

1780900
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Е. И. СЕМЕНОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ШТАМПОВКИ
И ПРЕССОВАНИЯ**

(Специальность 05.03.05 — Технология и машины обработки
давлением)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Научный консультант —
доктор технических наук Сторожев М. В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Охрименко Я. М.,
доктор технических наук, профессор Поздеев А. А.,
доктор технических наук Мошнин Е. Н.

Ведущее предприятие — Всесоюзный ордена Ленина научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения.

Автореферат разослан « 22 » 1973 г.

Защита диссертации со-
на заседании Совета фак-
зация производства» Мос-
Трудового Красного Зна-
имени Н. Э. Баумана по а-
ская, 5.

С диссертацией можно
лица.

Ваши отзывы в 2-х э
просьба выслать по указателю

Ученый секретарь Сов-
канд. техн. наук, доце

М 186900

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

Евгений Иванович СЕМЕНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ШТАМПОВКИ
И ПРЕССОВАНИЯ

(Специальность 05.03.05 — Технология и машины обработки
давлением)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



В В Е Д Е Н И Е

В Директивах XXIV съезда КПСС по развитию народного хозяйства нашей страны на 1971 ÷ 1975 г.г. намечено широкое внедрение прогрессивных технологических процессов.

Поставлена задача совершенствовать технологию обработки металлопроката, причем главное внимание должно быть уделено повышению качества и точности штампованных поковок.

В цехах горячей штамповки все больше будут применять кривошипные горячештамповочные прессы — КГШП, как оборудование, дающее большую точность и производительность. В новых кузнечно-штамповочных цехах будут внедрены автоматические линии штамповки на КГШП.

Большие задачи поставлены перед энергетическим машиностроением. Будет значительно увеличена мощность выпускаемых паровых и газовых турбин. Это потребует увеличить производство крупногабаритных дисков с наивысшим качеством, которое обеспечивает штамповка. Для изготовления штампованных дисков необходимы прессы очень большого усилия, что ограничивает возможности изготовления дисков, применяя обычный процесс штамповки. Поэтому для получения дисков больших размеров и при относительно меньших потребных усилиях деформирования в ЦНИИТМАШ был предложен способ секционной штамповки (осадки), который представляется перспективным и должен получить более широкое применение в будущем.

Все более широкое значение приобретают в машиностроении процессы прессования, которые позволяют получать высокое качество изделий. Кроме самостоятельного значения процессы прессования являются элементами течения металла при горячей штамповке на КГШП и гидравлических прессах в сочетании с другими операциями. Процессы прессования являются прогрессивными и высокоэффективными.

Данная работа посвящена исследованию технологических процессов горячей объемной штамповки, секционной штамповки и прямого прессования на базе единой экспериментально-теоретической методики.

Основой для исследования и разработки технологических процессовковки, штамповки и прессования является теория обработки металлов давлением, научной базой которой является теория пластичности.

Математическая теория пластичности создана и развита трудами советских и зарубежных ученых: Н.И.Безухова, Ильюшина А.А., А.Ю.Ишлинского, С.Г.Михлина, Л.М.Качанова, Н.Н.Малинина, В.В.Соколовского, С.А.Христиановича, Л.Прандтля, Г.Генки, Г.Гейрингер, Э.Зибеля, А.Надаи, Р.Хилла и др.

В развитие теории и практики обработки давлением большой вклад внесли Д.К.Чернов, К.Н.Богоявленский, А.Н.Брюханов, О.А.Ганаго, С.И.Губкин, Г.Я.Гун, Е.М.Макушок, В.Т.Мещерин, Л.Н.Могучий, И.М.Павлов, Я.М.Охрименко, И.Д.Перлин, А.А.Поздеев, Е.А.Попов, Л.В.Прозоров, А.В.Ребельский, И.П.Ренне, П.И.Полухин, В.П.Северденко, Г.А.Смирнов-Аляев, М.В.Сторожев, И.Я.Тарновский, А.Д.Томленов, Е.П.Унксов, В.С.Смирнов, К.Н.Шевченко, Л.А.Шофман, А.И.Целиков, Г.Закс, Э.Зибель, В.Джонсон, А.Надаи, Э.Томсен, Ш.Кобаяши и др.

Советские и зарубежные ученые создали научную базу для технологических расчетов процессов обработки давлением. Однако сами технологические процессы во многих случаях проанализированы недостаточно и их анализ не всегда удовлетворяет требованиям практики.

Потребность в уточненных расчетах технологических процессов обработки металлов давлением с одной стороны и, во многих случаях, невозможность получения требуемых результатов даже наиболее приближенными теоретическими методами приводит к необходимости разработать экспериментально-теоретическую методику исследования, с помощью которой можно решать основные вопросы технологической разработки.

Обычно для разработки технологии необходимо следующее:

а)определить оптимальные размеры заготовок, при которых обеспечивается необходимое качество поверхности;

б)установить деформированное состояние, которое позволяет получить наилучшее качество материала и помогает выявить и предотвратить возможные внутренние дефекты;

в) выявить напряженное состояние с целью вычисления действующих напряжений и усилий для выбора машины, произвести расчет инструмента

на прочность, рассчитать потребную работу деформации и решить ряд производственных задач в отношении повышения производительности, стойкости штампов и т.п.

Целью работы является создание экспериментально-теоретической методики и исследование на ее основе процессов горячей объемной штамповки, секционной штамповки и прямого прессования. Методика разрабатывалась параллельно с исследованием указанных процессов с учетом особенностей каждого процесса.

Экспериментальная часть работы выполнена, в основном, в лаборатории Кафедры "машины и автоматизация обработки давлением" МВТУ им.Баумана и в лаборатории ООМД ЦНИИТМАШа.

В работе частично использован материал диссертаций, выполненных под руководством автора С.А.Скородумовым, В.Г.Кондратенко, Н.И.Ляпуновым и В.К.Ефремовым, ныне кандидатами технических наук.

- 0 -

Работа подразделена на четыре главы.

В первой дан анализ основных теоретических и экспериментальных методов исследования напряжений и деформаций в обработке металлов давлением, обзор работ по исследуемым процессам штамповки и прессования, а также поставлены задачи работы.

Вторая глава касается исследования горячей штамповки в открытых штампах поковок осесимметричных и удлиненных в плане.

В третьей главе проведено исследование процесса секционной штамповки дисков.

В четвертой главе рассмотрено исследование напряженного и деформированного состояния при прямом прессовании.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ В ОТКРЫТЫХ ШТАМПАХ

Задачами работы в области горячей штамповки в открытых штампах были следующие:

- 1) исследование формы и размеров очага деформации при доштамповке;
- 2) экспериментальное построение эпюры напряжений в плоскости разреза штампов;
- 3) теоретический анализ напряженного состояния при доштамповке и вывод формул для определения необходимого усилия при штамповке;
- 4) исследование формоизменения при штамповке гаммы экспериментальных поковок для последующей разбивки процесса штамповки на отдельные стадии;
- 5) исследование деформированного состояния на различных стадиях штамповки для выяснения очагов деформации;
- 6) аналитические расчеты усилий на различных стадиях штамповки на основании определенных очагов деформации;
- 7) построение расчетных графиков "усилие-путь" и определение по ним теоретических значений работы деформации;
- 8) экспериментальная проверка теоретических решений по определению работы деформации;
- 9) вывод формул по определению веса падающих частей штамповочного молота.

Для ряда процессов или этапов процессов обработки металлов давлением формоизменение определяется однозначно формой инструмента и ходом деформирования. Для таких процессов (или этапов) исследование ограничивается деформированным и напряженным состоянием.

Постановка экспериментов по пластическому деформированию металла в горячем состоянии связана со значительными трудностями. Поэтому в работе было применено моделирование на свинце, а затем уже проведена проверка на стали в горячем состоянии.

Экспериментами на свинце можно установить изменение формы, размеров и распределения деформаций для данного процесса в зависимости от формы и размеров инструмента. Можно установить форму и количественные соотношения между размерами очага деформации. Экспериментами на свинце можно также проверить правильность принятого теоретического распределения напряжений по контактным поверхностям по-

ковки или в очаге деформации, можно проверить точность формул по определению необходимого усилия деформирования и область их рационального применения.

При проведении экспериментов на свинце необходимо учитывать ряд их особенностей.

При экспериментах на свинце чаще всего применяют метод координатной сетки при помощи которой можно выявить распределение деформаций и очаг деформации.

Для проверки приемлемости теоретически принятого распределения напряжений по контактным поверхностям поковки или по очагу деформаций также применяют эксперименты на свинце.

Для получения количественных значений нормальных напряжений в очаге деформации следует изготавливать штамп, в который встраивают датчики, позволяющие получить экспериментально их величину.

Моделирование на свинце позволяет оценить точность полученных формул для определения необходимого усилия деформирования.

Во все теоретические и большинство эмпирических формул входит в качестве сомножителя величина напряжения текучести σ_s . Наибольшее влияние на σ_s свинца оказывает скорость деформации, однако при этом степень деформации должна быть больше 10%.

Скорость деформации в экспериментах, в которых пластически деформируется только часть поковки, следует вычислять в зависимости от размеров очага деформации и скорости деформирования.

Предпосылкой для теоретического расчета максимальных усилий, действующих при штамповке, является определение формы и размеров очага деформации при доштамповке. При определении усилий, действующих на отдельных этапах штамповки перед доштамповкой, также необходимо выявление формы и размеров очага деформации. В первом приближении можно принять три этапа: начало процесса; середина процесса; окончание процесса (по ходу деформирующего инструмента). В дальнейшем, по данным об усилиях на отдельных этапах можно получить формулы для определения работы деформирования при штамповке.

