

На правах рукописи

Никифоров Иван Андреевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТРПУАНСОНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СТАКАНОВ С ФЛАНЦЕМ В ДОННОЙ ЧАСТИ ПОВЫШЕННОГО
КАЧЕСТВА**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель:

Воронцов Андрей Львович,
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана»,
кафедра «Технологии обработки материалов»

Официальные оппоненты:

Сосёнушкин Евгений Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
заведующий кафедрой «Композиционные
материалы»

Лисунец Николай Леонидович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

Ведущая организация:

**«Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН»**

Защита состоится «_____» 2021 г. в ____ ч. ____ мин. на заседании
диссертационного совета Д212.141.04 в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
Телефон для справок: 8-499-267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и
на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «_____» 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Анализ современной справочной и специализированной технической литературы показывает, что полые изделия типа стаканов с фланцем в донной части в огромных количествах используются в машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и оружейной промышленности. Они применяются для производства гильз и капсюлей фланцевых сигнальных патронов, служат различными подпятниками и опорами, а также функциональными заглушками автомобилей и бытовой техники, используются в качестве крышек подшипниковых гнёзд редукторов, валов, осей и маслёнок.

В большинстве случаев использования таких изделий, они являются ответственными деталями, от надёжности которых зависит работоспособность и безопасность конструкции в целом, в связи с чем к ним предъявляют высокие требования по эксплуатационным и качественным характеристикам, в частности, прочности, твёрдости, точности размеров и формы, качеству поверхности.

Для повышения эффективности производства указанных деталей в современных условиях необходимо непрерывное совершенствование технологии их изготовления. Анализ имеющейся технической информации показывает, что для получения ответственных деталей типа стаканов с фланцем в донной части наиболее эффективно использовать холодное прямое выдавливание с применением контрпуансона. Однако процесс такого выдавливания ранее не изучался ни теоретически, ни экспериментально.

Поэтому проведение углублённого научного исследования процесса прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части для изучения его важнейших закономерностей и получения высокоточных формул, обеспечивающих надёжное проектирование высокоэффективного технологического процесса с использованием данной операции, является актуальной задачей.

Объектом исследования является холодная объёмная штамповка.

Предметом исследования является изготовление стаканов с фланцем в донной части выдавливанием с использованием контрпуансона.

Цель и задачи работы.

Целью данной работы является разработка методики расчёта технологических параметров прямого выдавливания с использованием контрпуансона, обеспечивающих получение заданных изделий с повышенными прочностью, размерной точностью и низкими параметрами шероховатости при минимальном количестве переходов, меньшей силе деформирования и повышенном коэффициенте использования металла.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе полной системы классических уравнений наиболее строгой в настоящее время теории пластического течения определить кинематическое, напряжённое и деформированное состояния заготовки в процессе её прямого выдавливания, учтя при этом влияние на напряжённое состояние и силу деформирования упрочнения материала заготовки при холодной деформации, возможного различного взаиморасположения рабочих участков матрицы и

контрпуансона, различных углов конусности матрицы, а также высот калибрующих поясков матрицы и контрпуансона, и различных коэффициентов трения на поверхностях контакта заготовки и инструмента.

2. Исследовать напряженное и деформированное состояние заготовки при стесненном выдавливании, которое будет иметь место при получении стаканов с дном небольшой толщины.

3. Определить оптимальные по деформирующей силе углы конического участка матрицы, которые обеспечат минимальные затраты энергии, необходимые для изготовления заданной детали.

4. Определить максимальное давление на стенку матрицы, необходимое для её расчёта на прочность и обоснованного решения вопроса о необходимости её бандажирования.

5. Разработать обоснованные с научной точки зрения методики проектирования технологического процесса прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части с использованием контрпуансона, которые дадут возможность как для свободного, так и для стеснённого выдавливания выбирать подходящее оборудование, определять и устанавливать оптимальные режимы работы, а также обеспечивать надежность и стойкость штамповочного инструмента.

6. Выполнить экспериментальную проверку достоверности полученных теоретических зависимостей и возможности их практического применения.

7. Для подтверждения эффективности полученных научных результатов разработать и опробовать в промышленных условиях технологический процесс изготовления с помощью прямого выдавливания с использованием контрпуансона ответственных деталей с фланцем в донной части.

Методы исследования.

Определение параметров кинематического, напряжённого и деформированного состояний материала производилось с помощью решения методом А.Л. Воронцова полной системы классических уравнений теории пластического течения Леви–Мизеса. Она сформулирована для цилиндрической системы координат и дополнена теорией конечных накопленных деформаций Ильюшина.

Экспериментальное определение сил деформирования проводилось на гидравлическом прессе ИПЭ-1000 с наибольшей создаваемой нагрузкой 1000 кН, имеющем выведенный на компьютер измеритель силы с погрешностью не более 1%.

Измерение твёрдости производилось по стандартной методике ГОСТ 9012-59 (в официальной редакции 2007 г.) на сертифицированном в России стационарном твердомере по Бринеллю НВ-3000В, обладающем высокой точностью и повторяемостью тестирования, соответствующей стандартам ISO6506.81 и ASTM E-10.

Шероховатость поверхности измерялась по стандартной методике ГОСТ 2789–73 (в официальной редакции 2018 г.) на профилографе-профилометре модели 252.

Достоверность результатов.

Достоверность полученных в данной работе результатов подтверждается:

- 1) разработкой математических моделей процесса прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части на основе фундаментальных уравнений современной механики деформируемого твёрдого тела;
- 2) высокой степенью соответствия результатов теоретических и экспериментальных исследований (проведено 94 числовых сравнения с максимальным расхождением 8,1%);
- 3) успешным промышленным опробованием и намеченным дальнейшим внедрением в ОАО «НПП «Звезда» имени академика Г.И. Северина» (в ходе опробования получено ещё 6 сравнений теоретических предсказаний с промышленными результатами с наибольшим расхождением 6,9%).

Научная новизна.

