

УДК 621.77.24

СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ П-ОБРАЗНЫХ КРОНШТЕЙНОВ ПРЕССОВАНИЕМ И ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Мария Юрьевна Маштакова

*Аспирант 2 года,
кафедра «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.Л. Воронцов,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

В настоящее время одной из основных задач современной технологии машиностроения является повышение качества получаемых изделий. Наиболее полно эта задача реализуется при использовании процессов, основанных на холодной пластической деформации. К числу наиболее прогрессивных процессов относится холодная объемная штамповка (ХОШ).

ХОШ является высокотехнологичным процессом изготовления деталей и широко используется в мировом машиностроении. Особое место среди операций объемной штамповки занимает выдавливание. Выдавливанием получают детали различной формы и назначения, используя соответствующие способы: прямое выдавливание, обратное, комбинированное, дифференцированное, выдавливание с активными силами трения или комбинации выше приведенных способов.

В современных технологиях обработки давлением П-образные изделия и изделия близкие к ним (рис. 1) получают различными способами: листовой штамповкой (вырубкой, гибкой), сортовой прокаткой, прессованием и выдавливанием.

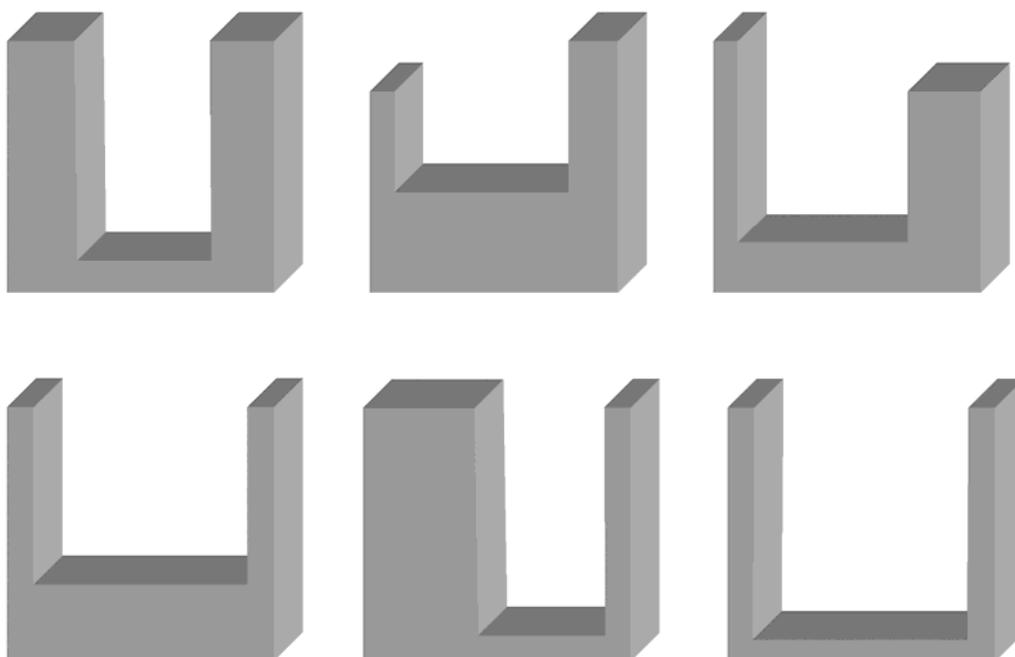


Рис. 1. Различные виды П-образных кронштейнов

Все выше названные способы имеют свои ярко выраженные недостатки. Сортовой прокаткой в калибрах можно получать П-образный профиль, даже с различной толщиной стенки. Тем не менее такой способ имеет ряд недостатков:

- данный способ рассчитан на крупносерийное или массовое производство длинномерных изделий, а значит требуются дополнительные операции для изготовления непосредственно скоб.

- из-за неравномерности деформации в калибрах весьма сложно получить профиль с различными толщинами.

- данный процесс является весьма энергоемким в производстве.

Недостатком профилирования в профилирующем стане является то, что он также как и сортовая прокатка рассчитан на производство длинномерных изделий. Главным недостатком данного способа является то, что им невозможно получить изделия с различной толщиной стенок, а также изделия толщиной более 8...10 мм (максимальная толщина прокатных листов обычного назначения).

Использование способов листовой штамповки (вырубки-пробивки и гибки) ограничено возможной толщиной листового материала (максимально 8...10 мм), а также данными способами невозможно получить изделия с различными толщинами полок скоб. Также способом гибки невозможно получить изделия с прямыми углами в торцах заготовки, что снижает прочность изделия на разгиб полок скобы.

