



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»  
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-01

Факультет

Е

Оружие и системы вооружения

шифр

наименование

Кафедра

Е4

Высокоэнергетические устройства автоматических систем

шифр

наименование

## РЕФЕРАТ

Обзор методов и результатов исследования напряженно-деформированного  
состояния заготовки при образовании полостей выдавливанием

Выполнил:

студент гр. Е1М31

Тягин А.С.

Проверил:

Нестеров Н.И.

г. Санкт-Петербург,

2018 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Процесс выдавливания полостей	4
2 Метод делительных сеток	6
3 Поляризационно-оптический метод	9
3.1 Метод оптически чувствительных покрытий	13
4 Исследования НДС заготовки при образовании полостей с плоской скругленной боковой поверхностью при помощи метода сеток и метода твердости	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	29

## ВВЕДЕНИЕ

Теория обработки металлов давлением позволяет оценить экономическую целесообразность принятого способа деформации, выявить влияние условий обработки на свойства получаемых изделий, определить силовые и энергетические параметры процесса и указать пути их рационального изменения, дает возможность управлять процессом обработки с точки зрения улучшения способности металлов пластически деформироваться. Знание закономерностей обработки металлов давлением помогает выбирать наиболее оптимальные режимы технологических процессов, требуемое основное и вспомогательное оборудование и технически грамотно его эксплуатировать. Перспективным способом получения полостей является процесс обработки металла давлением – выдавливание (экструзия) металла.

Актуальность исследования процесса выдавливания заключается в том, что производство выдавливание профилей сложной формы и сечений часто оказывается более экономичным процессом, чем штамповка их с последующей механической обработкой. Это объясняется тем, что выдавливанием можно получить изделия требуемых размеров с малыми допусками и тем самым сократить до минимума последующую холодную обработку заготовки.

## 1 Процесс выдавливания полостей

В настоящее время существуют технологии, обеспечивающие получения полостей любой сложности, основным способом является обработка резаньем. Основным недостатком резанья является низкий КИМ, а также в некоторых случаях повышенная трудоемкость. Перспективным способом получения полостей является процесс обработки металла давлением – выдавливание (экструзия) металла.

Выдавливание – это операция обработки металла давлением, заключающаяся вытеснением материала заготовки в полость ручья штампа. Суть способа заключается в том, что полость штампа или пресс – формы формируется внедрением пуансона. Этот способ обеспечивает точность размеров по 8 – 11 квалитетам. Шероховатость выдавливаемой поверхности составляет 0,008 – 0,016 мкм.

Полость – замкнутое пространство, в котором формируется деталь.

Выдавливанием получают гильзы, стаканы и другие детали из сталей и цветных металлов и сплавов.

Образование полостей методом выдавливания имеет следующие преимущества:

1. Высокая производительность по отношению других технологий образования полостей в заготовке;
2. Отходы материала уменьшаются, увеличивается КИМ в отличие от других технологий образования полостей в заготовке;
3. При выдавливании не происходит перерезания волокон материала;
4. Стойкость инструмента изготавливаемого методом выдавливанием в 2 – 6 раз больше, чем у инструмента изготовленного резаньем;
5. Выдавливание позволяет формировать полости сложной формы (полости с винтовой плоскостью).

Недостаток метода выдавливания:

1. Большие удельные силы, действующие на инструмент, которые снижают стойкость инструмента.

Процесс выдавливания относится к первой группе классификации Корнеева. В очаге пластической деформации преобладают сжимающие напряжения во всех направлениях, и поэтому у процесса выдавливания наибольшая предельная деформация из всех процессов.

## 1 Метод твердости

Метод измерения твердости основан на предположении о том, что между твердостью деформированного металла  $H$  и интенсивностью напряжений  $\sigma$ , при его деформировании существует однозначная функциональная зависимость. Предположение о существовании такой функциональной зависимости было подтверждено многими исследователями.

Таким образом, если заранее установить для исследуемого металла функциональную связь между его твердостью  $H$  и степенью деформации  $\varepsilon_i$ , а следовательно, и интенсивностью напряжений  $\sigma_i$ , то по замеренной твердости в исследуемых зонах деформированной заготовки из данного металла можно судить об интенсивностях деформаций и напряжений в соответствующей стадии формоизменения.

При исследовании напряженно-деформированного состояния используют различные методы определения твердости. Выбор метода измерения твердости зависит от размеров исследуемой модели или области пластической деформации, степени неоднородности; деформаций и т.п. Условия проведения испытаний по измерению-твердости определены ГОСТ 9012-59 (по Бринеллю), ГОСТ 9013-59 (по Роквеллу) и ГОСТ 2999-75 (по Виккерсу). На рисунке 1 изображены инденторы для каждого из метода.

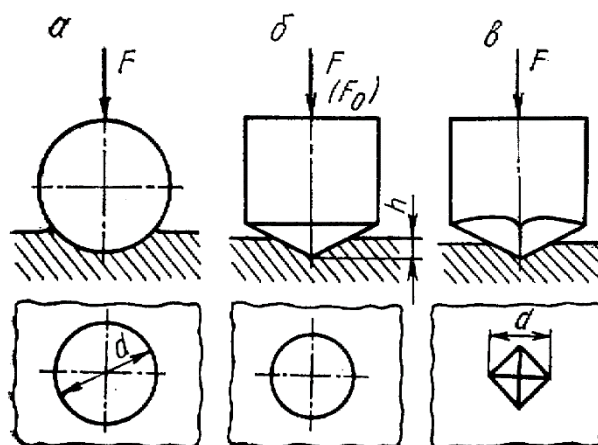


Рисунок 1 – Инденторы: а) индентор по Бриннелю, б) индентор по Роквеллу, в) индентор по Виккерсу

Методика исследования напряженно-деформированного состояния металла одинакова для любых способов измерения твердости.

По результатам испытания металла на растяжение или сжатие строится диаграмма зависимости  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ . При испытании на сжатие необходимо принять меры для исключения влияния сил трения на контактных поверхностях. Для этого можно использовать, например, цилиндрические образцы с выточками на торцах, заполняемые во время испытания густой смазкой.

После испытания на растяжение образцы разрезают по диаметральному сечению и в различных сечениях шейки измеряют твердость. Степень деформации в данном сечении определяется выражением

$$\epsilon_i = \ln \frac{d_i}{d_0},$$

где  $d_i$  – диаметр шейки в данном сечении;

$d_0$  — диаметр образца до испытания.

При испытании на сжатие необходимо осадить несколько образцов с разными степенями деформации и выполнив несколько замеров твердости в

диаметральном сечении, определить ее среднее значение для каждой степени деформации. Степень деформации в этом случае определяется формулой

$$\varepsilon_i = \ln \frac{h}{h_0},$$

где  $h$  и  $h_0$  – высота образца соответственно после и до осадки.

По результатам замеров твердости строят кривые  $H = f_1(\varepsilon_i)$  - изосклеры. Изосклеры – замкнутые кривые линии на поверхности, соединяющие точки, которые имеют близкие или одинаковые значения твердости. На рисунке 2 изображены изосклеры.

