

Научная статья

УДК 621.777.24

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 83–92.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 83–92.

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ЗАГОТОВОК ОТ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ СТУПЕНЧАТОГО ПУАНСОНА

Аннотация

Получена формула для определения силы холодной объемной штамповки выдавливанием детали типа стакана со ступенчатой полостью. Формула получена путем проведения экспериментального исследования по плану, являющемуся развитием метода греко-латинских квадратов, а также применения описанного в статье способа обработки результатов исследования. Выдавливание осуществлялось за один переход пуансоном, у которого рабочая часть имела ступенчатую форму с галтелью под ступенью. Полученная формула позволяет определять силу выдавливания пуансоном в зависимости от формы и размеров его рабочей части. Для расширения области применения полученной формулы для расчета сил холодного выдавливания деталей из разных материалов, имеющих различную форму полости, силы выдавливания, зависящие также от характеристик упрочнения материала заготовки, и исследуемые размеры ступенчатого пуансона рассмотрены и учтены в полученной формуле в относительных величинах. Проведена проверка результатов определения силы выдавливания ступенчатым пуансоном путем экстраполяции полученной формулы на форму гладкого (не имеющего ступеней) пуансона. Проверка показала достоверность полученной формулы.

Ключевые слова: детали со ступенчатой полостью, выдавливание холодное, величина деформирующей силы, определение экспериментальное, планирование и обработка результатов эксперимента.

Для цитирования: Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Исследование зависимости силы обратного выдавливания заготовок от относительных размеров ступенчатого пуансона // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 83–92.

A.M. Dmitriev, N.V. Korobova

MSUT “STANKIN”

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE FORCE OF REVERSE EXTRUSION OF WORKPIECES ON THE RELATIVE DIMENSIONS OF A STEPPED PUNCH

Abstract

The formula has been obtained for determining the force of cold volumetric stamping by extrusion of a glass-type part with a stepped cavity. The formula was obtained by conducting an experimental study according to the plan, which is the development of the method of Greek-Latin squares, as well as using the method of processing the research results described in the article. Extrusion was carried out in one transition with a punch, in which the working part has a stepped shape with a gatel under the step. The formula makes it possible to determine the extrusion force of a punch depending on the shape and size of the working part. To expand the scope of the obtained formula for calculating the cold extrusion forces of parts made of different materials having different cavity shapes, the extrusion forces, which also depend on the hardening characteristics of the workpiece material, and the dimensions of the stepped punch under study are considered and taken into account in the obtained formula in relative terms. The results of determining the extrusion force with a stepped punch have been verified by extrapolating the obtained formula to the shape of a smooth (stepless) punch. The verification showed the validity of the formula obtained.

Keywords: parts with a stepped cavity, cold extrusion, magnitude of the deforming force, experimental determination, planning and processing of experimental results.

For citation: Dmitriev A.M., Korobova N.V. Investigation of the dependence of the force of reverse extrusion of workpieces on the relative dimensions of a stepped punch. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 83–92. (In Russian)

Введение

Область применения прогрессивной технологии холодного обратного выдавливания полых деталей из сплошных цилиндрических заготовок ограничена большой величиной удельной силы (усредненной величины осевого напряжения), которую необходимо создавать на рабочем торце выдавливающего полость пуансона [1]. При штамповке детали со ступенчатой полостью возможным вариантом технологического процесса является выдавливание отдельных участков полости пуансонами соответствующих диаметров, так называемыми гладкими пуансонами, поскольку их рабочая часть не имеет ступеней. При холодном выдавливании гладкими пуансонами величина удельной силы 2500 МПа считается предельно допустимой с позиций рациональности процесса для пуансонов, изготовленных из быстрорежущих сталей: P9, P18, P6M. Для пуансонов из сталей X12Ф1, X12M предельно допустимой с позиций рациональности процесса удельной силой считается ее величина 2200 МПа [2].

