

Расширение применения штамповки холодным выдавливанием путем разработки прессов, создающих активно направленные силы контактного трения

А. М. Дмитриев, Н. В. Коробова, Н. С. Толмачев

Предложена доработанная высокопроизводительная технология холодного выдавливания, позволяющая изготавливать без последующей обработки резанием и термообработки детали с малой шероховатостью поверхности и структурой, обладающей повышенной прочностью.

Примененный метод выдавливания с активно направленными силами контактного трения, способствующими формоизменению заготовки, позволяет разгрузить пуансоны и изготавливать без использования нагрева детали даже из низколегированных среднеуглеродистых сталей. Для осуществления такой штамповки требуется применение специализированных прессов, конструкции которых описаны в статье.

Ключевые слова:

выдавливание холодное, увеличение сопротивления усталости пуансонов, силы трения активно направленные, прессы специализированные

УДК 621.979:621.73.01 | ВАК 2.5.7, 2.6.4
DOI: 10.22184/2499-9407.2024.37.4.48.54

Введение

Силы контактного трения на границах между деформируемой заготовкой и штамповым инструментом имеют существенное значение для реализации деформирования заготовки и изготовления высококачественной штампованной поковки.

Рассматривая влияние сил контактного трения при штамповке на структуру изготавливаемой детали необходимо конкретизировать область штамповки:

- горячая объемная штамповка;
- холодная объемная штамповка (ХОШ);
- листовая штамповка.

Это связано с тем, что, например, при горячей объемной штамповке силы контактного трения приводят, в первую очередь, к увеличению силы и энергии деформирования заготовки. Вследствие этого для штамповки требуется пресс с большим номинальным усилием. При этом силы контактного трения значительно меньше влияют на структуру и, как следствие, прочность поковки, поскольку горячая пластическая деформация сопровождается протеканием процесса рекристаллизации в материале заготовки.

ХОШ находит значительно более узкое применение, чем горячая объемная штамповка, несмотря на то, что при ХОШ в ряде случаев удается изготавливать готовые машиностроительные детали непосредственно деформированием. При этом исключается обработка поковок резанием, таким образом существенно повышается коэффициент использования металла [1]. Относительно узкое применение ХОШ объясняется тем, что в процессе пластической деформации внутри зерен заготовки в разных направлениях образуется большое количество стремящихся к перемещению линейных дефектов кристаллической решетки, называемых дислокациями и образующих так называемый лес дислокаций. Это приводит к значительному повышению сопротивления заготовки деформированию. В результате, при рационально организованном технологическом процессе ХОШ заготовок из малоуглеродистых сталей, в отличие от горячей объемной штамповки, достигается прочность изготавливаемой детали, соответствующая прочности детали из легированной стали [2–4].

Однако область применения холодного выдавливания, являющегося одной из операций ХОШ, ограничена величиной требующихся для деформации заготовки удельных сил выдавливания q . Удельная сила q определяется как сила P деформирования заготовки, деленная на площадь S поперечного сечения выдавливающего заготовку пuhanсона. В процессе выдавливания необходимая для деформации заготовки удельная сила может превышать ее допустимое значение, определяемое с позиций прочности пuhanсона.

Авторы настоящей статьи внесли свой вклад в разработку технологии холодного выдавливания заготовок с созданием активно направленных сил трения на поверхности контакта заготовки со штамповым инструментом. При этом существенно разгружаются выдавливающие заготовки пuhanсона и повышается сопротивление усталости пuhanсонов.

Основная часть

На рис. 1 приведена схема выдавливания с активно направленными силами трения. Справа на схеме приведена эпюра распределения нормальных давлений p_n на поверхность полости матрицы. Если скорость перемещения матрицы v_m больше скорости истечения металла $v_{ист}$, то направление сил трения на контакте с матрицей способствует течению металла и позволяет снизить удельную силу выдавливания q . Даже небольшое снижение удельной силы q позволяет