Значительные трудности при проектировании и отладке технологических процессов, в которых применяются операции гибки, заключаются в необходимости обеспечения высокой точности угловых размеров отштампованных деталей [1]. Связано это с тем, что при снятии внешних деформирующих усилий упругие деформации при разгрузке вызывают большие угловые деформации. При разгрузке слои заготовки, находящиеся в зоне тангенциального растяжения, укорачиваются, а слои, находящиеся в процессе деформирования в зоне сжатия, удлиняются.

Разные знаки деформаций по толщине заготовки приводят при разгрузке к тому, что сечения, перпендикулярные к срединной поверхности заготовки, поворачиваются; это обуславливает изменение угловых размеров и кривизны срединной поверхности и заготовки.

Считая справедливой гипотезу плоских сечений при нагружении и при разгрузке, можно прийти к заключению, что в заготовке при разгрузке после изгиба должны возникнуть остаточные напряжения первого рода. Действительно, каждый слой заготовки (если бы он был связан с соседними) при разгрузке от напряжения, соответствующего пределу текучести, должен получить деформацию укорочения, абсолютная величина которой определяется по закону Гука выражением

$$\Delta l = \pm \frac{\sigma_s}{E} l + \pm \frac{\sigma_s}{E} \rho \alpha \quad (1)$$

здесь знак минус соответствует зоне тангенциального растяжения, а знак плюс — зоне сжатия.

Таким образом получаем выражение для определения угла пружинения:

$$\Delta \alpha = 3 \frac{\sigma_s}{E} \left(\frac{r}{S} + 1 \right) \alpha \quad (2)$$

Анализ был проведен без учета влияния упрочнения; в то же время упрочнение должно оказывать заметное влияние на величину угла пружинения. Для определения характера влияния упрочнения на величину угла пружинения и приближенной оценки степени этого влияния примем, что напряжение текучести находится в линейной зависимости от величины тангенциальной деформации. Тогда максимальное напряжение, действующее в растянутом слое, будет равно

$$\sigma_{\theta_{\max}} = \sigma_{T0} + \Pi \frac{S}{2r + S} \quad (3)$$

где σ_{T0} - экстраполированный предел текучести, соответствующий началу пластических деформаций;

Π — модуль упрочнения.

Таким образом угол пружинения будет равен:

$$\Delta\alpha = \frac{\frac{3}{2}\sigma_{T0} + \Pi \frac{S}{2r + S}}{E} \left(\frac{r}{S} + 1 \right) \alpha \quad (4)$$

Из рассмотрения формул видно, что на величину угла пружинения существенное влияние оказывает отношение предела текучести к модулю упругости (упрочнение повышает предел текучести). Следовательно, наклепанный металл пружинит больше, чем отожженный. Высокопрочные цветные металлы, имеющие предел текучести, близкий к пределу текучести стали, но значительно меньший модуль упругости, пружинят больше, чем сталь.

Значительное влияние на величину угла пружинения оказывает также относительный радиус изгиба $\frac{r}{S}$ и угол α , причем увеличение обеих этих величин (приводящее к увеличению длины зоны пластических деформаций) способствует росту угла пружинения. Можно также заметить, что более интенсивно упрочняющиеся материалы имеют большее пружинение.

Производство П-образных изделий прессованием имеет также ряд недостатков:

- прессование достаточно энергоемкий процесс производства;
- процесс прессования рассчитан на производство длинномерных профилей, и следовательно потребуются дополнительные операции для производства П-образных изделий;
- производство профилей с различными толщинами требует применения специализированного инструмента и приспособлений, что приводит к удорожанию процесса производства.

Поэтому для профилей с разнотолщинными элементами, как и для асимметричных профилей, очко в матрице располагают таким образом, чтобы максимально приблизить тонкие полки к центру матрицы. Такое расположение очка наряду с другими методами выравнивания скоростей истечения металла, о которых будет сказано ниже, позволяет значительно улучшить условия прессования, обеспечить минимальное утягивание периферийных участков тонких полок и уменьшить искажения поперечной и продольной геометрии профиля.

При проектировании профильных матриц наряду с рациональным расположением очка и определением его исполнительных размеров первостепенное значение имеют выбор оптимальных размеров рабочих поясков и применение эффективных методов выравнивания скоростей истечения элементов профиля, обеспечивающих стабильность его геометрии.

Ширина рабочего пояска представляет важный геометрический параметр прессовой матрицы. В отличие от процесса волочения, в котором рабочий (калибрующий) поясок выполняет только функции повышения точности геометрии наружного контура и уменьшения продольной кривизны протягиваемого профиля, при прессовании основная функция рабочего пояска матрицы заключается в выравнивании скоростей истечения отдельных элементов сечения прессуемого профиля.