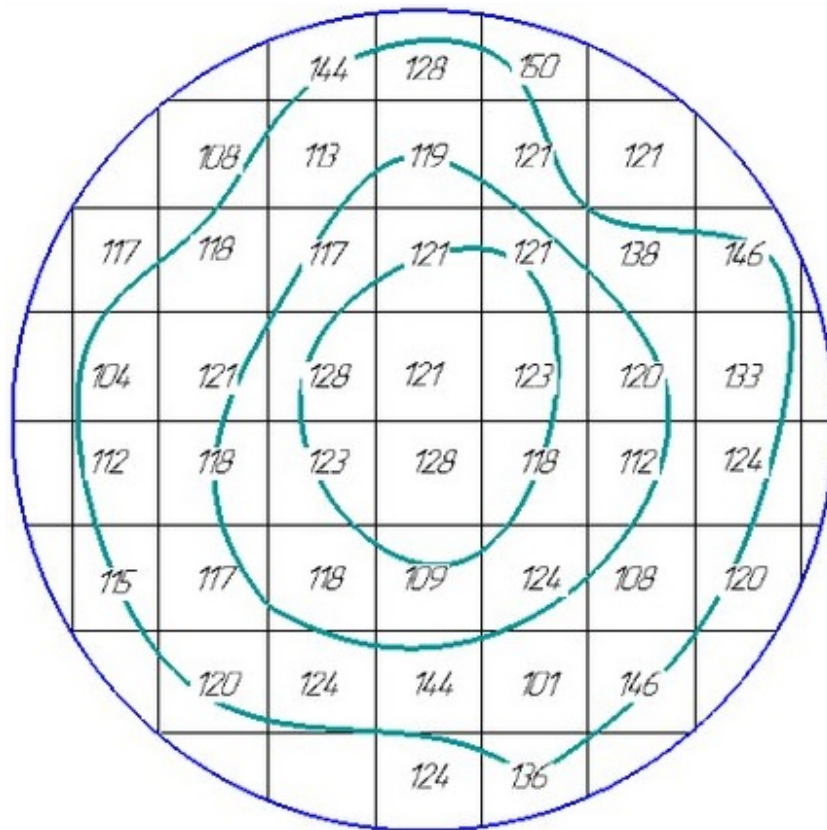


Рисунок 2 – Линии изосклер на поверхности торца осаженной заготовки

Имея указанные зависимости и измерив, твердость деформированной заготовки в интересующих зонах, можно определить величины интенсивностей напряжений и деформаций в этих зонах.



Детального анализа напряженно-деформированного состояния металла с помощью этого метода выполнить нельзя, однако в силу сравнительно небольшой трудоемкости он находит применение в экспериментальных исследованиях в тех случаях, когда определение двух параметров напряженно-деформированного состояния – интенсивностей деформаций  $\epsilon_i$  и напряжений  $\sigma_i$  – достаточно для решения поставленных задач.

К таким исследованиям относятся определение границ очага деформации, если он занимает только часть объема деформируемого тела, а также определение линий равного уровня напряжений и деформаций, но объему очага деформации.

### 3 Поляризационно-оптический метод

Поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости) основан на использовании различных оптических явлений в некоторых прозрачных материалах, которые выбираются в качестве модели исследуемого материала. При просвечивании таких материалов поляризационным светом возникают оптические явления, которые позволяют связать наблюдаемую картину с механическим состоянием тела, т.е. определить упругие контактные напряжения в инструменте из прозрачного оптически активного материала. В качестве оптических чувствительных материалов моделей применяют материалы на основе органического стекла, эпоксидных смол, поликарбоната и др. Распределение напряжений на контактной поверхности инструмента соответствует распределению напряжений на контактной поверхности деформируемого тела.

На рисунке 3 приведена принципиальная схема прибора (полярископа) для исследования напряженного и деформированного состояний деформируемого тела данным методом.

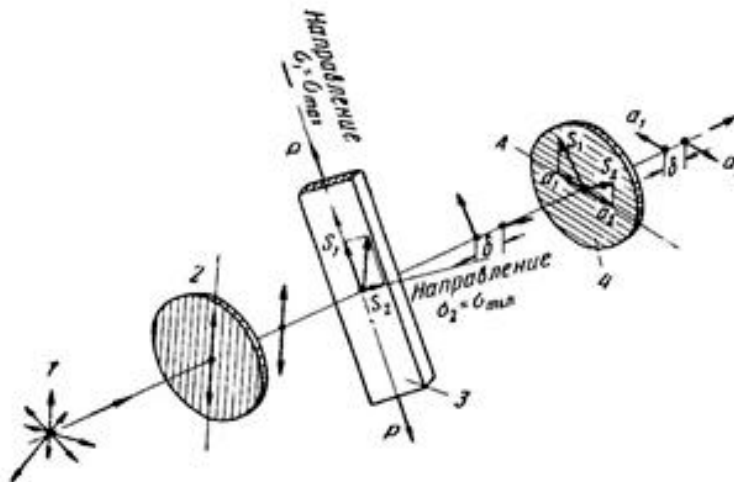


Рисунок 3- принципиальная схема полярископа 1 – источник света; 2 – поляроид; 3 – модель в виде пластины из прозрачного материала, нагруженная по периметру; 4 – второй поляроид или анализатор.

Если две световые волны  $S_1$  и  $S_2$  распространяются с различными скоростями, то после прохождения через модель они имеют разность хода  $\delta$ , которому соответствует разность фаз этих волн

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} t (n_1 - n_2),$$

где  $\lambda$  - длина световой волны;  $t$  - толщина модели;  $n_1, n_2$  - коэффициенты преломления света вдоль главных осей (направлений главных напряжений). Существует связь между оптическими и механическими характеристиками прозрачного материала модели (то есть между скоростями распространения света в теле и напряжениями в нем) в виде уравнений Неймана

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0 + C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \\ V_2 &= V_0 + C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\},$$

где  $V_1, V_2$  - скорость света после деформации тела по направлениям главных напряжений соответственно;

$V_0$  - скорость распространения света в теле в недеформированном состоянии;

$C_1, C_2$  -оптико-механические константы материала и длины волны света соответственно.

Из уравнений Неймана с учетом зависимости для определения разности хода можно вывести основной закон фотоупругости, в котором линейно связаны оптический эффект и разность главных напряжений.

$$\delta = C_\sigma t (\sigma_1 - \sigma_2),$$

где  $C\sigma$  - коэффициент оптической чувствительности по напряжениям;

$\sigma_1, \sigma_2$  - главные напряжения в плоскости модели.

Далее два луча света  $S_1$  и  $S_2$ , имеющие разность хода, проходят через второй поляризатор (анализатор), плоскость поляризации которого перпендикулярна плоскости поляризации первого поляризатора (горизонтальная плоскость поляризации). После анализатора остается только часть интенсивности лучей ( $S_1'$  и  $S_2'$ ) (проекции на плоскость поляризации анализатора). Так как лучи  $S_1'$  и  $S_2'$  лежат в одной плоскости и имеют разность хода  $\delta$ , они начинают интерферировать друг с другом. Если фазы этих волн совпадают, интенсивность света возрастает, если не совпадают - интенсивность света убывает и может исчезнуть совсем. Получается интерференционная картина. Одноцветные полосы на экране полярископа, проходящие через изображение модели, называют изохорами, которые являются геометрическим местом точек с одинаковой разностью главных нормальных напряжений. На экране видна модель, покрытая разноцветными полосами. В некоторых точках неоднородно напряженной модели направление одного из главных нормальных напряжений совпадает с плоскостью поляризации поляроида 2, тогда луч света, проходя через модель, не будет разлагаться на два луча, а сохранит свою плоскость поляризации. Поскольку у него на пути к экрану стоит скрещенный поляриод, то этот луч гасится. На экране будут видны темные полосы. Темные полосы на экране полярископа, проходящие через изображение модели, называются изоклинами, являющимися геометрическим местом точек с одинаковым направлением главных нормальных напряжений. Физические явления поляризации света и искусственного двойного лучепреломления, которые изложены выше (метод фотоупругости), также положены в основу метода фотопластичности, который позволяет исследовать механизм пластической деформации: он позволяет получать экспериментальные

данные о распределении напряжений, деформаций и скоростей деформаций в макрообъемах сплошной среды, используя достижения теории пластичности и феноменологической реологии. В основе метода лежит эффект двойного лучепреломления, который проявляется в некоторых прозрачных материалах при возникновении в них напряжений и деформаций. При просвечивании таких материалов поляризованным светом возникают оптические явления, позволяющие связать наблюдаемую картину с механическим состоянием тела. Применение данного метода связано с проблемой создания материалов, обладающих определенным комплексом оптико-механических свойств. Однако моделирование пластических деформаций (фотопластичность) до сих пор сдерживается из-за отсутствия соответствующих материалов.