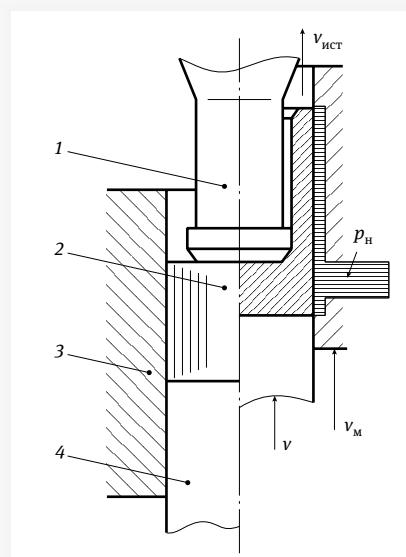


Рис. 1. Схема выдавливания детали типа «стакан»:
1 – выдавливающий пuhanсон,
2 – заготовка,
3 – матрица,
4 – контрупансон,
перемещаемый со скоростью v

заметно повысить сопротивление усталости выдавливающих пuhanсонов, которое оценивается по зависимости [5] сопротивления пuhanсонов усталостному разрушению.

Практикой установлено, что величина удельной силы выдавливания q , воспринимаемая выдавливающими пuhanсонами из лучших на современном этапе развития инструментального производства сталей (P9M4, P6M3, P6M5, ЭП761, HRC₉ 61...63 [1, 5]) не должна превышать 2500 МПа.

В величине удельной силы выдавливания q заметную долю играет контактное трение между инструментом и заготовкой, которое увеличивает необходимую для деформирования заготовки силу P .

Трение на контактной поверхности заготовки создает касательные напряжения τ_k , величина которого ограничена в соответствии с формулой:

$$\tau_k = \mu p_n < \beta \sigma_s / 2,$$

где σ_s – напряжение текучести деформируемого материала; μ – коэффициент трения по Ш. Кулону; β – коэффициент В. Лоде, максимальная величина которого равна 1,155. В отличие от предела текучести σ_p , являющегося для конкретного материала величиной постоянной, напряжение текучести изменяется в зависимости от степени и скорости деформации заготовки. Это напряжение, которое необходимо для того, чтобы вызвать и поддерживать пластическое состояние заготовки. Как было показано выше, при ХОШ деформируемый материал существенно упрочняется, и напряжение его текучести увеличивается.

Э. Зибель и Х. Кудо сочли целесообразным принимать трение независимым от нормального давления p_n и выражать его в долях от величины напряжения текучести:

$$\tau_k = \mu_s \beta \sigma_s. \quad (1)$$

Коэффициент μ_s , в отличие от коэффициента трения μ , называют фактором трения [6]. В последнем выражении значение σ_s принимают осредненным, а μ_s – постоянным по всей поверхности контакта. Таким образом, это выражение определяет и постоянство контактных касательных напряжений. Формула (1) носит у обработчиков давлением название «формула Зибеля». Поскольку максимальное касательное напряжение не может превзойти величины $0,5\beta\sigma_s$, поскольку фактор трения $\mu_s < 0,5\beta$.

Показанная на рис. 1 эпюра давлений p_h на поверхность полости матрицы имеет существенную неравномерность. Это объясняется тем, что пластическая деформация в заготовке при выдавливании деталей типа «стакан» сосредоточена в очаге пластической деформации, расположенным под торцом пуансона и, соответственно, выдавливаемой полости (рис. 2).

На рис. 2 видно, что независимо от глубины внедрения пуансона наиболее интенсивные искажения координатных сеток, нанесенных на плоскости меридиональных разрезов деформируемых заготовок, сосредоточены под торцами выдавливаемых полостей. При этом площади участков на поверхностях разрезов, в которых происходят интенсивные искажения координатных сеток, остаются постоянными независимо от глубины выдавливаемой полости. Эти участки наиболее интенсивных искажений координатных сеток соответствуют очагам пластической деформации.

Ниже рассмотренных участков интенсивных искажений координатные сетки имеют первоначальную форму. Это показывает, что ниже очагов пластических деформации отсутствуют, а имеет место только всестороннее равномерное сжатие заготовок. Таким образом, очаг пластической деформации имеет конкретную высоту, которая практически не изменяется по мере выдавливания полости.

Именно на уровне очага пластической деформации эпюра распределения нормальных давлений p_h на поверхность полости матрицы, показанная на рис. 1, имеет наибольшие значения. При теоретическом анализе операции выдавливания

стакана [7], напряженно-деформированное состояние заготовки рассматривалось с учетом реактивно или активно направленных напряжений контактного трения по матрице, действующих на высоте очага пластической деформации. При этом высота очага пластической деформации определялась из условия минимума мощности внешних сил, требующихся для деформирования заготовки. Сравнением выдавливания с реактивно и активно направленными касательными напряжениями контактного трения, определенными с применением формулы (1), оценено снижение удельной силы q , действующей в рабочей части выдавливающего пояса пуансона.

