

1565305

На правах рукописи
УДК 621.961.2

Оленин Леонид Дмитриевич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОГО
ВЫДАВЛИВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ
ФОРМЫ С ГЛУБОКИМИ ПОЛОСТЯМИ**

Специальность 05.03.05.- Процессы и машины
обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

Москва 1999 г.


Л.И.О.

Работа выполнена в научно исследовательском и экспериментальном институте автомобильной электроники и автотракторного электрооборудования (НИИАЭ) г. Москва

Официальные оппоненты: -

Доктор технических наук,
профессор Е. И. Семенов

- Доктор технических наук,
профессор А. Д. Матвеев
- Доктор технических наук,
профессор В. Н. Субич

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1565305

Опение П. Д. Научное обосоно

Ведущее предприятие: -

АО НИИТ автопром

__ 1999 года в 14³⁰ часов на заседа-
при Московском Государственном
и по адресу: 107005, Москва, ул. 2-я

нный печатью, просим выслать по

1565305

иотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана

1999 г.

В.И. Семенов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Благодаря целому набору уникальных свойств металл продолжает оставаться основным материалом в машиностроении. Но металл не только дорог сам по себе, перевод в стружку каждого его килограмма обходится еще дороже. В этой связи представляется, что подъему отечественной экономики в значительной степени будет способствовать развитие малоотходных энергосберегающих методов обработки металла, таких как холодная штамповка выдавливанием.

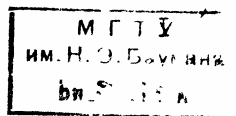
От других малоотходных методов эта технология выгодно отличается высоким качеством изделий и стабильностью технологического процесса, а по эффективности энергозатрат с ней может конкурировать только метод порошковой металлургии, при том, что последний не всегда обеспечивает требуемую прочность изделий. Однако в практике проектирования этой наукоемкой технологии сложился чисто эмпирический подход, при котором технологический процесс строится как последовательность простейших операций, в которых деформируемый металл вытесняется в одну сторону, и как механическая система имеет только одну степень подвижности. Это упрощает проектирование, но приводит к неэффективным решениям, порождая громоздкие дорогостоящие проекты и серьезные проблемы, главными из которых являются низкая стойкость деформирующего инструмента, особенно прошивных пуансонов, и высокая себестоимость изделий.

В результате холодной штамповки изготавливают либо детали из малопрочных сплавов и низкоуглеродистых сталей, либо детали простой формы, без глубоких полостей (главным образом, метизы).

Диссертация посвящена исследованию операций так называемого комбинированного выдавливания, и двусторонней прошивки, в которых деформируемый металл как механическая система имеет не одну, а несколько степеней подвижности, а также новых операций, используемых для безотходного изготовления точных заготовок – безотходного разделения сортового проката на мерные отрезки хрупким сколом и поперечного выдавливания в придонную кольцевую щель, разделенную на отдельные полости.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью является научное обоснование способов интенсификации малоотходной технологии холодной объемной штамповки и разработка энергосберегающих процессов выдавливания деталей сложной формы с глубокими полостями на основе высокоэффективных, но недостаточно исследованных операций выдавливания через два и три канала с дополнительными нагрузками, а также двусторонней прошивки в перемещаемом контейнере, в которых металл как механическая сис-



тема имеет более одной степени свободы, и потому деформирование осуществляется при минимальных давлениях, а конечным формоизменением можно активно управлять за счет приложения дополнительных нагрузок.

АВТОР ЗАЩИЩАЕТ

1. Математическую модель и методику расчета операции двусторонней прошивки упрочняемого материала с дополнительными нагрузками и активными силами трения как общего случая прошивки в закрытом штампе.

2. Математическую модель и методику расчета технологических переходов при холодном комбинированном выдавливании через три канала в режиме управления течением за счет приложения регулируемых по величине и знаку дополнительных технологических нагрузок как достаточно общего случая выдавливания.

3. Методику расчета операции поперечного выдавливания упрочняемого металла в кольцевую придонную щель, разделенную пилонами.

4. Методику расчета технологической силы, а также давления на бойки и стенки матричной полости в зависимости от величины недоштамповки на стадии калибровки в закрытой полости при холодной осадке и высадке.

5. Методики расчета и проектирования рабочих элементов, а также конструкцию штампа для безотходного разделения прутка на отрезки высокой точности хрупким сколом с компенсацией изгибающих напряжений за счет приложением поперечной силы.

6. Способ и автономное устройство с подпружиненным контейнером для прошивки заготовок с утолщением у одного конца двумя встречными пуансонами.

7. Способ и устройство для комбинированного выдавливания на принудительно перемещаемой оправке с истечением через два канала.

8. Способ управления конечным формоизменением при выдавливании одновременно через несколько каналов путем приложения дополнительных технологических нагрузок.

9. Процессы и конструкции устройств для безотходной штамповки точных осесимметричных заготовок (изделий) на автоматах, а также для корректировки объема точной заготовки путем свободного выдавливания в придонную кольцевую щель, разделенную пилонами и последующей обсечки выдавленных отростков при выталкивании.

10. Концепцию организации технологического процесса холодной объемной штамповки точных изделий из специальных заготовок, объем которых корректируется при штамповке, в том числе деталей сложной формы с глубокими полостями на основе интенсивных операций комбинированного выдавливания и двусторонней прошивки, осуществляемых в режиме управления течением.

11. Результаты реализации новой технологии в промышленности.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА заключается :

- в теоретическом обосновании эффекта уменьшения упрочнения, а также силы и мощности, необходимых для выдавливания, при увеличении числа степеней свободы деформируемого металла как механической системы,
- в теоретическом обосновании эффективности использования дополнительных технологических нагрузок с целью уменьшения нагрузок на инструмент и интенсификации процесса деформирования,
- в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении эффекта управления конечным формоизменением при комбинированном выдавливании и двусторонней прошивке за счет приложения дополнительных технологических нагрузок,
- в установлении количественных соотношений между технологическими параметрами операции комбинированного выдавливания с истечением через три канала с приложением дополнительных технологических нагрузок как достаточно общего случая выдавливания,
- в аналитическом решении задачи о конечном формоизменении при двусторонней прошивке упрочняемого материала с приложением растягивающей нагрузки, противодействия, а также активных сил трения как общего случая прошивки в закрытом штампе и выводе уравнений для расчета параметров этих операций,
- в аналитическом решении задачи о свободном выдавливании упрочняемого металла в придонную кольцевую щель, разделенную пилонами,
- в разработке способа и автономного устройства для прошивки ступенчатой заготовки в принудительно перемещаемом внешней силой контейнере, в том числе одновременно двумя встречными пуансонами.
- в разработке способа и устройства для дозирования объема поковки обрезкой излишков, выдавленных в придонную кольцевую щель, разделенную пилонами,
- в разработке технологического процесса объемной штамповки точных деталей сложной формы из заготовки, объем которой корректируется при штамповке, в том числе на основе операций комбинированного выдавливания и двусторонней прошивки, осуществляемых в режиме активного управления течением.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

заключается в разработке научно обоснованной методики проектирования интенсивной малоотходной технологии холодного выдавливания точных деталей сложной формы на основе высокоэффективных, но ранее недостаточно исследованных операций: двусторонней прошивки ступенчатых заготовок в принудительно перемещаемом контейнере с приложением дополнительных нагру-

зок, а также комбинированного выдавливания из заготовок, из заготовок, объемом которых корректируется при штамповке как альтернатива методам, основанным на снятии стружки.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

Результаты исследования использованы для разработки типовых технологических процессов холодного выдавливания наиболее массовых деталей автотракторного электрооборудования. Эти технологические процессы внедрены на заводах: АО БАТЭ, г. Борисов, Белоруссия; АО Завод им. А.М. Тарасова, г. Самара; АО ЭЗАЭС, г. Энгельс; АО ЭЛТРА, г. Ржев; АО Автоприбор, г. Калуга; АО СОАТЭ, г. Владикавказ; АО ХЭМЗ, г. Херсон. Спроектированы, изготовлены и внедрены на заводе ЭЗАЭС отечественные прессы-автоматы для выдавливания корпусов свечей из штучной заготовки. Получена годовая экономия стального проката в размере 6,266 тонн, высвобождено 288 работающих.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

По материалам диссертации сделаны доклады: на научном семинаре кафедры "Машины и технология обработки металлов давлением" завода-ВТУЗа при ПО "Турбостроение" ЛМЗ, Ленинград, 1982 г.; на семинаре "Современные достижения в области холодной объемной штамповки" в МДНТП, Москва, 1984 г.; на юбилейной конференции, посвященной 60-летию автомобильной промышленности, ВДНХ СССР, 1984 г.; на семинаре "Контактное трение и износ в процессах обработки металлов давлением" в МДНТП, Москва, 1985 г.; на семинаре "Пластичность материалов при обработке давлением", Челябинск, 1986 г.; на семинаре по гидростатической обработке металлов, г. Донецк, 1986 г. на семинаре "Интенсивная технология обработки металлов давлением" в МДНТП, Москва, 1987 г.; на Всесоюзной конференции г. Минск 1989 г.; на семинаре "Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования" в МДНТП, Москва, 1990 г.; на конференции "Прогрессивные технологии и оборудование для обработки металлов давлением" в УДЭНТЗ, Киев, 1993 г.; на Научно-техническом Совете НИИАвтоприборов, 19 сентября 1996 г.;

Основное содержание диссертации опубликовано в 19-ти научных статьях, 9-ти Авторских свидетельствах об изобретениях, пяти патентах РФ, пяти зарубежных патентах, двух справочниках и одной монографии.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ.

