to reduce the stiffness of the stress state schemes by providing expansion – preferential metal radial flow. Effectively also increase the freedom degree of the metal expiry is shown combined extrusion scheme, chambers and cavities facilitate. The experimental investigations are considered for the purpose of comparing the deformation forces to make hollow parts such as cup part from aluminum alloy AD31 and technical lead in longitudinal and combined extrusion with expansion. It is considered that in radial-forward extrusion deformation force can be reduced by several times in comparison with backward extrusion. To make hollow parts, first

time in combined extrusions (backward-forward and radial-forward extrusions) deforming force is reduced at each stage in comparison with backward extrusion.

Keywords: extrusion with expansion, combined extrusion, hollow part, deformation scheme, deformation force, experimental result.

Постановка проблемы

Холодная объемная штамповка (ХОШ) выдавливанием является эффективным методом получения прецизионных деталей и заготовок с высокими показателями точности формы и размеров и качества поверхности. Применение процессов холодного деформирования в производстве сдерживается в основном из-за повышенных удельных и полных нагрузок, действующих на формообразующий инструмент. Давление деформирования в ряде случаев может достигать до пяти значений напряжения текучести материала заготовки. Как следствие, снижается стойкость деформирующего инструмента и надёжность работы штампов [1,2].

Анализ последних исследований и публикаций

Одним из эффективных направлений решения данной проблемы является поиск и освоение новых схем штамповки, позволяющих оптимизировать силовой режим процессов деформирования. Для процессов ХОШ выдавливанием это в первую очередь означает снижение давлений и сил формообразования деталей. В технологиях ХОШ известен целый ряд способов, направленных на снижение энергосиловых параметров деформирования: выдавливание с активными силами трения, деформирование с применением ультразвуковых колебаний, комбинированное деформирование (выдавливание, нагружение) заготовки, локальное деформирование, выдавливание с раздачей, выдавливание с натяжением [2-8]. Кроме повышения стойкости штампового инструмента, перечисленные выше способы позволяют повысить качество деталей, сложность и точность их формы и, соответственно, расширить технологические возможности процессов холодного выдавливания [3,8,9].

В способах выдавливания с раздачей деформирование сопровождается увеличением диаметральных размеров заготовки. К данным способам выдавливания стаканов, наряду с известными процессами (например, деформирование с облегчающими камерами, безматричное выдавливание, штамповка с раздачей), можно отнести менее известный, но эффективный способ снижения усилия деформирования - комбинированное последовательное радиально-прямое выдавливание – процесс с развитым радиальным течением деформируемого материала [9,10].

В последние годы много работ посвящено оценке силового режима процессов комбинированного выдавливания и установлению характера влияния на энергосиловые параметры технологических факторов и коэффициента трения. Теоретические исследования процесса изготовления полых деталей способом радиально-прямого выдавливания с раздачей, позволяют судить о возможном существенном снижении силовых параметров (до нескольких раз) в случае реализации на практике преимуществ радиально-прямого выдавливания [9, 13].

Несмотря на большое количество предложенных способов выдавливания направленных на оптимизацию силового режима, число работ посвященных сопоставлению силовых параметров новых способов комбинированного и традиционных схем продольного выдавливания незначительно, при этом они содержат в основном результаты теоретического анализа и компьютерного моделирования [9, 11, 13].

Формулировка цели исследований

Целью данной статьи является обобщение способов выдавливания с раздачей на основе продольного (обратного и прямого) и комбинированного радиально-продольного выдавливания и сравнение силовых параметров выдавливания полых деталей типа стакана различными технологическими способами.

Изложение основного материала исследования

Приемы силового и кинематического воздействия на деформируемую заготовку (комбинированное течение, раздача металла, создание облегчающих камер и др.), используемые для снижения сил деформирования при холодном выдавливании, направлены на повышение степени свободы истечения металла и, как следствие, вызывают изменение схемы напряженно-деформированного состояния заготовки.

Рассмотрим вначале разновидности технологических приемов и способов (рис.1), призванных снизить силы штамповки в наиболее распространенных и энергоемких процессах выдавливания полых деталей.