- 1) Впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования нового процесса прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части с использованием контрпуансона.
- 2) Впервые на основе решения полной системы классических уравнений механики деформируемого твёрдого тела, описывающих пластическое течение материала в процессе прямого выдавливания с использованием контрпуансона, определены все компоненты кинематического и напряжённого состояний заготовки.
- 3) Анализ кинематического и напряженного состояний позволил с помощью строгого решения уравнений Ильюшина в частных производных установить единое поле скоростей течения и на его основе получить формулы, позволяющие определить в любой точке очага пластической деформации величину накопленной деформации.
- 4) Кроме исследования напряжённо-деформированного состояния заготовки при свободном выдавливании, с той же механико-математической строгостью выведены формулы и для стеснённого выдавливания.
- 5) Получены формулы, описывающие все важнейшие технологические параметры при любом взаиморасположении рабочих участков матрицы и контрпуансона, а также для любого угла конического участка матрицы, различных коэффициентов трения между контактными поверхностями матрицы и контрпуансона и заготовкой для неупрочняющегося и упрочняющегося материала.
- 6) Выведена формула для определения оптимальных углов конического участка матрицы, обеспечивающих минимальную деформирующую силу.

Теоретическая значимость работы.

Реализован конкретный метод всестороннего механико-математического исследования закономерностей пластической деформации при наличии большого количества разных областей пластической деформации, а именно, 4-х областей напряжённого и 12-ти областей деформированного состояния, что поможет успешно решать аналогичные научные задачи полного определения параметров кинематического, напряжённого и деформированного состояний материала при его обработке давлением с упрочнением.

Практическая значимость работы.

Разработанная методика расчета технологических параметров процесса прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части с использованием контрпуансона позволяет получить всю необходимую информацию для оптимального выбора кузнечно-прессового оборудования.

Теоретические зависимости, полученные в работе, позволяют учитывать влияние на результирующую силу деформирования и давление на штамповый инструмент всех основных факторов: геометрических параметром штампового инструмента, получаемого металлом в результате пластической деформации упрочнения, используемой смазки. Это позволяет еще на стадии разработки технологического процесса выбирать наиболее оптимальные параметры.

По сравнению с традиционными методами экспериментальной отработки нового технологического процесса практическая ценность работы заключается в сокращении материальных и финансовых затрат на исследование. Результат достигается с меньшими затратами труда и большей скоростью.

Выведенные формулы просты в использовании технологами-практиками, обладают наглядным видом, но при этом обеспечивают высокую точность практических расчетов. Не требуют длительной и трудоемкой отладки компьютерных программ, что исключает возможность совершения ошибок.

По результатам исследования прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части с использованием контрпуансона даны конкретные рекомендации по рациональному выбору всех основных параметров процесса, которые обеспечат длительное использование штампового инструмента за счет максимального повышения его стойкости, а также позволят уменьшить как материальные и энергетические, так и финансовые затраты за счет снижения деформирующей силы и исключения последующей термической и механической обработки.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в детализации математических моделей, проведении и обработке результатов экспериментов, формулировке на основе проведённых исследований выводов и практических рекомендаций, а также в успешном проведении заводских испытаний.

Рекомендации к использованию.

Полученные результаты и рекомендации приняты к использованию в ОАО «НПП «Звезда» имени академика Г.И. Северина» (Московская обл., пос. Томилино).

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертации неоднократно излагались и обсуждались на научных семинарах кафедры технологий обработки материалов (Москва, 2019, 2020), а также на объединённом научном семинаре кафедр технологий обработки давлением, оборудования и технологий прокатки, материаловедения и технологий обработки материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2020). Международной научно-технической конференции «Динамика, надёжность и долговечность механических и биомеханических систем», (Севастополь, 2018), Всероссийской научно-технической конференции «Будущее машиностроения России», (Москва, 2018), Международной конференции «Ма-

шины, технологии и материалы для современного машиностроения», (Москва, 2018), Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению», (Москва, 2018) , Международной научно-технической конференции «Иновационные технологии реновации в машиностроении», (Москва, 2019), Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», (Москва, 2019).

Публикации.

Основные положения диссертации отражены в 23 научных публикациях, включающих 18 статей в рецензируемых научно-технических журналах из перечня ВАК РФ. Общий объем –13,82 п. л., авторский вклад –7,41 п. л.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 93 наименований, списка условных обозначений и приложения, изложенных на 193 страницах машинописного текста. Работа включает 69 рисунков и 12 таблиц.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Разработанные расчётные схемы и выведенные на их основе теоретические формулы напряжений, сил и накопленных деформаций;
- 2) результаты экспериментальной проверки высокой точности полученных теоретических формул;
- 3) установленные закономерности изменения оптимальных углов матрицы;
- 4) методики расчёта технологических параметров, обеспечивающих получение заданных стаканов с фланцем в донной части с повышенными прочностью, размерной точностью и низкими параметрами шероховатости при минимальном количестве переходов, меньшей силе деформирования и повышенном коэффициенте использования металла.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, раскрыты научная новизна и практическая ценность, а также перечислены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе проведён анализ существующих промышленных способов изготовления стаканов с фланцем в донной части, в результате которого показано, что наиболее эффективным процессом является прямое выдавливание с применением контрпуансона.

Установлено, что для теоретического определения кинематического, напряжённого и деформированного состояний заготовки в процессе выдавливания лучше всего подходит общий метод А. Л. Воронцова.

На основании проведённого литературного обзора в соответствии с поставленной целью сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена всестороннему теоретическому исследованию прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части с использованием контрпуансона.

Для определения кинематического и напряжённого состояний выдавлива-

емой заготовки использована расчётная схема, показанная на Рис. 1.