Диссертация изложена на 425 страницах, включая машинописный текст и 144 и рисунков, состоит из оглавления, введения, 7-ми глав, заключения и списка литературы из 230-ти источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. На основании анализа литературных источников обоснована актуальность темы и сформулированы задачи исследования.

Состояние вопроса и задачи исследования. Технология холодного выдавливания стали с использованием штучной заготовки появилась в Германии в конце тридцатых годов, после изобретения фосфатного покрытия, которое используется в качестве смазки.

Основу этой технологии составляют операции выдавливания, которые можно разделить на группы по числу направлений (каналов) истечения. Общим признаком для операций первой группы является то, что деформируемый материал как механическая система имеет только одну степень свободы, поэтому расчет таких операций сводится к оценке технологического усилия. Для расчета конечных размеров достаточно условия постоянства объема. В операциях второй и последующих групп деформируемый металл имеет более одной степени свободы, поэтому из всех вариантов формоизменения реализуется тот, который требует наименьших энергозатрат. При этом, за один переход получают поковку сложной формы. Однако методики расчета таких операций недостаточно разработаны.

По целям и задачам исследования операций штамповки выдавливанием можно разделить на следующие группы: разработка методов расчета усилий, интенсификация прямого и обратного выдавливания за счет оптимизации геометрии инструмента и активизации сил трения, оценка пластичности.

Б.Авицур, Е.Бишоп, В.Хан исследовали стационарную стадию прямого и обратного выдавливания с использованием однозонной модели. М.В.Сторожев и А. Сконечный предложили модификацию решения Б.Авицура.

Г.Я.Гун выполнил решение некоторых задач со стационарным течением упрочняемого материала, И.П.Ренне разработал методику оценки деформации при плоском течении. П.Д.Чудаков и В.Д.Коробкин разработали метод оценки накопленной деформации при использовании разрывных полей скоростей.

П.Бариани и О.Зурла оценили неравномерность деформации и упрочнения при обратном выдавливании толстостенных стаканов. Е.П.Унков и Ю.С.Сафаров методом фотоупругости исследовали распределение нормальных и касательных напряжений при обратном выдавливании в плоском и цилиндрическом контейнерах.

Способ обратного выдавливания заготовки с фланцем в принудительно перемещаемом контейнере предложен Г. Геллером в 1943 г., сведения о его дальнейших работах не публиковались.

С.Ш.Яшаяев впервые исследовал обратное выдавливание с активными силами трения. Ю.П.Можейко и Н.Л.Розенталь предложили конструкцию гидропресса для этого способа прошивки.

Исследование холодного обратного выдавливания с активным трением выполнено в МГТУ А.Г.Овчинниковым, И.Е.Семеновым, А.М.Дмитриевым, В.И.Малышевым, К.А. Макиной и А.Л. Воронцовым.

Исследования прессования с активным трением выполнены школой Я.М.Охрименко, в частности, В.Л.Бережным, В.Н.Щербой, А.Н.Шебеком, Б.С.Морозом, Ю.П.Рязанцевым и др.

Из операций выдавливания с числом направлений истечения более одного исследованы некоторые. Комбинированное выдавливание изделия в форме полый головки со стержнем из неупрочняемого материала исследовано в автором в МАМИ. Показано, что прямое, и обратное выдавливание а также чистовая вырубка - частные случаи этой схемы. Подтверждена эффективность и целесообразность использования комбинированного выдавливания для снижения усилия деформирования и сокращения количества переходов.

Б.Авицур, Е.Хан, Лихайский университет США, М.Мори аналитически, на основе метода верхней оценки, получили зависимости для расчета давления при выдавливании неупрочняемого материала по аналогичной схеме, но с закрепленной на пуансоне оправкой. Р.Гайгер, Дюссельсдорфский университет, численным методом исследовал двустороннюю прошивку цилиндрической заготовки в неподвижном и незакрепленном контейнерах и определил все параметры, включая глубины обеих полостей.

Оценке пластичности при холодном деформировании посвящены работы В.Л.Колмогорова, А.А. Богатова, Г.Д. Деля, В.А. Огородникова, Л.Д. Соколова, В.А. Скуднова, В.Г. Нахайчука, Ю.Г. Важенцева, В.В. Исаева, А.В. Тротова, М.Г. Амирова, И.П. Барыкина. Отмечается, что межоперационный отжиг не в состоянии полностью восстановить пластичность.

Операции комбинированного выдавливания с истечением через три канала не исследованы.

Недостаточно исследованы операции прошивки глубоких полостей в том числе операция двусторонней прошивки контейнере с приложением дополнительных растягивающих нагрузок и противодействия.

На практике интенсификация технологии сводится к некоторому уменьшению давления при выполнении отдельных операций за счет оптимизации геометрии инструмента, уменьшения потерь на трение и активизации сил контактного трения. Применение комбинированного выдавливания для исключения повторного отжига за счет одновременного оформления нескольких эле-

ментов поковки при минимальных деформациях и упрочнении почти не практикуется из-за отсутствия надежных методов расчета таких операций.

В разработке технологии холодного выдавливания преобладает эмпирический подход, порождая громоздкие дорогостоящие проекты, основанные на недостаточно эффективных технических решениях. Это порочит холодную объемную штамповку как метод, неоправданно ограничивая область ее применения производством либо деталей простой формы, либо изделий из малопрочных цветных сплавов и низкоуглеродистых сталей.

В связи с необходимостью решения важной народно-хозяйственной задачи - ресурсо- и энергосбережения в машиностроении за счет расширения масштабов применения высокоэффективной малоотходной технологии холодной объемной штамповки точных изделий сложной формы с глубокими полостями как альтернативы методам, основанным на удалении в стружку значительной доли перерабатываемого металла поставлены следующие задачи:

- обосновать необходимые и достаточные требования к заготовкам под холодное выдавливание точных изделий сложной формы;
- разработать эффективный способ их производства;
- разработать способ дозирования объема в процессе штамповки;
- выполнить аналитическое и экспериментальное исследования операции двусторонней прошивки в принудительно перемещаемом контейнере с приложением дополнительных растягивающих нагрузок и противодействия как общего случая прошивки в закрытом штампе;
- исследовать технологические возможности операций холодного комбинированного выдавливания с истечением через два и три канала в режиме управления течением за счет приложения дополнительных растягивающих и сжимающих нагрузок, а также активизации сил трения;
- разработать методики расчета этих операций;
- разработать конструкции штампов и устройств для осуществления такой технологии в промышленности;
- реализовать разработки в условиях массового производства на предприятиях автомобильной промышленности.

Исследование операций, связанных с получением заготовок. При многопереходной штамповке размеры заготовок должны быть согласованы с последующими формоизменяющим переходами, а требования к геометрии - обоснованными. Необоснованное их ужесточение делает получение заготовок едва ли не самым дорогостоящим этапом всего технологического процесса.

Показано, что необходимыми и достаточными для успешной штамповки условиями являются обеспечение базовых поверхностей для фиксации заготовок в полости штампа и отсутствие биения объема относительно оси.

Анализ способов изготовления заготовок - резки прутков пилами, вырубки из листа или полосы, точения на автоматах, безотходной качественной резки пластическим сдвигом по способу Я.Бурани, резки с дифференцированным поперечным зажимом по способу С.Ш.Яшайева, резки втулочными ножами - показывает, что ни один из них не может эффективно использоваться для получения стальных заготовок под холодное выдавливание в производственных условиях.

Предлагается заготовку получать безотходным разделением проката хрупким сколом на относительно длинные отрезки с последующей осадкой-калибровкой или однопереходной высадкой по специальной технологии. Разработан и способ качественной резки, основанный на компенсации изгибающих напряжений в зоне реза за счет предотвращения отгиба отрезаемой заготовки путем приложения дополнительного усилия поддержки в сочетании с оптимальным осевым зазором между режущими кромками по всему контуру разделения.

Минимальные сила поддержки и ширина ножей определены из условий компенсации изгибающего момента, возникающего при резке и несматия контакта ножей с прутком.

$$P_n = \sigma + b - Q \quad (2.1)$$

$$t = C \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q}{\sigma C b}} \right) \quad (2.2)$$

$$Q = 0,8\sigma b F_{CP} \quad (2.3)$$

где P - сила поддержки; Q - сила реза; t - ширина ножа (вдоль оси прутка); σ_b - предел прочности на растяжение; σ_t - сопротивление пластическому течению разделяемого материала без учета упрочнения; F_{CP} - сечение прутка; C - расстояние от кромки ножа до точки приложения поддержки; b - ширина разделяемого профиля (в плане); P_n - сила поддержки.

Осевой зазор между режущими кромками выполняется по контуру реза в соответствии с зависимостью:

$$Z = Z_0 + \alpha S \quad (2.4)$$

где Z - осевой зазор в данном сечении контура; Z_0 - минимальный зазор между ножами, обусловленный конструктивными требованиями; α - коэффициент, равный углу заточки ножей по задней грани (в радианах); S - разрезаемая толщина в данном месте разрезаемого профиля.

Отрезанную заготовку подвергают осадке-калибровке или высадке с калибровкой. При калибровке не следует добиваться заполнения углов, а рекомендуется прекратить операцию после того, как на боковой поверхности образуется цилиндрический пояс, необходимой для дальнейшего деформирования ширины. Получена формула для определения давления при калибровке, которая после упрощения имеет вид:

$$q = \frac{R_1^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\sqrt{3}}\right) \left(\frac{R^2 - R_1^2}{2} - I_1\right)}{R^2 - \mu \left(\frac{R_1^3}{6H} - \frac{R^2 - R_1^2}{2} - I_1\right)} \quad (2.5)$$

где $I_1 = (b+R)(R-R_1) + (b+R)^2 \ln \left| \frac{b+R-R_1}{b} \right|$; $R_1 = R - T/2$; T - ширина цилиндрического пояса; b - величина недоштамповки (по образующей); μ - коэффициент трения.