Штамповка выдавливанием полости в заготовке показанным на *рис. 1* ступенчатым пуансоном, по сравнению с выдавливанием каждого участка полости гладким пуансоном, имеет не только преимущества в обеспечении строгой соосности между собой участков полости и в сокращении количества штамповочных операций, но и недостаток. Недостаток заключается в увеличении удельной силы выдавливания, что связано с изменениями направления течения выдавливаемого металла заготовки и взаимным влиянием потоков металла из-под торца пуансона вверх и от торца ступени вниз. Напомним, что удельная сила [1] определяется как частное от деления деформирующей заготовку силы на площадь поперечного сечения пуансона на уровне его калибрующего выдавливаемую полость детали пояска. Помимо увеличенной деформирующей силы, ступенчатый пуансон испытывает двойную концентрацию напряжений: силовую – на участке между торцом пуансона и торцом ступени, и геометрическую – в галтели под ступенью. Наибольшей величины напряжения в ступенчатом пуансоне достигают в галтели под его ступенью [3].

Именно в этой области начинается усталостное разрушение ступенчатого пуансона. Вследствие сказанного, сопротивление ступенчатого пуансона усталостному разрушению существенно ниже, чем у гладких пуансонов, выдавливающих отдельные участки полости при указанном выше альтернативном технологическом процессе. В результате сужается область материалов, заготовки из которых можно выдавливать ступенчатыми пуансонами при обеспечении достаточно высокого сопротивления усталости таких пуансонов.

В работах авторов настоящей статьи [3, 4] опубликованы результаты проведенных исследований макроструктур деталей, полости в которых изготовлены выдавливанием ступенчатыми пуансонами, также теоретического анализа распределения напряжений в выдавливаемых ступенчатыми пуансонами заготовках и в самих пуансонах.

Целью исследования, описанного в настоящей статье, является получение формулы, применимой для расчетов сил холодного выдавливания ступенчатыми пуансонами с разными размерами деталей из разных материалов. Для достижения указанной цели определенные экспериментальным путем величины удельных сил выдавливания, имевшие размерность в МПа, переводили в относительные величины путем деления на напряжение текучести материала заготовки, также измеренное в МПа, для которого величина конкретной удельной силы была определена. Полученная таким образом величина позволяет определять безразмерную относительную удельную силу выдавливания. Для определения удельной силы выдавливания заданной чертежом конкретной детали рассчитанную по полученной формуле величину относительной удельной силы умножают на напряжение текучести материала, из которого изготавливают деталь. Затем рассчитывают силу выдавливания, умножая удельную силу на площадь поперечного сечения калибрующего пояса пуансона, которым будет производиться выдавливание заданной чертежом детали.

На основании предшествующего опыта, отраженного в статьях [3, 4], в описанном ниже исследовании принято, что сила обратного выдавливания заготовки ступенчатым пуансоном зависит от четырех факторов: относительного радиуса матрицы R , относительного радиуса ступени пуансона r_1 , относительного радиуса галтели r_2 , относительной длины участка пуансона до ступени l (рис. 1). В проведенном эксперименте диаметр матрицы равнялся 20 мм. В ней штамповали заготовки, также имевшие диаметр 20 мм, с высотой 25 мм. Заготовка в матри-

це опиралась на нижний пуансон, и матрица была освобождена от крепления вдоль своей оси. Под действием напряжений трения на контакте с заготовкой матрица поднималась вслед за вытекающим из-под пуансона деформируемым сплавом. Это позволило уменьшить силу выдавливания.