Характерным примером применения способов комбинированного выдавливания с раздачей при получении полых деталей являются схемы деформирования с дополнительным (преимущественно радиальным) течением материала в облегчающие камеры (рис. 1, ряд А) [1, 4, 5]. Раздача деформируемого материала при обратном выдавливании происходит в камеры («карманчики»), предусмотренные в заготовке (схемы А1-А3, В1-В2), в матрице (схемы В1-В2, В3) или одновременно в заготовке и матрице (схема А4).

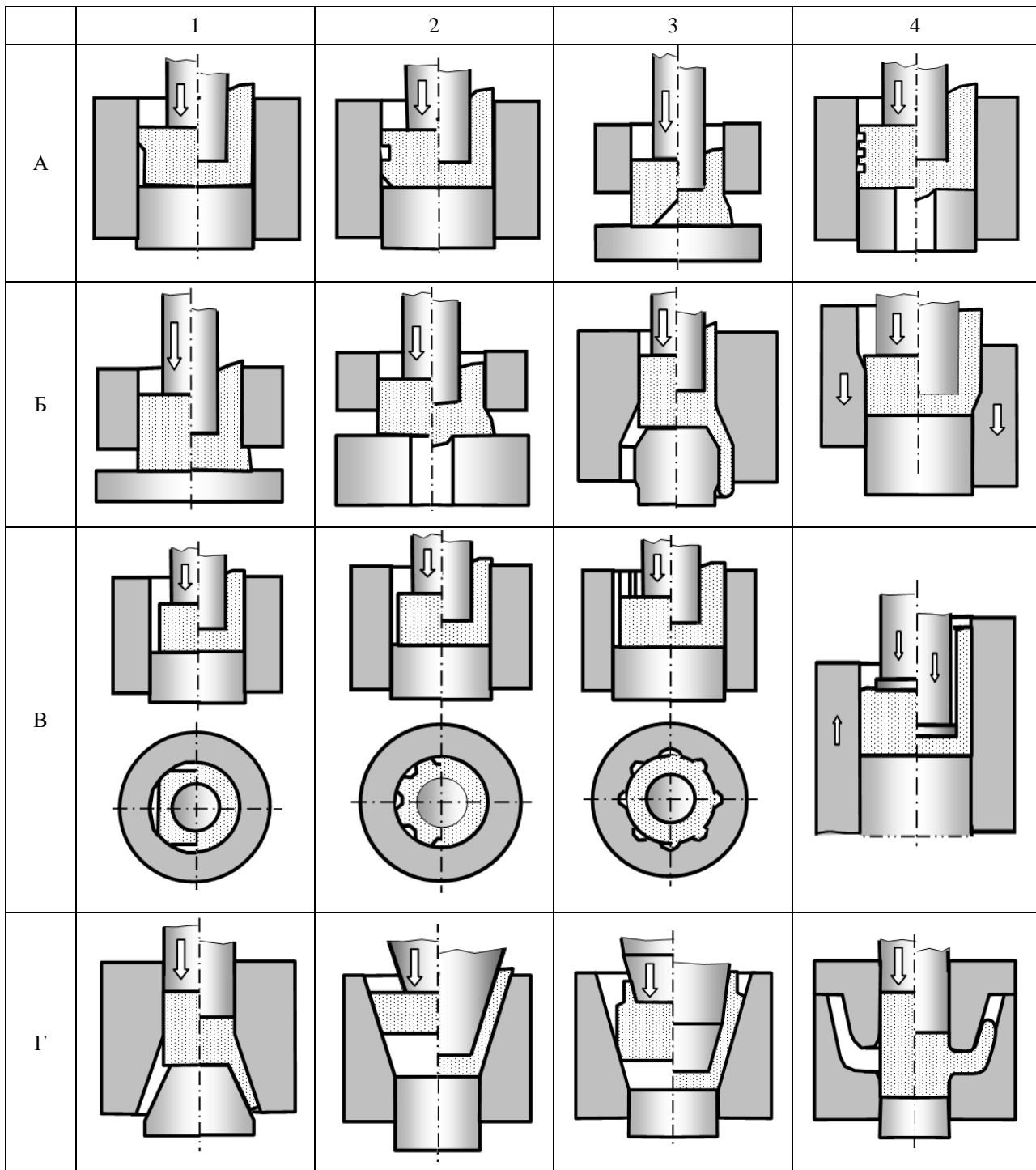


Рис. 1. Процессы выдавливания с раздачей

Облегчающие камеры изменяют характер течения материала, увеличивают предельную степень деформации и гидростатическое давление [4]. Кроме этого, создание облегчающих камер в заготовке требует предварительных формообразующих операций. В некоторых случаях это можно сделать при сопутствующей калибровке исходной заготовки, а также обеспечить путем выбора профилированного исходного проката. Схемы выдавливания полостей с облегчающими камерами для снижения рабочих сил реализованы на практике в процессах изготовления выдавливанием гравюр матриц [5, 1].

По сути способа комбинированного выдавливания (схемы Б1-Б2) заготовка подвергается дополнительному кинематическому (не силовому) воздействию, заключающемуся в увеличении степени свободы истечения металла из замкнутой полости. Обеспечение двухстороннего и трехстороннего выдавливания имеет решающее значение для снижения гидростатического давления в очаге деформации, и

кроме того, введення радіального течення принципіально змінює схему НДС: замість всестороннього стиснення реалізується різномірна схема напруженого стану, суттєво знижуюча значення тисків і сил деформування. С цієї точки зору цікавими також є способи подовженого зсувеного (обратно-прямого) видавлювання (схема Б3) і зворотного видавлювання з роздочей в рухомій матриці (схема Б4). Особливими за ефективності впливу є способи видавлювання (схема В3) в яких для зниження навантажень на деформуючий пуансон використовуються сили активного контактної тертя [2].