Деформированное состояние при доштамповке

Осесимметричное деформированное состояние. До наших исследований в литературе приводился экспериментальный материал, характеризующий результат течения металла на протяжении всего процесса штамповки, включая и доштамповку поковки. Из этого материала можно было

сделать лишь заключение, что в процессе доштамповки деформация охватывает не всю поковку, а только ту ее часть, которая расположена вблизи поверхности разъема штампов. Затем в наших работах и в работах школы С.И.Губкина было показано, что очаг деформации при доштамповке по форме представляет собой двояковыпуклую линзу.

В наших работах впервые была установлена зависимость размеров очага деформации от диаметра поковки и толщины заусенца.

Первым был поставлен эксперимент по выявлению очага деформации, целью которого было проверить правильность выбора в качестве наиболее вероятного очага деформации объема в виде диска в плоскости разъема штампов, высота которого постоянна и равна толщине заусенца. Эксперимент показал, что очаг деформации, по крайней мере в средней части поковки распространяется на глубину, большую чем толщина заусенца.

Следующий эксперимент имел целью выявить форму очага деформации. Для этого проводили доштамповку составной поковки из двух половин с нанесенной координатной сеткой на вертикальной плоскости разъема. Вид сетки после доштамповки показал, что существует определенная зона деформации, меньшая, чем объем поковки, но и большая, чем толщина заусенца. Этот эксперимент позволил установить очаг деформации, который был построен графически.

При построении было принято, что от точки перегиба первоначально вертикальных деформированных линий сетки начинается переходный участок, за которым следует недеформированный участок и что очаг интенсивной деформации именно и ограничен этими точками перегиба. Основанием к этому послужило предположение, что по точкам перегиба должны действовать максимальные касательные напряжения, которые в условиях деформирования с наличием упругой и пластической зон можно было принять равными $\tau_s = K$.

Эксперименты показали, что если по контуру выделенного указанным способом очага деформации изготовить специальный штамп и произвести в нем осадку поковки, то течение металла в таком штампе будет примерно одинаковым с течением металла в очаге деформации при доштамповке поковки. Следствием же этого должны являться одинаковые эпюры распределения напряжений по контуру очага деформации и по специальному штампу, а также одинаковые полные усилия деформирования.

После того как был построен очаг деформации, в соответствии с ним был предложен упрощенный очаг деформации с сечением в виде ступенчатого прямоугольника, симметричного относительно центральной оси.

Такой очаг деформации можно разбить на три участка. На крайних участках А и С толщина очага деформации равна толщине заусенца, а ширина очага деформации больше ширины заусенца на величину Q . На среднем участке В толщина принимается постоянной и равной максимальной высоте h_{01} графически построенного очага интенсивной деформации.

Для определения величин h_{01} и Q был поставлен новый эксперимент.

Были изготовлены составные поковки с координатной сеткой. Толщина заусенца у этих поковок была различной. В одной группе поковок начальная толщина заусенца была 6,9 мм, а в другой 3,45 мм. Поковки были доштампованы с последовательными степенями деформации примерно 25%. Перед каждой осадкой и после осадки сетку фотографировали на металлографическом микроскопе. На фотографиях с деформированной сеткой были графически построены очаги интенсивной деформации и по ним упрощенные очаги деформации. Замерив последние получили размеры h_{01} и Q . Поковки имели форму сечения в виде прямоугольника и были названы поковками первого типа. Эксперимент показал, что при больших вертикальных размерах поковки очаг интенсивной деформации занимает относительно малый объем и можно полагать, что при доштамповке форма поперечного сечения поковки не будет сказываться на форме и размерах очага деформации. Для проверки этого предположения были поставлены аналогичные предыдущим опыты на поковках второго типа — с бобышкой.

В результате этих опытов было установлено, что размеры очага деформации h_{01} и Q равны при одинаковых толщинах заусенца для поковок первого и второго типа. Оказалось также, что величина h_{01} изменяется в пределах $2,15 \pm 3,2$ от толщины заусенца, а величина Q примерно равна одной толщине заусенца ($Q \approx h_0$). При этом, значение h_{01} относительно толщины заусенца растет с увеличением отношения D_0/h_0 (или с уменьшением h_0 при неизменной величине D_0).

Для подтверждения возможности применения для стали данных, полученных на свинце была проведена еще одна серия опытов. Материалом служила прокатанная сталь 35. Исходные образцы, имеющие форму поковки первого типа с заусенцем изготавливали резанием из прутка, так чтобы направление волокон было параллельным оси. После нагрева до температуры 1100°C была произведена доштамповка. Затем поковки были разрезаны вдоль оси, а плоскость разреза отполирована и протравлена глубоким травлением. По искажению волокон, также как и по деформации сетки в предыдущих опытах в дальнейшем были построены очаги деформации.

Сравнение данных показало близкое совпадение размеров очага

деформации для стали и для свинца.

Проведенные эксперименты дали возможность выделить очаг деформации при доштамповке и в первом приближении установить зависимости между размерами очага деформации, согласно которым: $h_1 \approx 3h_2$ и $Q \approx h_2$.

При рассмотрении деформированной сетки оказалось возможным выделить три зоны: зону I, названную нами очагом интенсивной деформации, которая ограничивается упомянутыми точками перегиба вертикальных линий сетки; зону II малой деформации, примыкающую к зоне I и ограниченную с другой стороны зоной III, в которой пластическая деформация практически отсутствует. Весь очаг деформации включает в себя I и II зоны.

Указанными выше опытами не была установлена зависимость размеров очага деформации от толщины заусенца при различных отношениях D_n/h_2 и, таким образом, потребовались дополнительные эксперименты. Они были проведены на свинце по описанной ранее методике. Для опытов вначале было взято семь образцов. Каждый образец деформировался 2-3 раза в зависимости от начальной толщины заусенца - $h_{нач}$. Далее были построены очаги деформации для всех указанных образцов по точкам перегиба вертикальных линий сетки и были замерены и сведены в таблицу следующие размеры:

h_{01} - высота очага интенсивной деформации по оси поковки;

h_{02} - высота очага интенсивной деформации, расположенная на расстоянии $D_n/4$ от оси поковки;

h_{03} - совместная высота I и II зоны очага деформации по оси поковки;

h_{04} - совместная высота I и II зоны очага деформации, расположенная на расстоянии $D_n/4$ от оси поковки.

При определении размеров очага деформации для образцов с тонким заусенцем возникли трудности вследствие малых степеней деформации в середине образцов.

Поэтому были поставлены эксперименты с целью более точного определения размеров очага деформации для двух толщин заусенца, приближающихся к применяемым при штамповке в производственных условиях. При этом была применена разработанная нами методика последовательных доштамповок.

После первой осадки образца со степенью деформации примерно 25% его фотографировали, а штампы стачивали в плоскости разреза на величину осадки заусенца. Образовавшийся на поковке заусенец также стачи-

вали и снова производили ее доштамповку.

Первый образец был доштампован последовательно пять раз, а второй образец - одиннадцать раз. Таким образом удалось получить большую степень деформации в середине образца, не изменяя условий доштамповки в отношении размеров и степени деформации заусенца и построение очагов деформации уже не представило затруднений. Затем были построены графические зависимости относительных толщин очагов деформации от относительных диаметров поковки. Их рассмотрение показало, что отношение $h_{01}/h_{зср}$ соизмеримо с отношением $h_{02}/h_{зср}$. В свою очередь, отношения $h_{01}/h_{зср}$ и $h_{02}/h_{зср}$ имеют один порядок величин с отношениями $h_{01}/h_{зср}$ и $h_{02}/h_{зср}$. При этом относительная толщина очага деформации как на оси поковки, так и на расстоянии $D_n/4$ от оси непрерывно растет с увеличением отношения $D_n/h_{зср}$. Вместе с тем толщина очага деформации на оси поковки не обращается в нуль и при очень малых, не встречающихся в практике штамповки, отношениях $D_n/h_{зср}$. При отношениях $\frac{D_n}{h_{зср}} \approx 20$ отношение $h_{01}/h_{зср}$ приблизительно равно 3,5. Таким образом, по оси поковки толщина очага деформации во всех опытах была конечной величины h_{02} , что находится в противоречии с теоретической формой очага деформации, построенной методом линий скольжения. С увеличением отношения D_n/h_z происходит качественное изменение формы очага интенсивной деформации. До отношений $\frac{D_n}{h_z} \approx 3$ очаг интенсивной деформации имеет форму двояковыпуклой линзы, а при больших отношениях D_n/h_z линза превращается в двояковыпуклую. Полученные данные о форме и размерах очага деформации при различных значениях D_n/h_z позволили производить приближенный расчет этих размеров для различных конкретных случаев штамповки.

Недостатком проведенных экспериментов было отсутствие данных о форме и размерах очага деформации для случаев $D_n/h_z > 20$. Вид зависимостей типа $\frac{h_{01}}{h_{зср}} = f\left(\frac{D_n}{h_{зср}}\right)$ позволял предполагать, что при $\frac{D_n}{h_z} \approx 20$ отношение $h_{01}/h_{зср}$ достигает некоторого предела. В первом приближении такое предположение можно было сделать. Однако было очевидным, что чем больше будет увеличиваться отношение D_n/h_z сверх значения, равного 20, тем большая ошибка возможна в результате использования данного предположения. Поэтому были поставлены дальнейшие эксперименты.