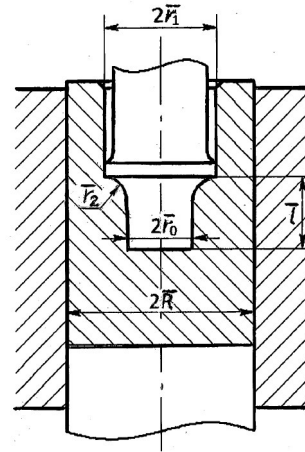


Рис. 1. Принятые обозначения относительных размеров ступенчатого пуансона:

$$R = \frac{\bar{R}}{\bar{r}_0}; r_1 = \frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_0}; r_2 = \frac{\bar{r}_2}{\bar{r}_0}; l = \frac{\bar{l}}{\bar{r}_0}$$

На рис. 1 и в подрисуночной подписи буквами с чертой сверху обозначены натуральные, т.е. измеренные в мм, размеры пуансона. Эти натуральные размеры переведены в относительные путем их деления на измеренный в мм радиус торца пуансона. Сделано это для того, чтобы полученная в результате описанного в настоящей статье исследования формула была применима для расчетов сил штамповки холодным выдавливанием вне зависимости от габаритов деталей.

Исследуемая удельная сила выдавливания заготовок q определялась путем деления измеренной в опытах силы выдавливания P , на площадь торца ступени пуансона $\pi \bar{r}_1^2$. Деформирование заготовок проводили на гидравлической испытательной машине марки Инстрон. Технологическим смазочным материалом служил технический животный жир. Каждый из опытов был проведен дважды: на заготовках из алюминиевого сплава Д1 и заготовках из меди М1 [5]. Скорость деформирования заготовок составляла 5 мм/мин. Выдавливание заготовок из двух разных материалов было проведено, чтобы повысить универсальность формулы, полученной в результате описанного в настоящей статье исследования.

Напряжения текучести материалов деформируемых в эксперименте заготовок определяли по кривым упрочнения, построенным по результатам испытания образцов на сжатие. Заготовки для испытания вырезали из прутков в состоянии их поставки, без дополнительной термообработки. Для построения кривой упрочнения для меди М1 проводили поэтапную осадку двух цилиндрических образцов диаметром 15 мм и высотой 16 и 18 мм. Перед каждым этапом осадки на торцы заготовок наносили смазочный материал, что позволило практически полностью исключить образование бочки у осаживаемой заготовки, т.е. свести к минимуму влияние трения между заготовкой и шлифованными бойками, на которых производилась осадка. Для построения кривой упрочнения для сплава Д1 при изготовлении образцов для испытания на их торцах вытачивали канавки. Диаметр канавок был на 1 мм меньше диаметра образца. Глубина канавок составляла 0,5 мм. Канавки заполняли техническим животным жиром. В результате разделительный слой смазочного материала между торцами образцов и бойками, на которых производили осадку, сохранялся в течение длительного этапа деформирования образца. Такое различие в подготовке образцов из меди и алюминиевого сплава для испытания на осадку вызвано тем, что коэффициент контактного трения между поверхностью шлифованного стального бойка и поверхностью медного образца существенно меньше коэффициента контактного трения между поверхностью шлифованного стального бойка и поверхностью алюминиевого образца.

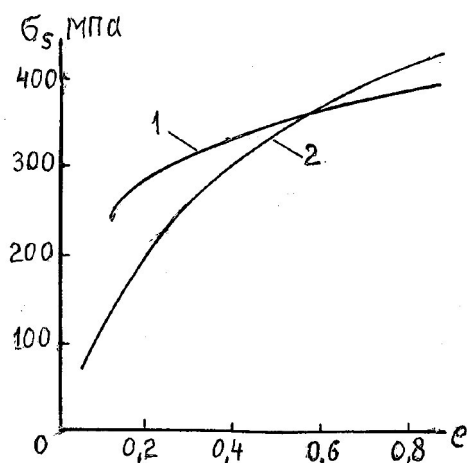


Рис. 2. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава Д1 – 1 и меди М1 – 2

Степень деформации осаживаемого образца e , откладываемая по горизонтальной оси при построении графика на рис. 2, оценивали как отношение приращения площади поперечного сечения образца к самой указанной площади. Приращение площади поперечного сечения рассчитывали через неизменный объем образца и фиксируемое записывающим устройством испытательной машины уменьшение высоты образца.