Если провести оценку ординат эпюры p_h (см. рис. 1) на уровне очага пластической деформации с инженерными позиций, то их величина примерно равна $q - \sigma_s$. Поскольку, изменяясь в зависимости от схемы выдавливания (с активными или реактивными силами контактного трения), а также от относительной толщины стенки выдавливаемого стакана, $q = (3...5)\sigma_s$, то $p_h = (2...4)\sigma_s$.

Также заслуживает внимания участок приведенной на рис. 1 эпюры распределения нормальных давлений p_h на поверхность полости матрицы, расположенный на уровне выдавленной стенки стакана. Поскольку при применении рассматриваемой схемы выдавливания матрица перемещается в сторону истечения металла заготовки в стенку со скоростью, превышающей скорость течения, на внешней поверхности выдавливаемой стенки, так же как и на уровне очага пластической деформации, создаются активно направленные касательные напряжения контактного трения, способствующие вытеканию металла деформируемой заготовки в стенку. Однако, поскольку выдавленная стенка уже не находится в пластическом состоянии, то на ее уровне $p_h < \sigma_s$, что существенно меньше ординат эпюры на уровне очага пластической деформации.

Также трение между стенкой и поверхностью полости матрицы подчиняется закону Кулона. Коэффициент контактного трения при холодном выдавливании качественно смазанных заготовок $\mu \approx 0,08$. По мере выдавливания полости высота стенки увеличивается. Также увеличивается трение между стенкой и поверхностью полости матрицы. Однако сказанное выше позволяет заключить, что, несмотря на большую площадь контакта между внешней поверхностью выдавливаемой заготовки и поверхностью полости матрицы, наибольший эффект в создание активно или реактивно направленной силы контактного трения вносит участок контакта на уровне очага пластической деформации заготовки.

Для реализации на практике выдавливания с рассмотренным

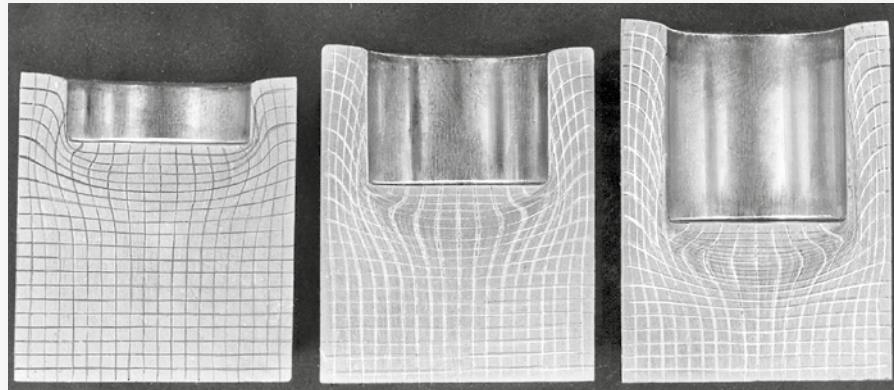


Рис. 2. Ограниченнная высота очага пластической деформации при выдавливании стакана

эффектом снижения q путем обеспечения схемы выдавливания с перемещением матрицы в сторону течения металла заготовки в выдавливаемую стенку стакана, авторы данной статьи создают специализированные прессы.

Такие прессы создаются для массового или крупносерийного производства одного изделия или нескольких однотипных изделий в течение всего срока своей службы. В конструкции специализированных прессов можно отказаться от ряда элементов, присутствующих у универсальных прессов, в том числе даже привычных рабочего стола и ползуна. Вместо них в конструкцию специализированных прессов можно добавить элементы, позволяющие реализовать наиболее рациональное нагружение штампаемой заготовки [1, 3, 8–10]. Рациональность нагружения определяется повышением качества изделий, сокращением энергозатрат и увеличением производительности штамповки.