Основные требования, предъявляемые к фотопластичным материалам, которые могут быть использованы в данном методе: механическая и оптическая однородность; высокая пластичность; соответствие реологического поведения материала модели и реологическому поведению натуры; наличие определенной связи между оптическим эффектом (допустим, линейной разностью хода  $\delta$  и напряжением  $\sigma$ , деформациями  $\varepsilon$ , скоростями деформаций  $\zeta$ , температурой  $t$  т.е.  $\delta = f(\sigma, \varepsilon, \zeta, t)$ . Для изготовления фотопластичных моделей используют целлулоид, полистирол, поликарбонатную смолу, нитрат целлюлозы и другие высокомолекулярные аморфные соединения. Для изготовления фотопластичных моделей используют целлулоид, полистирол, поликарбонатную смолу, нитрат целлюлозы и другие высокомолекулярные аморфные соединения.

### 3.1 Метод оптически-чувствительных покрытий.

Трудностей моделирования и переноса результатов моделирования с фотопластичной модели на натуру удастся избежать, применяя новое экспериментальное направление в фотопластичности, основанное на использовании метода прозрачных оптически чувствительных покрытий (слоев или пленок), наклеиваемых на поверхность реального пластически-

деформируемого металлического объекта. Этот метод получил название как метод оптически чувствительных покрытий. Согласно этому методу, на поверхность исследуемого объекта наносится тонкий слой оптически чувствительного материала, что позволяет применить поляризационно-оптический метод для изучения непрозрачного объекта. Основные положения метода для решения упругих задач были разработаны в 30-х годах XX в., однако широкое применение метода стало возможным только в 60-х годах благодаря появлению новых полимерных материалов, которые обладают необходимыми оптикомеханическими свойствами и сравнительно просты в использовании П.И.Полухин, В.К.Воронцов, Р.М.Голубчик и др. использовали метод оптически чувствительных покрытий для исследования напряженно-деформированного состояния заготовки при винтовой прокатке, выбрав в качестве модели реальный очаг деформации промышленного прошивного стана, который ограничен валками, линейками или роликами рисунок 4.

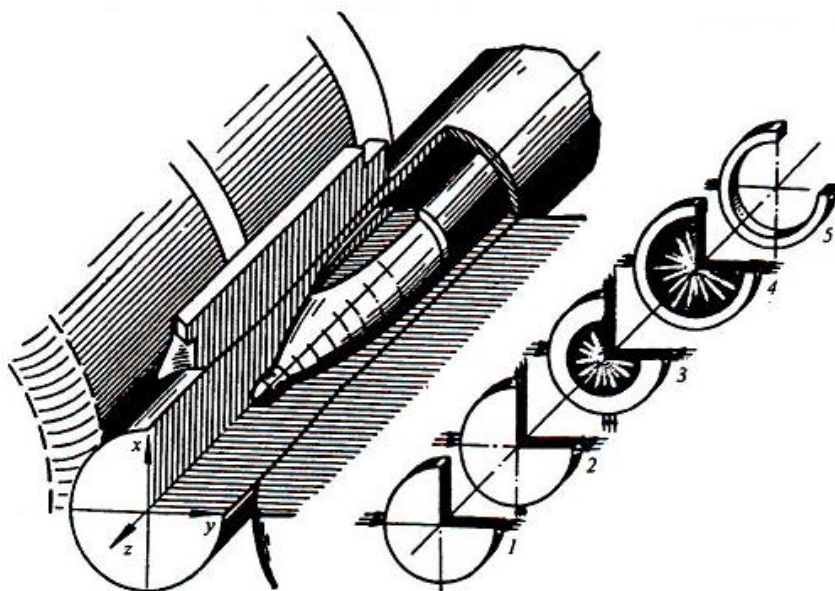


Рисунок 4- схема моделирования процесса винтовой прокатки при оптическом методе исследования

В результате проведенных авторами исследований было установлено, что в осевой зоне заготовки в направлении приложения нагрузки  $P$  по оси  $oz$

действуют напряжения сжатия ( $-\sigma_z$ ), а в перпендикулярном направлении по оси  $oy$  действуют растягивающие напряжения ( $+\sigma_y$ ). С переходом от деформаций упругих к пластическим и с увеличением степени деформации диска величина растягивающих напряжений увеличивается, следовательно, увеличивается и коэффициент жесткости схемы напряженного состояния  $k_{ж}$ , т.е. напряженное состояние становится менее благоприятным и опасным с точки зрения возможного нарушения сплошности заготовки.

На рисунке 5 изображены изохромы полученные с помощью ОЧП при внедрении пуансона с плоским (а), сферическим (б) и оживальным (в) торцами.

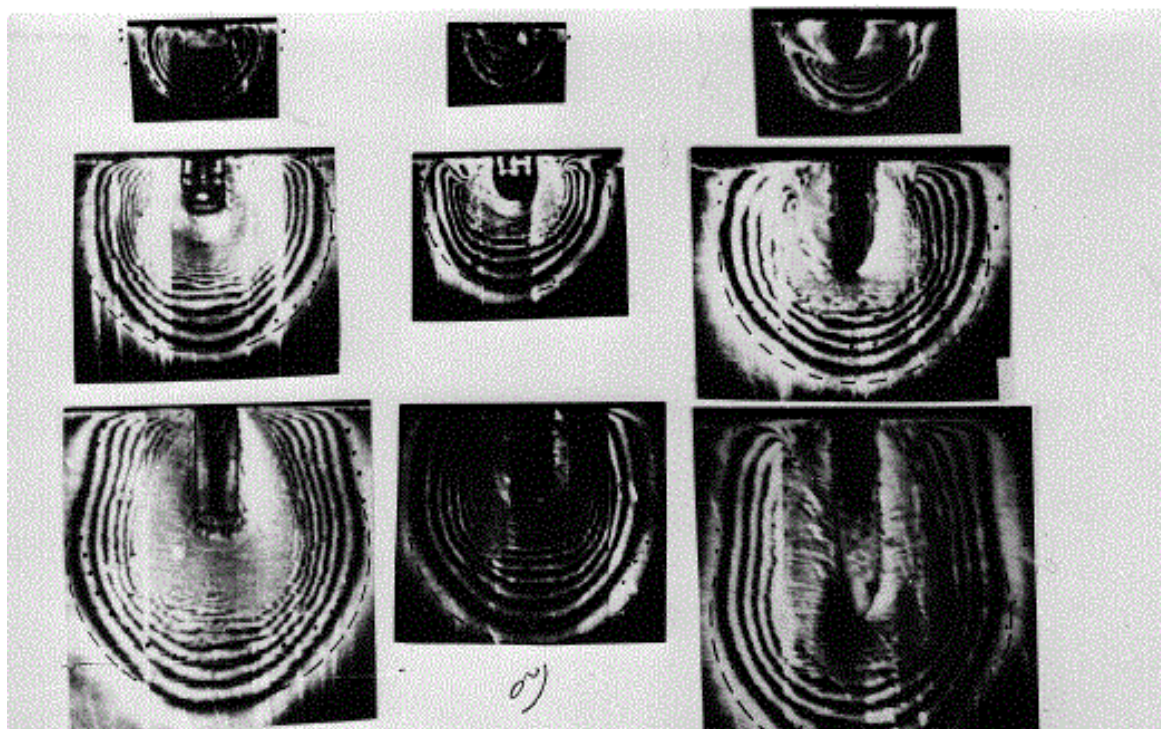


Рисунок 5 - Изохромы полученные с помощью ОЧП при внедрении пуансона с плоским (а), сферическим (б) и оживальным (в) торцами.