Сила калибровки соответственно равно:

$$P_k = q \sigma_s \pi R^2 \quad (2.6)$$

Величина σ_s определяется по кривой упрочнения по деформации осадки.

$$\bar{\varepsilon}_k = \ln \frac{H_0}{H} \quad (2.7)$$

где H_0 , H - исходная и конечная высоты заготовки.

При этом давление на стенку матричной полости рекомендуется вычислять на основании условия пластичности.

$$\sigma_p^n = (q-1)\sigma_s \quad (2.8)$$

где σ_p^n - нормальное давление на стенке полости.

По мере заполнения углов, давление и сила возрастают, достигая к концу операции бесконечных величин. Величину недоштамповки следует определять по допустимому давлению или усилию по предлагаемой методике.

Аналогичные формулы получены для калибровки при высадке Т-образных заготовок. При этом давление равно:

$$q = \frac{R_1^2 + \frac{R-R^2}{2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{3}}\right) - \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\right) I_1 - \mu TR}{R^2 - \mu \left[TR + \frac{2}{3} \frac{R_1^3}{H} - \frac{R^2 - R_1^2}{2} + I_1 - \frac{r^3}{3H} \right]} \quad (2.9)$$

здесь r - половина диаметра заделанной части заготовки.

Дозирование объема при калибровке заготовки. Ни один из известных способов получения заготовок не обеспечивает требуемую для безотходного изготовления изделий точность объема заготовки. Проблема усугубляется тем, что объ-

ем штамповой полости изменяется из-за износа. Таким образом, требуется точное соответствие объема заготовки изменяющемуся объему штамповой полости, поэтому объем заготовки не может оставаться постоянным. Иными словами, для эффективного использования предварительно отожженных и фосфатированных заготовок необходимо восстановить цепочку обратной связи между размерами готового изделия и объемом подаваемой на штамповку заготовкой, как и при штамповке из бунта, когда объем оперативно корректируется наладчиком.

Разработан способ калибровки с выдавливанием и последующим отделением излишков металла в отход. Способ обеспечивает выдавливание излишков металла через щели минимальной ширины. При этом давление в полости штампа существенно меньше, чем в известных схемах, главным образом благодаря их оптимальной геометрии. Оптимизация заключается в том, что, во-первых, излишки металла свободно вытекают в открытое пространство, сохраняя те составляющие скорости, которые они имели в очаге деформации. Тем самым минимизируются затраты мощности, связанные с разрывом скоростей на границе между пластической зоной и зоной жесткого металла. Во-вторых, выдавливается не кольцевой облой, а кольцо, рассеченное на отдельные лепестки. Поэтому за пределами полости контейнера металл больше не деформируется; исключаются затраты мощности, сопоставимые с мощностью, затрачиваемой на выдавливание из щелей.

Анализ операций выдавливания через придонную щель, разделенную пилонами, со свободным истечением выполнен методом верхней оценки при следующих допущениях. Материал считается жестко-пластичным. Трение подчиняется закону Кулона, то есть пропорционально нормальному давлению. В соответствии с этими допущениями давление на входе в очаг деформации равно:

$$q_0 = \frac{1 + \frac{R}{3\sqrt{3}h} + \frac{1}{\sqrt{3} \cdot \sin \pi/n} \left(1 - \cos \frac{\pi}{n} \right) + \frac{2\mu\sigma_s^*}{\pi E \gamma} \cdot n \cdot \sin \frac{\pi}{n} + \frac{a}{6 \cdot R \cdot \sin \pi/n}}{1 - \mu \frac{R}{3h}} \quad (2.10)$$

где h - высота кольцевой щели; n - число пилонов, разделяющих кольцевую щель; a - ударная вязкость упрочненного (выдавленного) материала; R - половина диаметра (радиус) контейнера; σ_s^* - истинный предел текучести деформированного материала; γ - угол между стенкой канала и выдавливаемым лепестком.

Полное давление на деформирующем пуансоне вычисляется по формуле:

$$q_{\max} = q_0 \exp\left(2\mu \frac{H-h}{R}\right) + 2\mu \frac{H-h}{R} \quad (2.11)$$

где $q_{\max}$ - полное давление; q_0 - давление на входе в очаг деформации, вычисляемое по формуле (10).

Технологическая сила равна:

$$P = \sigma_s \left(q_0 \exp \left(2\mu \frac{H-h}{R} \right) + 2\mu \frac{H-h}{R} \right) \pi D^2 \quad (2.12)$$

По окончании процесса калибровки заготовку выталкивают из контейнера, при этом выдавленные лепестки обрезаются. Необходимая сила выталкивания определяется по формуле:

$$P = 2\pi R \left(\mu \sigma_s H + \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} h \right) \quad (2.13)$$

Эта сила расходуется на преодоление контактного трения на стенке контейнера и отделение лепестков от тела заготовки.

Анализ показывает, что оптимальное количество пилонов при дозировке равно 6-10 в зависимости от качества смазки и высоты щели. По технологическим соображениям рекомендуется ограничиваться шестью пилонами.

3. Анализ операции двусторонней закрытой прошивки в активном контейнере (конечная стадия). Операция двусторонней прошивки, на рис. 1, относится к группе операций выдавливания, в которых деформируемый материал как механическая система имеет, по крайней мере, две степени свободы. Практически это означает, что, с одной стороны, для расчета конечных размеров поковки недостаточно знать только кинематические условия, в частности условие несжимаемости, что вносит неопределенность в процесс проектирования технологии, с другой стороны, это создает предпосылки для активного управления течением, что расширяет технологические возможности штамповки.

Особенностью операции является использование контейнера, перемещаемого дополнительной нагрузкой Q_2 . Величина ее должна превышать силу трения на контактной поверхности контейнера с деформируемым металлом в зоне

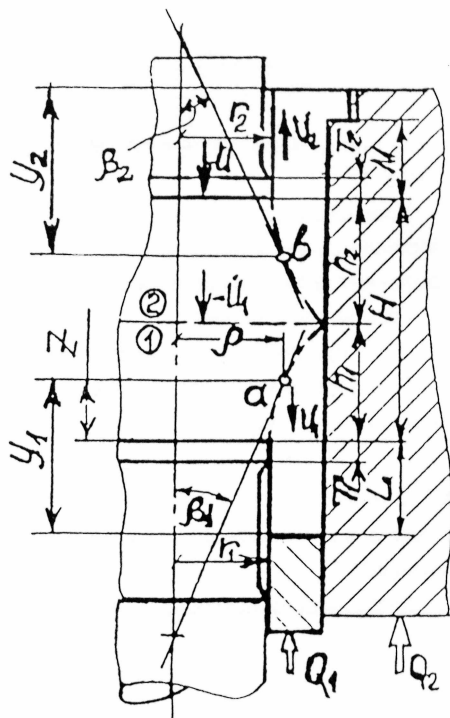


Рис. 1. Схема операции двусторонней прошивки.

прямого выдавливания (зона I). Эта сила трения препятствует истечению металла вниз и способствует истечению в обратном направлении. Истечению в обратном направлении способствует также растягивающее напряжение от избытка Q_2 над силами трения в зоне прямого выдавливания.

Проанализирована конечная стадия операции, когда пластические зоны прямого и обратного выдавливания образуют единый очаг деформации. Принято, что материал изотропен и упрочнен, контактное трение постоянно в зоне деформирования, где давление велико, и пропорционально нормальному давлению в зонах, где давление незначительно превышает величину сопротивления пластическому течению. Используется поле скоростей:

$$\dot{u}_z = \dot{u} \frac{z}{H}; \dot{u}_r = \dot{u} \frac{\rho}{2H}, \quad (3.1)$$

где u и u_z , u_r - скорость деформирования и компоненты скорости соответственно; z , r - текущие координаты; H - текущая высота очага деформации.

Уравнения поверхностей Γ_1 и Γ_2 разрыва скоростей имеют вид:

$$\frac{\rho_1^2}{R_2} = \frac{\alpha_1}{\zeta_1 - \frac{z}{jH}}; \frac{\rho_2^2}{R_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \frac{z - jH}{H(1-j)}} \quad (3.2); (3.3)$$

где $\alpha_1 = r_1^2 / (R^2 - r_1^2)$; $\alpha_2 = r_2^2 / (R^2 - r_2^2)$; $z_1 = R^2 / (R^2 - r_1^2)$; $j = h_1 / H$; r_1 , r_2 , R , h_1 - см.

Рис. 1.

Уравнения (3.2), (3.3) получены интегрированием соответствующих дифференциальных уравнений, отражающих условие непрерывности нормальных компонент скорости при переходе границы этих скоростей.

Граничные условия:

$$\text{при } z=0 \rightarrow r=r_1; \text{ при } z=H \rightarrow r=r_2; \text{ при } z=jH \rightarrow r=R. \quad (3.4)$$

При пересечении частицей металла этой границы к деформации добавляется величина, равная:

$$\Delta \bar{\epsilon} = \left| \frac{\Delta v_r}{\sqrt{3} v_n} \right|. \quad (3.5)$$

где v_n и Δv_r - нормальная и разрыв касательной составляющей скорости истечения.