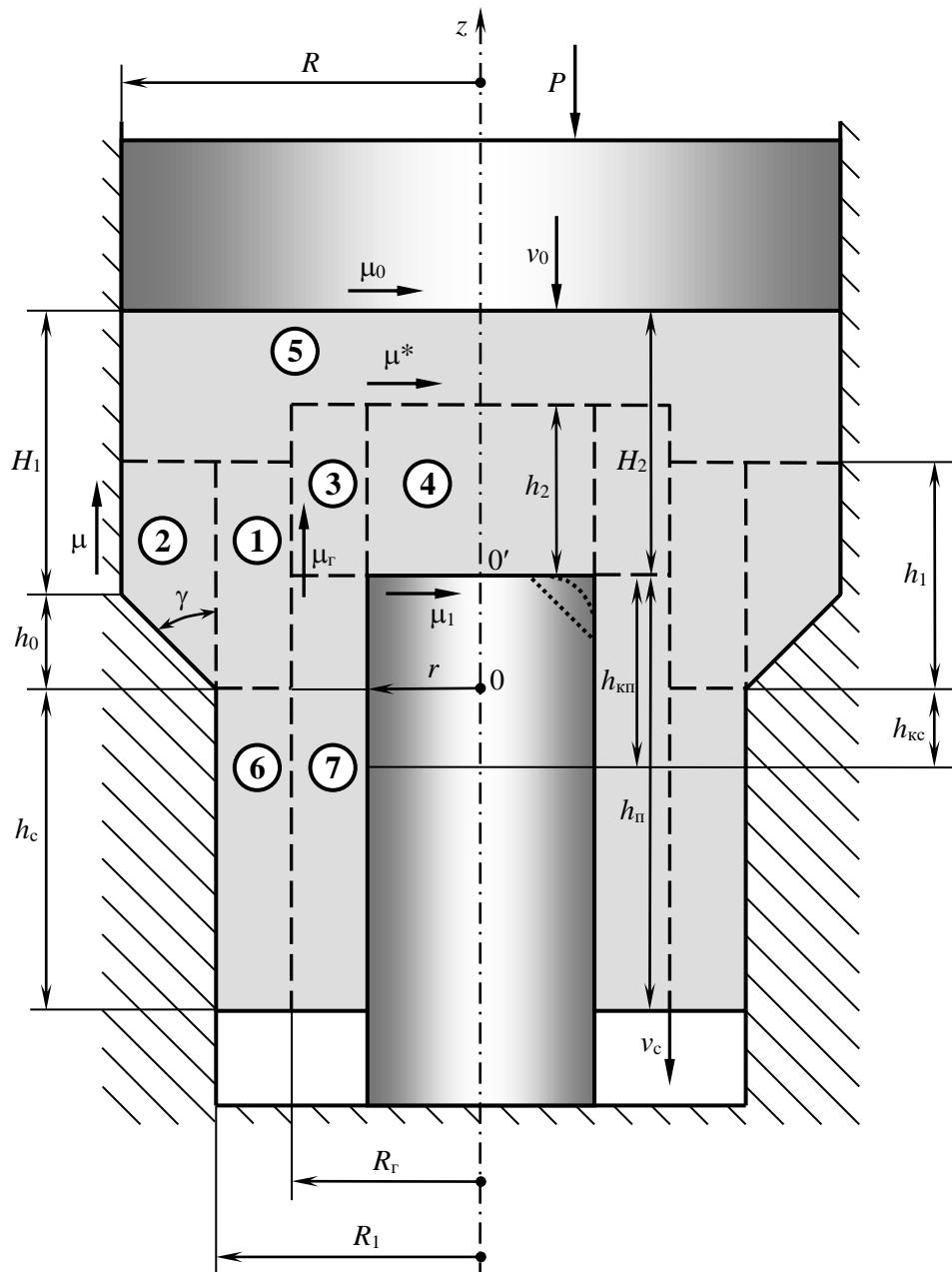


Рис. 1. Расчётная схема прямого выдавливания с использованием
контрпуансона

В результате решения в каждой из областей 1–4 полной системы дифференциальных уравнений в частных производных, включающей 12 уравнений, в которые входит 12 неизвестных величин: напряжения σ_ρ , σ_θ , σ_z , $\tau_{\rho z}$, среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление) σ , скорости деформаций ξ_ρ , ξ_θ , ξ_z , $\eta_{\rho z}$, интенсивность скоростей деформаций ξ_i , скорости перемещения материальных точек среды (скорости течения) v_ρ , v_z – найдены все перечисленные неизвестные в каждой области очага пластической деформации.

Получены формула радиуса раздела течения R_g

$$R_{\Gamma} = \frac{rR}{\sqrt{R^2 + r^2 - R_1^2}}, \quad (1)$$

а также формулы высот очага пластической деформации h_1 и h_2 на стадии свободного выдавливания, максимального давления на стенку матрицы и силы выдавливания. Формула силы выдавливания имеет вид:

$$\begin{aligned} P = & 3,456\sigma_s \left\{ 0,275R_{\Gamma}^2 \left[2 \ln \left(\frac{R_1}{R_{\Gamma}} \right) - 1 + \left(\frac{R_{\Gamma}}{R_1} \right)^2 \right] + 1,5(R^2 - R_1^2) + R^2 \ln \frac{R}{R_1} + \right. \\ & + 2\mu R_1 h_{\text{кc}} \frac{R^2 - R_{\Gamma}^2}{R_1^2 - R_{\Gamma}^2} + \left\{ 0,5 - 0,25 \left(1 - \frac{R_1}{R} \right) \cos \gamma \right\} \frac{R^2 + R_1^2 - 2R_{\Gamma}^2}{R_1^2 - R_{\Gamma}^2} - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \left. R_1 h_1 + \right. \\ & + \left. \left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right) \left\{ R^4 R_1 \left[\ln \left(\frac{R}{R_1} \right) - 0,75 \right] + R^2 R_1^3 - 0,25 R_1^5 \right\} \right. \\ & \left. + \frac{h_1(R^2 - R_1^2)}{h_1(R^2 - R_1^2)} + \right. \\ & \left. + r^2 \left[2 + \ln \frac{R_{\Gamma}}{r} + \frac{rh_2}{2(R_{\Gamma}^2 - r^2)} + \frac{2\mu_1 rh_{\text{кп}}}{R_{\Gamma}^2 - r^2} + \frac{(\mu_1 + 0,5)r}{4h_2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_s – напряжение текучести, а μ и μ_1 – коэффициенты трения по напряжению текучести на соответствующих поверхностях инструмента, которые, как и геометрические параметры, ясны из Рис. 1.