При прессовании профилей, имеющих разнотолщинные элементы поперечного сечения, наряду с применением различных рабочих поясков и углов торможения на

очке матрицы, используются и другие способы выравнивания скоростей истечения элементов профиля.

Для разнотолщинных симметричных профилей, имеющих большие габаритные размеры поперечного сечения с тонкими периферийными элементами, целесообразно применять кольцевые конические проточки на торце матрицы.

Для несимметричных профилей обычно выполняется наклонная плоскость, обеспечивающая направление течения металла к периферии тонкого элемента. Кроме того, выполнение наклонной плоскости позволяет создать при прессовании благоприятные условия для истечения тонкого элемента за счет уменьшения ширины рабочего пояса матрицы и облегчения питания периферийных зон полки.

Для разнотолщинных профилей с небольшими габаритными размерами поперечного сечения часто делают местное заглубление на торце матрицы по тонкому элементу очка. Небольшое заглубление обычно выполняют бормашиной, более глубокие — на электроимпульсной установке с последующей зачисткой шлифовальным кругом.

Необходимо отметить, что в ряде случаев при проектировании матриц для прессования профилей сложной конфигурации расчет размеров рабочих поясков очка и углов торможения представляет весьма сложную задачу. Поэтому окончательная отработка геометрии матрицы производится при опытном прессовании, после чего вносятся необходимые корректировки в рабочие чертежи.

Но, несмотря на указанные недостатки, прессования имеет также ряд преимуществ по сравнению с другими вышеназванными способами:

- возможность успешной пластической обработки с высокими вытяжками, в том числе малопластичных по природе металлов и сплавов;
- возможность получения изделия практически любого поперечного сечения, что при обработке металла другими способами не всегда удается;
- более низкие капитальные затраты, чем при прокатке;
- пластичность металла при прессовании выше, так как металл в контейнере находится в условиях всестороннего сжатия; а это играет большую роль при производстве изделий из труднодеформируемых сплавов и при необходимости получения большой вытяжки (до 50...100, а для алюминия до 1000), в то время как при прокатке за один проход вытяжка обычно меньше 2;
- перенастройка пресса на изделие нового профиля гораздо легче, быстрее и дешевле, чем прокатного стана;
- возможность получения изделий широкого сортамента на одном и том же прессовом оборудовании с заменой только матрицы;
- производство изделий с высоким качеством поверхности и высокой точностью размеров поперечного сечения, что во многих случаях превышает принятую точность при пластической обработке металла другими способами (например, при прокатке).

Так как из всех выше названных способов производства П-образных кронштейнов наиболее рациональными являются холодное выдавливание и прессование то произведем сопоставительный анализ энергосиловых показателей данных процессов применительно к детали-представителю.

В качестве детали-представителя нами выбран кронштейн, представленный на рис. 2.

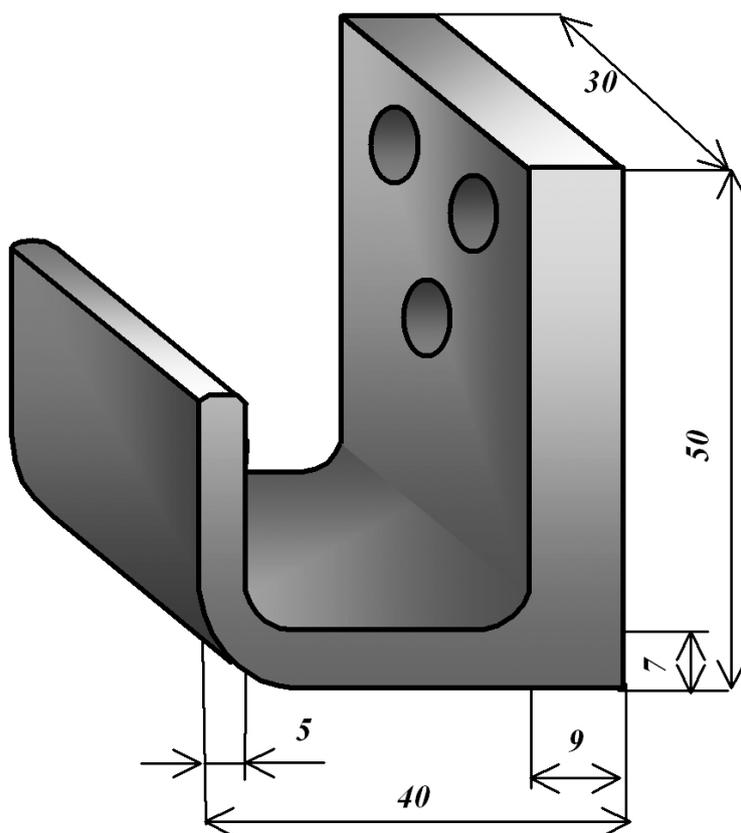


Рис. 2. Деталь-представитель: П-образный кронштейн

Для определения силы прессования в начале приравняем площадь кронштейна к площади круга согласно рекомендациям [2]. Исходя из чего определим ряд важных технологических параметров, таких как размеры контейнера, угол матрицы, коэффициент трения и т.д.