Эксперименты проводили также, как и в предыдущем случае, методом последовательных доштамповок образцов с одинаковой степенью деформации и при одинаковых начальной и конечной высотах заусенца при

каждой доштамповке. Было взято два разрезных образца. Образец 1 был доштампован последовательно 12 раз, а образец 2 - 16 раз. Оказалось, что при $\frac{D_c}{h_{дог}} \approx 81$, $h_c/h_{дог}$ равно 7,8 (образец 1), а при $\frac{D_c}{h_{дог}} = 47$, $h_c/h_{дог}$ равно 11 (образец 2). Для данных образцов была также установлена полная картина распределения деформаций по сечению. Для этого были проведены расчеты относительных главных деформаций вдоль вертикальных линий координатной сетки.

Плоское деформированное состояние. Выводы из экспериментов для осесимметричного случая обычно распространяли и на плоское деформированное состояние, хотя экспериментальных данных не было. Поэтому нами были поставлены эксперименты^{х)} по доштамповке удлиненных поковок с использованием разработанной выше методики многократных доштамповок. Отношение длины полости штампа к ширине было равно примерно 2,25 с тем, чтобы обеспечить плоскую деформацию в средней зоне заготовки. Эксперименты проводили на трех разрезных образцах с разными толщинами заусенца (соответственно с разными отношениями ширины полости к толщине заусенца).

При сравнении с осесимметричным случаем было обнаружено большое различие в деформированном состоянии сетки. Для плоской деформации модель деформации оказалась значительно более сложной. Наиболее достопримечательным являлось наличие "мертвой" зоны в центральной части сечения заготовки, в месте пересечения вертикальной оси с плоскостью разбега штампов.

Из рассмотрения деформированной сетки были установлены четыре различные зоны деформации: 1 - зона очень больших деформаций - очаг интенсивной деформации; 2 - зона средних деформаций; 3 - зона малых деформаций; 4 - "мертвая" зона.

Данное подразделение на зоны является существенно качественным. При очерчивании границ зон линии проводили через упомянутые точки перегиба первоначально прямых вертикальных линий координатной сетки.

Была обнаружена зависимость течения металла от размера заусенца. Для толстого заусенца зона 1 представляет большую область простой однородной деформации. Картина деформаций для этого случая схожа

х) Эксперименты проведены в конце 1969 - начале 1970 г. в Университете г.Лидса (Англия). В проведении экспериментов принимали участие доктор Парсонс Б. и инж.Бомонт А.

с картиной деформаций для осесимметричного деформирования при относительно толстом заусенце. Отношение ширины полости b к средней толщине заусенца - $h_{\text{ср}}$ равно

$$\frac{b}{h_{\text{ср}}} = \frac{102}{11,5} = 8,9, \text{ а отношение}$$

$\frac{h_0}{h_{\text{ср}}} \approx 1,75$. Следует отметить более медленное возрастание толщины зоны I вблизи заусенца по направлению к оси по сравнению с осесимметричным случаем. Зона II, окружающая зону больших деформаций, подобна зоне II для осесимметричного случая, но не идентична. Оставшаяся часть сечения включает зону III (зону небольших деформаций) и зону IV (зону нулевых деформаций), что сравнимо с целой зоной III в осесимметричном случае. Рассматривая границу между зонами II и III для толстого заусенца можно полагать, что теоретическая модель картины течения В.Джонсона вполне вероятна. Непосредственное сравнение с обычным полем линий скольжения невозможно, т.к. для обычного поля рассматривались случаи с очень толстым заусенцем или в предположении отсутствия трения. Однако главное противоречие нашего эксперимента с обычным полем линий скольжения наблюдалось в отношении зоны II и величины

При уменьшении толщины заусенца модель деформации изменяется постепенно. При среднем по толщине заусенце появляется небольшая звездообразная зона "мертвого" металла в средней части сечения, на оси, а область средних деформаций распространяется в глубину полости штампа, удаляясь от зоны I. Область малых деформаций становится неразличимой от зоны "мертвого" металла IV.

При очень тонком заусенце обнаруживается относительно большая зона "мертвого" металла в центре сечения. Деформации в зонах I и II становятся значительно более выраженными. Результаты для образцов с очень тонким заусенцем наиболее отличаются от осесимметричного случая. Характер распределения деформаций в сечении заготовки подобен распределению деформаций при прямом плоском прессовании. Поэтому представляется возможным использовать решение для поля линий скольжения при прямом плоском прессовании.

Полученные результаты были позднее подтверждены выполненными нами экспериментами в НИИТРАКТОРОСЕЛХОЗМАШЕ.

Теоретическое определение напряжений и усилий при доштамповке

Осесимметричное напряженно-деформированное состояние. С целью получения наиболее простого решения мы сочли возможным вначале исходить из упрощенной формы очага деформации в виде ступенчатого пря-

моугольника, симметричного относительно осей касательными напряжениями максимальной величины $\tau = \tau_2$ по его поверхностям и получили первую упрощенную формулу для определения усилия деформирования при доштамповке круглых в плане поковок.

В дальнейшем были получены формулы на основе уточненных формы и размеров очага интенсивной деформации, в частности была выбрана М.В.Сторожевым и С.Б.Кирсановой линзообразная форма. Однако оказалось, что напряжения в очаге деформации в теле поковки растут неравномерно от периферии к центру. Начиная от заусенца напряжения вначале резко возрастают на относительно коротком участке, а затем рост напряжений происходит значительно медленнее. Если же принимать линзообразную форму очага деформации, то теоретическое распределение напряжений значительно отличается от действительного.

Вместе с тем, рассмотрение деформированной сетки показало, что очаг интенсивной деформации значительно более приближается к форме в виде линзы в центральной части с примыкающими плоскими кольцевыми участками в периферийной части (в области поковки). При принятии такой формы очага деформации можно ожидать большего соответствия теоретической и экспериментальной эпюр распределения напряжений по очагу деформации.

При этом для усилия при штамповке получена формула:

$$P = b_s \left(2 + \frac{b_s}{2h_s} \right) (h_s + l_s) \pi D_n + b_s \left\{ 2.5 + \frac{l_s}{h_s} + \left[\frac{\sqrt{m}}{4(m-1)} \frac{1}{\sqrt{m}-\sqrt{m-1}} \right] n \right\} \pi (D_n - 2h_s) \quad (1)$$

где $m = \frac{h_0 l}{h_s} \quad \text{и} \quad n = \frac{D_n - 2h_s}{h_s}$.

Плоское деформированное состояние. Форма и размеры очага деформации, выявленные для осесимметричного деформирования ранее распространялись и на плоское деформированное состояние. На этой основе для усилия деформирования при доштамповке простых удлиненных в плане поковок нами была получена первая упрощенная формула. Очаг деформации был принят в виде ступенчатого прямоугольника, симметричного вертикальной оси в сечении, перпендикулярном длине поковки.

Результаты экспериментов по доштамповке удлиненных в плане поковок заставили искать новые решения. Для относительно толстого заусенца, когда $\frac{b}{h_s} < 12$ оказалось возможным принять, что схематизированный очаг деформации имеет в сечении форму ромба. Толщина очага деформации в области поковки на некотором расстоянии от заусенца принимается равной толщине заусенца. Сопротивление истечению металла

в магазине заусенечной канавки не учитывается. На основании этих предпосылок для усилия деформирования была получена формула:

$$P_4 = 2k \left(0.04h_3 p + 0.5 \left(2.73 + \frac{h_2}{h_3} \right) (v_3 + 0.3h_3) p + 0.5 \left(3.17 + \frac{2h_2}{h_3} \cdot v_n \frac{0.5b - h_2 + x_0}{x_0} \right) (b - 2h_3) v_n \right)$$

$$x_0 = \frac{h_2(0.5b - 1)}{h_0 - h_3}, \text{ где}$$

Для относительно тонкого заусенца, когда $b/h_2 > 15$ формула может давать значительные ошибки. Для получения более точного решения целесообразно выполнить его методом линий скольжения с учетом центральной "жесткой" зоны. В работе предложены варианты возможного построения сетки линий скольжения.

Экспериментальное исследование напряженного состояния при доштамповке осесимметричных поковок

Для проверки полученных теоретических зависимостей была проведена экспериментальная работа, которая включала: проверку знаний средних давлений в полости штампа; разработку специального датчика для замера напряжений внутри заготовки; проверку возможности использования датчика для замера напряжений по плоскости разбега; экспериментальное определение напряжений по плоскости разбега и сравнение их с расчетными.

Заготовки изготавливали из прокованных литых чушек свинца (степень укова $\psi = 6$). Одновременно с получением заготовок для моделей из прокованных чушек изготавливали образцы для механических испытаний свинца. В некоторых случаях свинцовые образцы для испытаний изготавливали из поковок, на которых проводили эксперимент.

До нашей работы не было разработано надежного способа непосредственного измерения напряжений внутри деформируемой поковки, позволяющего измерять высокие напряжения (порядка 30 кгс/мм²) в течение всего или части процесса деформирования и записывать их осциллографом.

Поэтому был разработан датчик для замера напряжений внутри поковки. Датчик состоит из корпуса, выполненного в виде усеченной с двух сторон конусной линзы; измерительного стержня, воспринимающего напряжения и выполненного в виде трехгранника с цилиндрической головкой по описанной окружности трехгранника; трех проволоочных датчиков, наклеенных последовательно на гранях трехгранника; крышки, закрывающей с одной стороны отверстие в корпусе и трубки, по которой подводится провода к датчикам.