К достоинствам метода оптически чувствительных покрытий можно отнести;

- возможность исследования напряженно-деформированного состояния в упругой и пластической областях и прямого наблюдения за разрушением в



процессе его развития;

- возможность проведения исследований на реальных конструкциях (мосты, станины) при обычных и повышенных (до 650°C) температурах, а также в местах, недоступных для человека, с использованием телеметрирования.

Однако этот метод имеет и недостатки;

- невозможность исследования напряжений и деформаций внутри детали;
- затрудненность точного определения компонент напряженного состояния в пластической области. Хотя некоторые материалы покрытий выдерживают значительные упругие деформации (до 60%).



### 3 Результаты исследования НДС заготовки при образовании полостей с плоской скругленной боковой поверхностью при помощи метода сеток и метода твердости

Необходимость исследования НДС материала заготовки при внедрении призматического пуансона продиктована отсутствием сведений, необходимых для обобщения и разработки научных основ технологии. В частности, важно знать форму и развитие ОПД, распределение параметров деформации и напряжений, уметь определять неблагоприятную зону с точки зрения разрушения материала заготовки. Объектом этого частного исследования служили цельные и составные призматические заготовки поперечными размерами 20x28 и 17x38 мм и высотой 50 мм из стали 20;5ХНМ и 4Х5МФС, а также цельные цилиндрические заготовки из стали 10. Составные заготовки имели две половинки с разъемом вдоль и поперек большей стороны (соответственно продольное и поперечное меридиональное сечение). На одну из половинок заготовки царапанием нанесена сетка размерами 0,5x0,5 мм. Прямоугольные в плане заготовки деформированы призматическими пуансонами с размерами 12x12 мм, 8,5x19 мм, 5.5x26,5 мм, 5.5x28 мм с плоскими и цилиндрическими торцами. Отношение длины пуансона  $2a$  к его  $2b$  находилось в диапазоне от 1 до 5. У части пуансонов боковая поверхность заготовок скруглена радиусом равным половине ширины пуансона. Цельные цилиндрические заготовки диаметром 35 мм и высотой 50 мм деформированная испытательной машине ГМС-50 пуансонами, имеющими одинаковое поперечное сечение в виде квадрата, прямоугольника, треугольника, креста и шлица изображенные на рисунке 6.

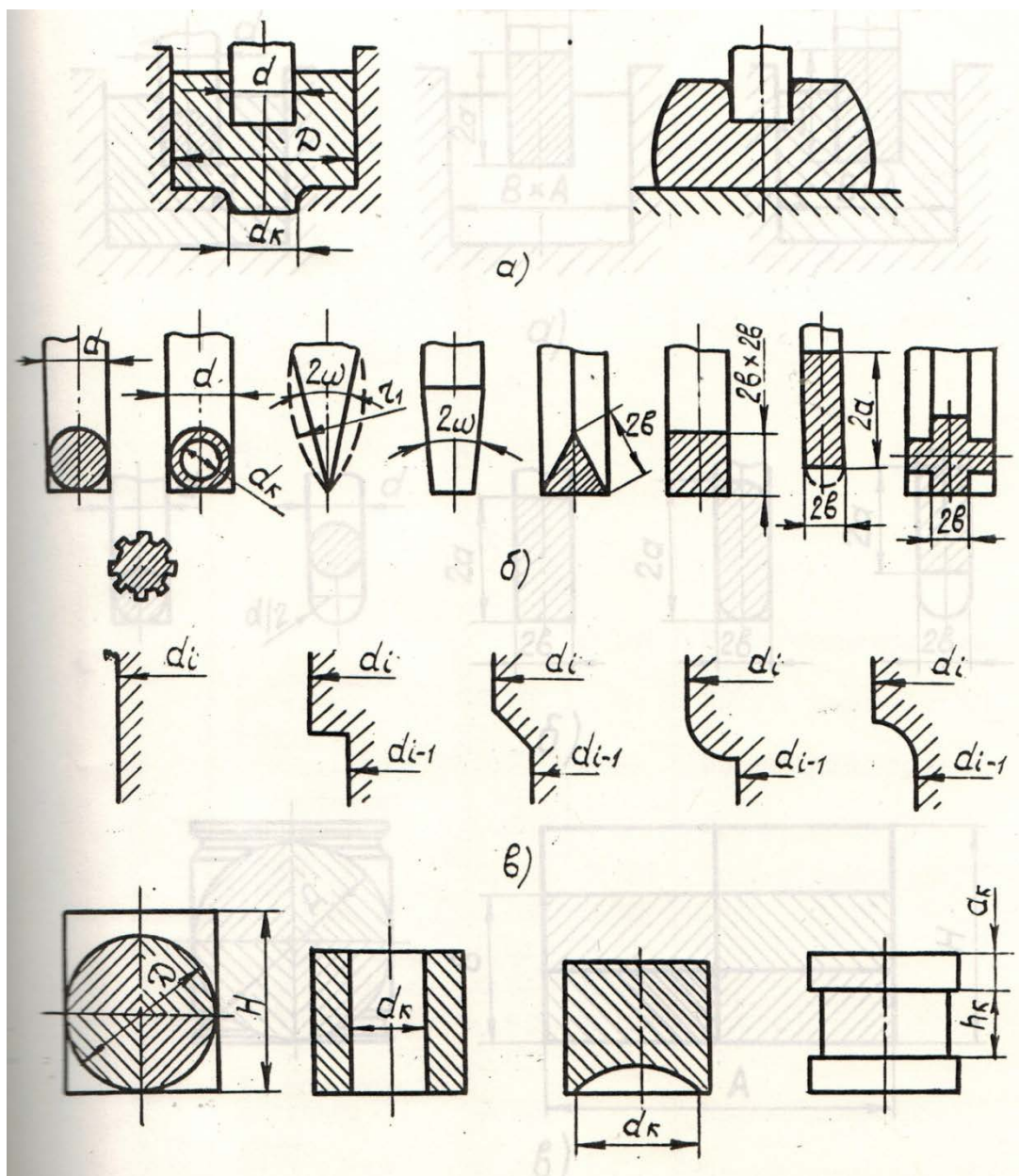


Рисунок 6 - Пуансоны имеющие одинаковое поперечное сечение в виде квадрата, прямоугольника, треугольника, креста и шлица

Призматические заготовки деформированы на механическом прессе К2130Б по схеме закрытого выдавливания. Заготовки были из легированных сталей и стали 20.

Параметры деформированного состояния определены методом сеток и твердости. Экспериментальным исследованием установлено, что при образовании прямоугольной полости в заготовке формируется ОПД форма и развитие которого зависит от стадии деформирования, размеров заготовки, а

также поперечных размеров и торца пуансона. В процессе перемещения призматического пуансона в полу бесконечном пластическом теле динамика роста ОПД подобна рассмотренной при осесимметричной и плоской деформации, т.е. размеры ОПД вначале изменяются интенсивно, а затем они стабилизируются. Форма ОПД соответствует первоначальной и арктически не искажается. При деформированной пуансоном с поперечным размером  $a > 1$  как на рисунке 7.