Принимаем: размеры контейнера 180×360 мм; размеры прутка 30×10000 мм, коэффициент трения $\mu=0,5$; угол матрицы $\gamma=90^\circ$.

Для определения силы прессования воспользуемся известной методикой [3].

При прямом выдавливании заготовка помещается в полость контейнера и при рабочем ходе сплошного пуансона выдавливается через отверстие матрицы, расположенной внизу контейнера. В этом случае кроме силы, необходимой для осуществления процесса пластической деформации, требуется дополнительно преодолевать силу трения между контейнером и перемещаемой вниз жёсткой частью заготовки в зоне $H-h$. Следует также отметить, что прямое выдавливание позволяет получать значительно большее разнообразие геометрической формы изделий, чем обратное. Это связано с тем, что переходной части отверстия матрицы при прямом выдавливании можно придать любую требуемую форму.

На схеме представленной на рис.3 используется цилиндрическая система координат, а очаг пластической деформации представлен в виде двух областей: центральной области 1 и периферийной области 2. Определение напряжённого состояния заготовки подробно изложено в разделе 8.1 монографии [3], для более общего случая выдавливания полого стержня. Здесь же приведём частные результаты, вытекающие из общей теории применительно к сплошному стержню.

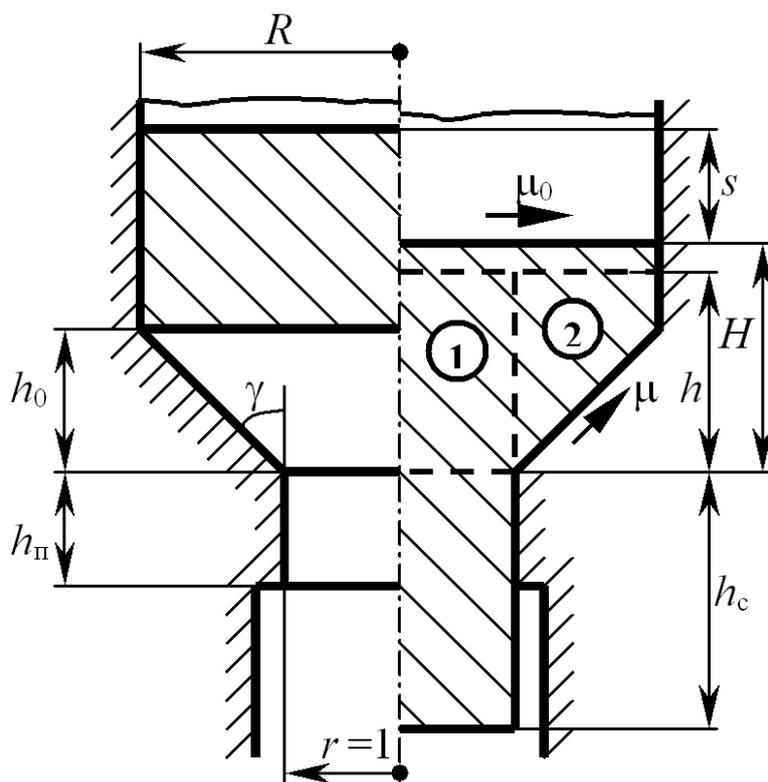


Рис.3. Расчетная схема процесса выдавливания

Высота очага пластической деформации определяется выражением:

$$h = \sqrt{\frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right) \left[R^4 (\ln R - 0,75) + R^2 - 0,25\right]}{(R^2 - 1) \left\{0,5(R^2 + 1) \left[1 - 0,5 \left(1 - \frac{1}{R}\right) \cos \gamma\right] - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right\}}} \quad (5)$$

При использовании формулы (5) следует учитывать, что физически высота h не может быть меньше высоты h_0 , определяемой выражением:

$$h_0 = (R - 1) \operatorname{ctg} \gamma. \quad (6)$$

Если в результате расчёта окажется, что $h < h_0$, то следует принимать $h = h_0$. Для уменьшения расчётов целесообразно руководствоваться табл. 7.1.[3].