Измерительный стержень одним концом упирается в крышку, а дру-

гим концом с головкой выходит на поверхность корпуса. На этот конец стержня и воздействует нормальное давление со стороны материала, в котором проводятся измерения напряжений. Под действием давления со стороны материала стержень сжимается и изменяется электрическое сопротивление наклеенных на него проволочных датчиков. По изменению сопротивления можно измерить напряжения, действующие на измерительный стержень и, стало быть, в материале.

Датчик устанавливают внутри поковки в плоскости разреза. Это позволяет измерять удельные усилия и, следовательно, напряжения, нормальные к указанной плоскости. Устанавливая датчики в различных точках плоскости симметрии течения металла в поковке, можно получить эпюру напряжений, действующих в этой плоскости.

Эксперименты проводили на универсальной испытательной машине УИМ-50 в штампе. Штамп состоял из нижней и верхней половинок, в которых были выполнены полости диаметром 80 мм и глубиной 40 мм. Поковка диаметром $D_n = 80$ мм состояла из двух половинок, соединенных по плоскости разреза. По плоскости разреза штампа в каждой половинке были сделаны углубления для датчика и канал для выводной трубки.

После тарировки датчик укладывали в гнезда, выполненные в заготовке и вместе с заготовкой помещали в штамп. На барабане УИМ-50 записывали индикаторную диаграмму $P_{\text{эф}} = f(\Delta n)$. Сигнал с датчика внутренних напряжений усиливался и подавался на шлейф осциллографа Н700. Одновременно с ним подавались сигналы на шлейфы осциллографа от ходографа и отметчика времени. Если считать, что нормальные напряжения распределены на торцевой плоскости чувствительного элемента равномерно, то эти напряжения равны средним удельным усилиям, действующим на чувствительный элемент $P_{\text{чз}}$. Так как $P_{\text{чз}} = \frac{P_2}{F_{\text{чз}}}$
и $F_{\text{чз}} = \text{const} = 0,9508 \text{ см}^2$, то $\epsilon = P_{\text{чз}} = \frac{P_2}{F_{\text{чз}}}$.

Данные по конечным значениям P_2 , ϵ и геометрическим размерам заготовок до и после эксперимента были сведены в таблицу и были построены кривые изменения P_2 по ходу для различных серий заготовок.

Для проверки точности теоретических решений необходимо было сопоставить теоретические и экспериментальные данные. Сопоставляли:

а) величины напряжений - ϵ_r на контуре очага деформации, определенные по формуле и полученные экспериментально;

б) общее усилие деформирования при штамповке, определенное экспериментально на УИМ и по формуле.

Распределение напряжений по теоретическим формулам было подт-

верждено данными эксперимента (погрешность не превышала 16,88%).

Теоретически определенные усилия также соответствовали усилиям, определенным экспериментально. Следует отметить, что усилия, определенные теоретически, несколько превышали усилия, полученные экспериментально.

Формула для определения общего усилия деформирования была использована для расчета усилия деформирования реальных поковок, при штамповке которых были замерены усилия деформирования в производственных условиях. Сравнение рассчитанных усилий с экспериментально определенными показало хорошую сходимость результатов.

Экспериментально полученные данные по напряжениям были сравнены с другими теоретическими зависимостями.

Для сопоставления экспериментальных данных с данными по другим работам напряжения σ_p в центре поковки приводили к одним и тем же условиям деформирования, т.е. их уменьшали на величины $\beta \sigma_s \ln \frac{D_0}{D_2}$ и $\sigma_s \frac{v_s}{v_{sk}}$. Таким образом, напряжения, полученные в центре поковки, приводили к случаю поковки без заусенца. Кроме этого, было сделано приведение к относительному напряжению по формулам, σ_{rel} / σ_s , где σ_s — напряжение текучести определенное при скорости деформации, соответствующей экспериментальной скорости по высоте заусенца. Сравнение предлагаемой формулы дает наилучшее совпадение с экспериментом.

Сравнение усилий деформирования, полученных экспериментально при деформировании поковок с встроенным в них датчиком и без него (P_1 и P_2 соответственно), показало, что погрешность находится в пределах $\pm 5\%$. В условиях эксперимента максимальный диаметр датчика $D_0 = 80$ мм, а $D_n = 80$ мм. На основании этих и других данных можно сделать вывод, что если $D_n / D_0 \geq 2,5$, то наличие датчика в поковке существенно не влияет на общее усилие деформирования.

Качественная картина распределения напряжений при доштамповке была получена для осесимметричного и плоскодеформированного случаев путем затекания металла (свинца) в калиброванную щель шириной 1,5 мм.

Вначале были проведены эксперименты для осесимметричного случая.

Для осесимметричного случая были проведены эксперименты по определению напряжений внутри поковки с помощью датчика и поэтому эксперименты по затеканию металла в щель были ограничены одной толщиной заусенца.

Для плоскодеформированного случая эксперименты проводили для двух толщин заусенца тонкого и толстого. Эксперименты были проведены

нами в Университете г.Лидса (Англия) при участии доктора Б.Парсонса и инж.А.Бомонта. Вместо верхнего штампа ставили монолитную плиту с глубокой поперечной щелью. Отштамповывали поковки с заусенцем и от них отрезали сверху часть металла до плоскости заусенца. На оставшейся части боставляли заусенец по всей толщине и нижнюю часть поковки. Заготовки укладывали в нижний штамп и сверху накладывали упомянутую плиту с щелью. Щель устанавливали под прямым углом к продольной оси заготовки. Затем проводили деформирование. Результаты экспериментов показали резкое различие в напряженно-деформированном состоянии между осесимметричным и плоскодеформированным случаями.

Определение очагов деформации и усилий на различных стадиях штамповки осесимметричных поковок,предшествующих доштамповке

Исходными данными для аналитических расчетов усилий в различные моменты штамповки являются размеры и форма очагов пластической деформации. В нашей работе они определялись экспериментально.

Для экспериментов была выбрана гамма экспериментальных поковок двенадцати типоразмеров с захватом наиболее часто встречающихся размерных соотношений. Все поковки были осесимметричной формы в виде цилиндрической ступицы с двумя соосными бобышками на ее торцах. Основные размеры поковок следующие: диаметр ступицы $D_n = 70$ мм; толщина ступицы $B_1 = 24$ мм и $B_2 = 12$ мм; диаметр бобышек $d = 45, 30$ и 15 мм; высота бобышек $h = 30, 15, 16$ и 8 мм.

В экспериментах по изучению формоизменения были получены зависимости текущей высоты бобышек от величины рабочего хода при штамповке в экспериментальных штампах на испытательной машине УИМ-50 свинцовых поковок всех указанных размеров. По полученным зависимостям для каждой экспериментальной поковки были установлены характерные стадии штамповки.

Изучение деформированного состояния проводилось для этих стадий. Методом координатной сетки было выявлено 30 очагов деформации, анализ которых позволил свести их к четырем типам схематизированных очагов деформации.

Схематизированный очаг деформации первого типа наблюдался в начальных стадиях заполнения штампов, когда высота поковки по бобышкам до определенного момента оставалась равной высоте исходной заготовки. При этом процесс штамповки рассматривали как осадку кольцевой заготовки на оправке и по соответствующим формулам определяли нормальные напряжения по контактной поверхности.

Схематизированный очаг деформации второго типа в зависимости от направления течения металла разделяется на четыре области.

Область I соответствует участку заусенца высотой h_3 и ограничивается его наружным диаметром D_3 и диаметром поковки D_n . Нормальные напряжения на контактной поверхности этой области определялись по соответствующим формулам для осадки заусенца.

Область II ограничивается цилиндрами с наружным диаметром D_n и внутренним d и коническими поверхностями, образующая которых соединяет входные участки полостей для бобышек и для заусенца.

Нормальные напряжения на границе между областями I и II равны:

при $D_3 > d_f$

$$(\sigma_z)_{I-II} = \sigma_s \left[1 + \mu \ln \frac{D_3}{d_f} + \frac{\mu}{h_3} (d_f - D_n) \right];$$

при $D_3 \leq d_f$

$$(\sigma_z)_{I-II} = \sigma_s \left[1 + \frac{\mu}{h_3} (D_3 - D_n) \right],$$

где: d_f - диаметр по мостику заусенечной канавки; $\mu = 0,5$ - коэффициент трения.

Область II в общем случае делится поверхностью раздела течения металла на внешний и внутренний участки. Нормальные напряжения на границе очага деформации на внешнем участке равны:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left[\frac{(\sigma_z)_{I-II}}{\sigma_s} + \frac{1}{\mu} \ln \frac{h}{h_3} \right],$$

где: θ - угол между прямолинейными границами очага деформации; h - текущая высота очага деформации.

Область III заключена между основаниями бобышек внутри цилиндра диаметром d . Схема напряженного состояния в ней аналогична кузнечной вытяжке в вырезных бойках.

Область IV соответствует участкам бобышек, где деформация определяется условиями затекания металла в коническую полость при соответствующих напряжениях (σ_r) IV-III на границе областей IV и III.

Напряжения на границе областей III и II определяются по формуле:

$$(\sigma_r)_{III-II} = \sigma_s \left[1 + \frac{(\sigma_z)_{I-II}}{\sigma_s} + \frac{B - 2z}{d} \right],$$

где: B - высота ступицы поковки в данный момент; z - текущая координата.