Деформации на выходах из очага равны:

$$\bar{\epsilon}_{\bar{L}} = \ln \frac{H_0}{H} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\rho}{2\zeta_1 H} + \frac{2HjR^4\zeta_1}{\rho^5} \right); \quad (3.6)$$

$$\bar{\epsilon}_{\bar{N}} = \ln \frac{H_0}{H} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{\rho}{2\zeta_2(1-j)H} + \frac{2\alpha_2(1-j)HR^4}{\rho^5} \right], \quad (3.7)$$

где H_0 - начальная высота очага деформации; $z_2 = R^2 / (R^2 - r_2^2)$.

Давление q_2 на деформирующем (верхнем) пуансоне определено из уравнения энергетического баланса:

$$\begin{aligned}
 q_2 = & \frac{2R^2}{r_2^2} \left\{ j\alpha_1^2 \ln \frac{R}{r_1} + (1-j)\alpha_2 \ln \frac{R}{r_2} + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left[\frac{2j^2\alpha_1 H}{R} \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right) + \right. \right. \\
 & + \left. \frac{R^3 - r_1^3}{2HR^2} \right] + \frac{1}{3\sqrt{3}} \left[\frac{2(1-j)^2\alpha_2 H}{R} \left(\frac{R^3}{r_2^3} - 1 \right) + \frac{R^3 - r_2^3}{2HR^2} \right] + \\
 & + \frac{m(r_1^3 + r_2^3)}{3HR^2} + \left[m \left(j + \frac{t_1}{H} \left(1 + \frac{r_1}{R} \right) \right) + \frac{\mu}{\zeta_1} \frac{L}{H} \right] \alpha_2 + \frac{(\zeta_1 - \zeta_2)H}{R} + \\
 & + m\zeta_2(1-j) \frac{t_2}{R} + \frac{j(\beta_1 + \beta_2)}{2} - \frac{r_2^2\beta_2}{2R^2} \Big\}, \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

где m - фактор трения; t_1, t_2 - ширина поясков на пуансонах; μ - коэффициент трения; L - глубина полости, прошитой нижним пуансоном;

$$\beta_1 = \frac{Q_1}{\pi(R^2 - r_1^2)\sigma}; \quad \beta_2 = \frac{Q_2}{\pi(R^2 - r_2^2)\sigma}.$$

Неизвестный параметр j , характеризующий положение границы раздела течения, определен из условия минимума q_2 :

$$j = \frac{R}{HD} \left[k + \frac{E}{D} - \mu \left(1 - \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right) \frac{L}{R} - \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \right], \quad (3.9)$$

$$\text{где } k = \alpha_2 \ln \frac{R}{r_2} - \alpha_1 \ln \frac{R}{r_1} - m \left[\frac{t_1}{R} (\zeta_1 - \zeta_2) \left(1 + \frac{r_1}{R} \right) + \frac{t_2 \zeta_2}{R} \right];$$

$$E = \frac{4\alpha_2^2}{3\sqrt{3}} \left(\frac{R^3}{r_2^3} - 1 \right) - m\alpha_2$$

$$D = \frac{4}{3\sqrt{3}} \left[\alpha_1^3 \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right) + \alpha_2^3 \left(\frac{R^3}{r_2^3} - 1 \right) \right] + 2m(\zeta_1 - \zeta_2)$$

В свою очередь, выражение (3.9) содержит неизвестную величину L . По условию задачи

$$dL = j \zeta_1 dH. \quad (3.10)$$

Подстановкой в это выражение величины j из уравнения (3.9) получено псевдооднородное дифференциальное уравнение

$$\frac{dL}{dH} + \frac{\mu L}{HD} (\zeta_1 - \zeta_2) - \frac{R\zeta_1}{DH} k + \frac{E}{D} = 0. \quad (3.11)$$

Решая его с учетом начальных условий при $H = H_0, L = 0$, находим:

$$L = \frac{R\zeta_1 k}{\mu(\zeta_1 - \zeta_2)} \left[1 - \left(\frac{H}{H_0} \right)^\gamma \right] + \frac{\zeta_1 EH}{(1-j)D} \left[1 - \left(\frac{H}{H_0} \right)^{\gamma-1} \right], \quad (3.12)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{\mu(\zeta_1 - \zeta_2)}{D}.$$

Глубина верхней полости N определена из условия несжимаемости:

$$N = \left[(H_0 - H) + \frac{L}{\zeta_1} \right] \zeta_2. \quad (3.13)$$

Подстановкой формулы (3.9) в выражения (3.6) и (3.7) получены зависимости для определения накопленной деформации в стенках выдавленного изделия, соответствующее точкам с координатами ρ_1, y_1 и ρ_2, y_2 .

$$\text{Здесь } y_1 = L + jH \left(\zeta_1 - \frac{R^2 \alpha_1}{\rho_1^2} \right); \quad (3.14)$$

$$y_2 = N + H \left[j + (1-j) \left(\frac{R^2}{\rho_2^2} - 1 \right) \alpha_2 \right]; \quad (3.15)$$

$$\rho_1 = R \sqrt{\frac{\alpha_1}{\zeta_1 - \frac{z}{j+H}}}; \quad \rho_2 = R \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \frac{z-jH}{H(1-j)}}}; \quad (3.16)$$

В результате анализа полученных уравнений выявлено, что на течение материала наибольшее влияние оказывают параметры β_1 и β_2 , т.е. дополнительные внешние нагрузки - противодавление и усилие, приложенное к контейнеру. Роль трения не столь существенна, так как составляет не более 5% в общем балансе.

Полученные уравнения позволяют также оценить итоговое значение накопленной деформации, величина и распределение которой также зависят от j , а следовательно, от параметров β_1 и β_2 . Деформации в стенках полостей определяют по уравнениям (3.6) и (3.7). Сопротивление пластическому течению вычисляют по зависимости

$$\sigma = \sigma_0(1 + B\bar{\epsilon}), \quad (3.17)$$

где σ_0 - сопротивление пластическому течению неупрочненного материала, равное пределу текучести; B - константа упрочнения.

Для сравнения численным методом поэтапно выполнены расчеты размеров поковки и деформаций в стенках полостей с учетом упрочнения. При этом сопротивление пластическому течению σ^* внутри пластических зон вычислено

по деформации осадки, за пределами этих зон после пересечения границы - по деформациям в соответствии с формулами (3.6) и (3.7), а при переходе границы - как среднее арифметическое этих величин:

$$\sigma^* = \sigma_0 \left(1 + B \bar{\epsilon}_{0r} + \frac{B}{2} \Delta \bar{\epsilon}_{1r} \right), \quad (3.18)$$

где $\bar{\epsilon}_{0r}$, $\bar{\epsilon}_{1r}$ - накопленная деформация перед и после границы.

Соответствующая мощность рассчитана как интеграл по поверхности этой границы F_r :

$$\dot{A} = \int_F \sigma^* (\bar{\epsilon}_{1r} - \bar{\epsilon}_{0r}) dF_r. \quad (3.19)$$

Положение границы раздела течения, а также значения накопленных деформаций упрочнения и давления определены для каждого значения расстояния между пуансонами из условия минимума мощности деформирования. Глубины прошиваемых полостей отличаются от вычисленных по обоим методикам не более чем на 6%, а экспериментальные значения давления на пуансонах в среднем на 15% ниже расчетных.

Давление на нижнем пуансоне, определенное из условия равновесия сил, действующих на контейнер с изделием, равно:

$$q_1 = q_2 \frac{r_2^2}{r_1^2} \left(1 - \frac{\beta_2}{\alpha_2} \right) - \frac{\beta_1}{\alpha_1}, \quad (3.20)$$

где q_2 - давление на верхнем пуансоне.

Рассмотренная схема операции является достаточно общей, поэтому некоторые более простые схемы прошивки удобно рассматривать как ее частные случаи. Такие схемы, используемые как самостоятельные операции, могут также возникать на определенном этапе выполнения сложной операции, когда течение в одном из направлений блокируется.

На практике схема обратного выдавливания возникает, когда $r_1 = R$, либо когда течению вниз препятствует жесткая втулка. При этом появляется возможность изготовления сложного изделия. При подстановке $j=0$ в формулу (3.9) получаем условие, при котором обеспечивается прошивка по схеме обратного выдавливания.

$$\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \geq \alpha_2 \ln \frac{R}{r_2} - \alpha_1 \ln \frac{R}{r_1} + \frac{4\alpha_2 H}{3\sqrt{3}R} \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right) - m\alpha_1 \left(\frac{H}{R} - \frac{t_2 R}{r_2^2} \right). \quad (3.21)$$

При этом давление на прошивном пуансоне равно:

$$q_2 = 2\zeta_2 \left[\ln \frac{R}{r_2} + \frac{2H}{3\sqrt{3}R} \left(\frac{R^3 - r_2^3}{r_2^3} + \frac{R^3 - r_2^3}{2Hr_2^2} \right) \right] + \left[\left(\frac{r_2}{3H} + \frac{\zeta_2 t_2 R}{r_2^2} \right) + \zeta_2 \frac{H}{R} \right] m - \beta_2. \quad (3.22)$$

Для случая обратного выдавливания в неподвижном контейнере, когда $\beta_2=0$, получаем величину давления

$$q_2 = 2\zeta_2 \left[\ln \frac{R}{r_2} + \frac{2H}{3\sqrt{3}R} \left(\frac{R^3 - r_2^3}{r_2^3} + \frac{R^3 - r_2^3}{2Hr_2^2} \right) \right] + m \left[\frac{r_2}{3H} + \frac{\zeta_2 t_2 R}{r_2^2} + \frac{R^3}{Hr_2^2} \right]. \quad (3.23)$$

Аналогичное выражение получено Б. Авицуром и его сотрудниками при анализе конечной стадии обратного выдавливания.