Методика строгого определения степени деформации при выдавливании деталей типа стаканов описана в работе [1]. Приближенная оценка величины степени деформации при выдавливании стаканов как гладким, так и ступенчатым пуансонами, проведена по следующей формуле:

$$e = [F_{заг} - (F_{заг} - F_{пол})] / F_{заг} = d^2 / D^2, \quad (1)$$

где $F_{заг}$ – площадь поперечного сечения заготовки, $F_{пол}$ – площадь поперечного сечения выдавленной полости стакана, D – внешний диаметр стакана, равный диаметру заготовки, d – внутренний диаметр стакана. Для определения степени деформации при выдавливании ступенчатым пуансоном вместо величины d в формулу (1) следует подставлять $2\bar{r}_1$ (рис. 1).

Основная часть

При проведении описываемого исследования каждому из четырех указанных в подписи к рис. 1 факторов в эксперименте придавали 5 различных значений. При традиционном (так называемом однофакторном) экспериментировании варьируемый фактор принимал бы 5 различных значений при неизменных значениях остальных трех факторов. После этого меняли бы значение одного из трех зафиксированных факторов и снова придали 5 различных значений варьируемому фактору. После исследования влияния ранее варьируемого фактора его перевели бы на место зафиксированного. Затем варьировали бы другой из ранее зафиксированных факторов. При таком экспериментировании число опытов составляет 625.

При принятом в настоящей статье плане эксперимента в виде представленного на рис. 3 комбинационного квадрата, где малыми клетками отмечены исследованные сочетания факторов, количество опытов (и соответственно комплектов инструмента) сокращается в 25 раз. Применение таких комбинационных квадратов является предложенным М.М. Протодяконовым и Р.И. Тедером развитием метода греко-латинских квадратов, опубликованным в доступной в Интернете книге этих авторов.

Форма графика изменения силы по ходу выдавливания заготовки представлена на *рис. 4*. На этом графике для сопоставления результатов разных опытов за силу выдавливания ступенчатым пуансоном было принято значение, соответствующее началу внедрения в заготовку его ступени и отмеченное на *рис. 4* кружком. Считали, что дальнейший рост силы вызван упрочнением металла заготовки. Таким образом, при выдавливании заготовок из упрочняющихся сплавов, полученная путем описываемого эксперимента формула дает правильный результат при небольшой глубине полости на ее

участке выше ступени. При выдавливании заготовок из не упрочняющихся сплавов формула применима при любой глубине полости.

Экспериментально определенные величины удельных сил выдавливания q приведены на *рис. 5* на графиках вверху для каждой из отмеченных буквами позиций. На этом же рисунке, на графиках внизу, приведены значения относительных удельных сил выдавливания q/σ_s . Величины напряжения текучести σ_s были определены по кривым упрочнения материалов заготовок, приведенным на *рис. 2*.

R	r ₁	1,1				1,2				1,3				1,4				1,5			
		0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2
1,7	0,8																				
	1,2	4,12				3,7	3,72			4,06				3,6	3,49			4,38			
	1,6		4,05																		
	2	1,73%					0,54%			4	1,5%				3,06%			0,45%			
1,9	2,4																			4,4	
	0,8																				
	1,2		3,96			4,12				3,61	3,5			4,05				3,4	3,48		
	1,6						4,15														
2,2	2	4,1	3,41%				0,72%			3,14%				1,25%						2,35%	
	2,4													4							
	0,8																				
	1,2					3,78	3,75			3,84				3,62	3,53			3,61			
2,5	1,6																	3,6			
	2						0,8%			3,9	1,54%			2%	1,97%				3,6	0,28%	
	2,4									4											
	0,8																				
2,5	1,2																				
	1,6									3,83	3,9			3,57							
	2						0,25%			1,76%				0,83%				3,2%	3,75		
	2,4						4,05														
3	0,8																				
	1,2																				
	1,6																				
	2																				
3	2,4																				
	0,8																				
	1,2																				
	1,6																				
3	2																				
	2,4																				
	0,8																				
	1,2																				
3	1,6																				
	2																				
	2,4																				
	0,8																				
3	1,2																				
	1,6																				
	2																				
	2,4																				