С учетом граничных условий, заданных последней формулой, нормальные напряжения на внутреннем участке области II равны:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left[1 + \frac{1}{\mu} \ln \frac{h}{h_3} + \frac{(\sigma_r)_{III-II}}{\sigma_s} \right].$$

В схематизированном очаге деформации третьего типа на наружном участке области II происходит осадка кольца высотой h_3 , а на внутреннем - клина высотой h_3 и H .

00698111

В схематизированном очаге деформации четвертого типа на наружном участке области II происходит осадка клина высотой h_2 и H , а на внутреннем — осадка кольца высотой H .

В обоих последних случаях напряжения на границах очагов деформации определяли по соответствующим формулам для осадки кольца и клина.

В завершающих стадиях штамповки после касания бобышкой доньш-ка полости штампа начинается процесс заполнения углов конической полости. В исследованиях этот процесс доводился до оформления на бобышке фаски размером $1,5 \times 1,5$ мм. В данном случае на расстоянии от границы фаски $1,5$ мм в направлении оси поковки нормальные напряжения на торце бобышки $\sigma_z = 2,1 \sigma_s = \text{const}$. Затем σ_z возрастает до наибольшего значения на оси поковки в соответствии с формулами для осадки центрального цилиндрического участка, размеры которого определяли экспериментально по искажениям деформированной координатной сетки.

Для каждой из исследованных стадий штамповки по соответствующим формулам были построены энкры нормальных напряжений на границах очагов деформации и по ним с учетом сил трения определяли деформирующие усилия.

Усилие доштамповки рассчитывали по формуле М.В.Сторожева и С.Б.Кирсановой. Оно было одинаковым для всех исследованных поковок.

Определение работы деформации при штамповке

По расчетным усилиям для отдельных этапов были построены графики "усилие-путь" $P = f(H)$ и по их площади определена работа деформации при штамповке исследованных поковок. Последующее сопоставление расчетных значений величин работы деформации с действительными, определенными по экспериментальным графикам "усилие-путь" показало их сходимость в пределах $(+6,3) - (+12,4)\%$.

Подтвержденные экспериментально расчетные графики $P = f(H)$ затем были перестроены в относительные графики $\frac{P}{\sigma_s b_s} = f\left(\frac{H}{D_n}\right)$.

По площади расположенных под этими графиками определяли значения коэффициентов работы деформации A' , которые оказались практически не зависящими от толщины ступицы поковок.

Как показал анализ полученных результатов, основное влияние на величину A' оказывают размеры бобышек d и h , находящие свое отражение в относительной величине рабочего хода H/D_n . Поэтому величину D_n можно считать определяющим параметром для величины A' .

В результате построения и обработки графиков $A' = f\left(\frac{H}{B_n}\right)$ для всех исследованных поковок была получена следующая зависимость:

$$A' = 2,18 \frac{H}{B_n}$$

На основании этой зависимости была выведена формула для определения работы деформации при штамповке, учитывающая основные параметры поковок: $A = A' F_n B_n D_n = 2,18 H F_n B_n$.

В этой формуле величина рабочего хода H равна разности высот заготовки и ступицы поковки. Значения B_n следует принимать в соответствии с имеющимися в литературе рекомендациями по учету температурно-скоростных условий деформации.

Определение веса падающих частей штамповочного молота

Штамповка на молотах происходит за несколько ударов. За каждый последующий удар поковка осаживается на меньшую высоту. При этом с каждым ударом развиваются большие усилия деформирования, и снижается к.п.д. удара, так как возникает больше потерь на сотрясение шабота, фундамента, упругую деформацию штампа и т.п..

В течение последнего удара развиваются наибольшие усилия деформирования и достигается наименьшая величина осадки на весь процесс штамповки. Последний удар оказывается самым неэкономичным. Учитывая это, можно выдвинуть предположение, что за последний удар должна быть совершена какая-то определенная, скажем экономичная осадка. При этом предполагается, что к.п.д. удара не будет меньше какой-то определенной величины. Для получения экономичной осадки за последний удар молота требуется определенная работа деформирования и соответствующая энергия падающих частей, которая будет заведомо достаточной для получения экономичной осадки за предыдущие удары. Учитывая вышеизложенное, расчет необходимого для штамповки веса падающих частей молота можно вести исходя из последнего удара молота.

Величину работы деформации поковки и заусенца за период последнего удара можно определить по формуле,

$$A_n = \int_{h_{\text{тек.}}}^{h_{\text{осад.}}} P dh_{\text{тек.}}$$

где: P — необходимое усилие деформирования в течение последнего удара молота;

$h_{\text{тек.}}$ — текущее значение толщины заусенца;

$h_{\text{осад.}}$ — величина осадки за последний удар молота.

На основании экспериментальных данных А.В.Ребельский предлагает определять $\Delta h_{\text{осад.}}$ по формуле

$$\Delta h_{3, \text{полн}} = \frac{2,5/75 + 0,001 D_n}{D_n} / \text{мм},$$

где: D_n - диаметр поковки для круглых в плане поковок или приведенный диаметр поковки для удлиненных в плане поковок
 $- D_{np} / D_n = 1,18 \sqrt{E_n} /$.

При определении величины P в функции от $h_{3, \text{тек}}$ следует исходить из размеров очага деформации при доштамповке. Подробно данный вопрос был разобран выше. Величина P вначале была определена по упрощенным формулам.

Определив величину P можно было вычислить величину A_n . Однако более удобно определить ее по упрощенной формуле $A_n = P_{cp} \Delta h_{3, \text{полн}}$, где P_{cp} - среднее усилие деформирования за период последнего удара.

Расчеты фактических значений $P_{кон}$, $P_{кон}$ и A_n показали, что $P_{cp} \approx 0,7 P_{кон}$. Отсюда $A_n = 0,7 P_{кон} \Delta h_{3, \text{полн}}$.

Приравнявая необходимую работу деформирования к энергии, от данной поковки при ударе, выраженной через вес падающих частей молота получим $1,8 \cdot 10^3 G_n = 0,7 P_{кон} \Delta h_{3, \text{полн}}$.

Подставив соответствующие значения $P_{кон}$ и $\Delta h_{3, \text{полн}}$ по формуле А.В. Ребелянского получили:

а) для круглых в плане поковок

$$G_{н,кр} = 3,8 \frac{(75 + 0,001 D_n)}{10^3 D_n} (1 - 0,0005 D_n) \bar{b}_s \left(1,5 + \frac{P_s}{2h_s}\right) (l_s + h_s) 3,14 D_n + (1,9 + \frac{P_s}{h_s} + \frac{D_n}{2h_s}) 0,785 (D_n - 2h_s)^2;$$

б) для простых удлиненных в плане поковок

$$G_{н,уд} = 4,4 \frac{(75 + 0,001 D_n)}{10^3} (1 - 0,0005 D_n) \bar{b}_s \left[\left(1,5 + \frac{P_s}{2h_s}\right) (l_s + h_s) p + (1,86 + \frac{P_s}{h_s} + \frac{b}{14h_s}) (b - 2h_s) l_n \right],$$

где $\bar{b}_s$ - напряжение текучести при температуре штамповки и при скорости испытания на испытательной машине.

В дальнейшем приведенные формулы были уточнены. Вместо осредненного значения P было учтено, что эта величина изменяется в течение последнего удара при штамповке в соответствии с изменением $h_{3, \text{тек}}$, увеличиваясь к концу процесса аналогично изменению на прессах. Влияние скоростного коэффициента на изменение величины $\bar{b}_s$ в течение удара оказывает воздействие в связи со временем удара и, как показывают экспериментальные данные по осадке, может быть осреднено. Максимум усилия возникает в конце удара, перед упругой разгрузкой, а вся кри-

вая усилия монотонно изменяется от минимума до максимума.

Таким образом, усилие P можно вычислить по обычным формулам с учетом скоростного коэффициента.

Усилие P при последнем ударе можно определить по формуле Сто-рожева М.В. и Кирсановой С.Б., заменив в ней h_2 на $h_{2, \text{max}}$.

Приняв величину P по этой формуле, проинтегрировав ее в пре-делах от $h_{2, \text{max}}$ до h_2 , получим

$$A_g = b_s [1,5 (T_s - T_n) \Delta h_{2, \text{max}} + (\frac{b_s T_s}{2} + b_s T_n + 0,005 D_n) \ln(1 + \frac{\Delta h_{2, \text{max}}}{h_2})]$$

Соответственно формулы для определения номинального веса па-дающих частей паровоздушного молота двойного действия будут иметь следующий вид:

а) для круглых в плане поковок:

$$G_0 = 5,6 \cdot 10^{-3} b_s (1 - 0,0005 D_n) \left\{ 3,75 (b_s + \frac{D_n}{4}) (75 + 0,001 D_n^2) + D_n (\frac{b_s^2}{2} + \frac{b_s D_n}{4} + \frac{D_n^2}{50}) \ln \left[1 + \frac{2,5 (75 + 0,001 D_n^2)}{D_n h_2} \right] \right\}$$

б) для простых удлиненных в плане поковок:

$$G_m = 5,6 \cdot 10^{-3} b_s (1 - 0,0005 D_{np}) \left\{ 3,75 (b_s + \frac{D_{np}}{4}) (75 + 0,001 D_{np}^2) + D_{np} (\frac{b_s^2}{2} + \frac{b_s D_{np}}{4} + \frac{D_{np}^2}{50}) \ln \left[1 + \frac{2,5 (75 + 0,001 D_{np}^2)}{D_{np} h_2} \right] \right\} (1 + 0,1 \sqrt{\frac{T_n}{b_{cp}}})$$

Для быстрого определения G_0 и G_m составлена номограмма.