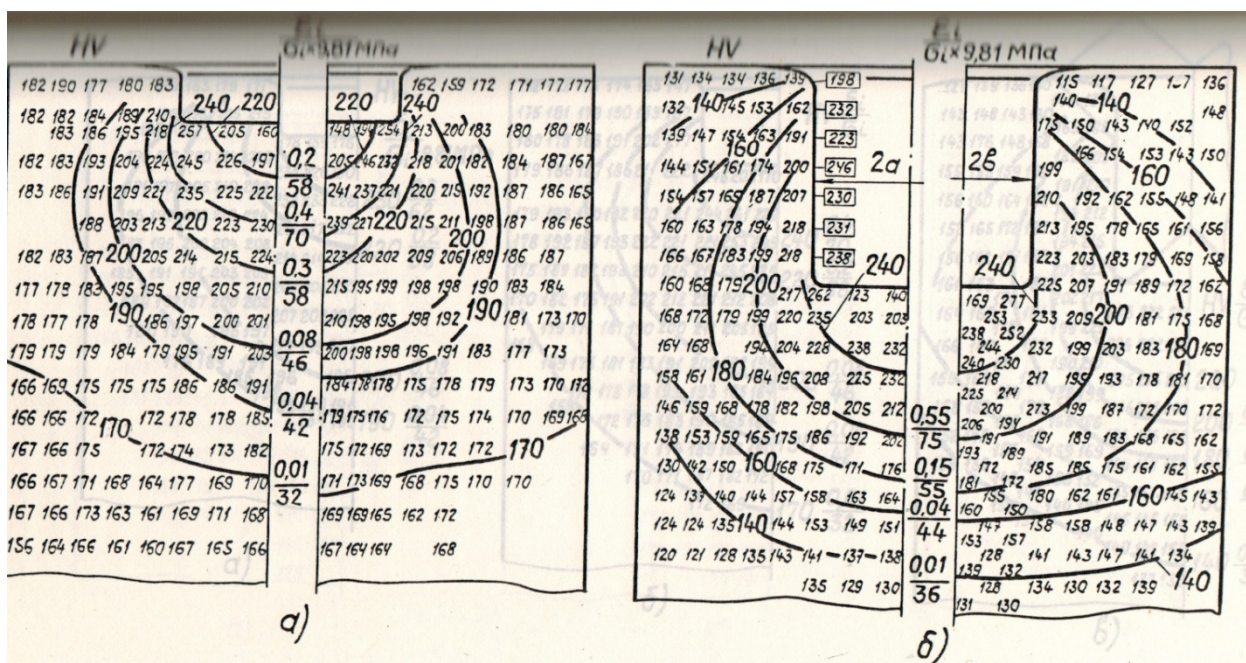


Рисунок 7 – Распределение твердости HV,  $\epsilon_i$ ,  $\sigma_i$  по продольному и поперечному меридиональному сечениям заготовки при внедрении призматического пуансона с  $a = 1,3$  на глубину  $h = 0,8$  (а) и  $h = 3$  (б)

ОПД ниже уровня дна близок по форме к сегменту сплюсненного эллипсоида с центром, расположенным на оси симметрии полости и совпадающим с ее дном или местом перехода торца пуансона соответственно внедрении пуансона с плоским и закругленным торцом.

Форма ОПД с максимальным продольным размером на оси симметрии сохраняется до определенного значения, а, выше которого она искажается, приобретая сложную форму с минимальным продольным размером ОПД на оси симметрии, рисунок 8.



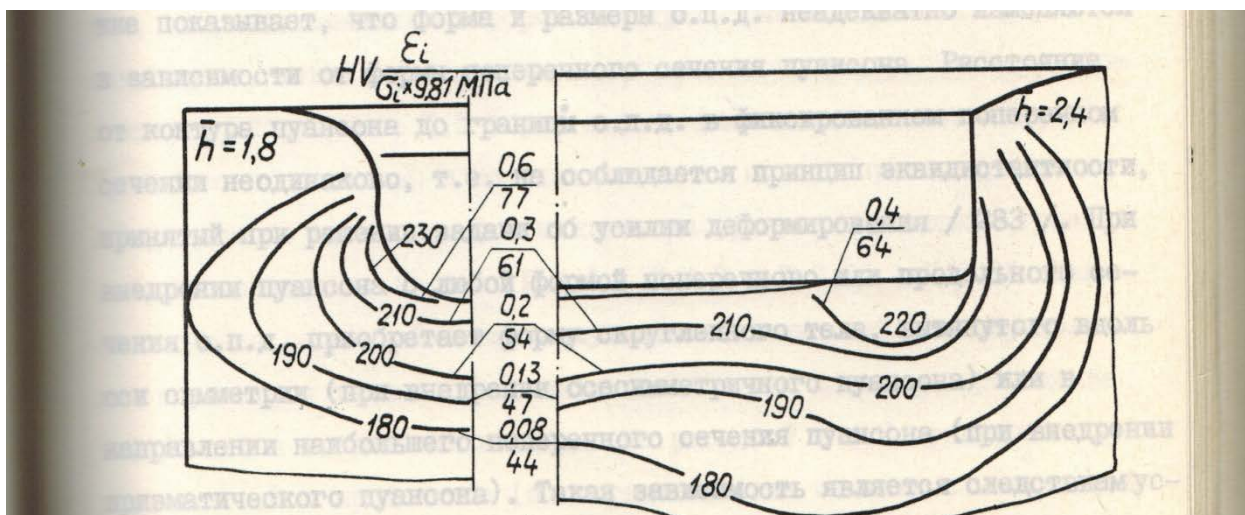


Рисунок 8 – Распределение твердости HV,  $\epsilon_i$ ,  $\sigma_i$  по продольному и поперечному меридиональному сечениям заготовки при внедрении призматического пуансона с цилиндрическим торцом

В этом случае ОПД состоит из двух периферийных ОПД, сформированных у краев пуансона, и центрального, расположенного между периферийным ОПД. Указанная динамика изменения ОПД в зависимости от  $a$  справедлива как при внедрении пуансона с плоским, так и цилиндрическим торцами.

При внедрении пуансона с любой формой поперечного или продольного сечения ОПД приобретает форму скругленного тела, вытянутого вдоль оси симметрии или в направлении наибольшего поперечного сечения пуансона. Такая закономерность изменения формы ОПД при внедрении пуансона является следствием принципа наименьшего сопротивления.

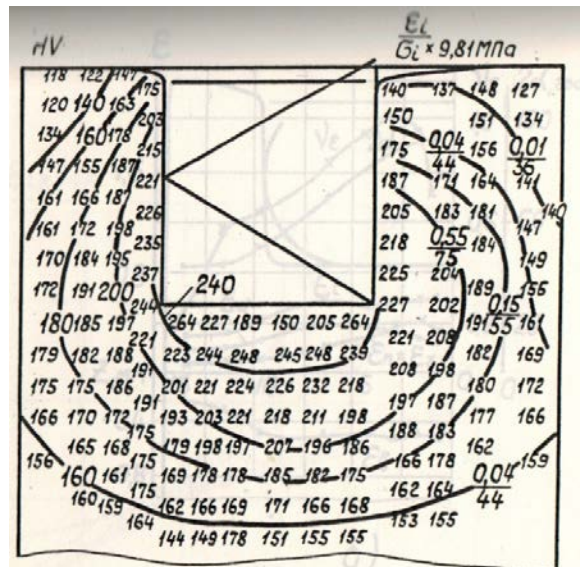
Поскольку в рассматриваемом процессе условно выделенная часть заготовки, контактирующая с пуансоном, интенсивно, то уже при малых перемещения прямоугольное сечение превращается в эллипс или в круг в зависимости от исходной формы поперечного сечения.

По этой причине при внедрении пуансонов имеющих одинаковую площадь поперечного сечения, но отличающихся разной формой с

Указанное следует из сопоставления условных границ ОПД показанных на рисунке 8 и рисунке 9.