Для определения деформированного состояния использована расчётная схема, которая показана на Рис. 2 и отличается исключительной сложностью, так как в общем случае включает 12 зон с различным деформированным состоянием, которое определено путём строгого вывода формул для каждой зоны.

Для иллюстрации приведём компоненты накопленной деформации, полученные для зоны 3б:

$$e_z = \ln \left(1 + \psi - \psi \frac{z}{h_2} \right), \quad (3)$$

$$e_{\theta} = \frac{1}{2} \ln \frac{\rho^2}{R_{\Gamma}^2 + (\rho^2 - R_{\Gamma}^2) \left(1 + \psi - \psi \frac{z}{h_2} \right)}, \quad (4)$$

где коэффициент обжатия

$$\psi = \frac{r^2}{R_{\Gamma}^2 - r^2}. \quad (5)$$

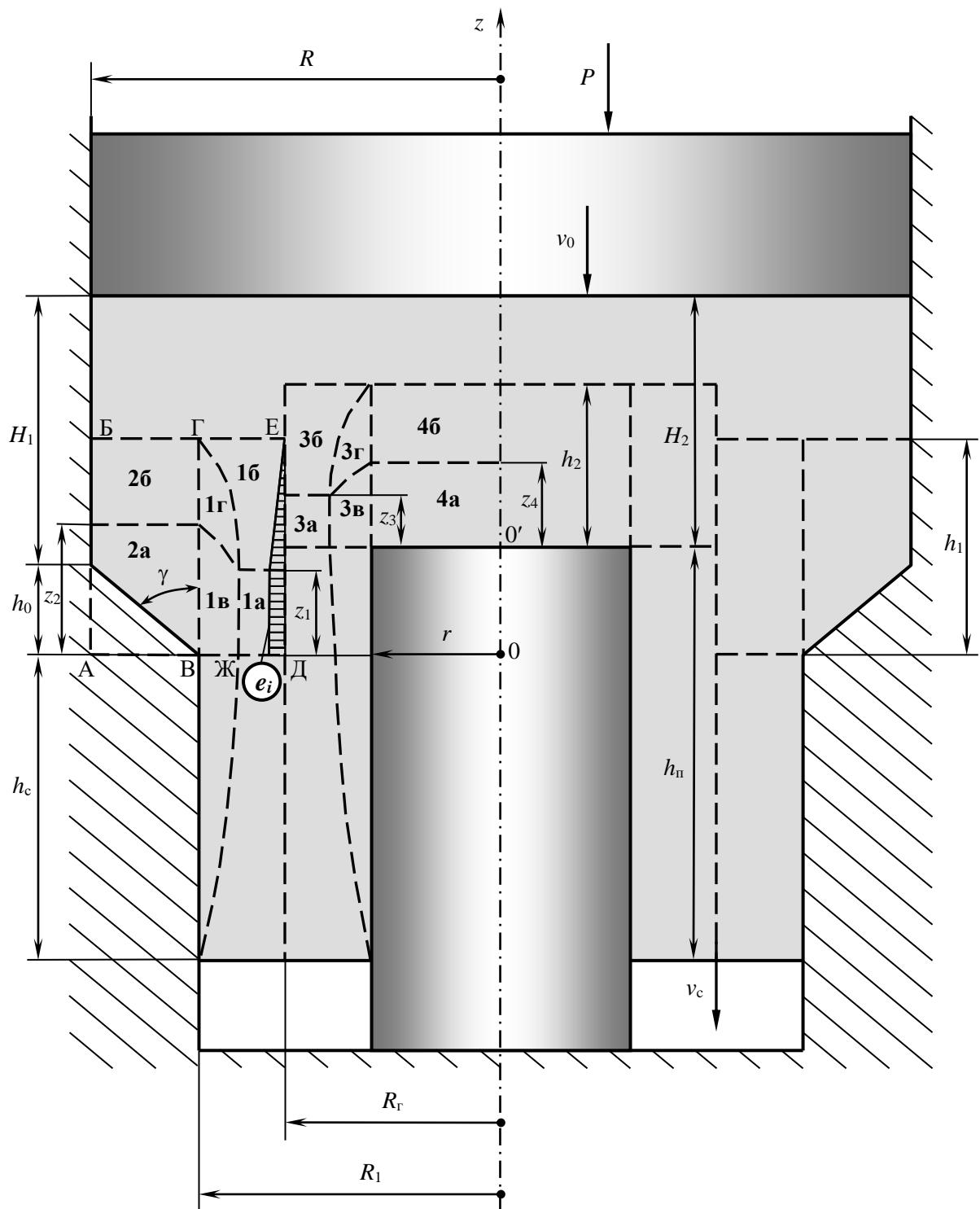


Рис. 2. Зоны с различным деформированным состоянием, образующиеся при прямом выдавливании с использованием контрпуансона

В третьей главе изложены результаты всесторонней экспериментальной проверки полученных теоретических формул и закономерностей. В общей сложности выполнено 94 опыта, которые применительно к горячему выдавливанию с отсутствием упрочнения делались на заготовках из свинца С00, а для холодного выдавливания с упрочнением делались на представителях основных типов сплавов, наиболее часто используемых в машиностроении: алюминиевом

сплаве АД1, латуни Л63 и коррозионно-стойкой и жаропрочной стали 12Х18Н9Т.

На Рис. 3 показаны выдавленные образцы из алюминиевого сплава АД1, смазанного животным жиром, а на Рис. 4 – сопоставление экспериментальной и теоретической кривых изменения силы по ходу холодного выдавливания.