Кроме этого, специализированные прессы должны обладать конструкцией, изготовление и сборку которой смогут осуществить для собственных нужд машиностроительные предприятия, специализирующиеся не на производстве прессов, а на выпуске иной машиностроительной продукции. В частности предприятия, производящие корпусные цилиндрические детали, для которых инновационная технология, связанная с использованием активно направленных сил контактного трения, позволяет расширить область применения перспективного процесса штамповки заготовок холодным выдавливанием. Конструкция одного из специализированных прессов для выдавливания с активно направленными силами контактного трения приведена на рис. 3.

В прессе, если матрицу, установленную в траверсе 1, с помощью гидроцилиндров 2 перемещать в направлении течения металла со скоростью, превышающей скорость течения, сила контактного трения на границе заготовки с матрицей будет способствовать течению деформируемого материала в стенку выдавливаемого изделия, имеющего форму стакана. Выдавливающий полость стакана пуансон устанавливают на опору 3 через закаленную прокладку и центрируют в опоре. Опора размещена в центральной трубной части пресса, являющейся его станиной. Нижняя часть этой трубной станины одновременно является корпусом главного гидроцилиндра 4, внутри которого перемещается плунжер, являющийся одновременно ползуном пресса. Непосредственно на этом плунжере с применением закаленной прокладки установлен штампующий заготовку контрпуансон. Соосность матрицы, пуансона и контрпуансона обеспечена тем, что элементы пресса, на которых они установлены, по посадкам направляются в единой полости трубой станины. Возвращение плунжера главного гидроцилиндра с контрпуансоном в исходное положение осуществляется дополнительным гидроцилиндром, размещенным под нижней плитой пресса.

При эксплуатации описанного выше пресса выявлено, что траверса 1 имеет недостаточную собственную жесткость, а также высоту посадочной поверхности в трубной станине

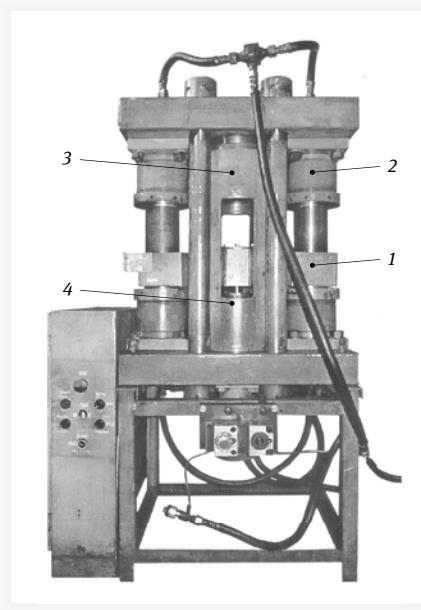


Рис. 3.
Конструкция пресса для выдавливания заготовок с активно направленными силами контактного трения

пресса. В результате при выдавливании заготовки, вследствие несинхронной работы гидроцилиндров 3, возможен перекос траверсы, что приводит к несоосности внутренней и наружной поверхностей штампаемой детали.

Более целесообразно конструировать пресс в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4. В этой конструкции все гидроцилиндры размещены на одной общей оси. При ее изготовлении требуются в основном токарные, круглошлифовальные и простые фрезерные работы.

В прессе на рис. 4 главный гидроцилиндр 1 расположен под столом пресса. Плунжер главного гидроцилиндра 2 является ползуном пресса и штамповой плитой. На нем установлен пуансон 3. Второй пуансон 6 закреплен на опоре 7, которая служит штоком гидроцилиндра привода матрицы 5. К гильзе этого гидроцилиндра крепят траверсу пресса 4, служащую для перемещения матрицы.

В прессе предусмотрено надежное направление опоры 7 по втулке 8, что позволяет свести к минимуму несоосность верхнего пуансона 6 и матрицы 5.

Рабочая жидкость в полости главного гидроцилиндра 1 подается от насоса 13 через трехпозиционный четырехходовой золотник 12. Рабочая жидкость в полости гидроцилиндра привода матрицы подается от насоса 11 также через трехпозиционный четырехходовой золотник 10. Соотношение скоростей перемещения пуансона 3 и матрицы 5 регулируется с помощью дросселя 9.

Технические характеристики пресса приведены в табл. 1.

Пресс описанной конструкции технологичен в сборке и монтаже, прост в наладке. Фотография этого пресса, установленного на производственном участке, приведена на рис. 5.