Относительная удельная сила прямого выдавливания вычисляется по формуле:

$$q = \frac{1,1}{R^2} \left\{ 1,5(R^2 - 1) + R^2 \ln R + \left\{ 0,5(R^2 + 1) \left[1 - 0,5 \left(1 - \frac{1}{R} \right) \cos \gamma \right] - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right\} h + \frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right) \left[R^4 (\ln R - 0,75) + R^2 - 0,25 \right]}{(R^2 - 1)h} \right\} + 2\mu h_{\pi} \quad (7)$$

где R – относительный радиус контейнера;
 h – высота очага пластической деформации;
 μ – коэффициент трения;
 γ – угол матрицы;
 h_n – высота калибрующего пояса матрицы.

При значительном трении и большой разнице $H-h$ к выражению (7) следует прибавлять удельную силу трения заготовки о стенку контейнера:

$$q_{\text{тк}} = 2\mu \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s} \cdot \frac{H-h}{R}. \quad (8)$$

При отсутствии упрочнения $\sigma_{s0}/\sigma_s = 1$, а при наличии упрочнения можно принимать $\sigma_{s0}/\sigma_s = 0,5$.

С учетом аппроксимации кривой упрочнения алюминиевого сплава АВ [3, с. 80]

$$\sigma_s = 349 - 163e^{-e_i} - 46e^{-20e_i} \text{ МПа}. \quad (9)$$

определяем относительную удельную силу, которая с учетом силы трения по контейнеру будет равна $q = 6,2$; затем находим натуральное значение удельной силы $q_y = 2132$ МПа и силу выдавливания равную $P = 53,3$ МН.

С учётом известных данных [3, с. 213], а также того, что при плоском выдавливании удельные силы в эквивалентных условиях меньше, чем при осесимметричном, можно принять, что $q = 3\sigma_s = 876$ МПа. Тогда сила, необходимая для осуществления холодного выдавливания, $P = qab = 683$ кН.

Проведённое сравнение позволяет сделать вывод, что наиболее рациональным способом получения скобообразных изделий типа П-образных кронштейнов, особенно в случае с различным соотношением толщин образующих элементов, является холодное обратное выдавливание.

Распространение холодного выдавливания связано с тем, что, благодаря упрочнению при пластической деформации, отсутствию надразов волокна (образующихся при обработке резанием) и направленности его вдоль конфигурации повышаются показатели сопротивления детали обычным нагрузкам. Упрочнение, рациональное направление волокна и значительные степени деформации позволяют повысить такие ответственные эксплуатационные характеристики, как сопротивление усталости, ударную вязкость и вибропрочность. Повышение надежности и долговечности стали в эксплуатации происходит также благодаря улучшению микрогеометрии поверхности. При штамповке выдавливанием коэффициент использования металла по сравнению с литьём или горячей штамповкой повышается на 10-30%, а по сравнению с обработкой резанием — в 2...3 раза. Следовательно, основные усилия конструкторов и технологов должны быть направлены на применение холодного выдавливания взамен обработки резанием. Эффективность такой замены повышается с внедрением процессов штамповки сложных по форме деталей. Наибольшая эффективность достигается при производстве осесимметричных деталей с большими перепадами сечений, сложной внешней конфигурацией и наличием полостей. Обработка резанием таких деталей является трудоемкой, связана с применением сложного и дорогостоящего инструмента и его большим расходом, а главное с большим отходом металла в стружку. Экономия за счет сокращения расхода металла особенно проявляется при замене обработки резанием холодным выдавливанием при производстве деталей из цветных и других металлов и сплавов с высокой стоимостью. При крупносерийном и массовом производстве: значительная

экономия достигается за счет снижения трудоемкости. Применение для холодного выдавливания многопозиционных прессов-автоматов позволяет увеличить производительность по сравнению с автоматами для обработки резанием в 10...15 раз и более.

Таким образом, основными достоинствами способа являются универсальность используемого оборудования, меньшая энергоемкость, возможность получения изделия с различной толщиной стенок, прямыми углами. Кроме того, данный способ, в отличие от других вышеописанных, является окончательным, т.е. не требующим дальнейшей обработки изделия, что является весьма важным в современном высокопроизводительном производстве.

Литература

1. *Попов Е. А.* Основы теории листовой штамповки – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. *Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х.* Теория прессования металлов. - М.: Металлургия, 1975. - 448 с.
3. *Воронцов А. Л.* Теория штамповки выдавливанием. - М.: Машиностроение. 2004. - 721 с.