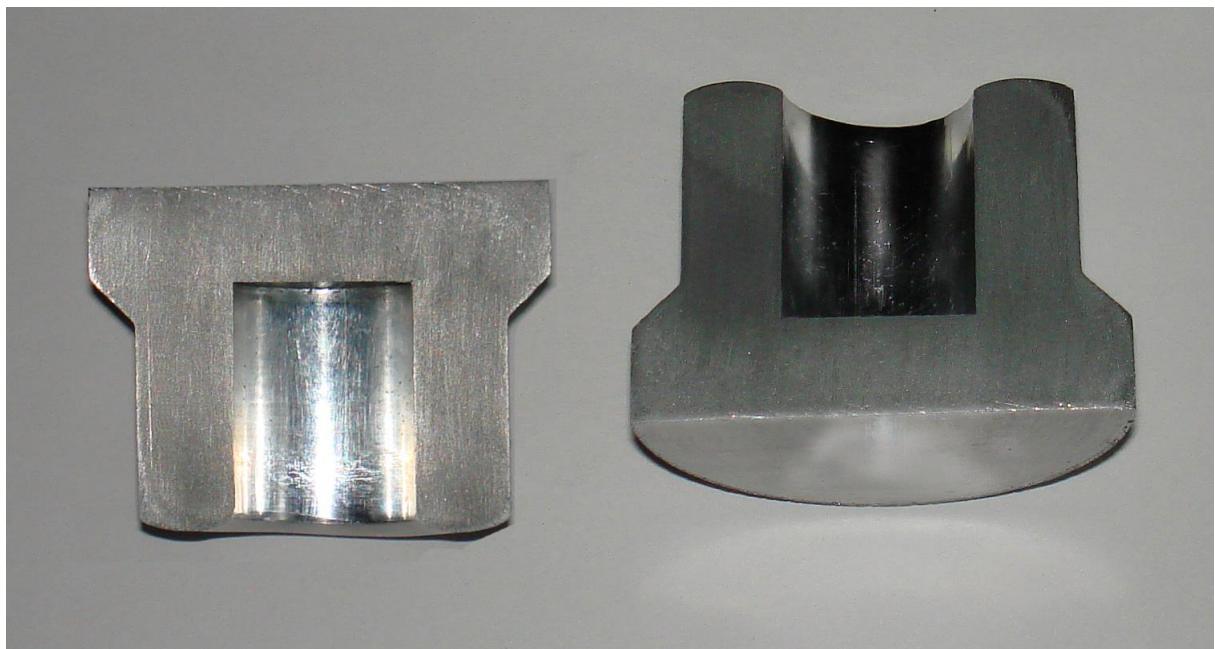


Рис. 3. Выдавленные образцы из алюминиевого сплава АД1, разрезанные вдоль оси

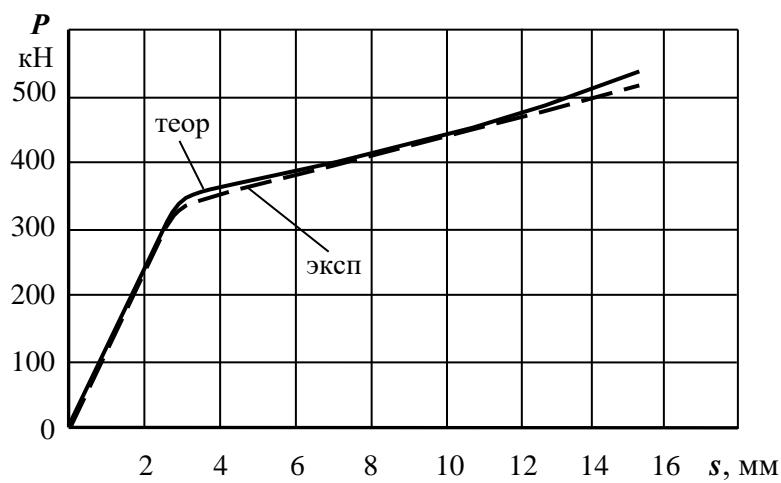


Рис. 4. График изменения силы по ходу выдавливания образца из алюминиевого сплава АД1

На Рис. 5 показаны образцы из алюминиевого сплава АД1, выдавленные с разным радиусом полости, а на Рис. 6 – сопоставление экспериментальных и теоретических данных. На Рис. 7 приведена фотография образцов, выдавленных с разной толщиной дна, что позволило исследовать влияние разного положения торца контрпуансона относительно конического участка матрицы. В результате при толстом дне была разработана новая расчётная схема, позволившая получить более точные формулы для вычисления силы выдавливания в данном случае.



Рис. 5. Выдавленные из алюминиевого сплава АД1 образцы с разным радиусом полости

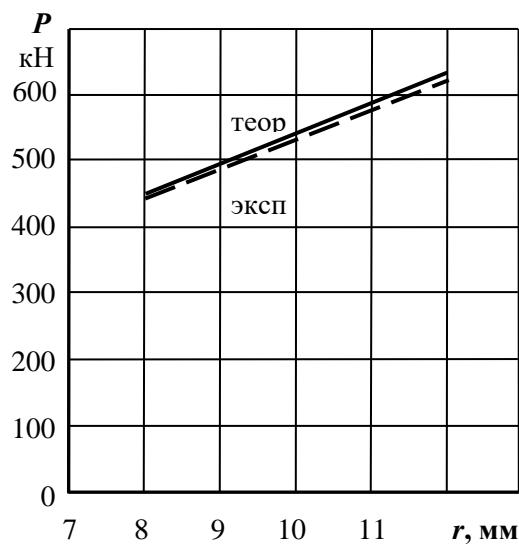


Рис. 6. График изменения силы выдавливания алюминиевого сплава АД1 в зависимости от радиуса рабочего торца контрпуансона



Рис. 7. Выдавленные из алюминиевого сплава АД1 образцы с разной толщиной дна

На образцах из свинца С00 и сплава АД1 были проведены исследования изменения силы выдавливания в зависимости от угла конусности матрицы, результаты которых показаны на Рис. 8–11, а типовые образцы – на Рис. 12, 13.