Условия, при которых реализуется прошивка по схемам прямого выдавливания, определяются зависимостями:

- течение вверх ограничено в конце операции

$$\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \alpha_2 \ln \frac{R}{r_2} - \alpha_1 \ln \frac{R}{r_1} + \mu \alpha_2 \ln \frac{L}{R} + m \left[\alpha_2 \frac{H}{R} - 2(\zeta_1 - \zeta_2) \frac{H}{R} + \zeta_2 \frac{t_2}{R} - (\zeta_1 - \zeta_2) \left(1 + \frac{r_1}{R} \right) \frac{t_1}{R} \right]; \quad (3.24)$$

- течение вверх ограничено с начала операции

$$\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \alpha_2 \ln \frac{R}{r_2} - \alpha_1 \ln \frac{R}{r_1} - \frac{4\alpha_1^2}{3\sqrt{3}} \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right) + \mu \ln \frac{L}{R} - m \frac{H}{R} [\alpha_2 + 2(\zeta_1 - \zeta_2)]. \quad (3.25)$$

При этом давление на нижнем пуансоне равно:

$$q_1 = \left(1 - \frac{\beta_2}{\alpha_2} \right) \left\{ 2\zeta_1 \ln \frac{R}{r_1} + \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[2\zeta_1 \frac{H}{R} \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right) + \frac{R^3 - r_1^3}{2Hr_1^2} + \frac{R^3 - r_2^3}{2Hr_1^3} \right] + m \left(\frac{r_1}{H} + \frac{r_2^3}{Hr_1^2} \right) + \beta_1 \frac{R^2}{r_1^2} + \frac{\beta_2}{\alpha_1} - \frac{2HR}{r_1^2} \left\{ m + \left[1 + \frac{t_1}{H} \left(1 + \frac{r_1}{R} \right) \right] + \mu \frac{L}{H\zeta_1} \right\} \right\} - \frac{\beta_1}{\alpha_1}; \quad (3.26)$$

на верхнем пуансоне -

$$q_2 = 2\alpha_1 \frac{R^2}{r_2^2} \ln \frac{R}{r_1} + \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[2\alpha_1^2 \frac{HR}{r_2^2} \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right) + \right. \\ \left. + \frac{R^3 - r_1^3}{2Hr_1^2} + \frac{R^3 - r_2^3}{2Hr_1^3} \right] + \frac{m}{3} \cdot \frac{r_1^3 + r_2^3}{Hr_2^2} + \beta_1 \frac{R^2}{r_1^2} + \frac{\beta_2}{\alpha_1} - \\ - \frac{2HR}{r_1^2} \left\{ m + \left[1 + \frac{t_1}{H} \left(1 + \frac{r_1}{R} \right) \right] + \mu \frac{L}{H\zeta_1} \right\}. \quad (3.27)$$

Область применения полученных результатов ограничивается сверху расстоянием между прошивными пуансонами, начиная с которого очаг деформации распадается на две пластические зоны, разделенные слоем жесткого, недеформированного металла. Это означает, что при такой схеме мощность деформации меньше, чем при однозонной модели. В свою очередь высоты каждой пластической зоны определяются из условия минимума мощности при допущении, что на границах с жесткой прослойкой имеет место пластический сдвиг.

Предельное расстояние между пуансонами, с которого начинается конечная стадия операции, равно:

$$H_K = \sqrt{\frac{3R^3 - r_1^3(1 - \sqrt{3}m)}{2R \left[\alpha_1^2 \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right) + 3\sqrt{3}\zeta_1 m \right]}} + \frac{1}{2\alpha_2} \sqrt{\frac{3R^3 - r_2^3(1 - \sqrt{3}m)}{R \left(\frac{R^3}{r_1^3} - 1 \right)}} \quad (3.28)$$

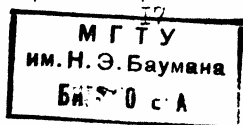
Дополнительные нагрузки не оказывает влияния на эту величину.

Данную модель, а следовательно и полученные уравнения, можно применять для расчета операции двусторонней прошивки, когда

$$0 \leq \frac{H_K}{R} \leq 1,5 + 2,0 \quad (3.29)$$

Деформируемый металл упрочняется неравномерно. Однако анализ показал, что учет упрочнения, особенно значительного на границах разрыва скоростей, не приводит к существенному изменению результатов расчета размеров выдавливаемого изделия, но влияет на расчетные величины давлений и технологических усилий.

4. Экспериментальные исследования двусторонней прошивки с противо-
давлением в принудительно перемещаемом контейнере. Основной задачей экспериментального исследования было подтверждение допущений, касающихся механической модели операции, а также результатов и выводов аналитического исследования. В частности, оценивалась адекватность модели с единым очагом деформации, принятой в анализе, и действительной кинематической картины течения при выдавливании упрочняемых материалов. Кроме



того, изучалось влияние геометрических размеров инструмента и величин дополнительных нагрузок и условий смазки на соотношение глубин прошиваемых полостей, распределение механических свойств деформированного материала, а также на давления и усилия, действующие на оба пуансона.

Использовалась установка на базе кривошипного пресса K264 (2500 КН, 35 ходов в мин.) Контрольные эксперименты проводились на промышленной установке при отладке технологии холодного выдавливания корпусов свечей зажигания, а также узла обоймы стартерного привода. Соответственно использовались четырехпозиционный холодно-высадочный автомат A104A с ходом пуансона 190 мм, делающим 45 ходов в мин. и полуторадьюмовый пятипозиционный автомат для холодного выдавливания National 1500-6 CF, с ходом ползуна 390 мм, делающим 17 ходов в мин.

В обоих случаях усилие, перемещающее контейнер, создавалось пружиной. Эксперименты проводились на образцах из алюминия АД1, а также из сталей 08 КП, 10, 15 ХР, 15 ХФ и 15 ХФР. Кривые упрочнения строились по результатам осадки цилиндрических образцов с торцевыми углублениями для смазки. Образцы имели диаметр 15, а высоту 20 мм. Осадку производили при скорости 0,3-0,6 мм/сек.

Выявление границ очага деформации и кинематики течения осуществлялось визуальным анализом искажения координатной сетки, измерением микротвердости, а также изучением деформированных микро и макроструктуры. Локализация сдвиговых деформаций в районе предполагаемых границ разрыва скоростей зарегистрирована всеми перечисленными методами. Она проявилась в характерном искривлении линий координатной сетки, резком местном повышении твердости и в интенсивной сдвиговой деформации микроструктуры.

Экспериментальное исследование подтвердило правомерность, принятых при анализе допущений, касающихся поля скоростей и очага деформации. Разница между вычисленными и измеренными результатами не превышает по давлению 11,2%, по геометрическим размерам - 3,7%. Вычисленное давление, как правило, выше экспериментально определенного.

Установлено также, что, начиная с расстояния между пуансонами, равного полутора диаметрам контейнера до соприкосновения пуансонов, очаг деформации состоит из пластических зон прямого и обратного выдавливания, примыкающих друг к другу. В этих зонах схема деформаций близка к осадке, за пределами этих зон, металл перемещается вверх или вниз, не деформируясь. С уменьшением ширины кольцевых каналов, начало конечной стадии сдвига-

Увеличение противодействия на выходе из зоны прямого выдавливания заметно уменьшает скорость истечения в этом направлении. Такой же эффект дает увеличение нагрузки, приложенной к контейнеру навстречу деформирующему пуансону. Сочетание этих воздействий усиливает эффект, вплоть до полного прекращения истечения в одном из направлений. Таким образом, двусторонняя прошивка в принудительно перемещаемом контейнере с одновременным приложением противодействия является общим случаем прошивки в закрытом штампе по схемам прямого и обратного выдавливания.

5. Анализ операции комбинированного выдавливания с истечением из трех коаксиальных каналов с приложением дополнительных технологических нагрузок. Исследовалась квазистационарная стадия операции, когда пластической деформацией охвачен не весь объем материала между пуансоном и дном контейнера, а только зоны, примыкающие непосредственно к рабочим щелям штампа (рис.2).

[illegible]

Рис. 2. Схема операции комбинированного выдавливания.

$$h_{11} = d + \rho \cdot \cos \theta \quad h_{22} = \rho; \quad h_{33} = 1; \quad J = \rho(d + \rho \cdot \cos \theta) \quad (5.1)$$

Использованы безвихревые разрывные поля скоростей. На границах зон 1, 2, 3, 4 выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} \text{при } \rho_i = R_i, \dot{U}_{\rho i} = -\dot{U} \cos \alpha_2 = \dot{U} \sin \theta; \quad \text{при } \theta = \frac{\pi}{2}, \dot{U}_\theta = 0 \\ \text{при } \rho_i = r_i, \dot{U}_{\rho i} = 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\text{при } \theta = \theta_i, \dot{U}_{\theta i} = v_i \sin \alpha_i; \quad \text{при } \theta = \frac{3}{2}\pi, \dot{U}_\theta = 0$$

В соответствии с этими условиями и принятыми допущениями записаны уравнения для компонент скоростей в единой для всех четырех зон форме:

$$\dot{\theta}_i = (-1)^{i+1} \frac{\dot{U} \cdot R_i (d_j \cos \theta + \frac{R_i}{2} \cos^2 \theta)}{(R_i^2 - r_i^2) \left(\frac{d_j}{R_i + r_i} + \frac{\cos \theta}{2} \right)} \quad (5.3)$$

$$\dot{\rho}_i = \frac{(\rho^2 - r_i^2) \left[\frac{\partial \dot{U}_{\theta i}}{\partial \theta} \left(\frac{d_j}{\rho + r_i} + \frac{\cos \theta}{2} \right) - \frac{\dot{U}_{\theta i}}{2} \sin \theta \right]}{\rho(d_j + \rho \cdot \cos \theta)} \quad (5.4)$$