Рис. 3. Комбинационный квадрат с отмеченными малыми клетками значениями факторов в каждом из 25 опытов с указанными в каждой из этих клеток соответствующими значениями относительных удельных сил выдавливания

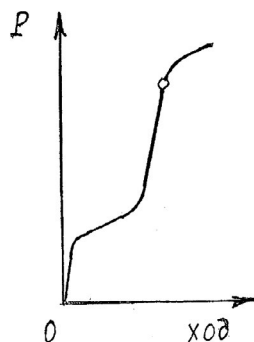


Рис. 4. График изменения силы по ходу выдавливания заготовки ступенчатым пуансоном

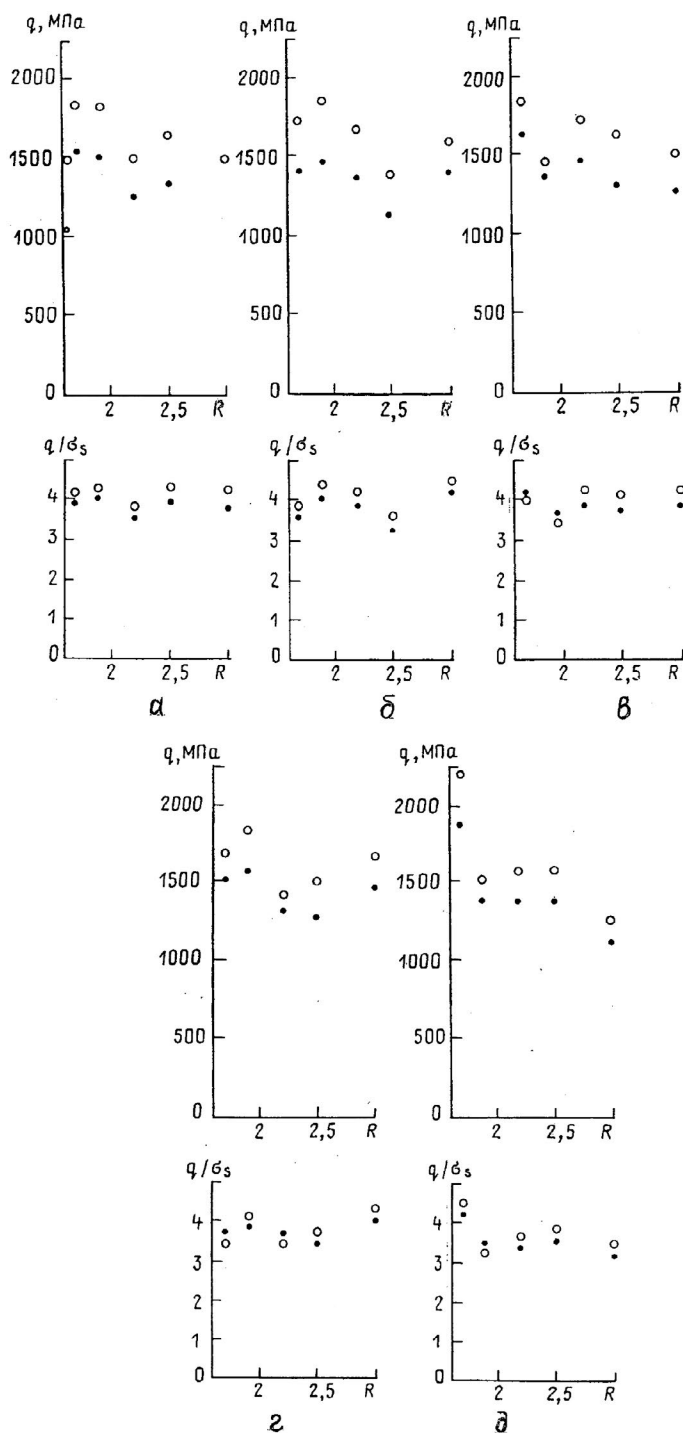


Рис. 5. Экспериментально определенные удельные силы выдавливания:

• – сплав Д1; ○ – медь М1;

а – $r_1 = 1,1$; б – $r_1 = 1,2$; в – $r_1 = 1,3$; г – $r_1 = 1,4$; д – $r_1 = 1,5$

На рис. 5 видно, что величины относительной удельной силы выдавливания одним и тем же пуансоном заготовок из алюминиевого сплава и меди незначительно различаются между собой. Различие может быть объяснено неодинаковым трением между этими материалами и деформирующим инстру-

ментом. За истинные значения величин относительных удельных сил были приняты средние между значениями, полученными при экспериментах на двух исследованных материалах. Эти средние значения записаны в соответствующих малых клетках комбинационного квадрата на рис. 3.

При обработке экспериментальных данных по каждой строке и столбцу комбинационного квадрата подсчитали среднее арифметическое результатов. Таким путем влияние трех факторов усреднили

и выявили влияние четвертого. Операции усреднения и полученные описанным образом данные приведены в *табл. 1 и 2*.

Таблица 1

Результаты определения q/σ_s в зависимости от относительного радиуса матрицы R и относительного радиуса ступени пуансона r_1

R	r_1						
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	Сумма по строке	
1,7	4,05	3,7	4,0	3,6	4,4	19,75	3,95
1,9	4,1	4,15	3,5	4,0	3,4	19,15	3,83
2,2	3,75	3,9	4,0	3,55	3,6	18,8	3,76
2,5	4,05	3,4	3,9	3,6	3,75	18,7	3,74
3,0	4,0	4,4	4,0	4,2	3,3	19,9	3,98
Сумма по столбцу	19,95	19,55	19,4	18,95	18,45	96,3	—
Среднее по столбцу	3,99	3,91	3,88	3,79	3,69	—	3,852

По усредненным данным построены графики (*рис. 6*). Графики показывают, что зависимости q/σ_s от r_1 и l являются линейными, зависимости q/σ_s от R и r_2 имеют более высокую степень. График $q/\sigma_s = f(R)$ по форме близок к алогичному графику

при выдавливании гладкими пуансонами. Характер изменения $q/\sigma_s = f(r_2)$ объясняется ростом по мере увеличения r_2 объема очага пластической деформации, а также силы контактного трения ввиду повышения давления на стенку матрицы.

Таблица 2

Результаты q/σ_s в зависимости от относительной длины пуансона до ступени l и относительного радиуса галтели пуансона r_2

l	r_2						
	0	0,6	1,2	1,8	2,4		
0,8	3,3	3,6	3,4	3,5	3,75	17,55	3,51
1,2	3,7	3,4	4,0	3,55	3,9	18,55	3,71
1,6	3,6	4,0	3,6	4,05	4,15	19,4	3,88
2,0	4,1	3,9	4,0	3,75	4,2	19,95	3,99
2,4	4,0	4,05	4,0	4,4	4,4	20,85	4,17
Сумма по столбцу	13,7	18,95	19,0	19,25	20,4	96,3	—
Среднее по столбцу	3,74	3,79	3,8	3,85	4,08	—	3,852

Из четырех факторов на относительную удельную силу выдавливания наиболее влияет r_1 . При возрастании r_1 на 0,1 величина q/σ_s увеличивается на 0,0375. Сказанное относится к влиянию фактора в среднем в пределах принятого диапазона его изменения. Однако, при изменении R от 1,9 до 1,7

величина q/σ_s изменяется на 0,19. Следовательно, на этом участке наиболее сильным по влиянию является фактор R .

Для построения математической модели, описывающей выявленные влияния, была проведена описанная ниже обработка графических зависимостей.