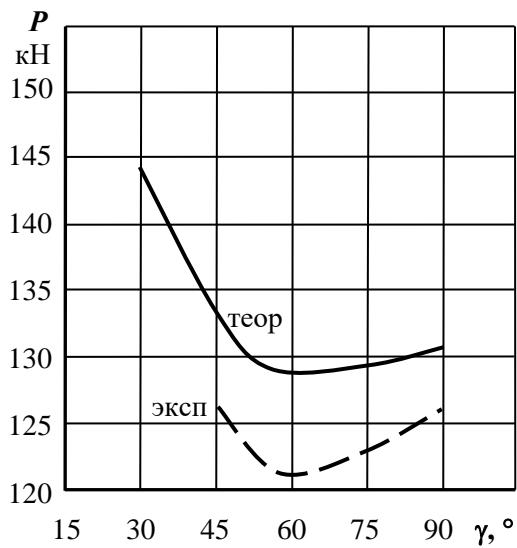


Рис. 8. График изменения силы выдавливания свинца С00 в зависимости от угла конусности матрицы при $R=25$ мм, $R_1=15$ мм, $r=10$ мм, $\mu=\mu_1=0,1$

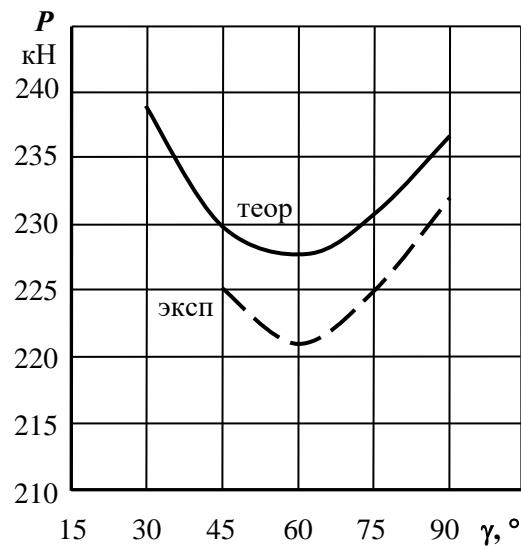


Рис. 9. График изменения силы выдавливания свинца С00 в зависимости от угла конусности матрицы при $R=25$ мм, $R_1=15$ мм, $r=10$ мм, $\mu=\mu_1=0,5$

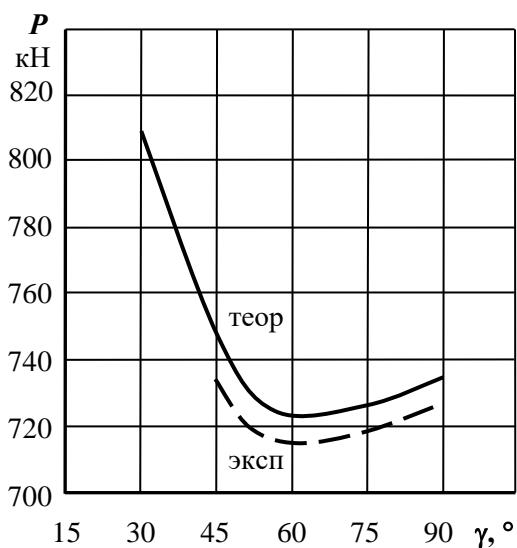


Рис. 10. График изменения силы выдавливания алюминиевого сплава АД1 в зависимости от угла конусности матрицы при $R=25$ мм, $R_1=15$ мм, $r=10$ мм, $\mu=\mu_1=0,1$

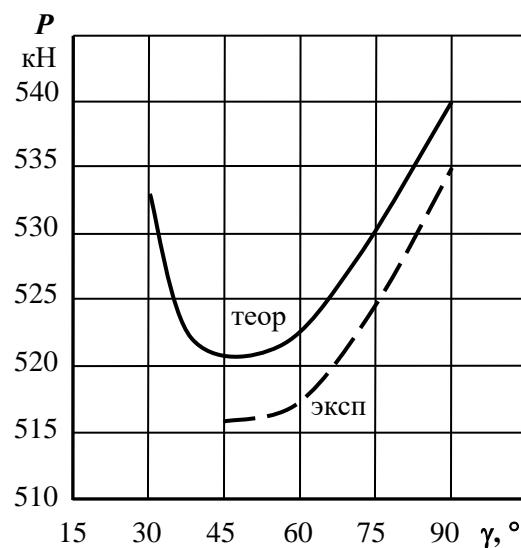


Рис. 11. График изменения силы выдавливания алюминиевого сплава АД1 в зависимости от угла конусности матрицы при $R=25$ мм, $R_1=20$ мм, $r=10$ мм, $\mu=\mu_1=0,3$

Типовые образцы, полученные при выдавливании значительно более трудно деформируемых представителей группы медных сплавов и высоколегированных сталей показаны на Рис. 14, 15. Заготовки из латуни Л63 смазывались пастой ВНИИНП-232, содержащей 70% дисульфида молибдена. Заготовки из стали 12Х18Н9Т подвергались оксалатированию с последующим омыливанием.



Рис. 12. Выдавленные из алюминиевого сплава АД1 образцы в матрице с $R_1=20$ мм и углами конусности $\gamma=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$



Рис. 13. Выдавленные из алюминиевого сплава АД1 образцы в матрице с $R_1=15$ мм и углами конусности $\gamma=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$



Рис. 14. Выдавленные из латуни Л63 образцы с разным радиусом полости и углом конусности матрицы $\gamma=45^\circ$

Для более детальной проверки результатов теоретического определения напряжённо-деформированного состояния заготовки в процессе прямого выдавливания с использованием контрпуансона был применён экспериментально-аналитический метод делительных сеток, результаты искажения которых (Рис. 16) обрабатывались по математической методике А. Л. Воронцова.