Пресс аналогичной конструкции, имеющий номинальную силу 6,3 МН, был изготовлен ОАО «Тяжрессмаш» (г. Рязань) по

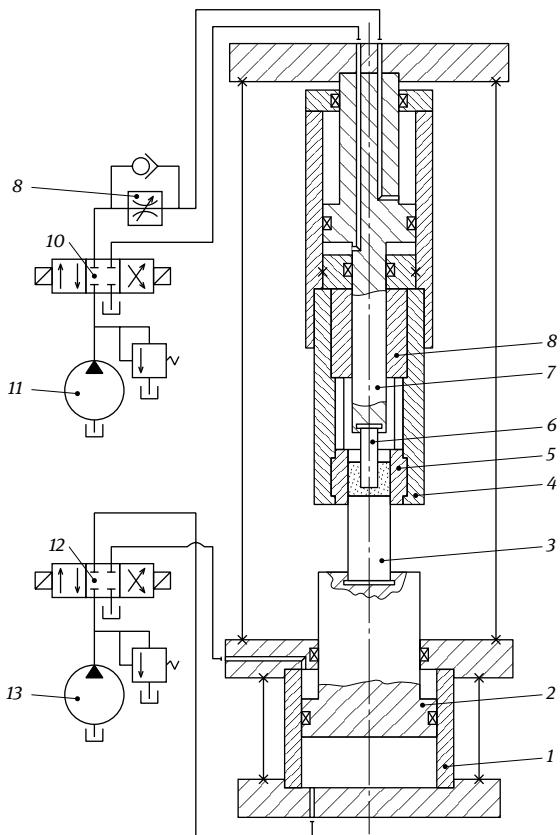


Рис. 4. Схема гидропресса с размещением гидроцилиндров на центральной оси

Таблица 1. Технические характеристики пресса

Показатель	Значение
Номинальная сила, МН	1,6
Номинальное давление рабочей жидкости, МПа	32
Наибольшая высота штампируемой детали, мм	160
Наибольший диаметр штампируемой детали, мм	40
Скорость перемещения пuhanсона, мм/с	2,7
Скорость перемещения матрицы, мм/с:	
вверх	12,7
вниз	6,8
Габариты, мм	650 × 500 × 2000
Масса без привода, кг	1 200
Установочная мощность, кВт	8,5

чертежам, выполненным под руководством авторов данной статьи. Прессу присвоена марка заводской модели РПГ-37.

Пресс [10], имеющий большую силу, по сравнению с приведенными выше прессами, разработанный под руководством авторов данной статьи и изготовленный на прессостроительном предприятии в г. Азове, приведен на рис. 6.

Пресс содержит неподвижные верхнюю поперечину 1 и нижнюю поперечину 2, соединенные между собой колоннами 3. В верхней поперечине закреплен корпус 4 гидроцилиндра 5. Поршень 6 гидроцилиндра через шток соединен с траверсой 7. Направление траверсы по колоннам 3 осуществляется направляющими втулками 8. В траверсе неподвижно закреплен верхний пuhanсон 9. На нижней поперечине 2 закреплен главный гидроцилиндр 10 с поршнем 11 и штоком 12 и, соосно с ним, – расположенный вспомогательный гидроцилиндр 13, содержащий шток 12 и гильзу 14. Гильза 14 вспомогательного гидроцилиндра соединена с матрицей 16, при этом шток 12 вспомогательного гидроцилиндра 13 является одновременно штоком главного гидроцилиндра 10, а гильза 14 вспомогательного гидроцилиндра 13 установлена в полости главного гидроцилиндра 10. Техническая характеристика пресса приведена в табл. 2.

Описанный пресс разработан в рамках государственного контракта № 11411.1003704.05.038 от 10 октября 2011 года на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка и технологическое обеспечение серийного производства гаммы гидравлических прессов тройного действия с числовым программным управлением для точной объемной штамповки». Разработанной конструкторской документации была присвоена литература О1.