$i=1,2,3,4; j=1,2; \text{ при } i=1,2, j=1; \text{ при } i=3,4, j=2.$

Компоненты скорости деформации в криволинейной ортогональной системе координат описываются формулами:

$$\dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{\dot{U}_\rho \cos \theta - \dot{U}_\theta \cos \theta}{d + \rho \cdot \cos \theta}; \quad \dot{\varepsilon}_\theta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \dot{U}_\rho \right); \quad \dot{\varepsilon}_\rho = \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta}; \quad \gamma_{\theta\rho} = \frac{1}{2\rho} \cdot \frac{\partial \dot{U}}{\partial \theta} \quad (5.5)$$

Обобщенная скорость деформации определялась из выражения:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_\varphi - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_\rho)^2 + (\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\varphi)^2 + 6\dot{\gamma}_{\theta\rho}^2} \quad (5.6)$$

Мощность деформации внутри пластических зон равна:

$$A_\varepsilon = \int_{\theta_{0i}}^{\theta_{1i}} \int_{r_i}^{R_i} \dot{\varepsilon} \cdot \rho(d_j + \rho \cdot \cos \theta) d\theta d\rho \quad (5.7)$$

$$\theta_{01} = \frac{3}{2}\pi, \quad \theta_{11} = \frac{3}{2}\pi + \alpha_1, \quad \theta_{02} = \frac{\pi}{2}, \quad \theta_{12} = \frac{\pi}{2} + \alpha_2$$

$$\theta_{03} = \frac{3}{2}\pi - \alpha_3, \quad \theta_{13} = \frac{3}{2}\pi, \quad \theta_{04} = \frac{\pi}{2} - \alpha_4, \quad \theta_{14} = \frac{\pi}{2}$$

Общая мощность деформации внутри пластических зон получается суммированием по индексам i и j .

На границах пластических зон имеют место разрывы касательных компонент скоростей. Таких поверхностей в каждой зоне по четыре: цилиндрическая радиуса d_j , две торические с образующими, радиусы которых равны r_i и R_i и центром в точке O , а также коническая с образующей AB , также как и центр O , вращаемой вокруг оси Z .

Уравнение для определения мощности, рассеиваемой на цилиндрических поверхностях, записаны в виде:

$$\dot{A}_{d_j}^r = \frac{2\sigma\pi}{\sqrt{3}} \int_z W_i - W_{i+1} |dF_j dz \quad (5.8)$$

где W_i и W_{i+1} касательные компоненты скоростей на границе; dF_j элементарная площадка на цилиндрической границе.

Торические поверхности. Таких поверхностей по две в каждой зоне. Разрывы касательных компонент на этих границах равны:

$$\Delta U_{r_i}^r = \left| \dot{U}_{\theta_i}(r_i) \right| \quad (5.9)$$

$$\Delta U_{R_i}^r = |\dot{U}_{\theta_i} + \dot{U} \cos \theta|$$

Мощность деформации на этих границах, равна:

$$\dot{A}^r = \frac{2\sigma\pi}{\sqrt{3}} \int_{\theta_{2i}}^{\theta_{2i+1}} |\dot{U}_{\theta_i} + \dot{U} \cos \theta| (d_j + R_i \cdot \cos \theta) \cdot R_i + + \dot{U}_{\theta_i} \cdot r_i (d_j + r_i \cos \theta)] d\theta \quad (5.10)$$

Конические поверхности. Разрыв касательных компонент скорости на конических границах AB определяется выражением:

$$v_i = \frac{\dot{U}_{\theta_i}}{\sin \theta_i} \quad (5.11)$$

где v_i скорость истечения на выходе из пластической зоны.

Элементарная площадка на конической поверхности равна:

$$dF_{\alpha_i} = 2\pi(d_j + \rho \cdot \cos \theta_i) d\rho \quad (5.12)$$

$$\text{где } \theta_1 = \frac{3}{2}\pi + \alpha_1; \theta_2 = \frac{\pi}{2} + \alpha_2; \theta_3 = \frac{3}{2}\pi - \alpha_3; \theta_4 = \frac{\pi}{2} - \alpha_4;$$

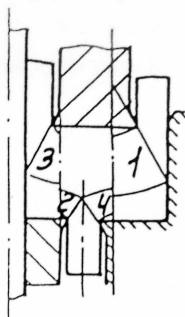
Соответственно для определения мощности деформации на конических границах использовалось выражение:

$$\dot{A}_{\alpha_i}^r = \frac{2\sigma\pi}{\sqrt{3}} \int_{r_i}^{R_i} (\dot{U} \operatorname{ctg} \alpha_i + \dot{U}_{\rho_i}) (d_j + \rho_i \cdot \cos \theta) d\rho \quad (5.13)$$

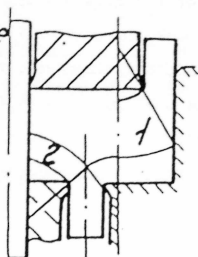
Мощность трения и дополнительной нагрузки, приложенной на выходе из канала записывалась в уравнение энергетического баланса с учетом этого обстоятельства с соответствующим знаком.

$$\dot{A}_i^0 = \pm(\theta_i^0 + \tau_i) v_i \quad (5.14)$$

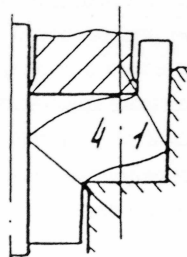
*Выдавливание
с оправкой*



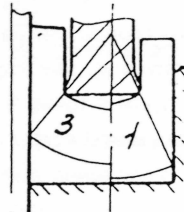
D.1234



D.0204



D.0004



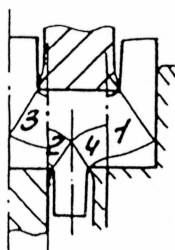
D.0030

*Выдавливание
без оправки*

Я.1204

Я.1004

Я.1030



Я.1234

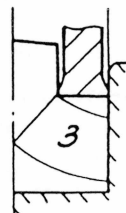
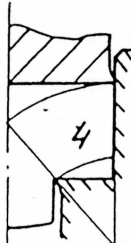
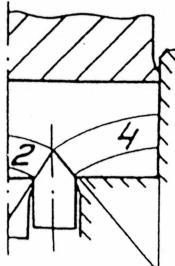
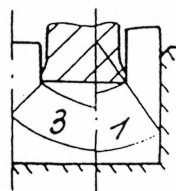
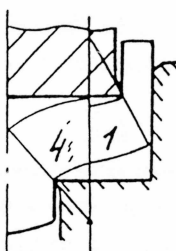
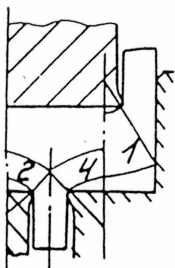


Рис. 3. Частные случаи комбинированного выдавливания.

Мощность, которую необходимо подвести к деформирующему пуансону, вычислялась как сумма всех составляющих.

$$\dot{A}_\partial = \dot{A}_i^\varepsilon + \dot{A}_{df}^\gamma + \dot{A}_{R,r}^\gamma + \dot{A}_i^0 \quad (5.15)$$

В развернутом виде это выражение содержит шесть варьируемых параметров: $d_1, d_2, a_1, a_2, a_3, a_4$; и 14 констант

$$R_A, R_B, R_C, r_A, r_B, r_C, H_0, h, m, t, m, Q^0_1, Q^0_2, Q^0_3, Q^0_4,$$

характеризующих геометрические размеры инструмента, условия контактного трения и величины дополнительных нагрузок.

Для исследования операций комбинированного выдавливания на оправке и без нее (см. рис.3.) были составлены две программы многомерной оптимиза-

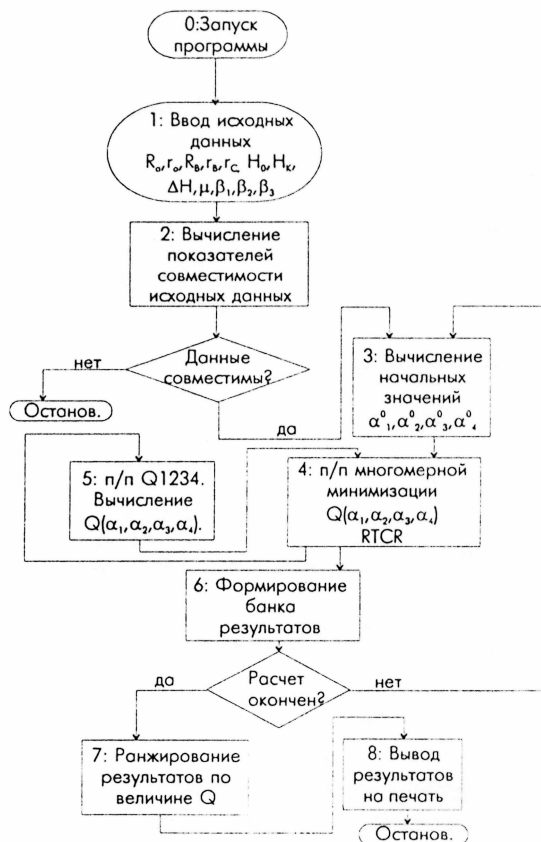


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета операции комбинированного выдавливания

ции. Одна программа предназначалась для исследования операций выдавливания с центральной оправкой, и предусматривала ввод данных в безразмерном виде. Другая - для схем без оправки - предусматривала ввод размеров в мм (Рис. 4).

Влияние изменения расстояния между пуансоном и дном контейнера на параметры операции показано на рис.5а, влияние изменения сечений каналов - на рис. 5б и 5г.