Для нейтрализации влияния факторов r_1 и l все данные были пересчитаны на значения $r_1 = 1$ и $l = 0$. Например, число 4, стоящее в центральной большой клетке комбинационного квадрата и относящееся к величинам $r_1 = 1,3$ и $l = 2,4$, было уменьшено на $[(1,3 - 1) / 0,1] \times 0,0375 = 0,9$ и увеличено на $[(1,3 - 1) / 0,1] \times 0,05 = 0,15$, после чего оно стало равным 3,25. Число 4,05, стоящее в первой большой клетке верхнего ряда и относящееся

к $r_1 = 1,1$ и $l = 1,6$, было уменьшено на $[(1,6 - 0) / 0,1] \times 0,0375$, увеличено на $[(1,1 - 1) / 0,1] \times 0,05$ и стало равным 3,5.

В соответствии с этим пересчетом в аналитическую формулу, которой ниже будет описано влияние факторов, входят слагаемые $0,375 l - 0,5 (r_1 - 1)$.

После пересчета указанным выше способом результаты, сгруппированные в зависимости от R и r_2 , приведены в табл. 3 (цифры без скобок).

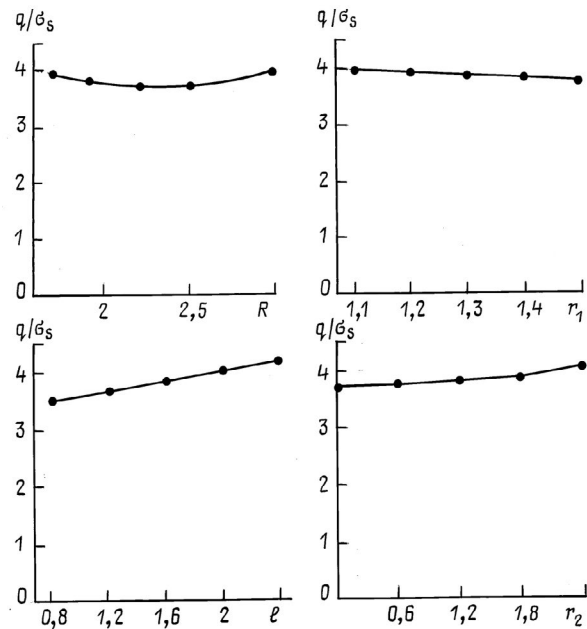


Рис. 6. Графики зависимостей относительной удельной силы выдавливания от рассматриваемых факторов

Таблица 3

Результаты промежуточных расчетов для определения свободного члена математической модели

R	r_2						Среднее по строке
	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Сумма по строке	
1,7	3,35 (3,14)	3,5 (3,27)	3,4 (3,1)	3,5 (3,09)	3,75 (3,18)	17,5 (15,78)	3,5 (3,156)
1,9	3,4 (3,3)	3,2 (3,08)	3,3 (3,11)	3,35 (3,05)	3,65 (3,19)	16,9 (15,73)	3,38 (3,146)
2,2	3,25 (3,24)	3,25 (3,22)	3,25 (3,15)	3,3 (3,09)	3,5 (3,13)	16,55 (15,83)	3,31 (3,166)
2,5	3,2 (3,19)	3,2 (3,17)	3,2 (3,1)	3,25 (3,04)	3,6 (3,23)	16,45 (15,37)	3,29 (3,146)
3,0	3,25 (3,04)	3,55 (3,32)	3,6 (3,3)	3,6 (3,19)	3,65 (3,08)	17,65 (15,93)	3,53 (3,186)
Сумма по столбцу	16,45 (15,91)	16,7 (16,06)	16,75 (15,76)	17 (15,46)	18,15 (15,81)	85,05 (79)	—
Среднее по столбцу	3,29 (3,182)	3,34 (3,212)	3,35 (3,152)	3,4 (3,092)	3,63 (3,162)	—	3,402 (3,16)

Изменение в зависимости от R усредненных по r_2 результатов (крайний правый столбец табл. 3) достаточно точно описывается формулой $0,5(R - 2,35)^2$. Для нейтрализации влияния R каждое значение q/σ_s было уменьшено на величину, подсчитанную по этой

формуле. Характер изменения в зависимости от r_2 усредненных по R результатов (нижняя строка табл. 3) позволил установить, что для нейтрализации фактора r_2 необходимо вычесть из каждого значения q/σ_s величину, подсчитанную по формуле $(0,25 r_2)^2$.