Предложенная конструкция пресса отличается простотой изготовления и низкой металлоемкостью. Станина колонного

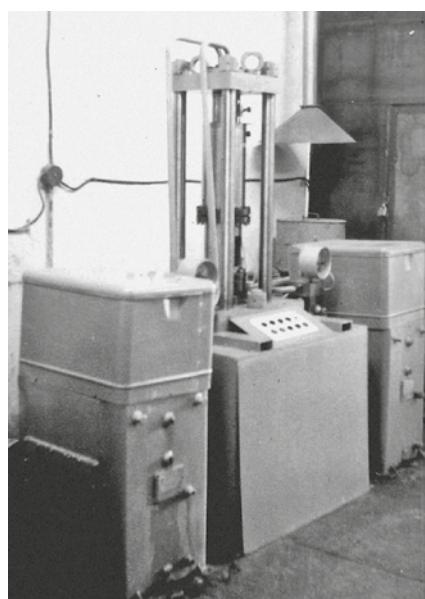


Рис. 5. Пресс на производственном участке

типа наиболее рациональна с позиции металлоемкости и обеспечения необходимой жесткости пресса. Упругая деформация колонн при деформировании заготовок компенсируется величиной рабочего хода пuhanсона с помощью системы числового программного управления. Конструкция цилиндра в цилиндре, реализованная в нижней части пресса, способствует повышению жесткости пресса и обеспечивает соосность расположения матрицы штампа и нижнего пuhanсона.

Заключение

Описанная в статье технология холодного выдавливания, являющегося разновидностью холодной объемной штамповки, позволяет изготавливать из недорогих малоуглеродистых сталей цилиндрические детали с глубокой полостью, имеющие форму стакана. Основным лимитирующим фактором применения этой технологии в крупносерийном производстве является большая величина давления, которое создается со стороны пuhanсона, выдавливающего полость в заготовке. Большая величина давления не позволяет обеспечить

Таблица 2. Техническая характеристика специализированного пресса тройного действия

Показатель	Значение
Номинальная сила, МН	
верхний цилиндр	8
вспомогательный цилиндр	6
главный цилиндр	8
Номинальная возвратная сила	
верхний цилиндр	0,8
вспомогательный цилиндр	0,6
главный цилиндр	0,8
Ход рабочих частей пресса, мм	
ход ползуна	800
ход вспомогательного цилиндра	1 400
ход главного цилиндра	1 000
Открытая высота, мм	4 000
Максимальная скорость перемещения, мм/с	
верхний цилиндр	300
вспомогательный цилиндр	300
главный цилиндр	300
Производительность, шт/ч	90
Номинальное давление жидкости, МПа	32
Тип привода	Насосно-аккумуляторный
Суммарная мощность электродвигателей, кВт	55
Габаритные размеры, мм:	
слева-направо	3 600
спереди-назад	1 900
высота над уровнем пола	6 400
высота пресса	9 000

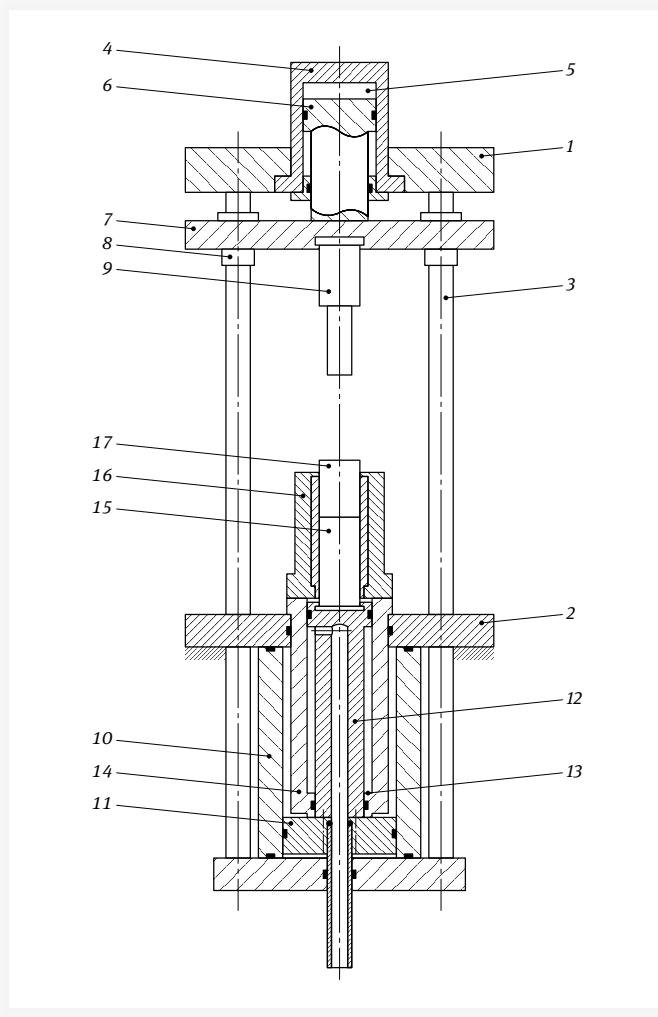


Рис. 6. Гидравлический пресс тройного действия

желаемое сопротивление усталости пuhanсона, и он подвергается усталостному разрушению. В результате имеют место остановки автоматических линий в крупносерийных производствах деталей.