С точки зору оптимізації силового режиму представляє інтерес застосування способів деформування, що дозволяють максимально використовувати ресурс пластичності матеріалу за рахунок реалізації схем напруженого стану оптимальної жорсткості в поєднанні з зниженими навантаженнями [2-4, 6-11]. При виготовленні конічних стаканів для створення сприятливих умов деформування в умовах впливу розтягуючих напружень видавлювання металу здійснюють в зужуючійся зазор між матрицею і нижнім пуансоном (схема Г1) [2, 6].

Використання комбінованого зсувеного видавлювання при виготовленні деталей типу «стакан» з конічною формою внутрішньої і зовнішньої бокових поверхонь дозволяє знизити удільні сили, підвищити продуктивність і розширити асортимент отримуваних деталей. Забезпечення двостороннього течення металу (одночасно вгору і вниз) дозволяє знизити силу видавлювання на 30-35% (схема Г2). Використання профілюваних заготовок з центруючим конусним пояском для комбінованого деформування (видавлювання з сдвигом і роздочей) дозволило суттєво знизити різномірність і підвищити стійкість пуансонів (схема Г3) [9]. К обмеженням деформування за цими двома схемами можна віднести необхідність попереднього профілювання заготовок і вибір оптимальної форми заготовки, встановлюваної, як правило, експериментальним шляхом для забезпечення двостороннього течення металу в процесі всієї операції. Спосіб послідовного радіально- зворотного видавлювання (схема Г4) не потребує спеціальної підготовки заготовок і може бути рекомендовано для отримання конічних чашек.

Типичною схемою штампування з розвинутим радіальним теченням (роздочей) деформуваного матеріалу є спосіб радіального видавлювання фланців [9], що відрізняється менш жорсткою схемою напруженого стану. Розвитком цього способу стало доповнення його елементами подовженого течення, що дозволило отримувати в комбінованому процесі порожні вироби з монолітних заготовок. В порівнянні з традиційними способами подовженого видавлювання, зворотним (рис.2, схема 1) і прямим (схема 2), таке поєднання повинно було привести до помітного зниження енергосилових параметрів. Представляє інтерес порівняння силових характеристик процесів подовженого і комбінованого послідовного радіально-прямого видавлювання порожніх деталей.