- 0 -

На основе установленной картины течения металла при штампов-ке оказалось возможным дать обоснования к определению основных размеров заусенечной канавки и, в частности, доказать линейный ха-рактер зависимости $h_2 = f(D_n)$.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕКЦИОННОЙ ШТАМПОВКИ ДИСКОВ

Задачи работы в области секционной штамповки дисков следующие:

- 1) Исследование формоизменения и расчет оптимальных размеров исходных заготовок;
- 2) Исследование деформированного состояния;
- 3) Экспериментальное исследование нормальных напряжений на контакт-ных плоскостях;
- 4) Исследование напряженного состояния.

Исследование проводили путем моделирования применительно к поковкам дисков с отношением конечных размеров $\frac{D_k}{H_k} = 6 + 18$. Экспе-рименты проводили на гидравлических прессах усилием 50, 400 и 1300т. Штампы имели отношение наружного пуансона D к центральному d , равное $\frac{D}{d} = 1,55$.

Формоизменение и расчет оптимальных размеров исходных заготовок

Экспериментами было установлено, что зажимы начинают образовываться в начале деформирования заготовки наружным пуансоном и их образованию всегда предшествуют поднутрения, получаемые на верхней торцевой поверхности при обжатии центральным пуансоном. Были построены кривые критических и допустимых или оптимальных степеней деформации заготовок с различными начальными отношениями. На основе кривой оптимальных степеней деформации, с учетом равенства объемов заготовки и поковки, была предложена формула для определения оптимальных отношений размеров исходных заготовок:

$$\frac{D_{0, \text{опт}}}{H_{0, \text{опт}}} = \frac{D_k}{H_k} \left(1 - \frac{\epsilon_{\text{опт}}}{100}\right) \sqrt{1 - \frac{\epsilon_{\text{опт}}}{100}},$$

где: D_0 — начальный диаметр заготовки;
 H_0 — начальная высота заготовки;
 $\epsilon_{\text{опт}}$ — оптимальная степень деформации.

Исследование деформированного состояния

Деформированное состояние изучали с помощью координатной сетки, наносимой на вертикальную диаметральную плоскость образцов из свинца, и с помощью шурупов, которые вставлялись в заготовки из армо железа.

Расчеты фактических степеней деформации в заготовках из свинца были выполнены по двум вариантам:

1. вдоль вертикальных линий деформированной координатной сетки, расположенных на определенных расстояниях от оси заготовки;

2. вдоль условных вертикальных линий, также расположенных на определенных расстояниях от оси заготовки.

Были построены графические зависимости распределения степеней деформации по высоте заготовок для каждого исследуемого отношения поковки диска в зависимости от средней степени деформации.

Исследование контактных нормальных напряжений

Ранее для подтверждения существующих теоретических формул по определению усилий при секционной штамповке определяли лишь суммарные усилия при деформировании каждым пуансоном штампа.

При наших экспериментах были построены эпюры распределения контактных напряжений. Экспериментами выявлены эпюры распределения контактных напряжений для различных отношений $\frac{D_k}{H_k}$. При деформировании центральным пуансоном эпюра распределения напряжений снизу заготовки охватывает большую площадь, чем площадь под центральным пуансоном. Выявлено, что при $\frac{D_k}{H_k} = 1,55$ усилие на центральном пуансоне превышает усилие на наружном пуансоне в 1,22-1,31 раза в зависимости от отношения $\frac{D_k}{H_k}$. Экспериментальные эпюры распределения контактных напряжений значительно отличаются от существующих теоретических.

Теоретический анализ и вывод формул для определения необходимых усилий деформирования

Рассмотрение деформированного состояния под центральным пуансоном позволило выделить отдельные участки с характерным течением металла. Зона раздела участков имеет относительно небольшую толщину. На середине высоты заготовки она имеет перегиб. Действительная форма участков деформации была упрощена и в заготовке намечены четыре расчетных участка. По ним были определены напряжения на нижней контактной плоскости, которые распределяются от осевой линии до $\frac{D}{2} = \frac{d}{2} + 0,41 H_k$ и захватывают площадь, большую площади центрального пуансона.

Затем были получены формулы по распределению нормальных напряжений на участках и построены эпюры. Эпюры были упрощены и по ним получена формула для определения необходимого усилия деформирования:

$$P_k = 6 \left[0,785 \left(1 + 11,2 \pi \frac{D_k}{d + 0,82 H_k} \right) (d + 0,82 H_k)^2 + (0,5d + 0,13 \frac{d}{H_k}) (d - 0,5d H_k) \right]$$

Для определения точности формулы были подсчитаны усилия деформирования по точным эпюрам для поковок дисков с $\frac{D_k}{H_k} = 6; 12$ и 18. Сравнение показало, что усилия деформирования, подсчитанные по приближенной формуле, дают величины, отличающиеся на $\pm 0,2-3\%$ от данных, подсчитанных по точным эпюрам.

При штамповке наружным пуансоном распределение деформаций мало отличается от осадки. Поэтому было принято, что распределение напряжений аналогично осадке. Были получены формулы по распределению контактных напряжений и затем выведена формула

для определения необходимого усилия деформирования:

$$P_k = 6,97 \left\{ 0,92 H_k (D_k - 0,685 H_k) + \left[\left(\frac{D_k - d}{4 H_k} + 1,09 \right) \left(\frac{D_k^2 - d^2}{4} - 0,685 D_k H_k - 0,47 H_k^2 \right) \right] \right\}$$

Исследований способ секционной штамповки дисков приводит к повышенной неравномерности макроструктуры поковки в зоне стыка секций штампа. Кроме этого, способ применим для дисков при $\frac{D_k}{H_k} = 5 \div 18$. При изготовлении дисков с $\frac{D_k}{H_k} < 5$ возникают трудности. Поэтому был предложен новый способ секционной штамповки крупногабаритных деталей, по которому деформирование производят с двух сторон (снизу и сверху).

Для осуществления этого способа была разработана конструкция приспособления, на модели которого способ был опробован путем штамповки алюминиевых образцов. Неравномерность макроструктуры оказалась значительно ниже, чем в случае штамповки в обычном секционном штампе.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ

Задачи работы в области прямого прессования были следующие: 1) экспериментальное исследование характера распределения деформаций в очаге деформации; 2) экспериментальное определение напряжений по контактным поверхностям инструмента и внутри заготовки; 3) исследование напряженного состояния.

Экспериментальное исследование напряженного состояния

Исследование проводили путем моделирования на свинце. Был использован датчик для измерения удельных усилий внутри заготовки, аналогичный примененному при объемной штамповке. Датчик устанавливали в гнезде образца так, чтобы плоскость его большего диаметра совпадала с плоскостью симметрии течения металла. Это позволило измерять напряжения, нормальные к осевой плоскости образца в течение всего процесса прессования.

Экспериментальная установка состояла из контейнера, сменных разъемных матриц с углами $2\gamma = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ и 180° , пуансона с измерительным блоком, центрального датчика (датчика для измерения напряжений внутри заготовки), девяти датчиков контактных напряжений, мессдозы среднего усилия на пуансоне, хромографа пуансона, хромографа центрального датчика и комплекта измерительно-регистра-

рующей аппаратуры. Датчики для замера контактных напряжений на пуансоне были собраны в единый измерительный блок. Прессование проводили в контейнере диаметром 100 мм со степенью деформации $\epsilon_{\lambda} = 1,38$. Процесс прекращали после выхода центрального датчика из матрицы. Запись электрических сигналов датчиков и ходографов производили одновременно на двух осциллографах. При построении графиков учитывали изменение ϵ_{λ} свинца. Испытание образцов, вырезанных из пропрессованных прутков показали, что значение ϵ_{λ} колебалось от 2,4 кг/мм² при скорости деформации, соответствующей входу в очаг, до 2,7 кг/мм² при скорости деформации, соответствующей выходу из очага деформации. Эксперименты позволили определить полное усилие на пуансоне, удельные усилия на контактных поверхностях контейнера, матрицы, пуансона и одновременно удельные усилия внутри заготовки, т.е. получить экспериментальным путем поле напряжений. Все удельные усилия были представлены в масштабе относительного удельного усилия: $n = \frac{\epsilon_{\lambda}}{\epsilon_{\lambda}^{\text{ф}}}$, где $\epsilon_{\lambda}^{\text{ф}}$ — фактическое удельное усилие, зафиксированное измерительным датчиком.

При прессовании через матрицу с углом $2\gamma = 90^\circ$ удельные усилия на пуансоне изменяются по сечению заготовки от максимальных ($n = 4,3$) у края до минимальных ($n = 3,0$) на оси при общем удельном усилии $n = 4,0$. Характер изменения удельных усилий на пуансоне при прессовании со смазкой и без смазки одинаков. С уменьшением высоты заготовки величина удельных усилий несколько уменьшается. Это объясняется уменьшением общего усилия за счет снижения контактного трения по контейнеру. Наиболее сильное уменьшение наблюдается по среднему датчику, наименьшее — по осевому датчику, где величина удельного усилия остается практически постоянной. При прессовании со смазкой кривые удельных усилий имеют более пологий вид и меньшую разницу между показателями среднего датчика и осевого. Удельные усилия на стенках контейнера уменьшаются по мере удаления от пуансона к матрице. Уменьшение удельных усилий больше при прессовании без смазки (от 4,5n до 3,1n), чем при прессовании со смазкой (от 3,4n до 3,0n). Величины удельных усилий в нижней части контейнера около матрицы при прессовании со смазкой и без смазки приблизительно одинаковы. Удельные усилия на образующей матрицы быстро возрастают в начале прессования, а затем остаются постоянными на протяжении всего процесса прессования до прессостатка с высотой $h = 0,2 + 0,3D_k$.