Применение разработанных под руководством авторов данной статьи специализированных прессов позволяет существенно увеличить сопротивление усталости пuhanсонов и таким образом увеличить количество деталей, изготавливаемых каждым пuhanсоном. Таюже сокращается количество технологических перерывов, связанных с заменой пuhanсонов. В целом достигается повышение производительности оборудования и снижение стоимости изготавливаемых деталей.

Простота конструкции разработанных специализированных прессов позволяет изготовить их в инструментальных цехах, непрофилированных на производство прессового оборудования машиностроительных предприятий, заинтересованных в применении у себя создаваемых прессов.

Литература

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. Т. 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / Под ред.

А.М. Дмитриева. 2-е изд.; Под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.

2. **Григорьев С.Н., Дмитриев А.М., Коробова Н.В.** Механические характеристики конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке и их описание аппроксимирующими зависимостями // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 12. С. 23–26.

3. **Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Практическое использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 4 (31). С. 41–44.

4. **Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке // Вестник машиностроения. 2015. № 4. С. 54–56.

5. **Суслов А.Г., Базров Б.М., Безъязычный В.Ф. и др.** Наукоемкие технологии в машиностроении / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. С. 68–114.

6. **Унксов Е.П., У Джонсон., Колмогоров В.Л., Кудо Х. и др.** Теория ковки и штамповки: Учеб. пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов / Под общ. ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1992. 720 с.

7. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Якубовская И.А.** Повышение стойкости пуансонов при холодном выдавливании детали типа ста-

кана при активном действии сил трения // Вестник машиностроения. 2015. № 9. С. 24–29.

8. **Дальский А.М., Барсукова Т.М., Вязов А.Ф. и др.** Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / 6-е изд., испр. и доп.; под общ. ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 2005. С. 59–147.

9. **Дмитриев А.М.** О целесообразности создания нестандартного малогабаритного прессового оборудования // Технология легких сплавов. 2010. № 2. С. 87–94.

10. **Коробова Н.В., Дмитриев А.М., Толмачев Н.С., Аксененко А.Ю.** Исследование высокоплотных порошковых цилиндрических заготовок, сформованных на специализированных гидравлических прессах // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 7. С. 15–19.

Авторы

Дмитриев Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, МГТУ «СТАНКИН»

Коробова Наталья Васильевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Системы пластического деформирования» МГТУ «СТАНКИН»

Толмачев Никита Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией кафедры «Системы пластического деформирования» МГТУ «СТАНКИН»



Металлообработка. Сварка — Урал

международная выставка технологий, оборудования, материалов для машиностроения, металлообрабатывающей промышленности и сварочного производства

18–21 марта 2025
Екатеринбург

крупнейший специализированный
региональный проект в России



телеграм-
канал
[@expometal](https://t.me/expometal)



(342) 264-64-27
egorova@proexpo.ru
metal-ekb.proexpo.ru



25–26 марта 2025 г. | Омск

XXVI СИБИРСКИЙ ПРОМЫШЛЕННО-ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ПРОМТЕХЭКСПО • 2025

В объединённой экспозиции:

- Машиностроение.
Металлообработка. Сварка.
Инструмент.
- Автоматизация.
Радиоэлектроника.
Приборостроение.
- Метрология. Измерения.
Диагностика.
- Омскгазнефтехим. Экология.
- Энергосиб. СибмашТЭК.
- Индустрия безопасности.
Связь. ИТ-решения.
Цифровизация.
- Промышленная робототехника.
Аддитивные технологии.
Композитные материалы.
- Наука. Образование. Кадры.
- Финансовые услуги.
- Рекламные услуги.
Продвижение. Маркетинг.