На рис. 2 представлені способи видавлювання і фотографії деталей в розрізі, отримані відповідним способом. Матеріал заготовок - сплав АД1, а деталі після видавлювання були протравлені для виявлення макроструктури.

Способи видавлювання з роздочей є модифікацією процесу прямого видавлювання стакана шляхом забезпечення зсувеного радіального течення металу в очагах деформації. Ці способи іноді називають способом безматричного видавлювання (схема 3) [8] або способом Куноги (схема 4) [4, 14]. В процесі вільного (без матриці) видавлювання виготовляють глибокі порожні судини з мінімальними навантаженнями [8, 13]. Остаточно деталі типу гільз (глибоких стаканів) формують калібруванням – протяжкою.

Відомий спосіб отримання порожніх виробів з монолітної заготовки в результаті радіального течення, що змінюється по ходу зворотним або прямим теченням деформуваного металу [9-12]. Цей спосіб представлений схемами 5, 6 і 7. Процес виготовлення порожніх виробів за цими схемами називають комбінованим послідовним радіально-прямим видавлюванням і також відносять до процесів з розвинутим радіальним теченням металу. Реалізація цієї схеми деформування дозволяє знизити сили деформування як за рахунок зменшення площі контакту активного деформуючого інструмента з заготовкою, так і за рахунок різномірного напружено-деформованого стану [9, 11].

Спосіб ускладненого радіально-прямого видавлювання, при якому в зоні розвороту відбувається додатково і течення в радіальному напрямку представлено схемою 8.

Способи 9 і 10 представляють 2-х перехідний процес, з виконанням комбінованого зворотного-прямого видавлювання полуфабриката, що підлягає потім радіально-прямому видавлюванню.

Для експериментального дослідження силового режиму застосовувалися циліндричні зразки висотою від 12 до 45 мм з діаметрами 15,0 мм, 21,0 мм і 28,0 мм, отримані з сортового прокату алюмінієвого сплаву АД31 і пресованих свинцевих прутків (технічний свинець С1). Висота заготовок вибиралася з урахування постійності їх об'ємів. Перед видавлюванням зразки з сплаву АД1 підлягали отжигу в процесі 40 хвилин в печі, нагрітій до температури 400°C. В якості смазки був використаний тваринний жир. Порожні деталі типу стакана мали товщину стінки - 2 мм, товщину дна - 3 мм, зовнішній діаметр - 28 мм і висоту - 36^{±1} мм. Для дослідження макроструктури,

полученные в процессе выдавливания полые детали разрезались вдоль оси, и после предварительной подготовки меридиональные поверхности деталей протравливались в 5% растворе NaOH при температуре 70°C. Экспериментальные исследования проводились на испытательной машине МС-2000.

№	Схема	Деталь	№	Схема	Деталь
1			2		
3			4		
5			6		
7			8		
9a			9		
10a			10		

Рис. 2. Схемы выдавливания и меридиональные сечения полученных полых деталей

На графике зависимости усилия деформирования от рабочего хода ползуна для различных способов холодного выдавливания (рис. 3) номер кривой соответствует номеру схемы деформирования и детали. Так, деталь 1 была получена обратным выдавливанием, 2 – прямым выдавливанием, 3 – прямым (без матрицы) выдавливанием с раздачей, 4 – свободным радиально-прямым выдавливанием (аналогично получению детали 3, но истечением металла только лишь через боковую поверхность заготовки), 5, 6 и 7 – радиально-прямым выдавливанием, 8 – радиально-прямым выдавливанием с возможностью дополнительного течения металла в радиальном направлении в зоне разворота.