Удельные усилия вдоль образующей матрицы распределяются неравномерно. Максимальное значение наблюдается в верхней части матрицы (без смазки 3,8п , со смазкой 3,0п) и понижается к месту перехода матричной воронки в калибрующий пояс (без смазки 1,2п , со смазкой 1,1п). Эпюра распределения удельных усилий внутри заготовки имеет ряд особенностей. В начальный момент прессования, ввиду того что предварительно была проведена подпрессовка, достигается необходимая максимальная величина, убывающая при дальнейшем прессовании по некоторой кривой. Перегибы кривой соответствовали входу датчика в очаг деформации и выходу из него. Величина удельного усилия, зафиксированная на выходе из очага деформации при прессовании без смазки составляет 1,1п . При прессовании со смазкой характер кривой не меняется, хотя она и имеет более пологий вид. При прохождении центральным датчиком наиболее узкого места (цилиндрического пояса матрицы) на осциллограммах удельных усилий на пуансоне и на матрице отмечался незначительный всплеск, что объясняется изменением величины степени деформации за счет тела датчика. Однако абсолютная величина повышения удельных усилий в этот момент составляла не более $5 \pm 7\%$. Наибольшее различие в величине среднего удельного усилия при прессовании со смазкой и без смазки было в начале процесса, когда наиболее полно сказываются силы трения. Разность между ними в процессе прессования уменьшается примерно в линейной зависимости по ходу пуансона и в конце принимает минимальное значение, которое учитывает трение в очаге деформации.

При прессовании через матрицу с углом $2\gamma = 120^\circ$ было установлено, что характер изменения удельных усилий на пуансоне аналогичен характеру изменения удельных усилий при прессовании с матрицей $2\gamma = 90^\circ$. Эпюра удельных усилий на оси заготовки представляет собой кривую, убывающую от максимального значения до нуля. При общем увеличении удельных усилий на оси заготовки по сравнению с прессованием через матрицу $2\gamma = 90^\circ$ наблюдаются одинаковые значения (1,1п) при выходе из очага деформации. Произошло также сближение удельных усилий при прессовании без смазки и со смазкой. Величина среднего удельного усилия на пуансоне увеличилась.

Прессование через матрицу с углом раствора $2\gamma = 60^\circ$ показало, что общая закономерность распределения удельных усилий на пуансоне по сечению заготовки сохраняется, но величины удельных усилий достигают наибольших значений. Также увеличилось и зна-

чение среднего удельного усилия. Несколько иной характер имеет распределение удельных усилий по образующей матрицы. Нет столь заметного перепада значений удельных усилий у верхнего и нижнего краев матрицы. Величина удельного усилия у верхнего края матрицы наименьшая: для $2\varphi = 90^\circ$ имели без смазки - $3,8 \text{ н}$, для $2\varphi = 120^\circ$ - $3,7 \text{ н}$, а для $2\varphi = 60^\circ$ - $2,6 \text{ н}$. Величина удельного усилия у нижнего края матрицы равна $1,2 \text{ н}$ (без смазки). Распределение удельных усилий на оси заготовки по ходу датчика имеет аналогичный характер, но по величине удельные усилия имеют наибольшие значения.

Экспериментальное исследование деформированного состояния

Для проведения эксперимента была использована установка, состоящая из пуансона, контейнера с внутренним диаметром 50 мм, сменных матриц с углами раствора $2\varphi = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$. Степень деформации была постоянной $\lambda = 1,38$. Образцы были применены из свинца, составные с радиальной координатной сеткой в осевом сечении. После прессования на инструментальном микроскопе производили замер искаженной сетки и вычисляли сдвиговые деформации. При обработке экспериментов применяли способ "наименьших квадратов" с расчетами на машине типа "Вега". Были получены диаграммы распределения сдвиговых деформаций ψ по текущему углу раствора матричной воронки θ . Наибольшая величина сдвиговых деформаций при прессовании со смазкой и без смазки наблюдается около контактной поверхности матрицы. На оси образца сдвиговые деформации были равны нулю.

Распределение сдвиговых деформаций различно по высоте очага деформации. Вблизи верхней границы очага деформации уменьшение сдвиговых деформаций от максимальной величины у контактной поверхности до нуля на оси происходит по линейному закону, т.е. в общем случае можно положить: $\psi = a\theta$. Зона линейного распределения сдвиговых деформаций различна для разных углов раствора матрицы. Она больше при прессовании через матрицу с углом раствора $2\varphi = 60^\circ$, чем при прессовании через матрицы с углами раствора $2\varphi = 90^\circ$ и 120° . Однако на большей части очага деформации сдвиговые деформации распределяются по углу раствора матрицы по некоторой кривой, уравнение которой близко к уравнению вида:

$\psi = a\theta^b$. Смазка не оказывала значительного влияния на закон

распределения сдвиговых деформаций. Расчет на машине "Вега" были получены коэффициенты в уравнениях распределения сдвиговых деформаций по углу раствора матрицы.

Теоретическое определение напряжений при прямом прессовании

Прессование через клиновую область. Рассмотрено плоское равновесие пластической массы, протекающей через клиновую область, ограниченную двумя жесткими стенками, угол между которыми равен 2φ , в полярной системе координат с центром O в точке пересечения образующих стенок.

Компоненты напряжений σ_r , σ_θ и $\tau_{r\theta}$ являются функциями от φ и θ . Для малых углов $\tau_{r\theta}$ является функцией только θ . Для углов $2\varphi > 20^\circ$ напряжение $\tau_{r\theta}$, вообще говоря, существенно зависит от двух параметров θ и φ . Вместе с тем, как показывает рассмотрение координатной радиальной сетки, сдвиговые деформации зависят главным образом от θ . Поэтому можно предположить, что

$$\tau_{r\theta} = f(\theta)$$

Примем, что $\tau_{r\theta} = Ak\theta^2 + Bk\theta$. Уравнение для $\tau_{r\theta}$ должно удовлетворять условию на контактной поверхности $\tau_{r\theta}|_{\theta=\theta_0} = k \cdot n_{\theta\theta} \tau_{r\theta}|_{\theta=\theta_0} = 0$. После подстановки в дифференциальные уравнения равновесия принятой зависимости $\tau_{r\theta} = f(\theta)$ и дифференцирования $\tau_{r\theta}$ по θ , с учетом условия пластичности и дальнейшего интегрирования получены следующие уравнения:

$$\sigma_\theta = -(2Ak\varphi + Bk) \ln \frac{r}{r_0} - 2k;$$

$$\sigma_r = -(2Ak\varphi + Bk) \ln \frac{r}{r_0} - 2k + 2\sqrt{k^2 - (Ak\theta^2 + Bk\theta)^2}$$

При выводе формул мы предполагали, что $\tau_{r\theta} = f(\theta)$ и не зависит от φ . Данное предположение приблизительно отражает действительное течение металла. В действительности распределение $\tau_{r\theta}$ на входе в очаг деформации (при $\varphi = \varphi_0$) близко к линейному от θ и может быть принято по формуле $\tau_{r\theta} = k \frac{\theta}{\varphi}$, а на выходе из очага деформации (при $\varphi = \varphi_0$) зависимость $\tau_{r\theta}$ от θ является квадратичной.

В целях упрощения было принято, что $\tau_{r\theta}$ на выходе из очага деформации линейно зависит от θ . Однако зависимость эта неодинакова на двух участках, делящих угол пополам (возможно и другое подразделение). Если бы сохранялась одинаковая линейная зависимость на всем угле θ , то полагая, при $\theta = \varphi$ $\tau_{r\theta} = k$, при $\theta = \frac{\varphi}{2}$ $\tau_{r\theta} = \frac{k}{2}$. Принимаем, что для участка вблизи оси распределение $\tau_{r\theta} = \frac{(k-Ak)\theta}{\varphi}$.

а для участка на периферии $\tau_{10} = \frac{(k - \Delta k)}{r} \theta$, где Δk - некоторое приращение k , определяемое экспериментально или задаваемое.

Принимаем, что приращение Δk изменяется по линейному закону в зависимости от радиуса r . При $r = r_0$, Δk равно нулю и при $r = r_a$, Δk равно некоторой величине $-\Delta k_{\text{ном}}$. Тогда можно определить условную текущую величину $k_{\text{теп}}$, которая равна:

$$k_{\text{теп}} = \frac{-\Delta k_{\text{ном}}}{(r_0 - r_a)} r - \frac{-\Delta k_{\text{ном}}}{(r_0 - r_a)} r_0 + k$$

Положим, что $\frac{-\Delta k_{\text{ном}}}{(r_0 - r_a)} = A^*$, тогда для τ_{10} имеем

$$\tau_{10} = (A_1^* - A_2^* + k) \frac{\theta}{r}$$

Полученное выражение для τ_{10} является функцией от r и от θ .