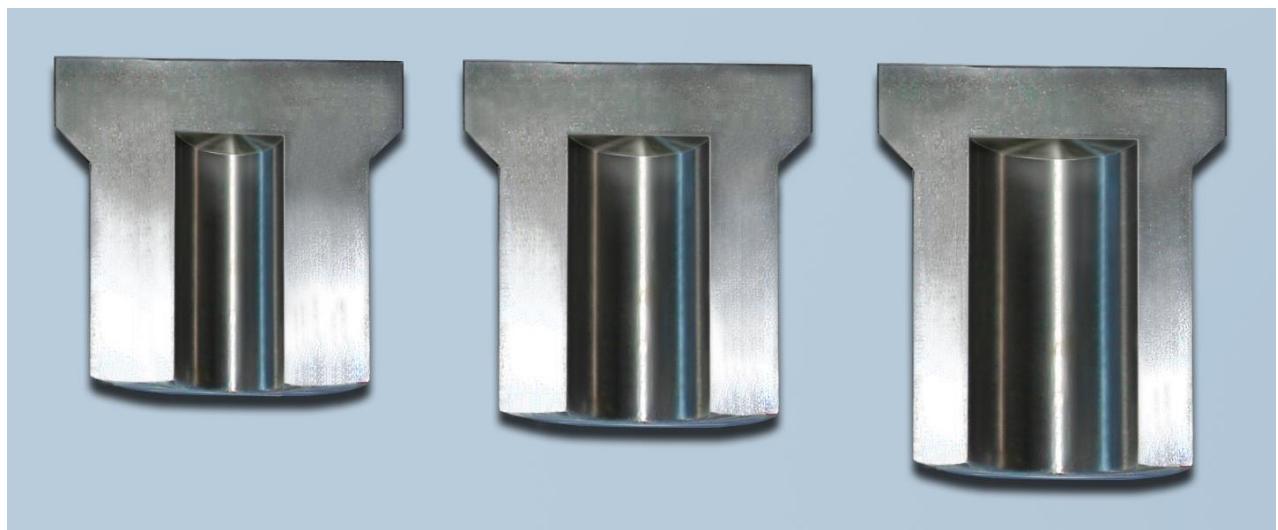


Рис. 15. Выдавленные из стали 12Х18Н9Т образцы с разным радиусом полости и углом конусности матрицы $\gamma=45^\circ$

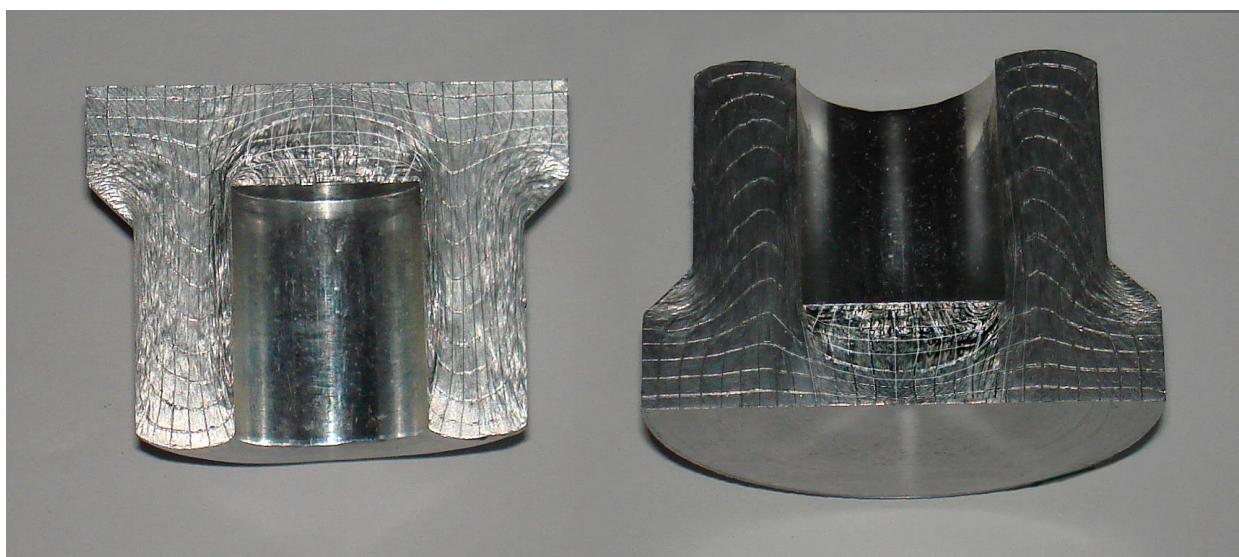


Рис. 16. Выдавленные образцы из алюминиевого сплава АД1, с нанесённой в осевой плоскости координатной сеткой

В четвёртой главе изложены методики расчёта технологических параметров прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части с использованием контрпуансона как для свободного, так и для стеснённого выдавливания.

В пятой главе изложены результаты практического использования новых научных положений диссертационной работы на примере разработки методики проектирования технологического процесса производства специальных заглушек аэрокосмической техники (Рис. 17).

Промышленная апробация выдавливания специальных заглушек, разработанного на основе выполненных научных исследований, подтвердила высокие точность и практическую значимость выведенных формул и всех установленных закономерностей.



Рис. 17. Полуфабрикат после выдавливания и окончательное изделие
после калибровки

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Наиболее эффективным для изготовления деталей типа стакана с фланцем в донной части является исследованный процесс прямого выдавливания с контрпуансоном, поскольку он способен обеспечить значительный рост производительности и наилучший показатель коэффициента использования материала, увеличение прочности, твердости и, как следствие, износостойкости получаемого изделия, а также значительное улучшение размерной точности и качества поверхности.

2. Впервые на основе полной системы классических уравнений теории пластического течения определены кинематическое, напряженное и деформированное состояния заготовки в процессе ее свободного и стесненного прямого выдавливания с контрпуансоном, что позволило получить расчетные формулы, которые учитывают упрочнение материала заготовки, различные значение угла конического участка матрицы, различное взаимное расположение рабочих участков матрицы и контрпуансона, а также высоты их калибрующих поясков, и различные значения коэффициента трения на поверхностях контакта между заготовкой и инструментом.