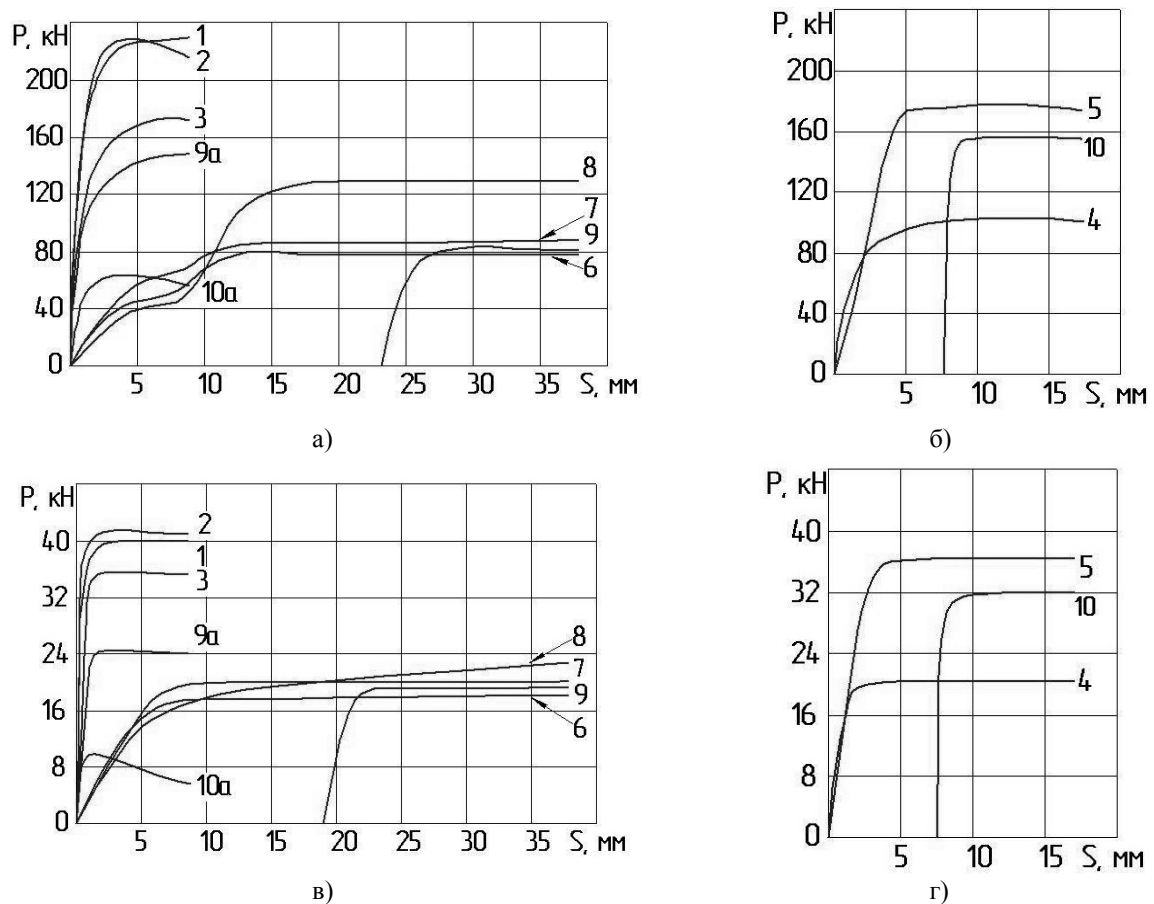


Рис. 3. Графики зависимости сил деформирования от рабочего хода по способам выдавливания полой детали из сплава АД1(а, б) и технического свинца С1(в, г)

Как видно из графика, наибольшее усилие деформирования характерно для схем обратного и прямого выдавливания (кривые 1 и 2). Усилие деформирования по ходу процесса для этих схем отличается незначительно. Прямое (без матрицы) выдавливание (кривая 3) позволяет снизить усилие деформирования на 22% по сравнению с обратным выдавливанием (кривая 1). В процессе свободного (без матрицы) выдавливания (схема 4) изготавливают глубокие полые сосуды. При этом удельное усилие снижается в 1,3 - 1,5 раза по сравнению с традиционным способом изготовления подобных деталей холодным обратным выдавливанием за счёт снижения в процессе деформирования влияния трения и свободной раздачи металла [8, 13].