В

Рисунок 8 - Распределение твердости HV,  $\epsilon_l$ ,  $\sigma_l$  по сечению заготовки из стали 10, деформированной пуансоном крестообразного (а) , шлицевое (б) и треугольно (в) сечения

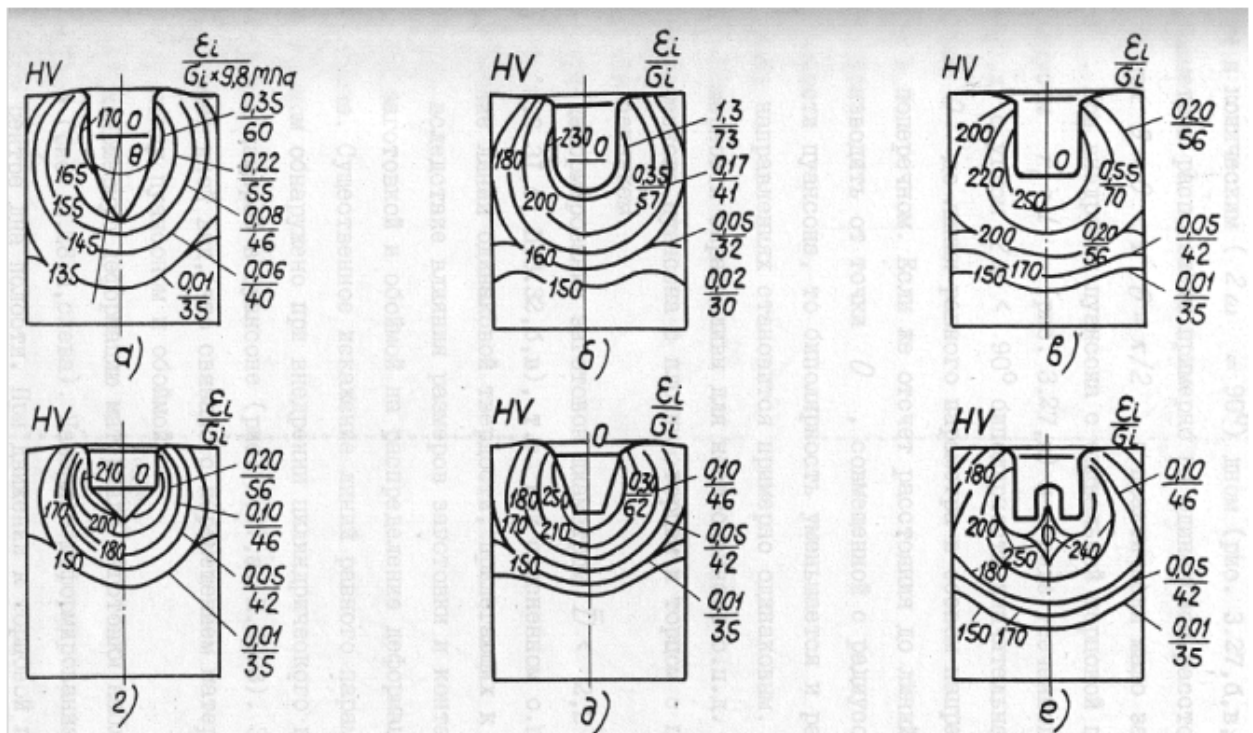


Рисунок 9 - Распределение твердости HV,  $\epsilon_l$ ,  $\sigma_l$  по меридиональному сечению заготовки при внедрении цилиндрического пуансона с различной формой торца

Для обоснования расчетной схемы получения зависимостей для определения параметров технологий выдавливания важно знать распределение деформаций и на напряжения в ОПД. На рисунках 10 и 11

приведены фотографии поперечных и продольных меридиональных сечений с искаженной координатной сеткой. В ОПД можно выделить те же характерные зоны, что и при внедрении цилиндрического и призматического пуансонов с плоским торцом.

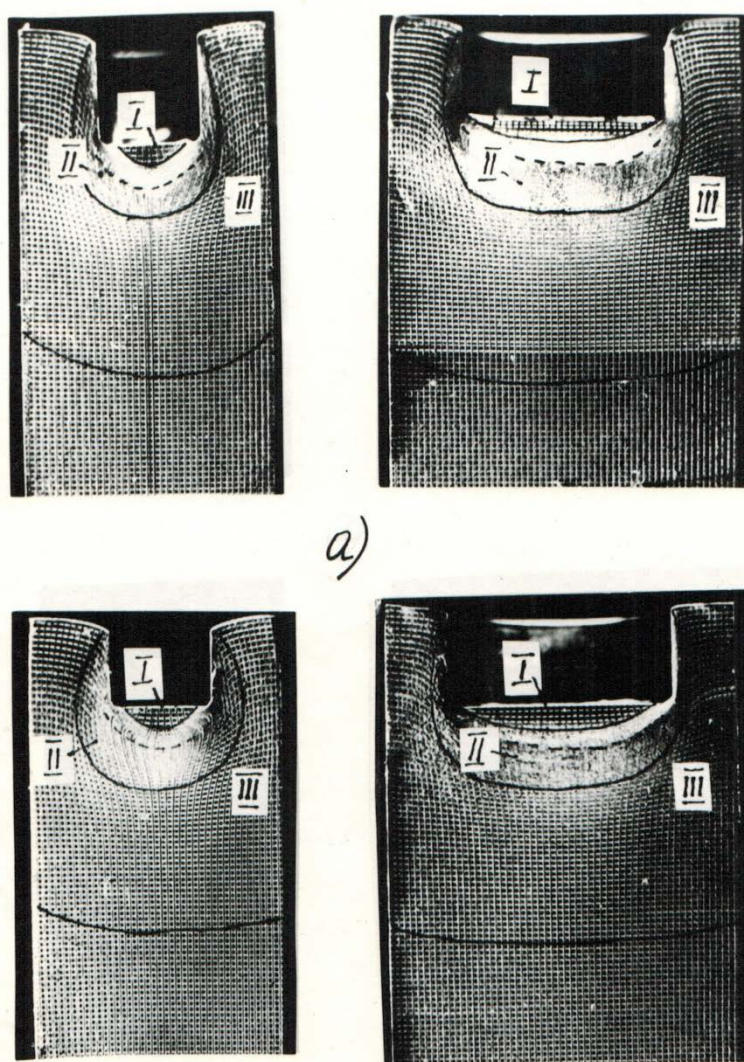


Рисунок 10 – Фотографии полостей заготовок из стали 20 с искаженной координатной сеткой при внедрении призматического пуансона с плоским торцом (а) с прямой боковой поверхностью, (б) со скругленной боковой поверхностью