Управление истечением. Моделировалось приложение регулируемых по знаку и величине дополнительных внешних нагрузок и трения.

Вклад трения в энергетику процесса невелик. Объясняется это: малым значением коэффициента трения. Напротив, влияние дополнительных нагрузок - существенно, хотя величины дополнительных технологических нагрузок

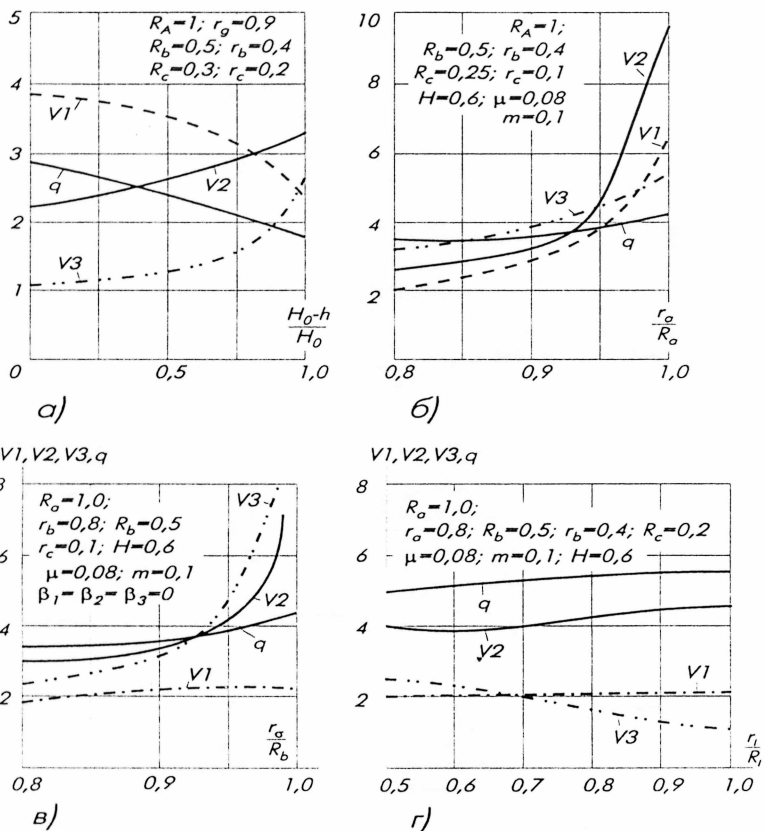


Рис. 5. Влияние геометрии инструмента при комбинированном выдавливании.

ограничены прочностью выдавливаемых элементов поковки. Принято, что напряжения от дополнительных нагрузок находятся в пределах: $-1 \leq \frac{\sigma_i^0}{\sigma} \leq 1$

Влияние дополнительных нагрузок на давление и скорости истечения показано на рисунках бб и бг. Видно, что выдавливание в неподвижном контейнере

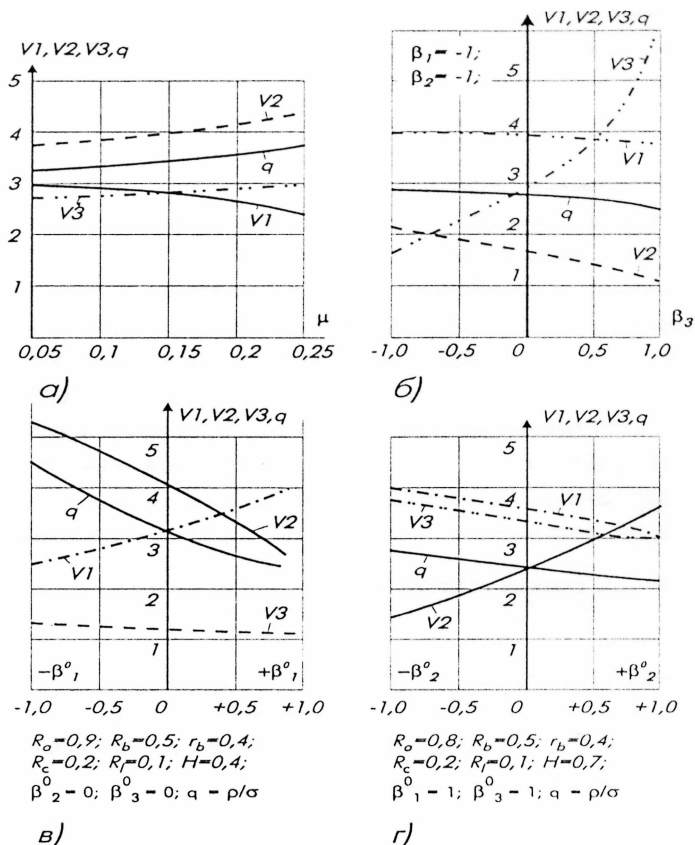


Рис.6. Комбинированное выдавливание. Влияние дополнительных нагрузок.

без дополнительных нагрузок является частным, но не оптимальным случаем операции.

6. Экспериментальные исследования операций комбинированного выдавливания с истечением в двух и трех направлениях. Исследования проводились с целью проверки результатов и выводов аналитического исследования. Исследовались: выдавливание на активной оправке с истечением через два ка-

нала и комбинированное выдавливание без оправки через три канала. Использовался кривошипный пресс К 264. Штамп для выдавливания на активной оправке был оснащен мессдозой и ходографом для регистрации перемещений ползуна.

Усилие на оправке регулировалось в пределах от 0 до 150 КН. Использовались отожженные и фосфатированные заготовки диаметром 25 мм с фланцем толщиной 12 мм и диаметром 50,8 мм из стали 15 ХР, прошитые со стороны фланца. Зарегистрировано уменьшение усилия с 800 КН до 580 КН, а соотношение скоростей V_1/V_2 изменялось с 0,87 до 1,42.

Исследование комбинированного выдавливания через три канала проводилось на прессе К 264 (2500 КН, 35 х/мин) в универсальном штампе с тензоэлементами и ходографами. Пресс был оборудован вторым пневмобуфером.

Использовались образцы диаметром 36 мм из стали 10. Границы очага деформации выявлялись методом координатной сетки, металлографическими исследованиями, и измерением твердости.

Результаты исследования приведены на графиках (Рис. 6а-6г). Приложение дополнительной нагрузки в пределах, определяемых прочностью стенок выдавливаемой поковки на выходе из одного канала влияет на скорость истечения из всех трех каналов. Варьирование двумя дополнительными нагрузками расширяет возможности управления течением. Это влияние тем больше,

чем меньше степень обжатия $\psi = \frac{F_0}{\sum f_i}$, где F_0 - сечение приемника контейнера; f_i - сечение отдельного канала истечения.

Наибольший эффект от приложения дополнительных нагрузок реализуется, когда создаются условия для перехода от объемной схемы (при выдавливании) к плоской (при вырубке). Материал в этих случаях практически не деформирован, а давления минимальны.

Таким образом, возможность эффективного управления течением за счет приложения дополнительных нагрузок экспериментально подтверждена. Кроме того, установлено, что методика расчета сил дает завышенные на 8-12,7% значения, что позволяет рекомендовать ее для практического использования.

7. Разработка и внедрение малоотходной технологии холодной штамповки выдавливанием. В рамках программы освоения холодной объемной штамповки деталей АТЭ, выполнено технологическое обследование заводов и составлен классификатор деталей, подлежащих первоочередному переводу на новую технологию. В него вошли изделия, при производстве которых в стружку

переводится более 40% металла. При годовом объеме производства 15-16 тыс. тонн экономия составляет в 22-30 тыс. тонн.

Разработана технология, объединяющая достоинства и возможности вариантов холодной штамповки на автоматах из бунта и выдавливания из штучных заготовок. Основу ее составляют операции комбинированного выдавливания, двусторонней прошивки в принудительно перемещаемом контейнере в сочетании с дозированием объема предварительно отоженных заготовок при штамповке. Вдвое сократилось число формоизменяющих переходов, исключаются промежуточный отжиг и повторное фосфатирование, при существенном уменьшении технологических усилий.

Разделение проката выполняется на кривошипных прессах, хрупким сколом в штампах с автоматической подачей. Используется специальная технология и штампы для однопереходных осадки или высадки с калибровкой, а также дозирования объема заготовок при штамповке. Тем самым решена проблема безотходного производства точных заготовок для выдавливания.

Новая технология холодного выдавливания реализована на заводах АТЭ в гг. Борисов, Владимир, Владикавказ, Москва, Ржев, Самара, Херсон, Энгельс для производства деталей - таких, как шестерни и обоймы стартерных приводов, сердечников реле, корпусов искровых свечей зажигания, датчиков различного назначения, наконечников гибких шлангов тормозной арматуры, коллекторов, прямоугольных корпусов микропроцессорных устройств, корпусов велогенераторов и карманных фонарей. Для выдавливания корпусов свечей по интенсивной технологии создан специальный 6-ти позиционный автомат.

Особенность и достоинство новой технологии состоит в том, что на выдавливание подается идеально подготовленная заготовка, имеющая не только оптимальную геометрию, но и строго дозированный объем. Это позволяет завершить штамповку таких сложных деталей, как корпуса свечей, не за 5, а за три формоизменяющих перехода.

Для наиболее ответственных деталей стартера - обоймы и шестерни привода разработано несколько вариантов технологии. В условиях массового производства используются многопозиционные горизонтальные или вертикальные прессы-автоматы, на которых за 4 перехода оформляются все функциональные поверхности; в серийном производстве - обе детали выдавливают на механических прессах К0036 или К0034. В мелкосерийном и опытном производствах выдавливанием окончательно оформляют только роликовую полость обоймы и зуб шестерни, используя, точеные заготовки.