Радиально-прямое выдавливание полой детали из заготовки диаметром $\varnothing 15$ мм позволяет снизить усилие в 2,4 раза по сравнению с обратным выдавливанием (кривая 4), а из заготовки диаметром $\varnothing 21$ мм – на 21% (кривая 5). То есть, увеличение площади поперечного сечения заготовки приблизительно в 2 раза приводит к увеличению усилия деформирования для схемы радиально-прямого выдавливания также приблизительно в 2 раза. Характер изменения усилия деформирования по ходу процесса последовательного радиально-прямого выдавливания полых деталей отличается нестационарностью и непрерывным ростом силы на начальной стадии радиального истечения и последующего разворота течения металла с радиального на прямое направление. Установившаяся стадия исследуемого процесса с постоянной величиной силы деформирования начинается после разворота течения металла и продолжается до окончательного оформления полой детали.

Изготовление полых деталей по схеме 6 позволяет снизить усилие деформирования на 17% (кривая 6) по сравнению с радиально-прямым выдавливанием (кривая 7) ввиду меньших затрат на преодоление сил контактного трения.

Свободное радиально-прямое выдавливание (кривая 4) заготовок из алюминиевого сплава по сравнению с радиально-прямым выдавливанием заготовки $\varnothing 21$ мм (кривая 5) позволяет уменьшить усилие формоизменения на 41%, а по сравнению с радиально-прямым выдавливанием заготовки $\varnothing 15$ мм (кривая 7) приводит к росту усилия деформирования на 11%.

Создание дополнительного очага деформации в зоне разворота течения металла с радиального направления на прямое за счёт предоставления металлу дополнительной степени свободы течения в радиальном направлении (кривая 8) с целью снижения сил выдавливания не увенчалась успехом. Материал заготовки в первую очередь заполнял полость высотой 0,7 мм и диаметром 50 мм в радиальном направлении, и только затем начал разворачиваться в зоне разворота. В результате, по сравнению с радиально-прямым выдавливанием (кривая 4) усилие возросло на 33% (кривая 8).

Относительно свободное формоизменение заготовок при изготовлении полуфабрикатов по схемам 3, 4, 6 можно принять первым этапом изготовления полых детали типа глубоких гильз, который позволяет заметно снизить силу деформирования по сравнению с обратным (кривая 1) и радиально-прямым выдавливанием из заготовки $\varnothing 15$ мм (кривая 7) и заготовки $\varnothing 21$ мм (кривая 5). В то же время, по этим способам трудно получить детали требуемой формы, размеров и качества. Но путем введения дополнительной операции калибровки, вытяжки с утонением или протяжки на оправке этих полуфабрикатов можно получить высококачественные детали конечных размеров с значительно меньшими энергозатратами.

Детали 9 и 10 изготавливались за два перехода. На первом переходе получали полуфабрикаты 9а и 10а комбинированным обратным-прямым выдавливанием со свободным истечением металла в обратном направлении и прямом направлении (формировался отросток $\varnothing 15$ мм у полуфабриката 9а и $\varnothing 21$ мм – у полуфабриката 10а). На втором переходе объём металла, который был ранее выдавлен в отросток, перемещался в обратном направлении (способом радиально-прямого выдавливания) для формирования стенки полого изделия. Кривые 9 и 10 начинаются на горизонтальной оси не с нуля по той причине, что высота отростков полуфабрикатов 9а и 10а меньше, соответственно, высоты 42 мм и 21,4 мм заготовок и поэтому для получения полого изделия с конечными размерами деформирующему пуансону необходимо было совершить меньший ход. Следует отметить, что каждый из этапов этого 2-х переходного процесса обеспечил снижение силы деформирования. Так, по сравнению с обратным выдавливанием (кривая 1) комбинированное обратное-прямое выдавливание позволило снизить усилие деформирования при изготовлении полуфабриката 9а на 35% (кривая 9а), при изготовлении полуфабриката 10а в - 3,5 раза (кривая 10а). По сравнению с радиально-прямым выдавливанием заготовки $\varnothing 15$ мм (кривая 4) усилие формоизменения уменьшилось на 15% (кривая 9), по сравнению с радиально-прямым выдавливанием заготовки $\varnothing 21$ мм (кривая 5) – на 14% (кривая 10). То есть, увеличение диаметра формируемого комбинированным обратным-прямым выдавливанием отростка на первом этапе приводит к снижению усилия деформирования на этом этапе и увеличению этого параметра на втором этапе. Поэтому диаметр отростка является оптимизируемым параметром, позволяющим регулировать нагрузки на инструмент на этапах.