Подстановка последнего значения τ_{10} в уравнения равновесия после преобразований даст два следующих уравнения

$$\partial b_z = \frac{1}{r} \left[\sqrt{4k^2 - 4(A_1^* - A_2^* + k)} + \frac{A_1^* - A_2^* + k}{r} \right] D r;$$

$$\partial b_\theta = \left[-A_1^* - 2(A_2^* - A_1^* + k) \right] \frac{\theta}{r} d\theta$$

Прессование через коническую матрицу. Было принято, что $\tau_{10} = A k \theta^2 + B k \theta$, где: A и B - постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально в зависимости от угла раствора матричной воронки 2γ . На поверхности конуса примем касательные напряжения равными: $\tau_{10\text{ном}} = k$. Подставляя выражение τ_{10} с учетом $b_0 = b_z$ в уравнения равновесия и пластичности, после дифференцирования τ_{10} по θ , интегрирования и определения произвольных функций получим:

$$b_\theta = (-2Ak\gamma + Bk + k \cot \gamma) \ln \frac{r}{r_0} - b_z$$

$$b_z = (-2Ak\gamma + Bk + k \cot \gamma) \ln \frac{r}{r_0} - b_z + \sqrt{3} [k^2 - (Ak\theta^2 + Bk\theta)^2]$$

Определение полного усилия при прессовании из цилиндрического контейнера через коническую матрицу с цилиндрическим пояском. Полное усилие деформирования для прессования через коническую матрицу без учета контейнера и выходного калибрующего пояска можно получить, просуммировав напряжение b_z по сферической поверхности при $r = r_0$.

Формула для определения усилия прессования из контейнера через коническую матрицу с цилиндрическим пояском получили следующий вид:

$$P = \left\{ 0,6 b_z [(2A\gamma + B + \cot \gamma) \ln \frac{r}{r_0} + 0,5] + b_z \frac{4MP}{D} + b_{z3} \frac{2F}{D} \right\} \pi$$

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана экспериментально-теоретическая методика исследования процессов штамповки и прессования, которая заключается:
а) в экспериментальном определении особых зон - очагов интенсивной пластической деформации; б) в установлении характерных зависимостей для размеров этих зон или для распределения деформаций в них; в) в установлении теоретической модели деформированного и напряженного состояния; г) в подтверждении полученных результатов непосредственными измерениями напряжений по очагу деформации. Данная методика была применена для исследования ряда процессов штамповки и прессования.
2. Исследовано деформированное состояние в процессе доштамповки поковок. Определен очаг деформации и соотношения его размеров при осесимметричном и плоском деформированном состояниях. При определении уточненных размеров очага деформации применена разработанная методика, позволившая получать большие степени деформации за большое число малых деформаций, производимых при одинаковых условиях для течения металла в очаге деформации.
3. Исследовано теоретически и экспериментально напряженное состояние при доштамповке для осесимметричного и плоского деформированного состояния.
4. Исследовано экспериментально деформированное состояние с определением очагов деформации на различных стадиях штамповки осесимметричных поковок.
5. Исследовано экспериментально и теоретически напряженное состояние на различных стадиях штамповки осесимметричных поковок, а также проведен расчет работы деформации при штамповке.
6. Получены формулы для определения усилий при штамповке на прессах и веса падающих частей молота при штамповке на молотах.
7. Получены новые данные к обоснованию выбора основных размеров заусенечной канавки.
8. Исследовано формоизменение металла заготовки при секционной штамповке (осадке) дисков, на основе чего и предложен метод расчета оптимальных размеров исходных заготовок.
9. Исследовано деформированное состояние при секционной штамповке дисков и сопоставлено с обычной осадкой.
10. Установлены экспериментально очаги пластической деформации при деформировании центральным и наружным пуансонами при секционной штамповке дисков.

11. Исследовано экспериментально и теоретически напряженное состояние при секционной штамповке дисков. Получены формулы для определения усилий при деформировании центральным и наружным пуансонами. Определена зависимость отношений размеров пуансонов от отношений конечных размеров поковок дисков, при которых наступает равенство усилий, действующих на центральном и наружном пуансонах.

12. Предложен и опробован новый способ секционной штамповки дисков, который обеспечивает повышение однородности макроструктуры и расширяет область применения секционной штамповки дисков.

13. Исследовано экспериментально и теоретически напряженное состояние при прямом прессовании через коническую и клиновую матрицы с учетом нелинейного характера распределения касательных напряжений по углу раствора матрицы.

14. Исследовано деформированное состояние при прессовании через коническую матрицу с использованием радиальной сетки и установлением зависимости распределения угловых деформаций сетки по углу раствора матрицы.

15. Для экспериментального исследования напряжений в очаге деформации создан датчик для регистрации напряжений внутри поковки в процессе деформации.

16. Результаты исследований по секционной штамповке использованы при разработке и внедрении процесса на Невском машиностроительном заводе имени В.И.Ленина и при изготовлении дисков для завода "Экономайзер". Результаты исследований по штамповке в открытых штампах вошли в нормативные материалы. Результаты всех исследований используются в учебном процессе и вошли в учебную литературу для ВУЗов.

17. Разработанная экспериментально-теоретическая методика была использована также для исследования процессов открытой прошивки и высадки фланцев на трубных заготовках.

- 0 -

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Е.И.СЕМЕНОВ. Об очаге деформации при штамповке в открытых штампах. Сб. трудов МВТУ им. Баумана, "Машины и технология обработки металлов давлением", № 40, 1955.

2. Е.И.СЕМЕНОВ. Об определении необходимого для штамповки номинального усилия кривошипного горячештамповочного прессы. Сб. трудов МВТУ им.Баумана, "Машины и технология обработки металлов

давлением", № 42, 1955.

3. Е.И.СЕМЕНОВ. К вопросу постановки эксперимента по пластическому деформированию на свинце. Сб.трудов МВТУ им.Баумана, "Машины и технология обработки металлов давлением", № 79, 1957.

4. М.В.СТОРОЖЕВ, Е.И.СЕМЕНОВ, С.Б.КИРСАНОВА. Уточнение формы очага деформации и определение усилия при штамповке. Ж. "Вестник машиностроения", №4, 1959.

5. Е.И.СЕМЕНОВ. Определение усилий при штамповке в открытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах и веса падающих частей молота при штамповке на молотах. ЦИТЭИН, ПНТПО, тема 3, выпуск 17, № М-61-506/17, 1962.

6. С.А.СКОРОДУМОВ, Е.И.СЕМЕНОВ. Расчет исходных заготовок при секционной штамповке дисков. Ж. "Кузнечно-штамповочное производство", № 12, 1964.

7. С.А. СКОРОДУМОВ, Е.И.СЕМЕНОВ. Исследование деформированного состояния при секционной штамповке дисков. Ж. "Кузнечно-штамповочное производство", № 10, 1965.

8. E.I.SEMJENOW. Die rechnerische Ermittlung der für das Schmieden im Gesenck auf Kurbelpressen erforderlichen Kräfte und der Bargewichte beim Gesenkschmieden unter Hammern. "Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Otto von Guericke", N 1/2, 1966.

9. Е.И.СЕМЕНОВ, В.Г.КОНДРАТЕНКО. Установка для определения напряжений внутри поковки при штамповке в открытых штампах. Ж. "Вестник машиностроения", №4, 1966.

10. Е.И.СЕМЕНОВ. Определение веса падающих частей штамповочного молота Ж. "Кузнечно-штамповочное производство", № 8, 1966.

11. Е.И.СЕМЕНОВ, С.А.СКОРОДУМОВ. Определение усилий деформирования при секционной штамповке дисков. Ж. "Вестник машиностроения", №12, 1966.

12. С.А.СКОРОДУМОВ, Е.И.СЕМЕНОВ. Экспериментальное исследование контактных напряжений при секционной штамповке дисков. Сб.трудов ЦНИИТМАШ, № 63, 1966.

13. E.I.SEMENOV. Stanoveni sil pusobicich pri zapustkovem kovani. "Strojirenstvi", N 11, 1967.

14. Е.И.СЕМЕНОВ. Вес падающих частей штамповочного молота. Справочник "Ковка и объемная штамповка стали", т. I, Машиностроение, 1967г.

15. Е.И.СЕМЕНОВ, В.Г.КОНДРАТЕНКО. Напряженное состояние и определение усилий при штамповке осесимметричных поволоков. Ж. "Вестник машиностроения", № 12, 1968.

16. С.А.СКОРОДУМОВ, Е.И.СЕМЕНОВ. Экономичный процесс секционной штамповки крупных дисков. ГОСНИТИ, ЦНТПО, № 5-68-1264/73, 1968.

17. Е.И.СЕМЕНОВ, В.К.ЕФРЕМОВ. О напряженном состоянии металла при прямом прессовании. Ж. "Вестник машиностроения", №5, 1969.

18. E.I.SEMJENOW. Untersuchung des Spannungs und Deformationszustands beim Gesenkschmieden und Vorwärtsfliesspressen. "Fertigungstechnik und Betrieb", N 11, 1969.

19. Е.И.СЕМЕНОВ, В.К.ЕФРЕМОВ. Определение напряжений внутри заготовки при прямом прессовании. Ж. "Известия ВУЗов.Машиностроение", № 3, 1970.

20. Е.И.СЕМЕНОВ, С.А.СКОРОДУМОВ. Технология секционной штамповки. Материалы 3-ей Всесоюзной научно-технической конференции "Научные основы технологии и прогрессивные технологические процессы в машино- и приборостроении", МВТУ им.Баумана, 1970.

21. E.I. SEMJENOW. Stufenweises Abschmieden von Scheiben. "Der Maschinenbau", 19, Heft 5, 1970.

22. Е.И.СЕМЕНОВ, С.А.СКОРОДУМОВ. Способ секционной штамповки крупногабаритных деталей. Авторское свидетельство № 343750, Бюлл. № 21, 1972.

23. Е.И.СЕМЕНОВ. Ковка и объемная штамповка. Учебник для ВУЗов. Высшая школа, 1972.