По коэффициенту использования материала (0,8-0,9) технология соответствует мировому уровню, по эффективности использования трудовых и мате-

риальных затрат существенно выше его, а по стойкости инструмента в 2-3 раза превосходит лучшие зарубежные разработки. Отпадает необходимость в специальной импортной смазке.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшими технологическими возможностями обладают операции комбинированного выдавливания, в которых металл вытесняется через несколько каналов и как механическая система, имеет несколько степеней подвижности. Увеличение числа каналов или направлений истечения свыше единицы, с одной стороны вносит неопределенность в расчеты, с другой стороны, уменьшает итоговую деформацию, упрочнение и необходимое давление, но, что особенно важно, обеспечивает возможность эффективного управления течением в частности за счет дополнительных технологических нагрузок, не выводя при этом процесс из режима минимальной мощности.

Это позволяет рассматривать такие операции как общие случаи выдавливания, а схемы выдавливания через один канал без дополнительных нагрузок – как частные и далеко не самые эффективные способы штамповки.

2. Приложение растягивающей нагрузки при выдавливании уменьшает давление и увеличивает вероятность разрушения поковки, а приложение противодействия увеличивает давление, но уменьшает вероятность появления трещин на изделии. При этом эффект уменьшения усилия в несколько раз выше, чем при использовании активных сил трения.

3. Заготовки под выдавливание проще всего получать безотходным разделением проката в штампах хрупким сколом на отрезки длиной более диаметра с последующим поперечным выдавливанием, совмещенным с осадкой-калибровкой или высадкой. При калибровке не следует добиваться заполнения углов для базирования в матричной полости – достаточно на боковой поверхности оформить поясok шириной 0.3-0.7 высоты заготовки.

4. С целью минимизации затрат технологический процесс холодного выдавливания точных деталей сложной формы целесообразно строить на основе операций комбинированного выдавливания и двусторонней прошивки в режиме управления течением с использованием специальных заготовок, объем которых дозируется при штамповке. В этом случае для выдавливания деталей практически любой сложности, в том числе с глубокими полостями используются только два формоизменяющих перехода. Промежуточный отжиг, как правило, не обязателен. При этом стойкость прошивных пуансонов в 2-3 раза выше, чем в известных зарубежных разработках.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Оленин Л.Д. Интенсификация процессов выдавливания // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1971. - Вып. 5. - С. 30-34.
2. Оленин Л.Д. Расчет технологических переходов и конструирование инструмента для холодного комбинированного выдавливания // Кузнечно-штамповочное производство. - 1972. - №1. - С. 9-12.
3. Оленин Л. Д., Данилова Т. В. Штампы для качественной резки прутков. // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1974. - Вып. 5. - С. 17-20.
4. Оленин Л. Д., Соколов Л. А. Проектирование и эксплуатация рубочных штампов // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1976. - Вып. 5. - С. 13-16.
5. Оленин Л. Д. К проблеме управления конечным формоизменением в процессе выдавливания // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1976. - Вып. 6. - С. 4-7.
6. Оленин Л. Д. О некоторых особенностях механики процесса обратного выдавливания и путях его интенсификации // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1976. - Вып. 9. - С. 17-21.
7. Оленин Л. Д. Оптимизация технологического процесса и управление конечным формоизменением при холодной объемной штамповке // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1979. - Вып. 3. - С. 15-22.
8. Оленин Л. Д. Особенности конструирования инструмента для выдавливания деталей высокой точности // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1979. - Вып. 5. - С. 14-18.
9. Оленин Л. Д., Дериволков Д. И., Галкина Л. С. Резка заготовок с частичной компенсацией растягивающих напряжений // Совершенствование процессов объемной штамповки. - М.: МДНТП, 1980. - С.113-120.
10. Оленин Л. Д. Исследование и разработка процессов объемной штамповки стальных деталей в условиях массового производства // Совершенствование процессов объемной штамповки. - М.: МДНТП, 1980. - С.120-127.
11. Оленин Л. Д., Дериволков Д. И. Разработка и внедрение технологии холодного выдавливания корпусов свечей зажигания // Автотракторное электрооборудование. - М.: НИИНавтопром, 1981. - Вып. 3. - С. 17-21.
12. Оленин Л. Д. Исследование операций выдавливания с истечением в двух и трех направлениях с приложением дополнительных внешних нагрузок // Современные достижения в области холодной объемной штамповки. - М.: МДНТП, 1984. - С.77-82.

13. Оленин Л. Д. Анализ операции двусторонней прошивки в активном контейнере с приложением противодавления // Труды НИИАвтоприборов. – М.: НИИАвтопром, 1984. – Вып. 57. – С. 3-27.
14. Оленин Л. Д., Дериволков Д. И., Стрелецкий В. Н. Холодная объемная штамповка деталей автотракторного электрооборудования // Автомобильная промышленность. – 1983. – №10. – С. 22-23.
15. Оленин Л. Д. Опыт разработки и внедрения технологии изготовления деталей АТЭ // Автомобильная промышленность. – 1984. – №9. – С. 23-24.
16. Шехтер В. Я., Оленин Л. Д. Цехи холодной объемной штамповки // Проектирование машиностроительных заводов и цехов. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 183-204.
17. Головин В. А., Митькин А. Н., Оленин Л. Д. Определение технологических усилий // Холодная объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 183-191.
18. Авторское свидетельство №347112 (СССР). Способ выдавливания полых деталей / Л. Д. Оленин // Б. И. – 1969. – № 16.
19. Оленин Л.Д. Авторское свидетельство №381446 (СССР). Держатель быстросменного пуансона / Л. Д. Оленин // Б. И. – 1973. – №22.
20. Авторское свидетельство №583118 (СССР). Штамп для изготовления заготовки из труб/ Л.Д. Оленин, Ю.С. Маказан // Б. И. – 1977. – №43.
21. Авторское свидетельство №580952 (СССР). Устройство для резки проката / Л. Д. Оленин, Л. А. Соколов, Д. И. Дериволков // Б. И. -1977. – №45.
22. Авторское свидетельство №589059 (СССР) Устройство для высадки утолщения на стержнях / Л. Д. Оленин, Л. А. Соколов // Б. И. – 1978. – №3.
23. Авторское свидетельство (СССР). №703210 "Устройство для холодного выдавливания/ Л. Д. Оленин, Д. И. Дериволков, В. Н. Гельфанд // Б. И. -1983. – №46.
24. Авторское свидетельство №984728 (СССР). Устройство для резки / Л. Д. Оленин, Д. И. Дериволков // Б. И. – 1983. – №37.
25. Патент №987890 (РФ). Штамп для выдавливания/ Л. Д. Оленин // - 1980.
26. Авторское свидетельство №1046042А (СССР). Устройство для резки проката / Л. Д. Оленин, Д. И. Дериволков // Б. И. – 1983. – №37.
27. Патент №11069250А (РФ). Способ изготовления осесимметричных изделий / Л. Д. Оленин // 1982.
28. Патент № 1078743 (РФ). Штамп для штамповки выдавливанием / Л. Д. Оленин, К. Е. Полевикт // 1982.
29. Патент №1299692 (РФ). Способ изготовления поковок и штамп для его осуществления / Л. Д. Оленин, Д. И. Дериволков // 1983.

30. Патент № 1571874 (РФ). Способ выдавливания полых ступенчатых изделий с головкой, имеющей фланец, и с хвостовиком / Л. Д. Оленин, Д. И. Дериволков // 1986.
31. Патент №1584292 (Великобритания). Усовершенствование в области штамповки выдавливанием / Л. Д. Оленин // 1977.
32. Патент №E2747169C2 (ФРГ). Способ и устройство для производства полых деталей выдавливанием из сплошной заготовки / Л.Д. Оленин // 1979.
33. Патент №7739068 (Франция). Способ и устройство для получения полых деталей с утолщением / Л. Д. Оленин // 1977.
34. Авторское свидетельство №395508 (НРБ). Метод и устройство для штамповки истечением полых деталей / Л. Д. Оленин // 1977.
35. Авторское свидетельство №191763 (ЧССР). Способ изготовления полых деталей выдавливанием и устройство для его осуществления / Л. Д. Оленин //1978.
36. Оленин Л. Д., Дериволков Д. И. Малоотходная технология изготовления деталей АТЭ на основе интенсивных операций выдавливания // Интенсивная технология обработки металлов давлением. - М.: МДНТП, 1987. - С. 131-137.
37. Процессы пластического деформирования в машиностроении / А. В. Алифанов, Е. М. Макушок, Л. В. Захаревич, Л. Д. Оленин. – Минск: Наука, 1988. – 235 с.
38. Оленин Л. Д., Дериволков Д. И., Чернова Т. А. Исследование операции поперечного выдавливания упрочняемого материала через плоскую кольцевую щель, разделенную на отдельные каналы // Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования. - М.: МДНТП, 1990. - С. 82-88.
39. Авторское свидетельство №1333597 (СССР). Главный исполнительный механизм многопозиционного прессы / Н. М. Бухер, А. И. Гуральник, Л. Д. Оленин, Д. И. Дериволков // Б. И. - 1984. - №32.
40. Оленин Л. Д., К расчету технологических переходов при холодной двусторонней прошивке в принудительно перемещаемом контейнере // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. - №2. - С. 8-12.
41. Оленин Л.Д. Интенсивная технология холодной объемной штамповки // Автомобильная промышленность. – 1996, - № 10. - С.35-37.
42. Оленин Л. Д. Анализ комбинированного выдавливания через три канала в режиме управления течением (квазистационарная стадия) // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. - № 2. - С. 25-29.