Выводы

Рассмотрены и систематизированы разновидности технологических способов выдавливания, направленных на снижение сил и давлений деформирования при изготовлении полых деталей. Для снижения энергосиловых параметров холодного деформирования эффективно обеспечение большей степени свободы истечения металла, а также деформирования с раздачей - преимущественным радиальным течением.

Экспериментальным путем выполнено сопоставление силового режима процессов изготовления полых деталей способами продольного (обратного и прямого), прямого с раздачей (безматричного), комбинированного радиально-прямого и обратного-прямого выдавливания. Установлено, что наибольшие значения сил деформирования соответствуют способам обратного и прямого выдавливания. По сравнению с обратным выдавливанием в процессе радиально-прямого выдавливания усилие деформирования может снижаться в несколько раз. Изготовление полых деталей сначала в процессе комбинированного обратного-прямого выдавливания, а затем в процессе радиально-прямого выдавливания позволило на каждом из этапов снизить силу деформирования по сравнению с обратным выдавливанием. Увеличение диаметра формируемого комбинированным обратным-прямым выдавливанием отростка на первом этапе приводит к снижению сил деформирования на этом этапе и увеличению этого параметра на втором этапе.

Список использованной литературы

1. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В.А. Евстратов. - Харьков. : Вища школа, 1987. – 142 с.
2. Овчинников А.Г. Основы теории холодного выдавливания на прессах / А.Г. Овчинников. - М.: Машиностроение, 1987. - 205 с.

3. Алиева Л. И., Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2008. – № 1 (11). – С. 13–19.
4. Алиев И.С. Технологические процессы выдавливания с раздачей / И.С. Алиев, О.В. Чучин, А.А. Носаков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. – С. 328–334.
5. Хыбемяги А.И. Совершенствование обработки формообразующих полостей прессформ и штампов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1968. - №9. - С.17-21.
6. Евстифеев В.В., Подколзин Г.П. Методика построения геометрии инструмента при выдавливании конических стаканов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1978. - №3. - С.11-13.
7. Даммер А.Э., Эрк Е.В., Кононов В.Г. Совершенствование процесса выдавливания полых деталей на кривошипных прессах // Кузнечно-штамповочное производство. - 1977. - №2. - С.10-11.
8. Ренне И.П. Технологические возможности процесса свободного выдавливания (без матрицы) полых деталей / И.П. Ренне, А.И. Сумарокова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – №6. – С. 25-26.
9. Алиева Л. И. Анализ процесса последовательного радиально-прямого выдавливания методом кинематических модулей / Л.И. Алиева, О. В. Чучин // Научный Вестник ДГМА. –Краматорск : ДГМА, 2015. – № 3 (18Е). - С. 5-21.
10. Кузнецов А.В., Протопопов О.В., Блудов В.А., Коноплин А.А. Горячая штамповка стальных поковок в разъемных матрицах. - М.:НИИМАШ, 1968. – 80 с.
11. Чучин О.В., Алиева Л.И. Комбинированное последовательное радиально-прямое выдавливание полых деталей // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2002. – С. 352-355.
12. Алиева Л.И. Технологические возможности процессов радиально-прямого выдавливания с раздачей / Л.И. Алиева, О.В. Чучин // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы XII Всероссийской НПК. Том 1. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС. 2015. – С. 148-152.
13. Калюжний В. Л. Порівняльний аналіз процесів зворотного видавлювання і прямого видавлюванням з роздачею вісесиметричних виробів з порожниною постійного діаметру / В. Л. Калюжний, Л. І. Алієва, І. П. Куліков // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 4 (37). – С. 87–92.
14. Алиева Л. И., Чучин О. В. Экспериментальное исследование процессов штамповки полых деталей типа стакана // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VI Международной научно-технической конференции, – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – С. 8–10.