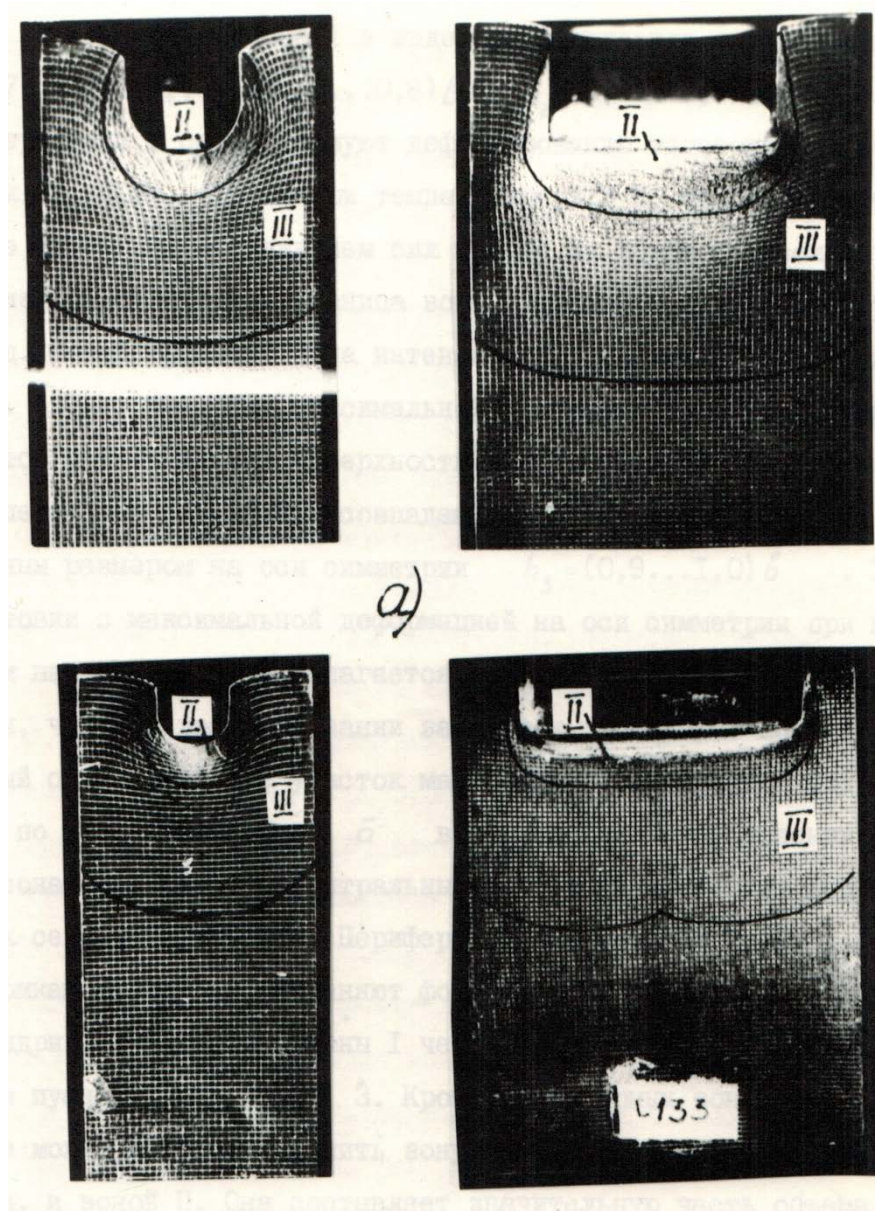


Рисунок 11 – Фотографии полостей заготовок из стали 20 с искаженной координатной сеткой при внедрении призматического пуансона с цилиндрическим торцом

При внедрении призматического пуансона с плоской и скругленной боковой поверхностями и плоским торцом, можно выделить кроме характерных зон I (торможения) и II (интенсивной деформации) можно выделить условно зону III, ограниченную внешней границе зоны II. Она составляет значительную часть объема ОПД и должна быть учтена в расчетной схеме при определении силовых параметров процесса.

При внедрении Призматического пуансона с цилиндрическим торцом заторможенная зона I отсутствует или же она мала и ею можно практически



пренебречь. В этом случае внутренняя граница ОПД совпадает с образующей торцевой поверхности пуансона. Участок максимальной деформации зоны II под пуансоном располагаются вблизи контактной поверхности. Количественная оценка напряженно-деформированного состояния приведена в предположении, что деформация в ОПД приближённо-монотонная. Известно, что использование методов твердости и сетки при определении итоговых параметров, например, интенсивности итоговой деформации, позволяет получить наиболее полную информацию. Совпадение же результатов исследования с учетом предельных погрешностей методов будет свидетельствовать о достоверности распределения параметров НДС в характерных сечениях заготовки. Наиболее важные результаты исследования приведены на рисунках 12-15, они свидетельствуют о неравномерном распределении параметров НДС по заготовке. Наиболее деформированным участком заготовки является ее центральная часть, примыкающая к плоскости. При движении от указанного участка к периферии деформация уменьшается.

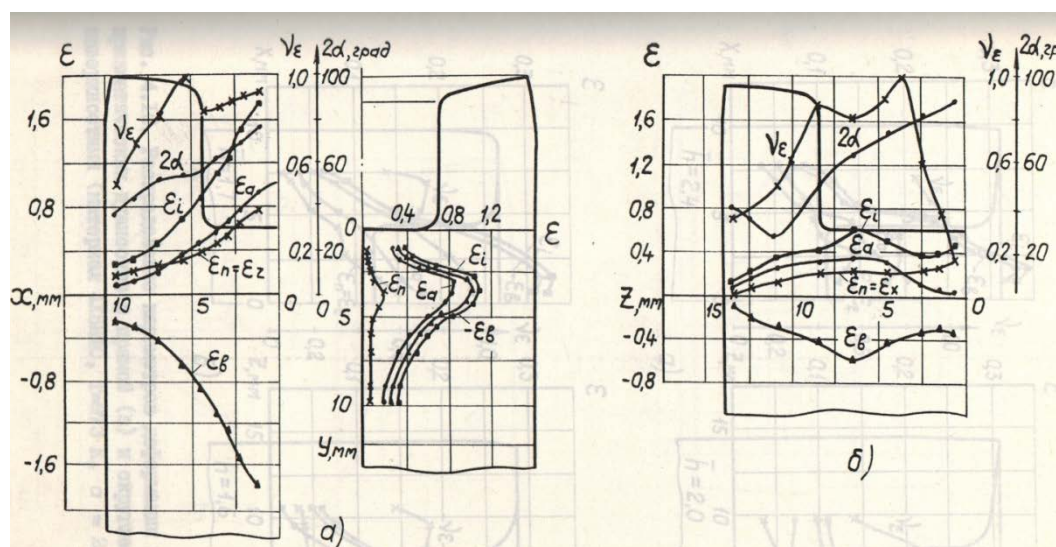


Рисунок 12- Распределение параметров деформации в поперечном (а) и продольном (б) меридиональном сечениях заготовки при внедрении призматического пуансона с плоским торцом