Нейтрализуя по найденным зависимостям влияние всех четырех факторов на экспериментальные данные, получили значения, записанные в *табл. 3* в скобках. Эти значения значительно меньше различаются между собой, чем указанные в малых клетках комбинаторного квадрата на *рис. 3*. Их среднее арифметическое равно 3,16.

Результаты исследования

Окончательный вид искомой формулы математической модели

$$q/\sigma_s = 0,5(R - 2,35)^2 - 0,5(r_1 - 1) + (0,25 r_2)^2 + 0,375 l + 3,16. \quad (2)$$

Рассчитанные по формуле (2) значения относительных удельных сил выдавливания для примененных в эксперименте пуансонов приведены в больших клетках комбинаторного квадрата на *рис. 3*. Там же в процентах указаны расхождения расчетных и экспериментальных данных. Наибольшее их расхождение между собой равно 4%.

Если применить полученную математическую модель к оценке относительной удельной силы выдавливания гладким пуансоном с цилиндрической боковой поверхностью, не имеющей ступеней, то останутся только следующие члены модели:

$$q'/\sigma_s = 0,5(R - 2,35)^2 + 3,16. \quad (3)$$

В соответствии с формулой (3), при $R = 2,35$ сила минимальна, и этот минимум равен 3,16. Такие значения типичны для выдавливания гладкими пуансонами, имеющими боковую поверхность без ступени [1].

Библиографический список

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка деталей из компактных и порошковых материалов / Е.Г. Белков, Г.В. Бунатян, А.Л. Воронцов и др. 2-ое изд. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.

2. Научно-технические технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др. / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

3. Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В. Повышение стойкости ступенчатых пуансонов при холодном выдавливании стаканов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 73–81.

4. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Горбаченко М.А. Оптимизация формы пуансонов для холодного выдавливания ступенчатых полостей стаканов из малопластичных алюминиевых сплавов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Выпуск 11. – Часть 1. – С. 7–20.

5. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 640 с.

References

1. Forging and stamping: Handbook. In 4 volumes. Vol. 3. Cold volume stamping of parts from compact and powder materials / E.G. Belkov, G.V. Bunatyan, A.L. Vorontsov, et al. 2nd ed. / Under the general editorship of E.I. Semenov. Moscow: Mechanical Engineering, 2010. – 352 p.

2. Science-intensive technologies in mechanical engineering / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezyazychny, et al. / Under the editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mechanical Engineering, 2012. – 528 p.

3. Dmitriev A.M., Grechnikov F.V., Korobova N.V. Increasing the durability of stepped punches during cold extrusion of cups. *Bulletin of mechanical engineering*. 2017. No. 2. – P. 73-81.

4. Dmitriev A.M., Korobova N.V., Gorbachenko M.A. Optimization of the shape of punches for cold extrusion of stepped cavities of cups from low-plasticity aluminum alloys. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2017. Issue 11. Part 1. – P. 7-20.

5. Handbook of structural materials: Handbook / B.N. Arzamasov, T.V. Solovieva, S.A. Gerasimov et al.; Under the editorship of B.N. Arzamasov, T.V. Solovieva. – Publishing house of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 2006. – 640 p.

Информация об авторах

Дмитриев Александр Михайлович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор
countess.olga@gmail.com

Коробова Наталья Васильевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой систем
пластического деформирования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mt-6@yandex.ru

Information about the authors

Dmitriev Alexander Mikhailovich – corresponding member of the Russian Academy of Sciences,
D.Sc. of Engineering, Professor
countess.olga@gmail.com

Korobova Natalya Vasilievna – D.Sc. of Engineering, head of the sub-department of “Plastic Deformation
Systems”, MSUT “STANKIN”
mt-6@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.