3. Выведена формула для определения оптимальных углов конического участка матрицы, обеспечивающих минимальную деформирующую силу. Установлено теоретически и подтверждено экспериментально, что такие углы как при наличии упрочнения, так и при его отсутствии в данном процессе имеются и в исследованном диапазоне находятся в пределах $45\text{--}60^\circ$, а в каждом конкретном случае зависят от величин обжатия и коэффициентов трения.

4. Получена формула для определения максимального давления, действующего на стенку матрицы, необходимого для её расчёта на прочность и обоснованного решения вопроса о необходимости её бандажирования. Расхождение экспериментального и теоретического значения максимального давления не превышает 6% в сторону запаса.

5. Разработаны научно обоснованные методики проектирования технологии как свободного, так и стеснённого прямого выдавливания стаканов с фланцем в донной части с использованием контрпуансона, позволяющие выбрать оборудование, обеспечить стойкость штамповочного инструмента и выбрать оптимальные параметры процесса, которые позволяют обеспечить требуемые произ-

водственные показатели.

6. В результате многочисленных числовых сравнений результатов расчёта с экспериментальными данными подтверждена надёжность количественного учёта выведенными формулами влияния всех значимых факторов на основные характеристики процесса. Расчетные значения сил деформирования незначительно (в пределах 10%) превышают экспериментальные, что соответствует поставленной задаче получения верхней оценки данных сил и позволяет правильно выбрать кузнечно-прессовое оборудование, требующееся для осуществления исследуемого процесса, а также с большей гарантией оценить прочность и стойкость штампового инструмента, что имеет важное практическое значение. Высокая степень соответствия результатов теоретического расчета и экспериментальных значений дает возможность рекомендовать полученные формулы к практическому использованию для увеличения эффективности производства стаканов с фланцем с помощью прямого выдавливания с использованием контрпуансона.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Никифоров И. А. Исследование прямого выдавливания с использованием контрпуансона для изготовления стаканов с фланцем в донной части // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 4-2 (330). С. 187-192. (0,8 п.л.)
2. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 1. Актуальность и постановка задачи // Производство проката. 2019. № 1. С. 26-32. (0,9 п.л./0,45 п.л.)
3. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 2. Определение кинематического и напряжённого состояний в первой периферийной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 2. С. 28-31. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
4. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 3. Определение кинематического и напряжённого состояний во второй периферийной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 3. С. 29-33. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
5. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 4. Определение кинематического и напряжённого состояний в третьей центральной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 4. С. 28-30. (0,4 п.л./0,2 п.л.)
6. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 5. Определение кинематического и напряжённого состояний в четвёртой центральной области пластической деформации // Производство

- проката. 2019. № 5. С. 19-22. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
7. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 6. Определение деформированного состояния в первой периферийной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 6. С. 25-31. (0,9 п.л./0,45 п.л.)
8. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 7. Определение деформированного состояния во второй периферийной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 7. С. 36-40. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
9. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 8. Определение деформированного состояния в третьей центральной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 9. С. 28-32. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
10. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 9. Определение деформированного состояния в четвёртой центральной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 10. С. 28-35. (1 п.л./0,5 п.л.)
11. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 10. Определение деформированного состояния при стеснённом выдавливании в первой периферийной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 11. С. 25-30. (0,8 п.л./0,4 п.л.)
12. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 11. Определение деформированного состояния при стеснённом выдавливании во второй периферийной области пластической деформации // Производство проката. 2019. № 12. С. 29-33. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
13. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 12. Определение деформированного состояния при стеснённом выдавливании в третьей центральной области пластической деформации // Технология металлов. 2020. № 3. С. 47-51. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
14. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Исследование изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с контрпуансоном. Сообщение 13. Определение деформированного состояния при стеснённом выдавливании в четвёртой центральной области пластической деформации // Технология металлов. 2020. № 4. С. 43-51. (1,2 п.л./0,6 п.л.)
15. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Штамповка стаканов с донным фланцем прямым выдавливанием с контрпуансоном. Актуальность и постановка задачи // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 4. С. 27-31. (0,6 п.л./0,3 п.л.)

16. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Штамповка стаканов с донным фланцем прямым выдавливанием с контрпуансоном. Определение кинематического и напряжённого состояний в первой периферийной области пластической деформации // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 4. С. 25-30. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
17. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Штамповка стаканов с донным фланцем прямым выдавливанием с контрпуансоном. Определение кинематического и напряжённого состояний во второй периферийной области пластической деформации // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 4. С. 23-29. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
18. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Штамповка стаканов с донным фланцем прямым выдавливанием с контрпуансоном. Определение кинематического и напряжённого состояний в третьей центральной области пластической деформации // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 4. С. 27-32. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
19. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Новейшая технология изготовления металлических стаканов с фланцем в донной части // Сборник тезисов международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвящённой 80-летию ИМАШ РАН. М., ИМАШ РАН. 2018. С. 49. (0,12 п.л./0,06 п.л.)
20. Никифоров И. А. Разработка схемы экспериментального штампа для изготовления стаканов с фланцем в донной части путем прямого выдавливания с использованием контрпуансона / Научные труды Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2018. С. 117-119. (0,2 п.л.)
21. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Повышение износостойкости деталей типа стаканов с фланцем в донной части путём прямого выдавливания с использованием контрпуансона // Труды XII международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению», посвящённой 80-летию ИМАШ РАН. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2018. С. 123-126. (0,4 п.л./0,2 п.л.)
22. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Повышение износостойкости полых деталей с фланцем в донной части путём инновационного прямого выдавливания с использованием контрпуансона / Инновационные технологии реновации в машиностроении. Сборник трудов международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана. М.: ИИУ МГОУ. 2019. С. 220-223. (0,3 п.л./0,15 п.л.)
23. Воронцов А. Л., Никифоров И. А. Математическое моделирование прогрессивной технологии изготовления стаканов с фланцем в донной части прямым выдавливанием с использованием контрпуансона / Научные труды VI международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». М. ИМАШ РАН. 2019. С. 102-104. (0,4 п.л./0,2 п.л.)