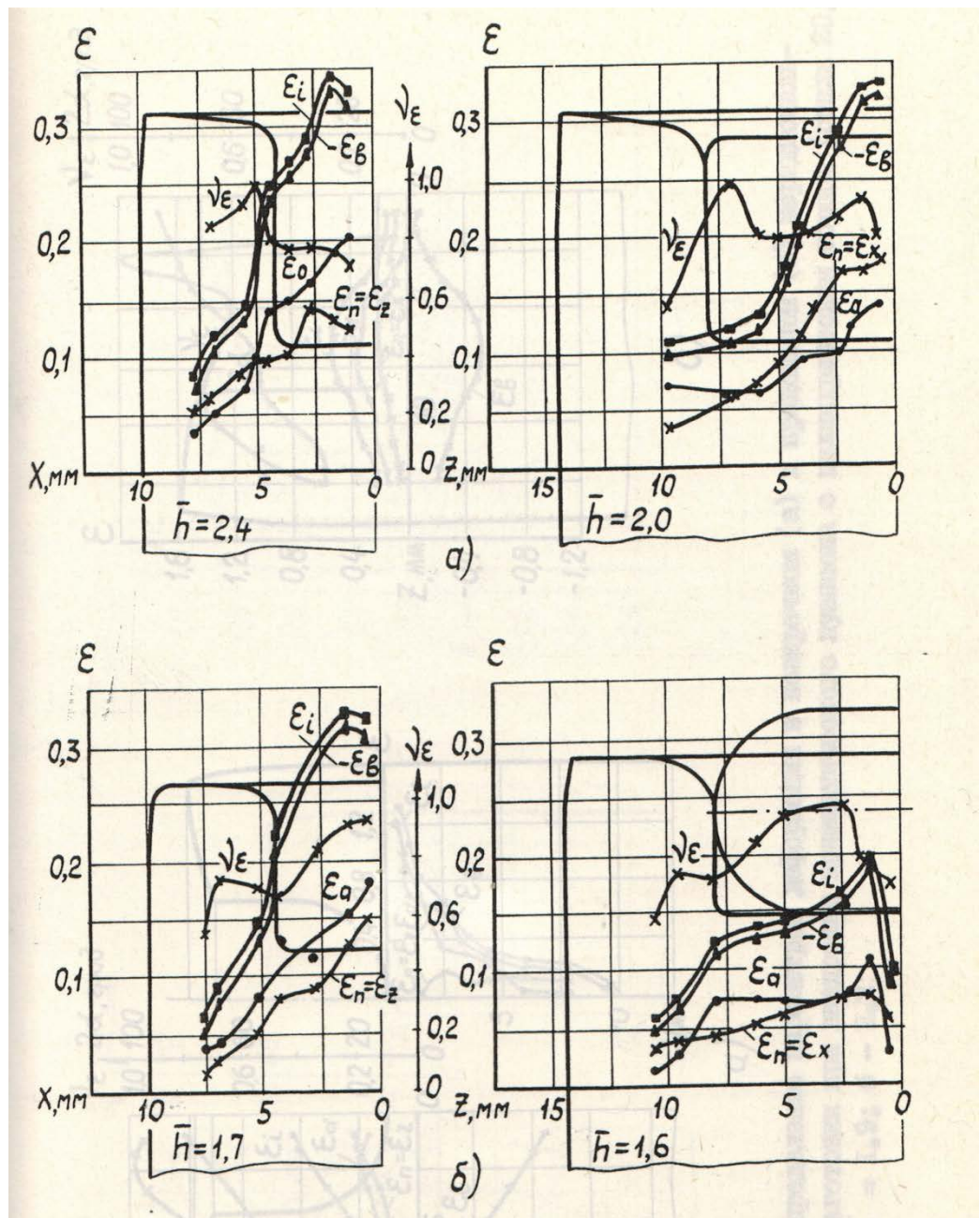


Рисунок 13- Распределение параметров деформации при внедрении призматических пуансонов с прямой (а) и скруглённой боковой (б) поверхностями

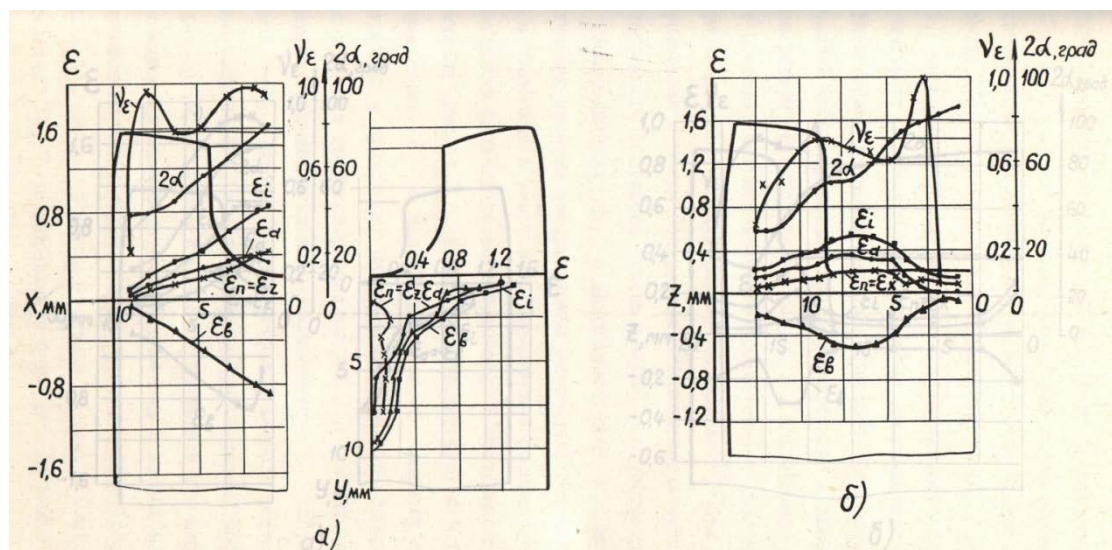


Рисунок 14 – Распределение параметров деформации в поперечном (а) и продольном (б) меридиональном сечениях заготовки при внедрении призматического пуансона с цилиндрическим торцом (сталь 20,  $a=2$ )

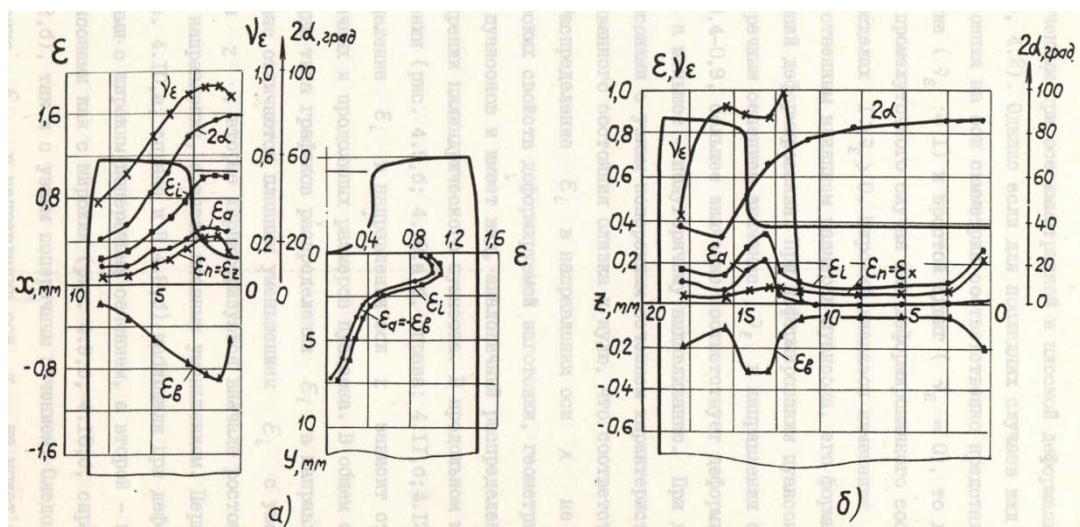


Рисунок 15 - – Распределение параметров деформации в поперечном (а) и продольном (б) меридиональном сечениях заготовки при внедрении призматического пуансона с цилиндрическим торцом (сталь 20,  $a=5$ )

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В реферате проведено ознакомление с процессом выдавливания полостей. Изучены и рассмотрены полученные результаты методов делительной сетки и метода моделирования многослойного материала в процессе выдавливания. Смоделирован процесс выдавливания в программе DEFORM – 3D.

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением и проектировании оборудования большое значение имеют экспериментальные методы определения усилий и деформаций, которые проводятся в лабораторных условиях, т. к. проведение эксперимента в производственных условиях затруднено техническими и организационными причинами, а исследование деформаций и напряжений в большинстве случаев невозможно. Результаты лабораторных исследований могут быть обобщены, если условия проведения на лабораторном оборудовании подобны производственным, при этом должны соблюдаться законы подобия.

Метод твердости сравнительно с остальными методами прост, пригоден как для монотонной и не монотонной деформации, но имеет и минусы такие как, возможность исследования только при холодной деформации, непригоден для больших деформаций и невысокая точность.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. / Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов/. Изд.2-е. М.-Л.: Машгиз, 1961.- 463с.
2. Нестеров, Н.И. Технология холодной объёмной штамповки: учебное пособие/ Н.И. Нестеров, В.Г. Трошин, О.Л. Киреев; под ред. Г.А. Данилина; Балт. гос. техн. ун-т. СПб.: 2016. – 167 с.
3. Иванов, К.М. Механика процессов обработки давлением: учебное пособие/ К.М. Иванов, Н.И. Нестеров, Д.В. Усманов; Балт.гос.техн.ун-т. СПб.: 2012. – 299 с.
4. Лясников, А.В. Образование полостей пресс-форм и штампов выдавливанием: Внешторгиздат, 1993 – 312 с.